

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**“ESTIMACIÓN DE ÁREAS INUNDADAS OCASIONADAS POR DOS
FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS UTILIZANDO
POLARIMETRÍA RADAR”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ANA KAREN VILLALBA AGUILERA

ASESOR DE TESIS:

LIC. ANTULIO ZARAGOZA ÁLVAREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mis padres y hermano,
este logro también es de ustedes.

A mi querido Chaim,
mi compañero de vida.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y permitirme conocer a personas extraordinarias.

A mí asesor Antulio, gracias por tu infinita paciencia, apoyo y por todo el conocimiento compartido durante la elaboración de este trabajo y durante mi estancia en el CENAPRED. Así como por tu valiosa amistad y entrañables momentos vividos.

A la Dra. Mary Frances Teresa Rodríguez, gracias por aceptar ser parte de este jurado.

Al Dr. Gonzalo Hatch, gracias por su confianza y recomendaciones para mejorar este trabajo.

A la Dra. Roció Alanís, por ayudarme a mejorar este trabajo y por ser parte del jurado.

A la Dra. Alejandra Toscana por sus observaciones y por tomarse el tiempo para revisar esta tesis.

A mis padres, Elvia Aguilera y Miguel Ángel Villalba, gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí y por brindarme tanto amor y comprensión durante esta etapa, sus consejos me han orientado a tomar las mejores decisiones. Son mi ejemplo a seguir, los amo.

A mi hermano Miguel, por ser mi compañero y cómplice de innumerables aventuras. Te quiero mucho.

A Chaim, sin duda alguna, tu amor, paciencia y apoyo me ayudaron a culminar este proyecto. Coincidir contigo es de los regalos más bellos que me ha dado la vida, gracias por ser mi mejor amigo y por compartir tu vida conmigo. Te amo mucho.

A la familia Alonso, principalmente a Gizel, Estela y Blanca por recibirme con los brazos abiertos y hacerme sentirme en casa. Gracias por todo el cariño que me han dado durante estos años.

A todos mis tíos, tías, primos y primas, gracias por sus consejos, regaños y cariño que me han brindado.

Especialmente a ti Mafer por crecer junto a mí y ser mi cómplice desde niñas. Eres la hermana que siempre quise, te amo infinitamente.

A mis queridas Geoburbujitas Itzel, Caro, Ari, Javi, Diego, Kike, Andrés y Memo por las risas, viajes y aventuras compartidas durante la carrera. Gracias por su amistad, sin duda la universidad no hubiera sido la misma sin ustedes.

Al Ing. Leobardo Domínguez, a los geógrafos Antulio Zaragoza y Michelle Munive y al Geólogo Alberto Huesca por permitirme ser parte de su equipo de trabajo en la Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales y por acompañarme durante el inicio de mi experiencia profesional.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres por brindarme la oportunidad de realizar mi servicio social, así como continuar como becaria durante un año en este centro. Admiro la laborar que cada uno de sus investigadores hace en beneficio de la sociedad.

A mis mejores amigas Dafne y Rocío. Gracias por su amistad, apoyo incondicional, experiencias compartidas juntas y por creer en mí. Son increíbles, las admiro y amo muchísimo.

A mis compañeros del COT, Fer, Diana, Luis, Rene y Carlos por enseñarme que un equipo multidisciplinario puede lograr grandes cosas en tan poco tiempo. Los quiero.

A mi estimada Eri Beli, por tu compañerismo y apoyo durante este año. Gracias por enseñarme y guiarme durante mi estancia en la DIV.

ÍNDICE

Índice de acrónimos	7
Índice de figuras	8
Índice de tablas	10
Introducción	11
Capítulo I. Aspectos generales	15
1.1 Marco teórico conceptual	15
1.2 Planteamiento del problema.....	25
Capítulo II. Percepción Remota e imágenes de RADAR	29
2.1 Definición	29
2.2 Historia de la Percepción Remota.....	31
2.2.1 Elementos de la Percepción Remota	35
2.3 Aplicación de la Percepción Remota para el fenómeno de inundaciones	38
2.4 Características de las imágenes SAR	41
2.5 Generación de las imágenes SAR	45
Capitulo III. Descripción de la zona de estudio	50
3.1 Nayarit.....	50
3.1.1 Clima e hidrología	50
3.1.2 Inundaciones en Nayarit 2018.....	53
3.2 Veracruz.....	54
3.2.1 Clima e hidrología	54
3.2.2 Inundaciones en el año 2018	56
3.3 Etapas en el manejo del fenómeno de inundación.....	58
Capitulo IV. Polarimetría RADAR aplicada a inundaciones	59
4.1 Programa espacial Copernicus	59

4.2 Imágenes Sentinel 1	63
4.3 Polarimetría RADAR	65
4.4 Metodología	67
4.5 Resultados	83
Conclusiones.....	90
Bibliografía	92

Índice de acrónimos

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres

CT: Ciclones Tropicales

DOF: Diario Oficial de la Federación

EM-DAT: *Emergency Events Database* (Base de datos de eventos de emergencia)

ESA: *European Space Agency* (Agencia espacial europea)

GIR: Gestión Integral de Riesgos

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

MDE: Modelo Digital de Elevación

OEA: Organización de los Estados Americanos

PR: Percepción Remota

RADAR: *Radio Detection and Ranging* (Detección de radio y alcance)

RAR: *Real Aperture Radar* (Radar de apertura real)

RH: Región Hidrológica

SAR: *Synthetic Aperture Radar* (Radar de apertura sintética)

SNAP: *Sentinel Application Platform* (Plataforma de aplicaciones sentinel)

Índice de figuras

Figura 1. Rangos del Espectro Electromagnético	19
Figura 2. Sensores activos y pasivos	20
Figura 3. Ilustración básica de un Radar de Apertura Sintética	22
Figura 4. Polarización de una onda electromagnética	23
Figura 5. Formas de polarización	24
Figura 6. México y la Zona Intertropical de Convergencia	26
Figura 7. Primera fotografía aérea	31
Figura 8. Satélite Sputnik	32
Figura 9. Imagen multitemporal de Sentinel 1	34
Figura 10. Elementos básicos de la PR	35
Figura 11. Componentes de una onda electromagnética	36
Figura 12. Comparación de inundaciones en Tabasco	39
Figura 13. Bandas en las que trabaja el RADAR	41
Figura 14. Iluminación del RADAR	42
Figura 15. Interacción de las bandas en diferentes medios	46
Figura 16. Geometría de un RADAR	47
Figura 17. Propiedades dieléctricas de la superficie en diferente estado	48
Figura 18. Comportamiento de la energía proveniente de un satélite	49
Figura 19. Características hidrográficas de Nayarit	52
Figura 20. Afectaciones por las inundaciones en Nayarit	53
Figura 21. Características hidrográficas de Veracruz	56
Figura 22. Afectaciones por las inundaciones en Veracruz	57
Figura 23. Página para la descarga de datos Sentinel 1	61
Figura 24. Estadísticas del programa Copernicus para el año 2018	62
Figura 25. Sobrevuelo de satélite Sentinel 1	63
Figura 26. Componentes de una onda electromagnética	65
Figura 27. Polarización de ondas en VV y HH	66
Figura 28. Diagrama de flujo para el procesamiento de imágenes Sentinel 1	70
Figura 29. Visualización de bandas VH y VV - antes del evento	71
Figura 30. Visualización de bandas VH y VV - después del evento	72

Figura 31. Orbit fil - antes del evento	73
Figura 32. Orbit file - después del evento	74
Figura 33. Calibración - antes del evento	75
Figura 34. Calibración - después del evento	76
Figura 35. Multilooking - antes del evento	77
Figura 36. Multilooking - después del evento	78
Figura 37. Filtro Spekle – antes del evento	79
Figura 38. Filtro Spekle – después del evento	80
Figura 39. Corrección del terreno – antes del evento	81
Figura 40. Corrección del terreno – después del evento	82
Figura 41. Imagen RGB en Veracruz – antes del evento	83
Figura 42. Imagen RGB en Veracruz – después del evento	84
Figura 43. Imagen RGB en Nayarit – antes del evento	84
Figura 44. Imagen RBG en Nayarit – después del evento	85
Figura 45. Imagen RBG del segundo par de imágenes en Veracruz – antes del evento	85
Figura 46. Imagen RBG del segundo par de imágenes en Veracruz – después del evento	86
Figura 47. Histograma de imágenes	87
Figura 48. Estimación de área inundada en Nayarit	88
Figura 49. Estimación de área inundada en Veracruz	89

Índice de tablas

Tabla 1. Elementos básicos y funcionamiento de la Percepción Remota	17
Tabla 2. Fenómenos hidrometeorológicos con mayor impacto en México	26
Tabla 3. Rangos de energía para técnicas de Percepción Remota	30
Tabla 4. Ventajas y desventajas en las imágenes de RADAR	44
Tabla 5. Factores involucrados en la captura de datos SAR	45
Tabla 6. Características y misiones de la flotilla Sentinel	60
Tabla 7. Características de las imágenes utilizadas para la inundación en Nayarit	68
Tabla 8. Características del primer par de imágenes utilizadas para la inundación de Veracruz	69
Tabla 9. Características del segundo par de imágenes utilizadas para la inundación de Veracruz	69

Introducción

En nuestro planeta son diversos los fenómenos naturales a los que las poblaciones están expuestas, ejemplo de ello son los sismos, las erupciones volcánicas, los deslizamientos, las inundaciones, etcétera. Estos fenómenos generalmente provocan daños en la infraestructura, las telecomunicaciones y lamentablemente el deceso de muchas personas. El estudio y monitoreo de los mismos, es esencial para la toma de decisiones en materia de prevención de desastres y protección civil (CENAPRED, 2014).

La ocurrencia de estos fenómenos sucede en gran parte del territorio mexicano, por ejemplo, dentro de la clasificación de fenómenos geológicos; la actividad sísmica y volcánica es frecuente en muchas partes del país. También, el hundimiento regional y agrietamiento afecta grandes ciudades como la Ciudad de México, Querétaro, Toluca, San Luis Potosí, entre otras. Asimismo, debido a que el país se encuentra en una región intertropical, los fenómenos hidrometeorológicos que se generan tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico pueden causar inundaciones en las costas y al interior del territorio nacional (CENAPRED, 2004).

Actualmente debido a las demandas que implica el crecimiento demográfico, existe una presión sobre la infraestructura actual, así como una mayor expansión. Esto ha generado el desarrollo de las comunidades y con ello, la creciente ocupación en zonas situadas en la ribera de los ríos, propiciándose una mayor exposición al riesgo de inundaciones (Vergara, 2011).

Es notable el aumento de los eventos hidrológicos a nivel mundial, y son varios los factores que inciden sobre el incremento de las inundaciones, sin embargo, destacan la ausencia del ordenamiento territorial y los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico, por lo tanto, existe cada vez, un mayor interés en cuanto a su estudio y la cuantificación de la magnitud y escala de afectaciones que producen en nuestro país (Cortes, et al., 2016). Más del 60 % del territorio nacional es propenso a la generación de fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2004).

En México, el monitoreo de las inundaciones es realizado por parte de varias instituciones, como la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) e IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).

Un ejemplo de monitoreo de inundaciones es el programa GEOSUR de la Universidad de Colorado, quienes en 2013 iniciaron un proyecto para el mapeo de inundaciones en América Latina y El Caribe con la finalidad de que sus usuarios tuvieran acceso a los mapas digitales de inundaciones en tiempo real, a los eventos recientes, así como a un registro georreferenciado de inundaciones en la región y poder estimar así la descarga de los ríos utilizando sensores remotos en sitios seleccionados¹. Actualmente dicho Geoportal se encuentra en mantenimiento, sin embargo, se destaca la participación de instituciones que generan y comparten material cartográfico de esta región.

Los diferentes programas de satélite para la observación de la Tierra, de tipo RADAR generados por diversas agencias espaciales permiten captar simultáneamente imágenes en diferentes modos de polarización, las cuales representan un medio eficiente y confiable para extraer información generada por una inundación.

Uno de estos programas es el llamado Copernicus, liderado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Copernicus consta de cinco misiones; la misión Sentinel 1 proporciona imágenes de RADAR con la ventaja de observar la superficie terrestre bajo cualquier condición atmosférica y su función no es limitada por el día o la noche.

Este trabajo tiene como objetivo principal estimar las áreas inundadas desencadenadas por dos fenómenos hidrometeorológicos, en las llanuras de inundación de los estados de Nayarit y Veracruz, mediante la técnica de polarimetría RADAR, analizando principalmente las zonas cercanas a los municipios más afectados durante las lluvias severas suscitadas en el año 2018. Es importante realizar estudios de este tipo, ya que cada año se presentan fenómenos de origen

¹ Información obtenida por medio del portal del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, recuperado de <https://www.ipgh.org/geosur.html> (Consultado el 14/02/22).

hidrometeorológicos en nuestro país, mismos que tienen como consecuencias (debido a la vulnerabilidad física y social), pérdidas humanas y económicas. Autores como Ana Lucia Maldonado de la Universidad Veracruzana de México, menciona que algunos Ciclones Tropicales pueden estar relacionados con el cambio climático, de ahí la importancia de identificar en dónde y la magnitud del fenómeno (Maldonado, 2019).

Se decidió realizar el estudio en los estados de Nayarit y Veracruz ya que ambos estados sufrieron severas afectaciones durante las lluvias del año 2018, es importante identificar los elementos que permiten que este tipo de fenómenos deriven en desastres, para así contribuir en programas de Planeación Territorial. Contar con información de las zonas afectadas sin necesidad de estar en el lugar donde impacto el fenómeno por medio de herramientas como los sensores remotos de tipo RADAR puede ayudar a las dependencias correspondientes a tomar decisiones rápidas y necesarias para ejecutar tareas de auxilio. Para cumplir con este objetivo fueron utilizadas imágenes Sentinel 1. El software mediante el cual se procesaron fue SNAP (*Sentinel Application Platform*), generado y distribuido de manera gratuita por la ESA.

En el primer capítulo se definen los conceptos de *inundación*, *percepción remota*, *espectro electromagnético*, *imágenes ópticas y de radar*, *sensores remotos y polarimetría radar*. Finalmente, de manera general, se abre el diálogo en cuanto a la problemática de inundaciones suscitadas en nuestro país y se desglosan los eventos con mayor impacto en el territorio. En el segundo capítulo se aborda de manera particular el tema de percepción remota; principalmente se habla de las características y generalidades de las imágenes de tipo RADAR. En el tercer capítulo se realiza una descripción de la zona de estudio para conocer las condiciones físico-ambientales que hay en ambos estados, así mismo se describen las inundaciones ocurridas en el año 2018.

Finalmente, en el último capítulo se describe el proceso de descarga y tratamiento de las imágenes de satélite Sentinel 1, mediante el software libre SNAP. Asimismo,

se describe la técnica de polarimetría RADAR, utilizando la banda C. Por último, se exponen los resultados y las conclusiones de este trabajo.

Capítulo I. Aspectos generales

Marco teórico conceptual

Como parte de la Gestión Integral de Riesgos (GIR), la cual refiere al “conjunto de acciones encaminadas al análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos”, el uso de herramientas digitales, en específico la Percepción Remota (PR), ha sido de gran utilidad no solo para el proceso de planeación territorial, sino que ha permitido evaluar determinados peligros naturales y generar cartografía de diferentes escalas para su monitoreo.

Una de las etapas más importantes dentro de la GIR, es la prevención, sin embargo, cuando un fenómeno impacta a una población vulnerable las consecuencias pueden ser catastróficas. Aquí es donde se puede emplear el potencial que tiene la información proveniente de la PR para conocer la magnitud, la extensión y duración de un desastre. A continuación, se describen algunos conceptos utilizados para la elaboración de este trabajo.

Inundación

Las inundaciones son de los fenómenos más recurrentes en nuestro país y pueden ser ocasionadas como consecuencia de lluvias intensas. Algunas se desarrollan durante varios días, otras pueden ser violentas e incontenibles en pocos minutos. Las fuertes lluvias generan tres peligros: las inundaciones, los torrentes y los deslizamientos (UNAM, 2015).

El CENAPRED (2004) define como inundación:

Aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura (pág.5).

Por otro lado, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), define a las inundaciones, como “el rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de la misma sobre áreas que por lo general no están sumergidas”, estas inundaciones pueden ser fluviales, súbitas, urbanas, y pluviales, debido a que las mismas tienen diferentes orígenes y características que se deben establecer en diferentes formas de atención a sus impactos (Cortes et al., 2016 p. 5).

A demás de los procesos naturales y físicos, el origen de las inundaciones también tiene que ver con las actividades antrópicas. La deforestación, incendios forestales, cambio de uso de suelo y alteración de los ecosistemas son actividades que propician y en muchos casos agudizan el fenómeno de las inundaciones (CENAPRED, 2004). La vulnerabilidad es otro de los factores que permiten explicar la distribución de los desastres. De acuerdo con la Ley General de Protección Civil (2012), la vulnerabilidad se refiere a la “Susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales”.

Percepción Remota

De acuerdo con Villegas (2008), se puede definir a la Percepción Remota (PR), como la ciencia que permite la adquisición de información de la superficie terrestre sin estar en contacto físico con ella. Gracias al avance tecnológico, es posible obtener dicha información por medio de las plataformas satelitales.

En estas plataformas son montados sensores remotos que miden la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie de la Tierra, en donde la información es almacenada y enviada a una estación receptora, para convertirla en una imagen digital que servirán para la interpretación y análisis de algún fenómeno o característica de nuestro planeta. Esta técnica cuenta con varios elementos, para su correcta realización (Collado, et al., 2015; INEGI s.a.), mismos que se describen en la Tabla 1.

Elementos de la Percepción Remota	
Fuente de energía o iluminación	Este elemento provee energía electromagnética al objeto de interés.
Atmósfera	La energía interactúa con este elemento al viajar del sensor al objeto y viceversa.
Objetos	Dependiendo de sus propiedades es la interacción o respuesta a la energía recibida y reflejada.
Sensor remoto	Recoge y graba la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto a la atmósfera. Este instrumento se monta en una plataforma llamada satélite.
Transmisión, recepción y procesamiento	La energía grabada por el sensor se transmite a una estación receptora, en donde los datos se procesan y son convertidos a imágenes digitales.
Interpretación y análisis	Consiste en interpretar la imagen para extraer la información de los objetos captados.
Usuario final	En este paso se le confiere una aplicación a la información extraída de las imágenes.

Tabla 1. Elementos básicos y funcionamiento de la Percepción Remota. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI s.a.

Espectro electromagnético

Uno de los principios esenciales para entender las técnicas de PR, es el espectro electromagnético, la SEA² define este concepto como “el conjunto continuo e infinito de ondas electromagnéticas (ondas de luz) ordenadas en zonas en función de su longitud de onda (o frecuencia) y, por tanto, de la energía que transportan”.

Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes las cuales van desde una menor longitud, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta llegar a ondas de mayor longitud como son las microondas y las ondas de radio. El conjunto de todas estas longitudes de onda se denominan espectro electromagnético.

Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de su longitud (Figura 1). Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son:

- Luz visible
- Infrarrojo (Infrarrojo cercano, Infrarrojo mediano e Infrarrojo lejano)
- RADAR

La radiación electromagnética también está presente en nuestras vidas y juega un papel fundamental. Gracias a ella es posible escuchar la radio, calentar comida en el microondas y comunicarnos por teléfono, éstos son algunos de los ejemplos de interacción con la energía electromagnética que están presentes en nuestras actividades diarias. En el caso de la PR, como ya se mencionó, los sensores montados en diferentes satélites de observación terrestre captan este tipo de energía emitida o reflejada que posteriormente es transformada a imágenes de satélite (Fontal, 2005).

² Sociedad Española de Astronomía, recuperado de: <https://www.sea-astronomia.es/glosario/espectro-electromagnetico> (Consultado el 8/10/21).

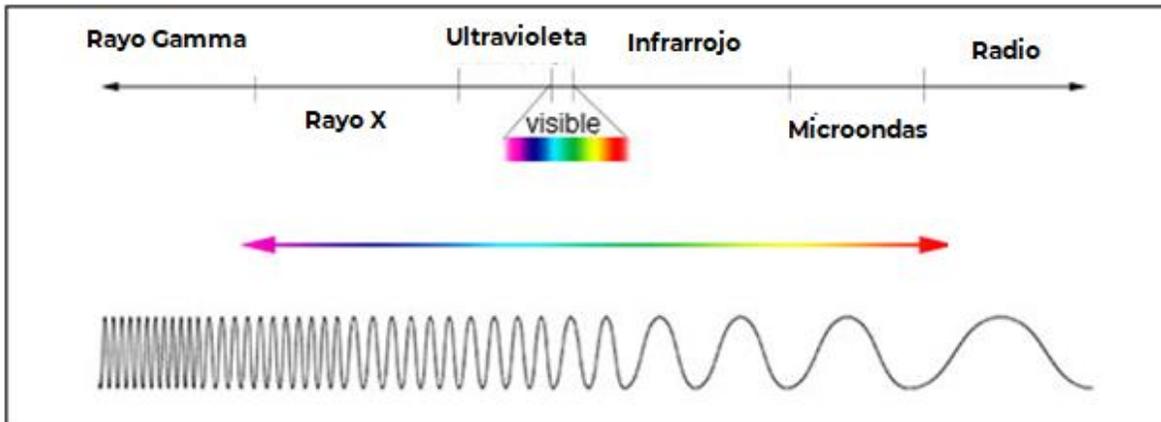


Figura 1. Rangos del Espectro Electromagnético, se resalta la región que es visible para los humanos.

Fuente: *Imagine the Universe*, NASA.

Imágenes de satélite

Se entiende por imagen de satélite, a la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial, en donde los datos obtenidos mediante estos sensores son enviados a una estación para que sean procesados y posteriormente convertidos a imágenes digitales (Universidad de Ciencias y Humanidades, 2018). La unidad mínima de captación de energía, es lo que conocemos o identificamos como un Pixel en una imagen digital (Basterra, s.a.).

Estas imágenes se clasifican en dos: ópticas y de RADAR, mismas que se diferencian por la forma en que obtienen su fuente de iluminación (Figura 2), las primeras utilizan sensores pasivos que registran información utilizando fuentes de energía naturales como el sol y cuerpos calientes. Las segundas imágenes, utilizan sensores activos, dichos sensores proporcionan su propia energía como fuente de iluminación, por ejemplo, el Radar de Apertura Sintética y Lidar (Podest, 2017).

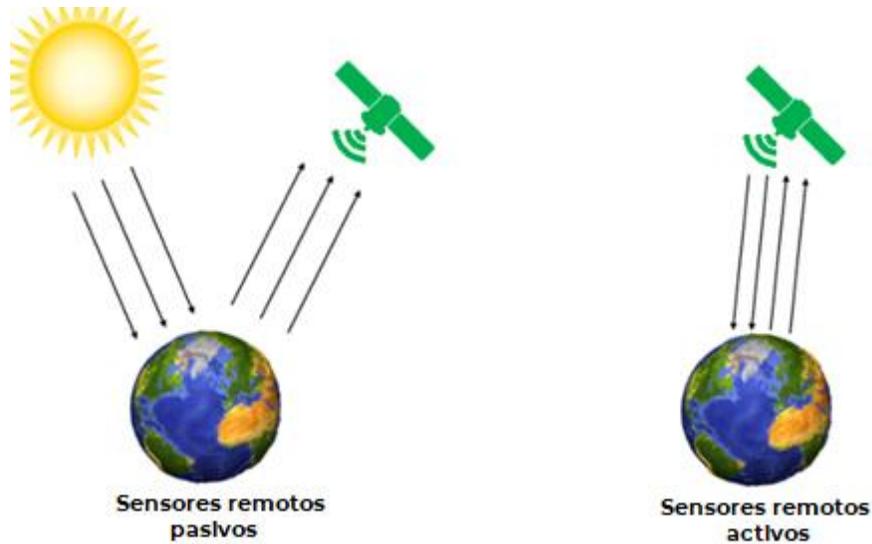


Figura 2. Funcionamiento básico de los sensores activos y pasivos. Fuente: <https://grindgis.com/what-is-remote-sensing/know-basics-of-remote-sensing#3>.

Sensores

De acuerdo con Ángeles, (2019), se pueden definir como “*un elemento capaz de obtener información de varias regiones del espectro electromagnético del objeto de estudio en forma de energía reflejada a distancia, [...], está montado en una plataforma de teledetección que puede ser terrestre, aéreo o satelital*”, la forma más común en que un sensor se clasifica es en activos y pasivos, y se refiere a la forma en que perciben la energía.

Imágenes ópticas (sensores pasivos)

Las principales características de los sistemas ópticos son que ellos reciben y adquieren información por medio de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la tierra y la atmósfera (por ejemplo la luz del sol para observar la superficie terrestre), dependiendo del tipo de detector utilizado, los sensores pasivos pueden grabar diferentes partes de la radiación, estos sensores son incapaces de adquirir datos de noche, o cuando prevalecen condiciones, tales como cobertura de nubes, neblina, polvo, granizo o humo (Reuter, 2009).

Los sensores pasivos incluyen diferentes tipos de radiómetros y espectrómetros, estos sistemas utilizados en el campo de la PR operan en las partes visibles, infrarrojas e infrarrojas térmica³.

Imágenes de RADAR (sensores activos)

Se obtienen a partir de sensores activos, este tipo de sensores envían pulsos de energía hacia la superficie de la Tierra, parte de esta energía se refleja y regresa al satélite. Por ello, el tipo de imágenes que se obtienen son muy diferentes a las imágenes ópticas, lo cual conduce a la aplicación de otras técnicas para obtener información de ellas (Fernández et al., 2019). Debido a que este tipo de sensores captan información independientemente de las condiciones atmosféricas y su operación no se limita al uso solamente de día, han ocupado una amplia variedad de aplicaciones comerciales y militares (Borden y Cheney, 2013).

Radar de Apertura Sintética

Inicialmente, para diversos estudios eran utilizados los Radares de Apertura Real (RAR - *Real Aperture Radar*), estos tenían la ventaja de contar con un diseño simple, sin embargo, su funcionamiento se veía limitado por la baja resolución de las imágenes que se obtenían, esta limitación se debía principalmente a la relación directa entre la plataforma y el tamaño real de la antena de radar (Morales, 2015).

Por ello, fue creado el Radar de Apertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar*, SAR por sus siglas en inglés), este sistema emite su propia energía en el intervalo de frecuencias de las microondas y recibe los ecos de la señal reflejada por los objetos iluminados desde plataformas aéreas (Posada et al., 2010). La antena del SAR está orientada perpendicularmente a su trayectoria e ilumina con cierto ángulo de incidencia el suelo (Zozaya, 2016). Durante su trayectoria, como se muestra en la Figura 3, se almacena la información de los ecos recibidos desde posiciones distintas “*La suma coherente de estos ecos permite la síntesis de una apertura*

³ NASA (National Aeronautics and Space Administration), recuperado de: <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors> (Consultado el 20/08/21).

virtual de longitud mucho mayor a la real. De allí el nombre de apertura sintética” (Zozaya, 2016).

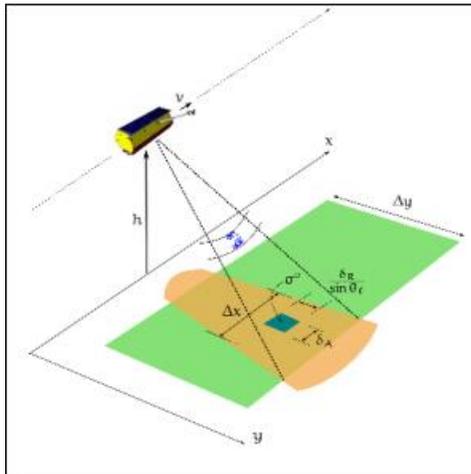


Figura 3. Ilustración básica de un radar de apertura sintética. Fuente: *Synthetic aperture radar: conceptual desing procedure*, Zozaya, 2016

Dependiendo de la longitud de onda en esta región del espectro electromagnético se puede obtener diferente información. Por ejemplo, la señal de la banda L (15-30 cm), llega hasta el suelo de una zona boscosa, mientras que la banda C (3.75-7.50 cm), es capaz de penetrar en la copa de los árboles, y en la banda X (2.40-3.75cm), la señal es retrodispersada por las hojas superiores del dosel (Lobo y Martínez, 2005).

Polarimetría RADAR

El principio de funcionamiento del RADAR es la emisión y recepción de múltiples ondas electromagnéticas en el rango de las microondas (Posada et al., 2010).

Estas ondas al entrar en contacto con el objeto en la superficie terrestre reflejan parte de la radiación, redireccionándola como una nueva onda, pero con propiedades físicas modificadas, especialmente en cuanto a la polarización en función de las características del objeto. Cuando se habla de polarización se hace referencia a la alineación y la regularidad de los componentes eléctrico y magnético de una onda en el plano perpendicular a la dirección de propagación (Figura 4). Al

conocer los modos de polarización emitida se puede facilitar la interpretación temática de las imágenes (Fernández et al., 2015; Posada et al, 2010).

En los SAR cuando hablamos de polarización nos referimos a la orientación de la energía electromagnética dirigida hacia la superficie de la Tierra (Fernández et al., 2015). Cuando una onda polarizada horizontalmente (H) o verticalmente (V), incide en el objeto de interés, produce una nueva onda que podrá obtener atributos en polarización H y V. Los elementos esenciales para el análisis de datos polarimétricos de RADAR, son la potencia o intensidad de la señal, la orientación de la propagación de la onda y su elipticidad, también se incluyen los sistemas (hardware y software), para el procesamiento de la información captada. En la PR es necesario conocer conceptos básicos de la naturaleza de los datos para elegir correctamente los métodos de análisis para una interpretación acertada (Fernández et al., 2015; Posada et al, 2010).

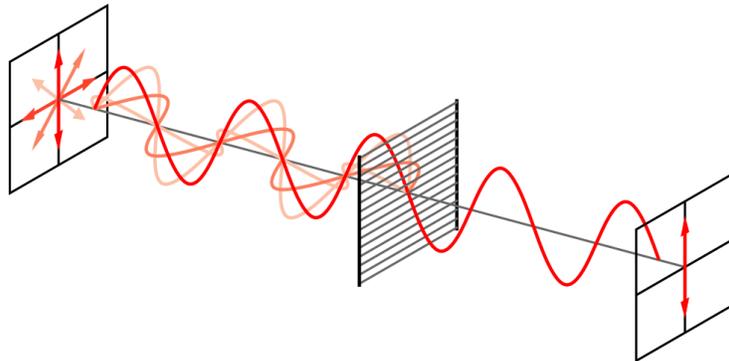


Figura 4. Polarización de una onda electromagnética. Los diferentes modos de polarización nos ayudan a determinar las propiedades físicas del objeto observado. Fuente: *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*, (Podest, 2017).

Los modernos sistemas de RADAR cuentan con antenas capaces de emitir y recibir diferentes componentes de polarización de la onda, así:

HH: Emisión horizontal, recepción horizontal

VV: Emisión vertical, recepción vertical

HV: Emisión horizontal, recepción vertical

VH: Emisión vertical, recepción horizontal

Cuando la emisión y la recepción de la señal se presentan con la misma polarización, por ejemplo, HH o VV, se le denomina como polarización simple y en caso de enviarla en un modo de polarización que se reciba en el opuesto (HV o VH), se denomina polarización cruzada (Figura 5), (Posada et al., 2010; Ranferi, 2010).

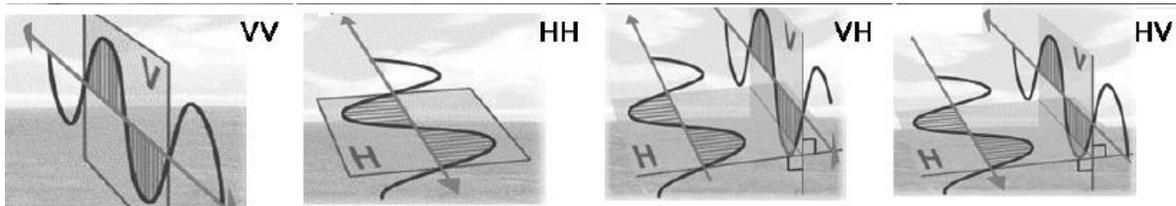


Figura 5. Mediante diferentes polarizaciones de una onda electromagnética, la dirección de la energía polarizada influirá en el flujo de retorno. Fuente: *Alcances de la Teledetección Espacial*, Marchionni, 2017.

1.2 Planteamiento del problema

El crecimiento demográfico, la falta de planeación territorial y las condiciones sociales desiguales, han ocasionado que la población se establezca en zonas propensas a la ocurrencia de fenómenos naturales. Cabe mencionar que estos fenómenos siempre han existido, incluso antes de la aparición de las primeras civilizaciones, sin embargo, la vulnerabilidad social y física, generan una baja capacidad de respuesta ante estos eventos.

Como se mencionó en párrafos anteriores, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático menciona que durante los últimos años ha habido cambios importantes en la precipitación, así como el incremento de la temperatura, con ello la ocurrencia de eventos extremos que han afectado severamente Latinoamérica. De ahí la importancia en estudiar las inundaciones y contribuir a la gestión integral de riesgos en nuestro país (Franco, 2010).

Debido a la orografía del territorio mexicano y a su cercanía con la zona intertropical de convergencia, como se observa en la Figura 6, cada año se generan Ciclones Tropicales (CT), que traen consigo lluvias intensas o prolongadas, desencadenando inundaciones en muchas zonas del país, esto sucede principalmente en el verano, en cambio, durante la época invernal los frentes fríos son la principal fuente de lluvias.

Los CT se definen como una gran masa de aire cálido y húmedo, con fuertes vientos que giran en forma de espiral alrededor de una zona de baja presión, pueden formarse tanto en el hemisferio norte como en el sur y se clasifican de acuerdo a la presión que existe en su centro o a la velocidad de sus vientos. Los efectos que pueden provocar son bastante peligrosos, tales como la generación de lluvias intensas, viento fuerte, oleaje e inundación costera por marea de tormenta (Rosengaus et al., 2014).

A pesar de ser fenómenos que generan daños importantes en las poblaciones, el agua que traen consigo ayuda al llenado de las presas, la infiltración de agua para la recarga de los sistemas de flujo de agua subterránea, la presencia de agua para

la agricultura, la generación hidroeléctrica y el suministro de agua potable (Comisión Nacional del Agua, 2008; CENAPRED 2004).



Figura 6. México y la Zona Intertropical de Convergencia. Fuente: *Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events* (Ortiz, et al, 2013).

En México del año 2000 al 2021 se han presentado aproximadamente 45 situaciones de desastre por inundaciones. Entendiéndose como desastre “una situación o un evento que sobrepasa la capacidad local de afrontamiento, lo que requiere solicitar asistencia a nivel nacional o internacional, un acontecimiento a menudo repentino que causa un gran daño, destrucción y sufrimiento humano” (EM-DAT, 2022). En la Tabla 2 se muestran los desastres hidrometeorológicos de mayor impacto en el territorio desde 1988 a 2014.

Fenómeno	Estado	Año
Huracán <i>Gilberto</i>	Nuevo León	1988
Inundaciones	Chihuahua	1990
Huracán <i>Diana</i>	Veracruz, Hidalgo y Puebla	1990
Huracán <i>Paulina</i>	Guerrero	1997
Lluvias torrenciales	Chiapas	1998
Inundaciones	Veracruz	1999
Inundaciones	Puebla	1999

Ciclón tropical <i>Isidore</i>	Yucatán	2002
Ciclón tropical <i>Wilma</i>	Yucatán y Quintana Roo	2005
Ciclón tropical <i>Stan</i>	Chiapas y 4 entidades mas	2005
Lluvias e inundaciones	Tabasco	2007
Ciclón tropical <i>Dean</i>	Veracruz, Hidalgo y Quintana Roo	2007
Ciclón tropical <i>Alex</i>	Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas	2010
Ciclones tropicales <i>Karl y Matthew</i>	Veracruz	2010
Ciclones tropicales <i>Ingrid y Manuel</i>	Guerrero y 20 entidades más	2013
Ciclón tropical <i>Odile</i>	Baja California Sur	2014

Tabla 2. Fenómenos hidrometeorológicos con mayor impacto en México. Fuente: Elaboración propia con base en CENAPRED, s.a⁴.

Durante el año 2018, nuestro país sufrió el impacto de varios desastres, de todos ellos, los que ocasionaron más daños fueron los de origen hidrometeorológicos, con un total de 84.4 % del monto de daños y pérdidas para ese año⁵.

En este mismo año, por medio del Diario Oficial de la Federación (DOF), fueron publicadas las declaratorias de desastre natural para los estados de Nayarit y Veracruz, a causa de la presencia de lluvia severa e inundación. Para el caso de Nayarit, el huracán Willa de categoría cinco en la escala Saffir-Simpson, generó

⁴ Generación de tabla con base en la infografía del CENAPRED “Desastres en México, Impacto social y económico: Los desastres de mayor impacto desde 1980”, recuperada de: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADDESASTRESENMXICO-IMPACTOSOCIALYECONMICO.PDF> (Consultado el 15/11/21).

⁵ Información obtenida del CENAPRED, mediante el documento “Resumen Ejecutivo: Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2018” recuperado de: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/409-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2018.PDF> (Consultado el 16/10/21).

fuertes lluvias en las costas del Océano Pacífico del 20 al 24 de octubre, afectando ocho municipios de esa entidad. Por otro lado, del 16 al 22 de octubre, las lluvias ocasionadas por el frente frío número seis, afectaron 42 municipios del estado de Veracruz.

En este sentido, una de las herramientas y tecnologías para generar cartografía de zonas inundadas es la Percepción Remota (PR). Esta ciencia enfocada en la obtención de información de la superficie terrestre por medio de imágenes de satélite es de gran importancia para el estudio de éste tipo de fenómenos, pues nos permite extraer información de zonas extensas en un periodo corto de tiempo, y a su vez permite dimensionar la escala de afectaciones en esas zonas (Belmonte y Caamaño, 2009).

Capítulo II. Percepción Remota e imágenes de RADAR

2.1 Definición

La percepción remota puede definirse como la técnica que nos permite adquirir información de un objeto o fenómeno sin la necesidad de entrar en contacto directo con él, esta técnica ha resultado de gran utilidad para muchas y diferentes aplicaciones; agricultura, minería, detección de aguas contaminadas y por supuesto el monitoreo de fenómenos naturales (González, 2010).

La Secretaría de Marina define esta técnica como aquella que permite registrar la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra, a fin de relacionar dichas mediciones con su naturaleza y distribución. Es una ciencia que involucra diversos elementos para el análisis de las imágenes de satélite que son tomadas desde el espacio por medio de plataformas como satélites, los procedimientos que se involucran, son la toma de información, las mediciones de la energía del espectro electromagnético, la utilización de sensores y estructuras o plataformas satelitales.

Esta ciencia ha evolucionado aceleradamente durante las últimas décadas, sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principios del siglo XX. Por mucho tiempo las fotografías aéreas representaron uno de los productos más útiles en las técnicas de PR, sin embargo, con el acelerado desarrollo tecnológico, el advenimiento de la tecnología satelital en la exploración de recursos naturales, así como el desarrollo de equipos de cómputo de alta capacidad y velocidad de procesamiento, las imágenes de satélite se posicionaron como la manera más eficaz y económica de recolectar datos necesarios para el monitoreo de los fenómenos espaciales en un territorio (Collado et al., 2015; SEMAR, 2009; Zaragoza, 2006). En las técnicas de PR se destaca la siguiente serie de bandas espectrales (Tabla 3):

Bandas	Características
Espectro visible	Es la única parte de la radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos. Suelen distinguirse tres bandas elementales, azul, verde y rojo.
Infrarrojo próximo	Destaca su capacidad para distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo medio	En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie. Resalta su capacidad para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de altas temperaturas.
Infrarrojo lejano o térmico	En esta banda se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
Microondas	<p>Esta región de ondas electromagnéticas se emplea comúnmente en los radares y se clasifican de la siguiente manera:</p> <p>Banda X: 2.4 a 3.75 cm</p> <p>Banda C: 3.75 a 7.5 cm</p> <p>Banda S: 7.5 a 15 cm</p> <p>Banda L: 15 a 30 cm</p> <p>Banda P: 30 a 100 cm</p>

Tabla 3. Principales rangos de energía utilizados para técnicas de Percepción Remota. Elaboración propia con base en Belmonte y Camaño, 2009.

2.2 Historia de la Percepción Remota

Los primeros usos de la PR se remontan a 1859, cuando se obtuvieron las primeras fotografías de un globo aerostático (Figura 7). Un año después se repitió esta hazaña, dejando en claro el interés por obtener un conocimiento más detallado de la organización urbana. Posteriormente en el año de 1909, gracias al desarrollo de la observación fotográfica desde aviones, fue adquirida la primera fotografía aérea (Chuvieco, 1990).



Figura 7. Primera fotografía aérea en España obtenida desde un globo aerostático a finales del siglo XIX. Fuente: *Fotografía aérea histórica e historia de la fotografía aérea en España*, (Fernández, 2015).

En los años siguientes, cuando los conflictos bélicos tuvieron un papel relevante en la historia de la humanidad, se intensificó el desarrollo de técnicas en el campo de la Percepción Remota, y se introdujeron nuevos sensores, como el RADAR.

Todas estas innovaciones que en un inicio tuvieron un enfoque bélico, posteriormente pasaron a un uso civil y académico, demostrando así las múltiples aplicaciones de esta exploración aérea para el conocimiento y control de los recursos naturales. Poco después, en la llamada “*Guerra Fría*” (1945-1991), se

intensificó la investigación en estos temas y con el lanzamiento del primer satélite soviético Sputnik en el año de 1957, fueron puestas en marcha una larga serie de misiones civiles y militares que no solamente han permitido la observación de nuestro planeta, sino que han contribuido al estudio del espacio y planetas que nos rodean.

Autores como Millán (1998), mencionan que, con el lanzamiento del Sputnik I, fue inaugurada la llamada “*Era Espacial*”, se describe a este satélite (Figura 8), como “una esfera de aluminio, de medio metro de diámetro, con un peso de 84 kg, que daba la vuelta a la Tierra cada 96 minutos recorriendo una órbita elíptica de 200 por 1,000 km a la velocidad media de 28,000 kilómetros por hora”. Sputnik transmitió por radio a la Tierra, algunos datos atmosféricos durante tres semanas, hasta que se descargaron sus baterías y término su viaje a los tres meses de su lanzamiento.



Figura 8. Así lucía el satélite Sputnik 1, el primer satélite artificial en la historia en el año de 1957.

Fuente: *El primer satélite artificial: Sputnik1*, (Armenta 2018).

Finalmente fue hasta el año de 1972 que el satélite Landsat 1 fue puesto en órbita con la principal finalidad de registrar y gestionar los recursos naturales que posee nuestro planeta (Chuvienco, 1990; Díaz, 2018).

A partir de este momento y con el rápido desarrollo científico enfocado al uso de tecnología espacial, son numerosas las flotillas lanzadas al espacio para el monitoreo y análisis de emergencias causadas por fenómenos naturales. Por ejemplo, mediante las imágenes de satélite es posible obtener información como mapas geológicos, mapas de áreas vulnerables a flujos de lava, mapas de pendientes, mapas topográficos, mapas de demarcaciones de llanuras de inundación, entre otros más⁶.

En cuanto a la aplicación de las imágenes SAR se destacan las siguientes aplicaciones:

Agricultura: Es posible distinguir las diferencias en los cultivos extrayendo parte de los cambios en las propiedades dispersoras de las plantaciones, ocasionadas por la producción y la maduración de las plantas.

Silvicultura: Detección de las diferencias estructurales entre las cubiertas forestales.

Océanos: Se pueden utilizar imágenes SAR para detectar y monitorear los diferentes procesos físicos, naturales o antrópicos que perturban la superficie del océano.

*Hidrología: La utilización de tecnología SAR en este componente, se ha enfocado en la estimación de la humedad del suelo, la cartografía de la cobertura de nieve, la cartografía de **zonas inundadas** y de los terrenos húmedos, esto, debido a la técnica de polarimetría de RADAR (Posada et al., 2010).*

La tecnología espacial ha evolucionado rápidamente desde el lanzamiento espacial del primer satélite artificial hasta la actualidad, un número creciente de satélites orbitan alrededor de la Tierra. El uso de estos satélites al igual que el desarrollo tecnológico, ha cambiado desde sus inicios y las aplicaciones son diversas. Desde

⁶ Dicha información fue obtenida mediante el documento “Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado” de la Organización de Estados Americanos, (Consultado el 3/05/21).

el espacio nos proporcionan información y servicios para las telecomunicaciones globales, la economía, la seguridad y la defensa, la gestión de emergencias, el medio ambiente y la salud (Canadian Space Agency, 2020).

Como se mencionó anteriormente, la información obtenida mediante satélites ha demostrado su gran utilidad, por ejemplo, Sentinel (Figura 9), es un conjunto de misiones satelitales desarrolladas por la ESA y forma parte del programa Copernicus, previamente denominado *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) este programa ofrece una gran cantidad de datos e imágenes fundamentales para el monitoreo de nuestro planeta (Donezar et al., 2017).

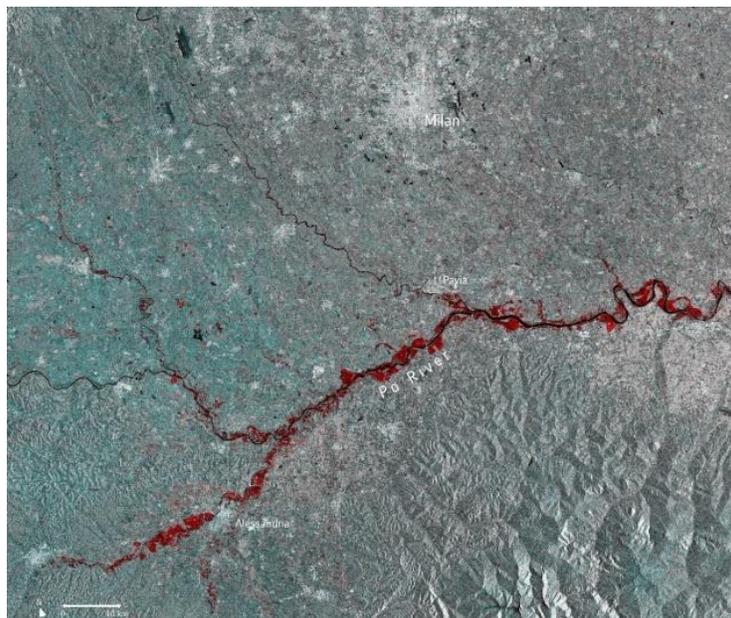


Figura 9. Imagen multitemporal, generada a partir de 2 imágenes capturadas por la misión Copernicus Sentinel 1, en donde se muestra las áreas inundadas, el río Po y las áreas urbanas en el norte de Italia.

Fuente: Agencia Espacial Europea.

2.2.1 Elementos de la Percepción Remota

Actualmente la PR requiere de varios elementos para su correcta aplicación:

- Plataforma (satélites, aviones o vehículos aéreos no tripulados)
- Objeto a observar (superficie de la Tierra)
- Instrumento o sensor (sistema de sensor del satélite)

Una vez conformados estos elementos (Figura 10), las plataformas satelitales tomarán una posición en la órbita de la Tierra, a una altitud predeterminada con la finalidad de obtener imágenes de satélite (ópticas o de RADAR) de diferentes partes de la superficie terrestre, los sensores montados van a medir la radiación electromagnética o también llamada la longitud de onda, esta puede ser energía reflejada por el sol o la que es emitida por la Tierra. Para el caso de los sensores activos los cuales funcionan emitiendo su propia fuente de energía, se les conocerá como tecnología RADAR o LIDAR, y su funcionamiento le permitirá tomar imágenes de día o de noche. Una vez que los valores de la radiación electromagnética son almacenados, se enviarán a un sistema de recepción codificado en valores numéricos, los cuales son traducidos a datos de coberturas o imágenes con diferentes tonalidades llamadas “bandas”, las imágenes son procesadas utilizando programas informáticos para generar imágenes compuestas (Collado et al., 2015).

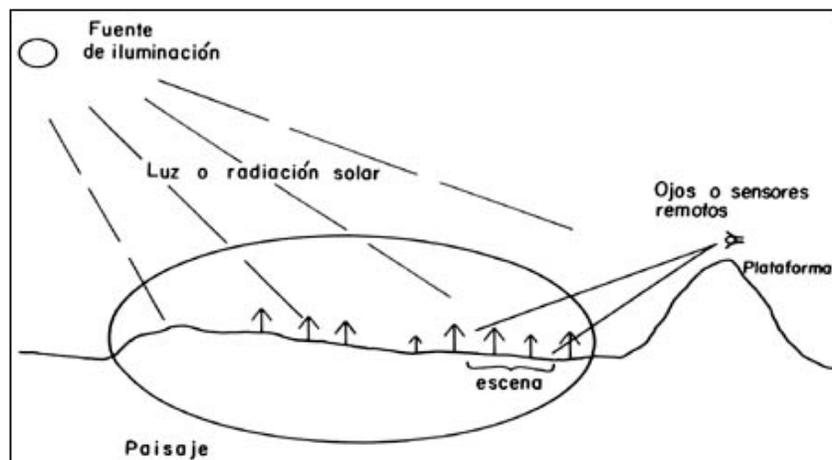


Figura 10. Representación de los elementos básicos de la PR. Fuente: *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio. La ciencia para todos*, (Lira 1987).

Otro de los elementos básicos para comprender el funcionamiento de las técnicas de PR es el *espectro electromagnético*, este elemento hace referencia al conjunto de ondas electromagnéticas (Figura 11) las cuales viajan por el espacio a la velocidad de la luz, estas ondas consisten en la variación de un campo eléctrico y otro magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento y la única diferencia entre ellas es su longitud o su frecuencia. Por lo tanto, el espectro electromagnético se define como el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética (UNAM, s.a.; Luque, 2012).

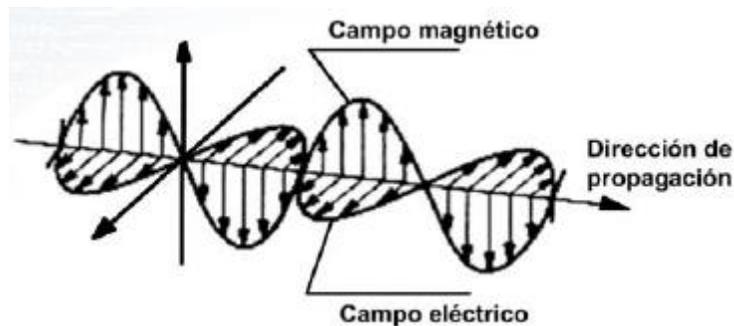


Figura 11. Componentes de una onda. Fuente: *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*, (Luque 2012).

En las últimas etapas de esta técnica es posible realizar la clasificación de las imágenes de satélite, esta clasificación hace referencia a la acción de extraer diferentes clases de información de una imagen *raster* y poder agrupar los píxeles que poseen una misma característica, se logra aplicando técnicas cuantitativas que automatizan la identificación de los objetos que hay en una escena.

La finalidad de esta etapa es comparar y relacionar las clases espectrales que posee una imagen cruda para poder generar datos y mapas temáticos que tengan un propósito evidente. Los métodos de clasificación más comunes son; supervisada, no supervisada y la basada en algún objeto (Tamayo, 2019; Cervantes 2014).

La clasificación supervisada se refiere al proceso mediante el cual los píxeles de identidad conocida ubicados dentro de las áreas de entrenamiento son utilizados

para clasificar píxeles de identidad desconocida, en esta clasificación el analista tiene una participación activa señalando en el sistema de información geográfica la clasificación de cada uno de estos píxeles (Monterroso, s.a.). Generalmente estas áreas de entrenamiento corresponden a sitios previamente muestreados en campo (Vázquez, 2015).

En la clasificación no supervisada, el algoritmo clasificador no necesita información adicional de la escena a clasificar y el analista no tiene una participación más allá de seleccionar el algoritmo de clasificación que va a utilizarse (Monterroso, s.a.). Autores como Cervantes (2019), definen esta clasificación como el método que crea agrupamientos espectrales o también llamados *clusters* para que el analista asocie una clase temática a cada uno de estos grupos, menciona que estas clasificaciones tienen relación directa con el valor relativo al color, al tono y al *cluster* para identificar entidades.

Por último, la clasificación por objetos se basa en un análisis de la información de un conjunto de píxeles similares llamados objetos, estos son similares entre si respecto a algunas propiedades espectrales como; el color, el tamaño, la forma y la textura (Tamayo, 2019).

2.3 Aplicación de la Percepción Remota para el fenómeno de inundaciones

La información proporcionada por la teledetección óptica ofrece información espectral para la extracción de masas de agua superficial mediante observaciones a gran escala y en tiempo real (Tong et al., 2018). Las masas de agua en estado líquido son visualizadas en tonos oscuros a lo largo de cualquier banda del satélite debido a la absorción de la energía⁷. La variabilidad en cuanto a la reflectancia, también dependerá de las condiciones del suelo sumergido, la profundidad de la lámina de agua y de las partículas en suspensión (Bella, 2018).

Respecto a la detección de agua con imágenes ópticas, se resalta que se obtienen mejores resultados si se utilizan regiones del espectro no visibles para el ojo humano, por ejemplo, la baja reflectividad en el infrarrojo es esencial para discriminar entre tierra y agua. Es posible interpretar las imágenes de satélite mediante los patrones típicos que experimenta cada cobertura.

Por otra parte, el análisis de inundaciones con el Radar de Apertura Sintética, ha tenido un aumento significativo debido a la calidad de datos y en la disponibilidad de información que podemos extraer. Sus aplicaciones son variadas y estas incluyen derrames de petróleo sobre el mar, monitoreo de cultivos, interferometría, mapeo de hielo en los polos, estudio de incendios forestales, generación de modelos digitales y por supuesto las inundaciones (Fernández et al., 2019).

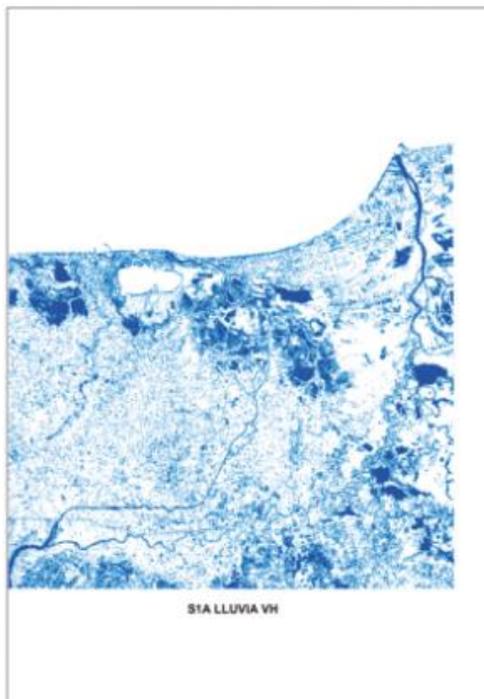
Todos los cuerpos reciben o emiten energía electromagnética y como ocurre con otras bandas del espectro, cada cubierta se comportará de forma particular. Diferentes factores van a influir en la señal emitida por el sensor, se destacan la rugosidad, la geometría del terreno, el ángulo de incidencia y su polarización (Smith, 2020).

En la interacción del agua frente a las microondas, estas proporcionan una cierta capacidad de penetración, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje

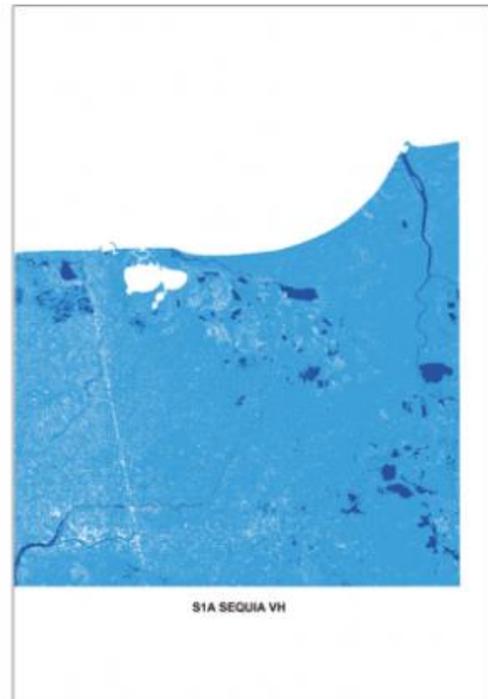
⁷ Evaluación de inundaciones mediante teledetección, recuperado de: <https://geoinnova.org/blog-territorio/evaluacion-de-inundaciones-mediante-teledeteccion/> (Consultado el 2/10/21).

con longitudes de onda largas. Por lo regular el agua refleja especularmente el pulso recibido, por lo que el retorno es bastante bajo (Fernández et al., 2019).

Un ejemplo de trabajo con imágenes SAR para el estudio de inundaciones, fue el realizado por parte de Fernández et al., en el año 2019. En dicho trabajo fueron utilizadas imágenes Sentinel 1 y Radarsat-2 para un estudio territorial de inundaciones en el estado de Tabasco, particularmente el área de estudio abarcó los municipios de Comalcalco, Centla, Centro, Macuspana, Jalpa de Méndez y Nacajuca. El objetivo de esta investigación fue determinar el comportamiento de un temporal de lluvias a fin de obtener cartografía comparativa de zonas inundadas, cuerpos de agua, y humedales antes y después de estos eventos hidrometeorológicos. Se compararon polarizaciones VH y VV (Figura 12) tanto para la temporada de lluvias (octubre), como para la de sequía (marzo).



Temporada de lluvias-polarización VH.



Temporada de sequía-polarización VH.

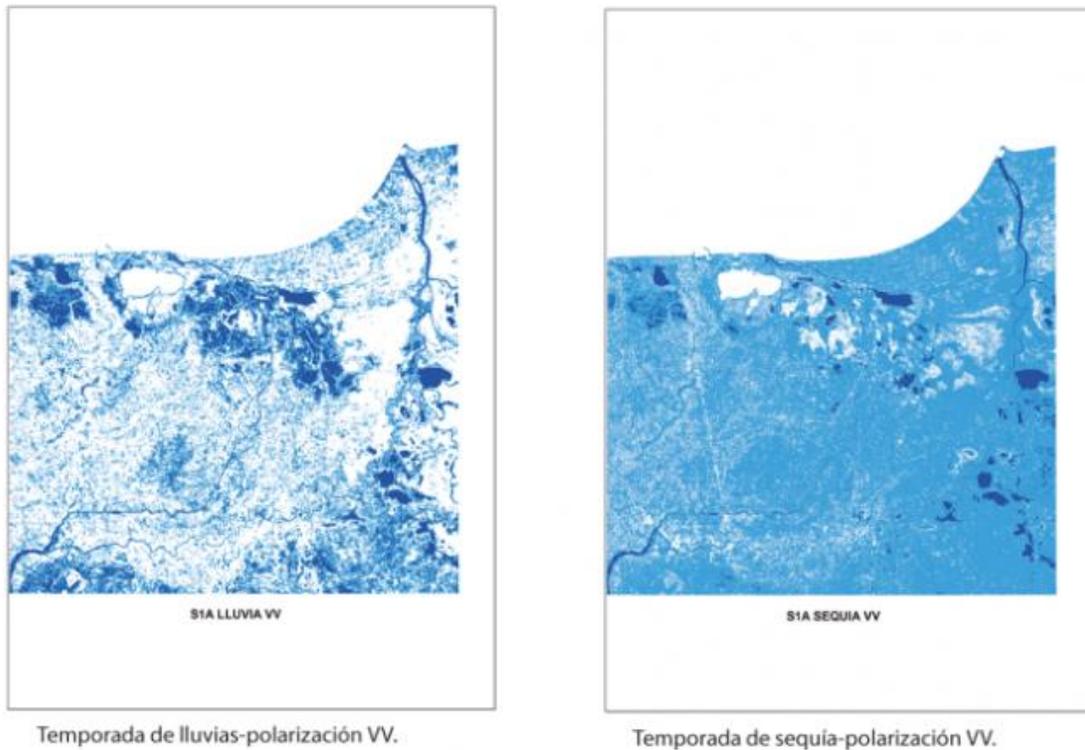


Figura 12. Comparación de inundaciones antes y después del evento obtenida a través de dos tipos de polarización de la onda. Fuente: *Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat-2*, (Fernández et al., 2019).

Los resultados de este trabajo mostraron un comportamiento similar en ambas polarizaciones, tanto en la temporada de lluvias como en la de sequía. Sin embargo, se destaca que con la polarización VH se obtuvo una mayor superficie de área inundada respecto a VV. Una de las razones, es por la constante dieléctrica que influye en la absorción y reflexión de energía, ocasionando que materiales idénticos puedan variar en apariencia.

2.4 Características de las imágenes SAR

El radar de apertura sintética SAR, es un sensor que opera en la frecuencia de las microondas. Al moverse a lo largo de su trayectoria, el RADAR ilumina hacia un lado de la dirección de vuelo franjas continuas y paralelas entre sí y acumula la información de la energía que se refleja hacia la antena del sensor (Figura 13). Cuando el RADAR emite pulsos de energía, se escanea el terreno en dos dimensiones, el rango se refiere a la dimensión determinada por la distancia que el haz es capaz de visualizar y el azimut se refiere al ancho del pulso y la velocidad a la que la plataforma avanza. Con la información adquirida se procesa para formar una imagen digital (Belmonte y Camaño, 2009).

Bandas de radar y los rangos de longitud de onda y frecuencia que operan

Banda	Longitud de onda (λ) (cm)	Frecuencia (GHz)
Ka	0.8 a 1.1	40.0 a 26.5
K	1.1 a 1.7	26.5 a 18.0
Ku	1.7 a 2.4	18.0 a 12.5
X	2.4 a 3.8	12.5 a 8.0
C	3.8 a 7.5	8.0 a 4.0
S	7.5 a 15.0	4.0 a 2.0
L	15.0 a 30.0	2.0 a 1.0
P	30.0 a 100.0	1.0 a 0.3

Figura 13. Bandas de RADAR, mientras más larga sea la longitud de onda, habrá una mayor penetración a través del medio. Fuente: *Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat-2*, (Fernández et al., 2019).

Se le llama RADAR de apertura sintética porque en los radares de apertura real a mayor tamaño de la antena el sensor incrementará la capacidad de distinguir objetos en el terreno. Sin embargo, es poco práctico y costoso que las misiones

satelitales utilicen antenas de gran tamaño, en los SAR mientras la plataforma avanza los ecos de señal que regresa a la antena (Figura 14), se registran durante el tiempo que el objetivo está dentro del haz y al sumar de manera correcta el total de la energía recibida es como se sintetiza una antena de mayor tamaño (Uraga 2020; Hernández, 2018).

Según su diseño, los distintos sensores de RADAR emiten con características propias su energía electromagnética hacia la superficie terrestre y la reciben para integrar con los datos recibidos las imágenes de RADAR. Por ello, estas son de naturaleza muy distinta de las ópticas y requieren de otras técnicas y conocimientos para su explotación como fuentes de información. Sus componentes son un transmisor, un receptor, una antena y un sistema electrónico para procesar los datos recolectados (Fernández et al., 2019; Podest, 2017).

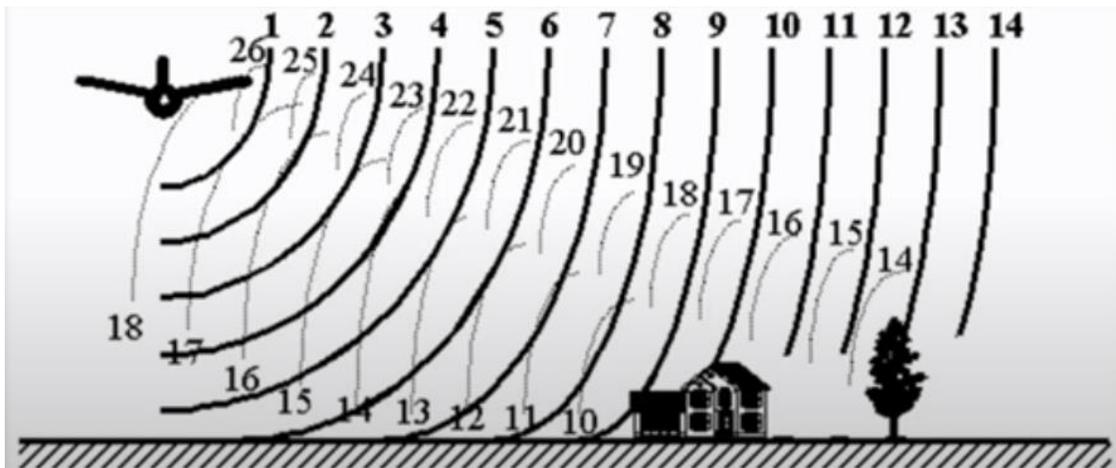


Figura 14. Iluminación del RADAR de forma oblicua a la dirección de desplazamiento de la plataforma
Fuente: *Applied Remote Sensing Training Program*, (NASA 2020).

Cuando la energía emite los pulsos de RADAR estos viajan a una gran velocidad y el sensor mide la parte de la señal que es retrodispersada, es decir, la energía que regresa a la antena. Los radares miden la amplitud (intensidad de la señal retrodispersada), y la fase (la posición en la que se encuentra un punto en el ciclo de la onda), la adquisición de esta información estará influenciada por tres

principales parámetros del RADAR que son la longitud de la onda, la polarización de la onda y el ángulo de incidencia (Podest, 2017).

De acuerdo con Labrador et al, (2012), las imágenes de RADAR y en general las imágenes de satélite cuentan con diferentes características de acuerdo al uso que se les dará, las principales son:

Resolución espacial: es el tamaño de la mínima unidad discriminable sobre una imagen y estará determinada por el tamaño del pixel, entendiéndose pixel como la unidad más pequeña que el sensor mide. Cuando la resolución es mayor resultará mejor la definición del pixel, debido a que será más probable que albergue una única cubierta. Sin embargo, cuando el pixel es mayor, la señal detectada engloba varios tipos de cubierta lo cual significa que la interpretación será más compleja (NASA, 2015; Chuvieco, 1994).

Resolución espectral: se refiere al número y ancho de bandas espectrales registradas por un sensor, mientras más estrechas sean estas bandas existirá mayor resolución espectral. Algunos sensores trabajan con la radiación electromagnética en el intervalo del visible como, por ejemplo, nuestras cámaras digitales, en cambio otros trabajarán en el intervalo del infrarrojo y otros más, utilizarán las microondas, las imágenes de RADAR trabajan en este intervalo del espectro, debido a esto es posible identificar estructuras de día y de noche, aún cuando existe nubosidad (Bernal, 2015).

Resolución temporal: se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma zona de la superficie terrestre y estará determinada por la altura, la velocidad y la inclinación del sensor montando en las plataformas satelitales (SEMAR, 2009).

Resolución radiométrica: es la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe y se expresa en niveles por pixel. A mayor resolución radiométrica, habrá una mejor interpretación de la imagen.

Ventajas del RADAR	Desventajas del RADAR
<p>Funcionan en casi cualquier condición meteorológica.</p> <p>Capacidad de observación diurna o nocturna.</p> <p>Penetran a través del dosel de vegetación (hasta cierto punto).</p> <p>Penetran a través del suelo (hasta cierto punto).</p> <p>Los efectos atmosféricos son mínimos.</p> <p>Sensibilidad a las propiedades dieléctricas de la superficie (ej. agua congelada vs líquida).</p> <p>Sensibilidad a la estructura de los componentes de la superficie</p>	<p>La información es diferente a las imágenes ópticas y algunas veces difícil de interpretar.</p> <p>Presencia de speckle (efecto moteado).</p> <p>Distorsiones en áreas donde hay topografía.</p>

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las imágenes de RADAR. Fuente: *Applied Remote Sensing Training Program*, (NASA 2020).

2.5 Generación de las imágenes SAR

Como se mencionó, el principio básico de un sistema RADAR consiste en medir el tiempo de retorno de la señal emitida y la intensidad de la misma para cuantificar las características físicas del terreno. La señal que es emitida en el rango de las microondas interactúa con los objetos de la superficie y finalmente la imagen se construye a partir de los retornos de esta energía. La antena del RADAR emite un haz de radiación conformado por un tren de pulsos de corta duración y con una alta frecuencia de repetición, la señal captada de vuelta por el RADAR se denomina dispersión o retrodispersión, esto significa que es el reflejo o también conocido como rebote de la señal (Dávila, 2011; Fernández et al., 2015).

Los factores involucrados que contribuyen a determinar las propiedades de la señal captada y que afectan los datos que vamos a obtener se dividen en dos tipos (Tabla 5), los primeros son los factores inherentes al sensor y los segundos son por las características o propiedades de los objetos.

Factores inherentes al sensor	Propiedades inherentes de los objetos
<ul style="list-style-type: none">• Longitud de onda de la radiación incidente.• Fuerza y polarización de la señal.• Ángulos de incidencia y de depresión local.• Distancia y orientación del objeto en Tierra hacia el RADAR.• La resolución.	<ul style="list-style-type: none">• Rugosidad del terreno.• Factores dieléctricos indicadores de humedad.• Rugosidad de los materiales.• Tamaño relativo absoluto y relativo del objeto respecto a la sección transversal del RADAR.

Tabla 5. Factores involucrados en la captura de datos SAR. Fuente: *Avances y Perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas*, (Fernández et al., 2015).

Factores inherentes al sensor

Podest, (2017) menciona que la longitud de onda define la interacción de la señal con la superficie y gran parte de los tonos en las imágenes SAR dependerán de este parámetro. Mientras más larga sea la longitud de onda habrá una mayor penetración a través del medio (Figura 15).

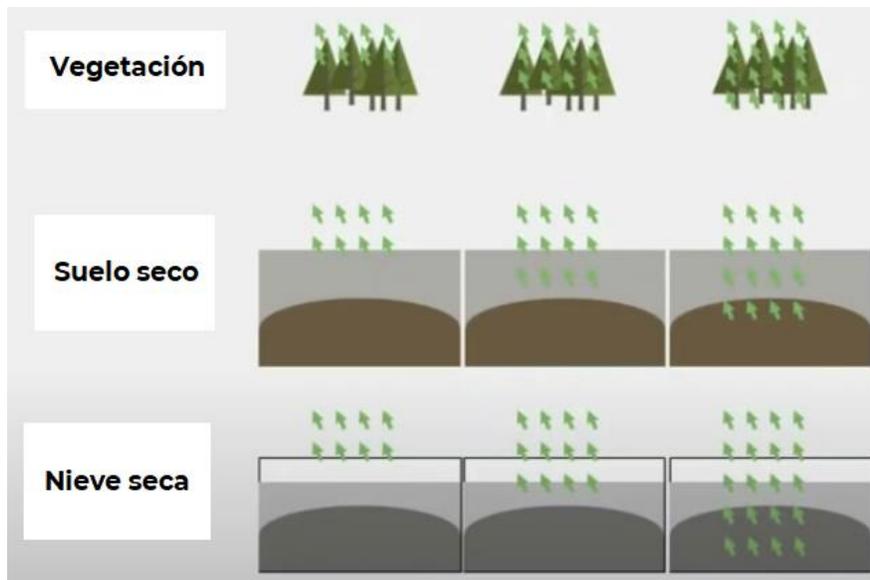


Figura 15. Se muestra la penetración que pueden alcanzar 3 tipos de bandas en diferentes medios de estudio. Fuente: *Applied Remote Sensing Training Program*, NASA.

La polarización de onda hace referencia al plano de propagación del campo eléctrico de la señal y se utiliza para obtener información de los componentes verticales y horizontales de la superficie.

De acuerdo con Dávila (2011) “a partir del modo de transmisión y recepción de la señal de radar montada en una plataforma en movimiento, para el caso de un sistema SAR, se considera una serie de elementos geométricos que son de especial interés en la generación de una imagen” (Figura 16).

Un factor relevante en la geometría de visualización es el ángulo de incidencia. Este parámetro se define por Podest, (2017) como:

El ángulo entre la dirección de iluminación del RADAR y la vertical de la superficie del terreno. Este ángulo cambia dependiendo de la altura del sensor. Los ángulos

pequeños tienen mayor penetración y resultan en una retrodispersión más alta, mientras que la retrodispersión disminuye a medida que incrementa el ángulo de incidencia, debido a que la superficie parece ser más lisa.

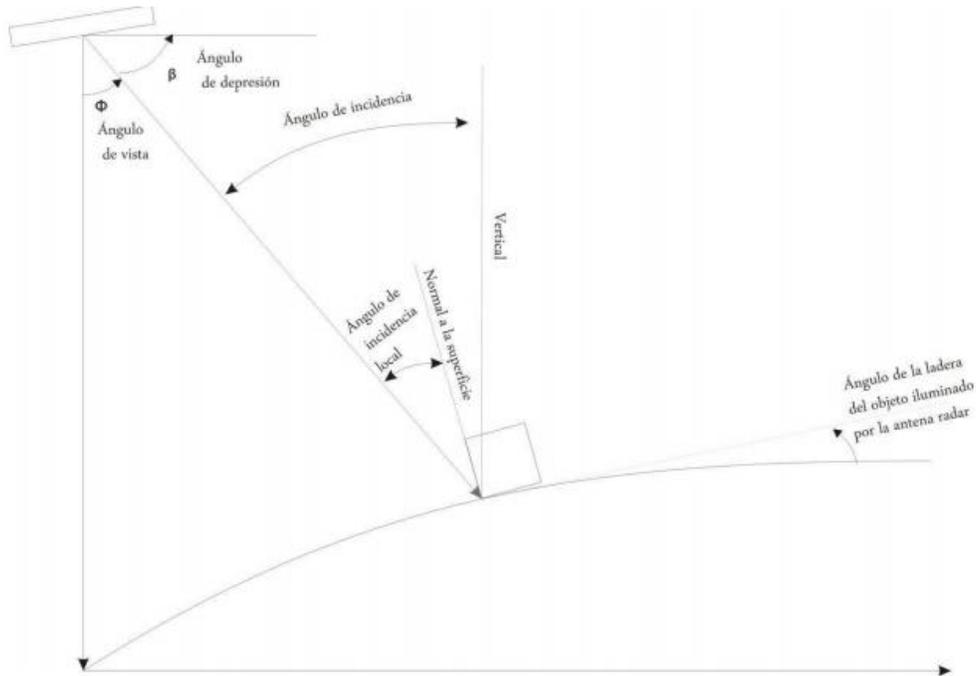


Figura 16. Geometría básica para un sistema RADAR. Fuente: *Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X)*, (Dávila, 2011).

Propiedades inherentes de los objetos

Las propiedades dieléctricas se refieren a los parámetros que determinan el acoplamiento y distribución de la energía electromagnética durante su exposición a microondas, en los sistemas SAR la constante dieléctrica nos ayudan a medir las propiedades eléctricas de los objetos en la superficie (Figura 17). Estas propiedades van a influir en la capacidad de los objetos de absorber energía en el rango de las microondas y se verán afectadas por el contenido de humedad, temperatura y frecuencia (Sosa et al., 2016; Podest, 2017).

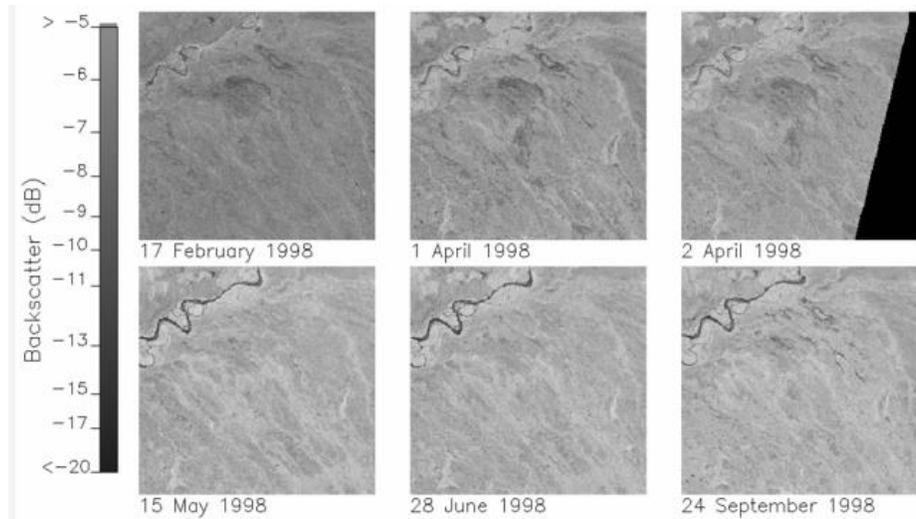


Figura 17. Cambio en las propiedades dieléctricas de la superficie cuando su estado es congelado (febrero) y su estado descongelado (junio). Tomadas por medio del satélite japonés JERS. Fuente: *Applied Remote Sensing Training Program, NASA.*

Por último, los mecanismos de retrodispersión (Figura 18), hacen referencia a la interacción entre la señal de RADAR con la superficie. Existen cuatro mecanismos básicos que explican este parámetro Podest (2017):

1. Retrodispersión en superficies lisas o también conocidas como superficies de dispersión espejo, reflejan la mayor parte de energía incidente de forma opuesta al RADAR, ejemplos de ello son las zonas donde existe presencia de agua sin vegetación.
2. Retrodispersión en superficie áspera cuando las variaciones en la altura se aproximan al tamaño de la onda y la superficie comienza a parecer áspera. En este mecanismo la energía se dispersa de forma igual en todas direcciones y una parte llega al RADAR.
3. Doble rebote sucede cuando dos superficies forman ángulos rectos en dirección al RADAR y la señal rebota dos veces reflejando la mayor parte de la energía de vuelta al RADAR, esto sucede comúnmente en áreas urbanas y vegetación inundada.
4. Dispersión por volumen, se refiere a la dispersión de la energía de RADAR dentro de un volumen o medio, aquí ocurren múltiples rebotes y

reflexiones de energía, un ejemplo de este mecanismo es en aquellas zonas donde se registra presencia de nieve o vegetación.

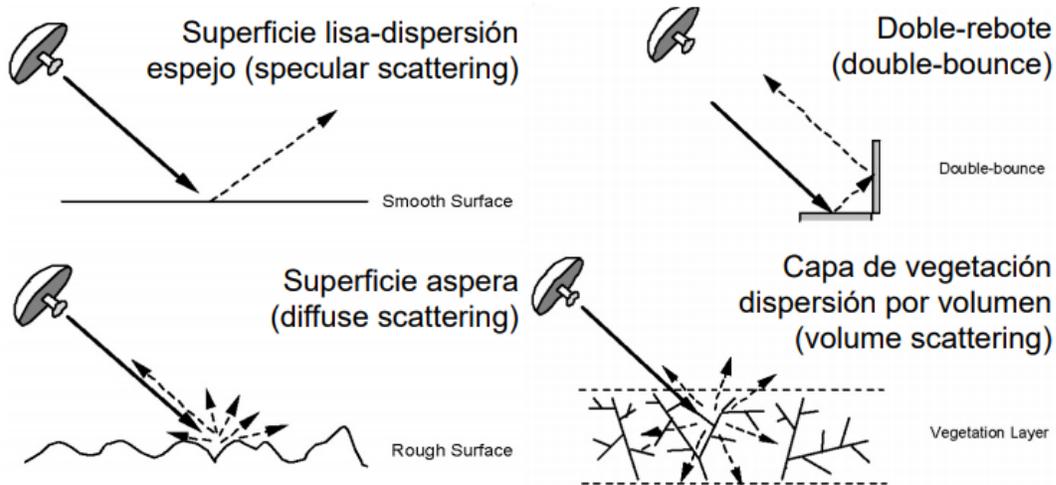


Figura 18. Comportamiento de la energía en diferentes estructuras de la superficie. Fuente: *Applied Remote Sensing Training Program, NASA.*

Capítulo III. Descripción de la zona de estudio

3.1 Nayarit

Se localiza en el noroeste del país, se ubica en las coordenadas geográficas extremas al norte 23° 05', al sur 20° 36', al este 103° 43' y al oeste 105° 46'. Los estados con los que colinda son Sinaloa, Durango, Zacatecas y Jalisco, tiene una superficie de 27,335 Km², el estado se integra por 20 municipios.

En cuanto a su orografía esta entidad federativa se constituye por cuatro regiones fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

Por medio del Atlas Nacional de Riesgos (ANR)⁸, se identificó que una superficie importante del estado de Nayarit se encuentra en un índice de peligro por inundación alto y muy alto.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el INEGI, en el CENSO 2020, la población total del estado es de 1,235,456 personas. Siendo Tuxpan el municipio con mayor densidad de todo el estado, con un total de 425,924 habitantes. Respecto a las actividades económicas, las actividades primarias aportan con un 7.3% al Producto Interno Bruto del estado, seguido de un 20.6% por medio de las actividades secundarias, por último, el sector terciario aporta con un total de 72.1%.⁹

3.1.1 Clima e hidrología

El clima que predomina en el territorio es el cálido, se distribuye en la parte occidente y cubre la Llanura Costera del Pacífico y partes de la Sierra Madre Occidental, del Eje Neovolcánico y de la Sierra Madre del Sur. También se presenta el clima semicálido, y se distribuye de forma irregular en el territorio.

⁸ Atlas Nacional de Riesgos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, página de consulta: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>.

⁹ Instituto Nacional de Estadística y Geografía, página de consulta: <https://cuentame.inegi.org.mx/default.aspx>

En la llanura costera se presentan lluvias de importancia durante gran parte del año, con precipitaciones que fluctúan entre los 900 y 1,500 mm anuales. Esto sucede en un 55 % del territorio del estado, mientras que el 45 % restante presenta un clima semicálido subhúmedo y templado¹⁰.

La interacción de factores como la latitud, altitud, distribución de tierras y cuerpos de agua, así como el relieve, contribuyen a que exista una diversidad de climas en el estado y gracias a estas condiciones se destacan seis principales productos agrícolas en este estado, los cuales son: caña de azúcar, mango, maíz, jitomate, frijol y sandía. Es importante mencionar que respecto a los productos pecuarios y acuícolas, la producción de camarón en este estado se posiciona en el tercer puesto a nivel nacional ¹¹.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el estado de Nayarit quedan delimitadas cuatro regiones hidrológicas RH-11 Presidio-San Pedro, RH-12 Lerma-Santiago, RH-13 Huicicila y RH-14 Ameca. Las principales corrientes y afluentes que drenan hacia cada región son:

RH-11: Acaponeta, Rosamorada, San Juan y San Pedro Mezquital

RH-12: Río grande de Santiago, Bolaños, De Joraviejo, La Palmilla, Santa Fe, Guásimas y Huaynamota.

RH-13: Está dividida en dos cuencas costeras, río Huicicila-San Blas (dentro de Nayarit) y río Cuale-Pitillal (en Jalisco).

RH-14: Su río principal es el río Ameca.

En la siguiente imagen (Figura 19) se muestra un mapa de elevaciones del estado de Nayarit, en dicho modelo se representan de manera visual y matemática los valores de altura respecto al nivel del mar, también nos permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes. Asimismo, se aprecia la

¹⁰ Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México, recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM18nayarit/mediofisico.html> (Consultado el 25/02/22).

¹¹ Agenda de Innovación de Nayarit, recuperado de: <http://www.agendasinnovacion.org/wp-content/uploads/2015/02/4.1-Agenda-del-%C3%A1rea-Agropecuario-e-Industria-Alimentaria.pdf>.

distribución espacial de los ríos que existen en esa entidad federativa también se muestran las regiones hidrológicas descritas anteriormente.

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), de la CONAGUA, las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México, son áreas conformadas en función de sus características:

- ❖ Morfológicas
- ❖ Orográficas
- ❖ Hidrológicas

Una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas, de esta manera quedan establecidas 37 regiones, que a su vez agrupan a las 757 cuencas hidrológicas que hay en México.

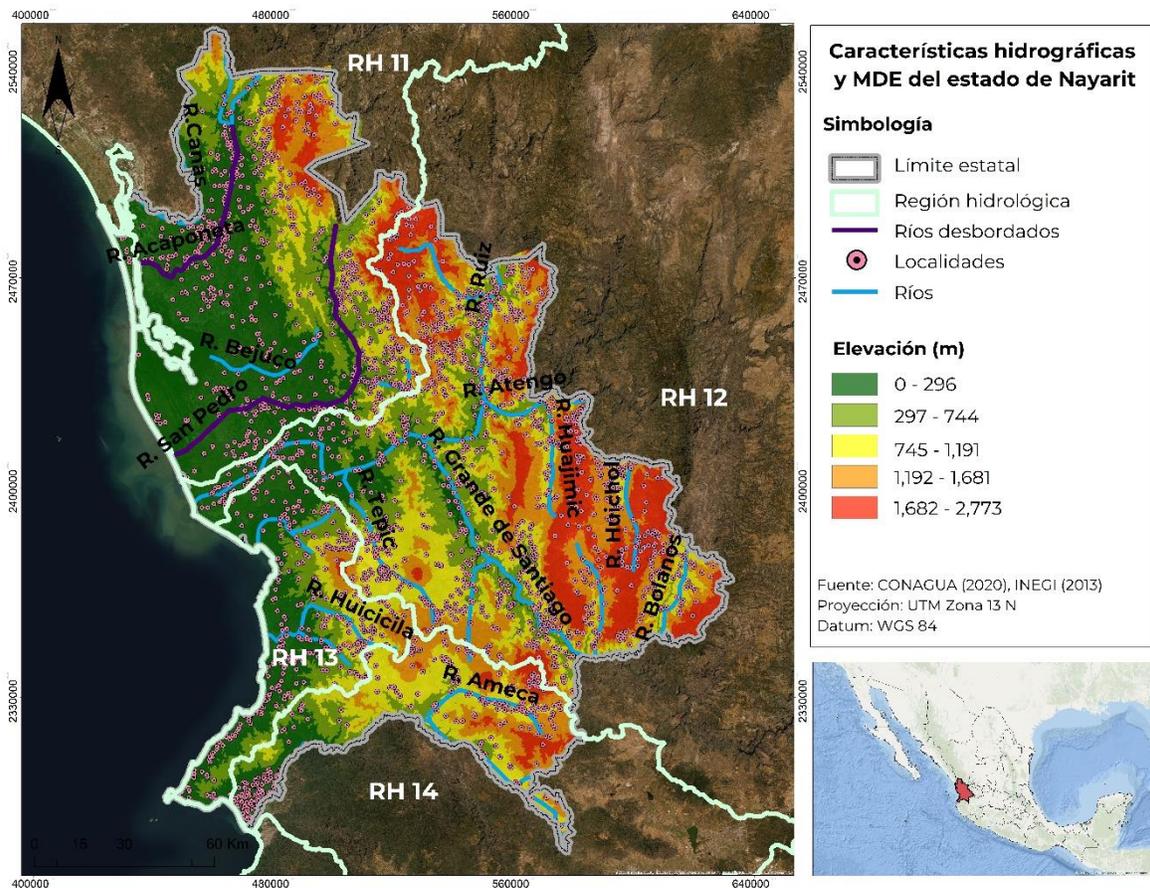


Figura 19. Valores de elevación y ríos que pasan por el estado de Nayarit. Se resalta en líneas de color morado los que se desbordaron durante las lluvias de octubre en el año 2018. Elaboración propia.

3.1.2 Inundaciones en Nayarit 2018

El día 24 de octubre de 2018, el estado de Nayarit fue impactado por el huracán Willa, debido a la precipitación suscitada en las zonas elevadas, principalmente en la zona norte del estado, se desbordaron dos importantes ríos, el San Pedro y Acaponeta. El primero tiene su origen en el estado de Durango, drena una superficie aproximada de 3.844,9 km², teniendo como principales afluentes los arroyos Fresnos, Cazuelas, Lajitas, Piedras Blancas, Hondo y Santa Rosalía. El segundo río también tiene su origen en el estado de Durango, drena una superficie de 5.603,90 km², atraviesa los municipios de Huajicori y Acaponeta y las localidades de Mineral de Cucharas, Quiviquinta, Huajicori, Acaponeta, San Felipe Aztatán, Tecuala y Quimichis (Protección Civil, 2018).

Debido a estos desbordamientos, 8 de los 20 municipios del estado resultaron afectados, es decir, Acaponeta, Huajicori, Del Nayar, Rosamorada, Ruiz, Santiago, Tecuala y Tuxpan, se estima que la población afectada fue de 180,000 personas, siendo las tres más críticas el municipio de Acaponeta, Tecuala y Tuxpan. En cuanto a los daños derivados del paso de este fenómeno se encuentran la severa afectación a planteles educativos, infraestructura carretera, infraestructura hidráulica y a los sectores de agricultura y ganadería.

En la Figura 20 se muestran algunas de las afectaciones ocurridas en Nayarit.



Figura 20. Se observa como las carreteras y caminos quedaron completamente obstruidos por el nivel de agua alcanzado. Fuente: Milenio 2018.

3.2 Veracruz

Se localiza en la costa del atlántico, en el Golfo de México, su posición es entre las coordenadas geográficas extremas al norte 22° 28´, al sur 17° 09´, al este 93° 36´ y al oeste 98° 39´. Colinda con los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Oaxaca, Chiapas y Tabasco. Asimismo, su extensión territorial es del orden de 78, 815 Km² y se divide en 212 municipios.

En cuanto a sus características orográficas, el estado de Veracruz forma parte de las provincias: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte, Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur, Llanura Costera del Golfo Sur, Sierra de Chiapas y Guatemala y Cordillera Centroamericana.

Por medio del Atlas Nacional de Riesgos¹², el estado de Veracruz se categoriza en un peligro alto y muy alto a sufrir inundaciones, siendo esta última categoría la de mayor presencia en el territorio.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el INEGI, en el CENSO 2020, en el estado de Veracruz se contabilizaron 8,062,579 habitantes. Las actividades primarias aportan un 5.5% al Producto Interno Bruto de la entidad, seguido por las actividades secundarias con un 31.2% y finalmente un aporte del 63.3% por parte de las actividades terciarias. El aporte por sector de la producción agroalimentaria de Veracruz es el siguiente; agricultura 50.6%, ganadería 47% y pesca 2.4%.¹³

3.2.1 Clima e hidrología

Debido a que el estado de Veracruz se encuentra entre la Sierra Madre Oriental y el Golfo de México, sus condiciones climáticas son diversas comprendiendo desde el cálido húmedo en el sur, hasta el cálido semiseco en el norte y centro, mientras que las condiciones templadas y frías se presentan en las zonas montañosas.

¹² Atlas Nacional de Riesgos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, página de consulta: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>.

¹³ Instituto Nacional de Estadística y Geografía, página de consulta: <https://cuentame.inegi.org.mx/default.aspx>

Resalta la presencia de un alto número de ríos que escurren en las laderas de la Sierra Madre Oriental. En cuanto a los patrones pluviométricos, se deben a las precipitaciones que se generan, principalmente, por la llegada de masas de aire húmedo tropical proveniente del Océano Atlántico y el Golfo de México, así como su interacción con la orografía de esta entidad federativa. La temporada de lluvias corresponde la mayor parte con el verano, aunque cabe aclarar que el mes más lluvioso no es el mismo para todo el estado, por ejemplo, en septiembre ocurren para las zonas norte y sur, debido a las tormentas tropicales y las ondas del este, mientras que para el centro es el mes de julio. Finalmente, el periodo de estiaje o menos lluvioso es en invierno (diciembre a febrero), en zonas montañosas y en primavera (marzo a mayo), en la llanura costera (Ruíz et al., s.a.).

Por sus características hidrológicas y en función de los límites de cuencas hidrológicas establecidos por la Comisión Nacional del Agua, en la costa veracruzana se delimitan cuatro regiones, de norte a sur: RH-26 Pánuco, RH-27 Norte de Veracruz o Tuxpan-Nautla, RH-28 Papaloapan y RH-29 Coatzacoalcos (Pereyra et al., 2010). En el estado existen más de 40 ríos debido a la diversidad topográfica, estos ríos representan el 35 % del total a nivel nacional.

En la Figura 21 se muestra un mapa de elevaciones del estado de Veracruz, asimismo se pueden observar sus principales ríos y las regiones hidrológicas que comprenden dicha entidad.

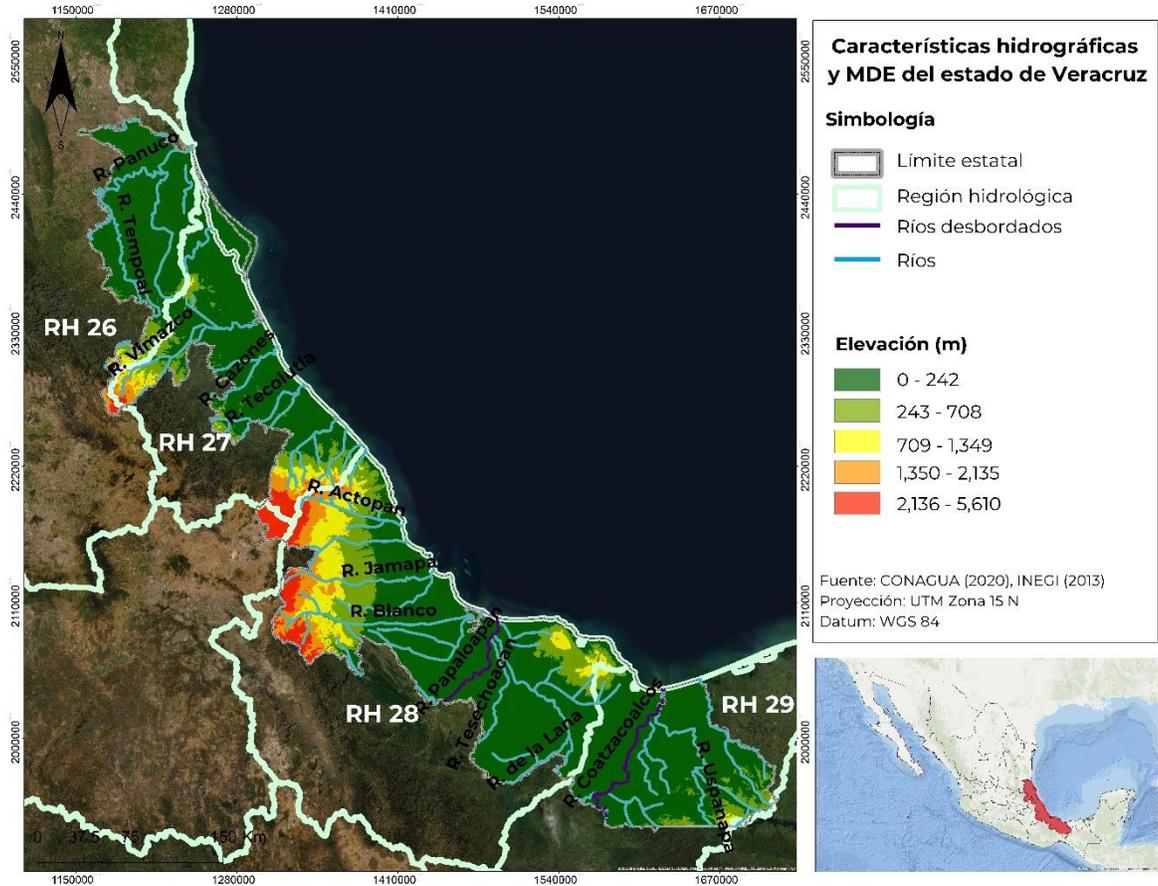


Figura 21. La figura muestra los valores de elevación y ríos que se encuentran en el estado de Veracruz. También resaltan en color morado, los que desbordaron durante las lluvias del año 2018. Elaboración propia.

3.2.2 Inundaciones en el año 2018

Para el caso de Veracruz, el paso del frente frío número seis generó una intensa precipitación del 19 al 23 de octubre del 2018, debido a ello cuatro municipios presentaron declaratoria de emergencia, los cuales fueron: Carlos A. Carrillo, Cosamaloapan, José Azueta y Playa Vicente. De acuerdo con la secretaría de Protección Civil de Veracruz, la presencia de fenómenos hidrometeorológicos es muy frecuente, principalmente en la temporada de ciclones, que ocurre del 15 de junio hasta el 30 de octubre, causando daños significativos, sobre todo por la crecida de los ríos que llegan a ocasionar inundaciones en el transcurso de unas cuantas horas y su presencia puede extenderse por semanas, tal como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Se muestran la participación de la SEDENA en acciones de auxilio a la población durante las inundaciones provocadas por el desbordamiento del arroyo Oro Verde, en el municipio de Álamo, Veracruz. Fuente: El Universal 2018.

3.3 Etapas en el manejo del fenómeno de inundación

Para el manejo de las emergencias naturales se llevan a cabo una serie de fases o etapas que incluyen la prevención del desastre, la preparación y pronóstico, seguido de la respuesta y asistencia y, por último, la recuperación y reconstrucción. Debido a los excesivos costos sociales y económicos es necesario reducir el impacto de esta problemática a fin de llevar a cabo una estrategia integrada para el manejo de emergencias. Por ello, en cada una de estas etapas son necesarios el aporte intensivo de información y, desde hace unas décadas, la tecnología espacial juega un rol notable en el suministro de estas (Belmonte y Camaño, 2009).

De acuerdo con la Organización de los Estados Americanos (OEA) en su documento, *“Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el desarrollo Regional Integrado”* (s.a.), las inundaciones representan el más común de los peligros naturales que puede afectar a las personas y el espacio donde se encuentran debido a que pueden presentarse de muchas maneras en diferentes ambientes, por ejemplo, las inundaciones en ríos, causadas por lluvias prolongadas e intensas y que suelen ser las más frecuentes. También otras inundaciones pueden ser causadas por precipitaciones cortas, pero extremadamente fuertes, por falla de presas u ocasionalmente pueden originarse por la erupción en algún glaciar o pico volcánico cubierto de nieve.

Teniendo en consideración las causas del fenómeno y su localización, más las características técnicas en la adquisición de imágenes de satélite, es posible identificar los mecanismos de prevención o mitigación para los efectos de este tipo de fenómenos hidrometeorológicos.

Capítulo IV. Polarimetría RADAR aplicada a inundaciones

4.1 Programa espacial Copernicus

Copernicus es un programa de observación terrestre, liderado por la Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea, que tiene como principal objetivo observar el medio ambiente para entender mejor los cambios ambientales, el porqué de esos cambios y su influencia en nuestras vidas, de ese modo busca contribuir a la protección del medio ambiente, la salud y seguridad de los ciudadanos (Unión Europea, 2015).

Para lograr su principal objetivo, Copernicus se apoya de una flota de satélites, llamados Sentinel, estos satélites suponen una fuente constante e independiente de datos de alta calidad.

“Los datos Copernicus, proporcionados en su totalidad de manera completa, abierta y gratuita, apoyarán los esfuerzos regionales, nacionales, europeos e internacionales para identificar, responder y adaptarse a fenómenos globales, como son el cambio climático, la gestión del suelo, la contaminación atmosférica y el estado de los mares, entre otros” (Unión Europea, 2015).

La flota de satélites del programa Copernicus consta de las siguientes misiones; Sentinel 1 proporciona imágenes de RADAR con la ventaja de observar la superficie terrestre bajo cualquier condición meteorológica. Por otro lado, Sentinel 2 obtiene imágenes ópticas de alta resolución. Sentinel 3 transporta varios instrumentos para llevar a cabo una serie de estudios de la Tierra y de sus océanos. Finalmente, Sentinel 4 y 5 miden la composición de la atmósfera desde la órbita geoestacionaria y órbita polar, respectivamente (Donezar et al., 2017).

A continuación, en la Tabla 6 se presentan algunas características de cada satélite y el funcionamiento que tienen:

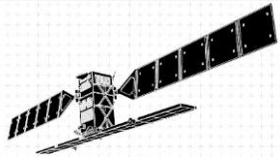
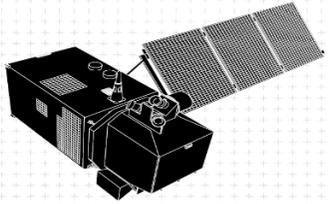
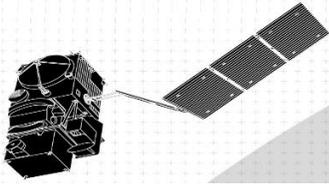
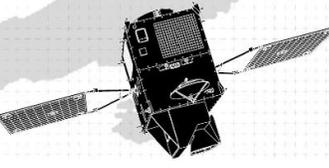
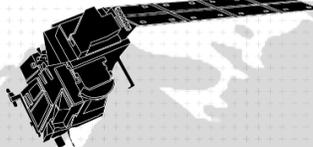
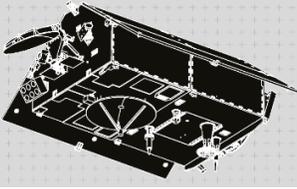
Satélite	Lanzamiento	Características del satélite	Imagen del Satélite
Sentinel 1-A Sentinel 1-B	3-04-2014 25-04-2016	Satélite generador de imágenes de RADAR, bajo cualquier condición meteorológica para aplicaciones terrestres y oceánicas.	
Sentinel 2-A Sentinel 2-B	23-06-2015 7-03-2017	Satélite óptico multiespectral; 13 bandas espectrales con diferente resolución. Útil para la observación de las masas terrestres, vegetación y agua.	
Sentinel 3-A Sentinel 3-B	16-02-2016 25-04-2018	Satélite enfocado a las mediciones de la topografía superficial de los mares, del vapor de agua, del contenido de agua de las nubes y la radiación térmica emitida por la Tierra.	
Sentinel 5-P	13-10-2017	Observación a escala mundial de los principales componentes atmosféricos.	
Sentinel 4	2017	Enfocado a la obtención de datos actualizados sobre la calidad del aire.	
Sentinel 5	2021	Está enfocado a las mediciones sobre la calidad del aire y la radiación solar, así como el seguimiento del ozono estratosférico y del clima.	
Sentinel 6	2020	Su misión es observar los cambios del nivel de la superficie del mar con una precisión de unos centímetros	

Tabla 6. Características y misiones de la flota de Satélites Sentinel. Elaboración propia, con base en ESA.

Como se mencionó, el programa Copernicus pone a disposición un extenso catálogo de información y conocimiento sobre nuestro planeta, este material puede ser descargado y obtenido de manera completamente abierta y gratuita por los ciudadanos, las autoridades públicas, los responsables políticos, científicos, emprendedores y empresas.

Debido a que la sociedad se enfrenta a numerosas amenazas globales, los datos de Copernicus apoyan los esfuerzos regionales y nacionales para identificar, responder y adaptarse a fenómenos como el cambio climático, la gestión del suelo, la contaminación atmosférica, y el estado de los mares, también significan un apoyo ante la respuesta a emergencias y la ayuda humanitaria.

Para poder descargar las imágenes de satélite es necesario acceder a la página electrónica Copernicus *Open Acces Hub*, en esta página (Figura 23) será posible delimitar un polígono de la zona de interés, así como la fecha o temporalidad de las imágenes de satélite que se buscan adquirir. Adicional a esto, en la pestaña *Insert search criteria* se pueden conocer especificaciones tales como, las imágenes del satélite que deseemos, la polarización de la onda, el tipo de producto, el modo del sensor y el número de orbita relativa. Una vez seleccionadas estas características, al usuario se le desplegara un catálogo de imágenes y así podrá elegir la que mejor se adapte a sus intereses de uso.

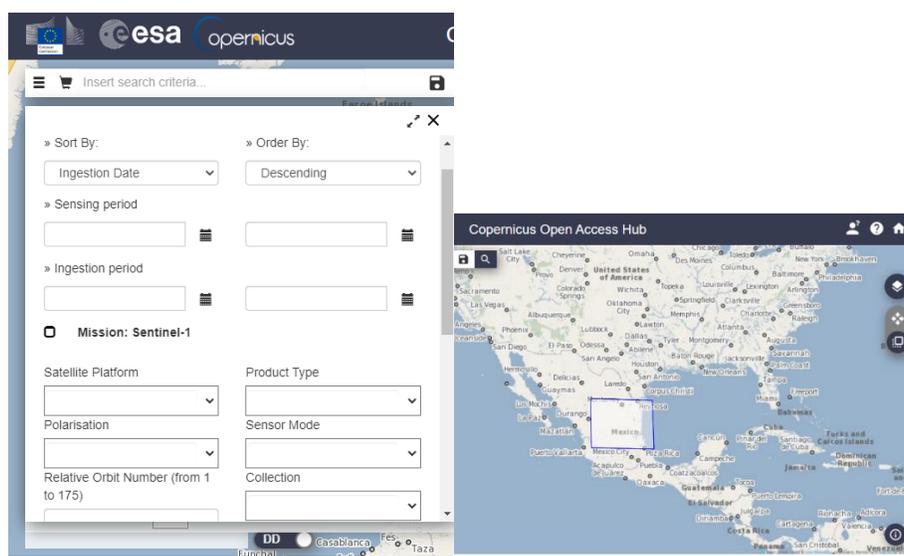


Figura 23. Portal de acceso para la descarga de datos Sentinel. Fuente: Agencia Espacial Europea.

De acuerdo con el informe anual del Sistema de Acceso a datos Copernicus (Figura 24) operado por la ESA, durante el 2018 el número de usuarios registrados fue de 187, 797 y el número total de productos Sentinel descargados fue de 13 millones de datos. A continuación, se presenta una gráfica donde se muestran las estadísticas antes mencionadas.

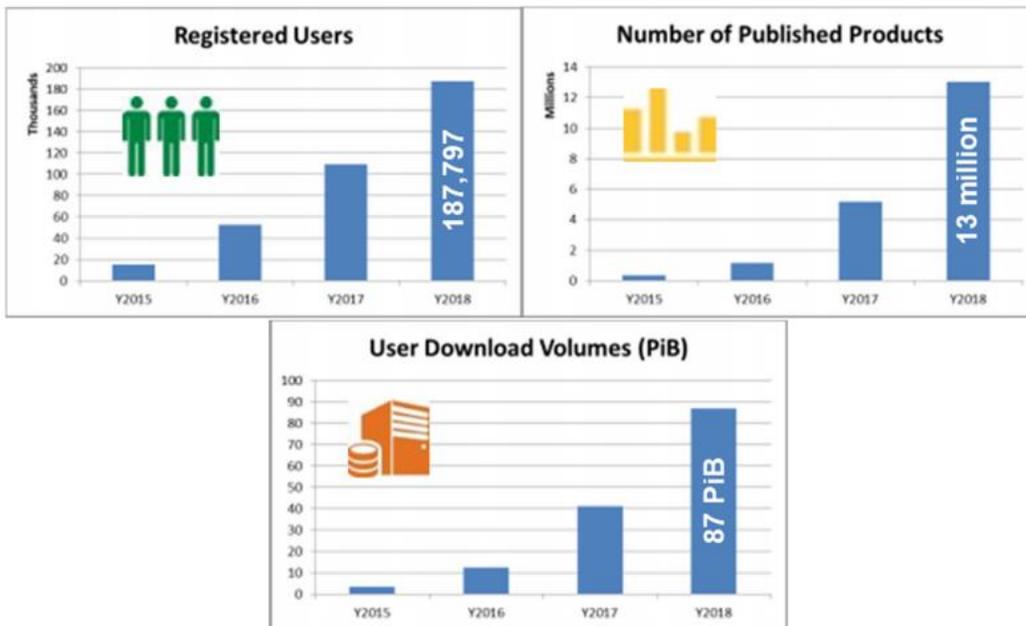


Figura 24. Estadísticas para el año 2018 de datos proporcionados por Copernicus. Fuente: Agencia Espacial Europea.

4.2 Imágenes Sentinel 1

La misión Sentinel 1 está conformada por una constelación de dos satélites de órbita polar, ambos satélites operan de día y noche, adquiriendo imágenes de Radar de Apertura Sintética en banda C, esto permite que se puedan obtener imágenes independientemente de las condiciones atmosféricas en un periodo de revisión de seis días. Las imágenes son adquiridas en cuatro modos y pueden llegar a tener hasta cinco metros de resolución y una cobertura de hasta 400 kilómetros.

El objetivo de esta misión es cubrir las zonas terrestres de todo el mundo cada dos semanas, el corto tiempo de revisión proporciona datos de manera rutinaria y sistemática para el monitoreo marítimo y terrestre, lo cual permite generar una respuesta a emergencias climáticas (ESA). El lanzamiento del Sentinel 1 (Figura 25), fue realizado en el año 2014, y Sentinel 1B se lanzó en el año 2016.



Figura 25. Imagen del satélite Sentinel 1 sobrevolando la Tierra. Fuente: Agencia Espacial Europea.

Las imágenes Sentinel tienen cuatro modos de adquisición:

Franja de mapa (SM): Proporciona datos con una resolución espacial de 5x5m y una escena de vista del sensor sobre la superficie terrestre de 80 km.

Amplia banda interferométrica (IW): Este modo combina un ancho de escena de 250 km con una resolución moderada de 5x20 m.

Franja externa ancha (EW): Este modo se emplea sobre zonas marítimas y polares, donde se necesita una gran cobertura y tiempos de revisita cortos. El ancho de escena en este modo es de 400 km con una resolución de 20x40 m.

Modo de ondas (WV): Este modo pretende ayudar en la determinación de la dirección y altura de olas en el océano. Se compone de imágenes con una resolución de 20x20 km que se adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100 km, es decir, dos imágenes con el mismo ángulo de incidencia están separadas 200 km.

Los productos adquiridos por Sentinel 1 se clasifican de acuerdo al tipo de procesamiento: Complejo de una sola mirada (SLC, por sus siglas en inglés), Rango de tierra observada (GRD, por sus siglas en inglés) y Océano (OCN, por sus siglas en inglés). La misión también recopila información en polarización simple y dual.

4.3 Polarimetría RADAR

Las ondas electromagnéticas están conformadas por un campo eléctrico y magnético (Figura 26), la frecuencia de estas indica el número de ondas completas por segundo y se mide en Hertz o Gi-gaHertz; la longitud se refiere a la distancia entre dos cimas o dos valles y la dirección de estas ondas es importante debido a la interacción que presenta con los objetos. En ese sentido, la polarimetría se refiere a *“un conjunto de técnicas de análisis numérico utilizadas para obtener información física cualitativa y cuantitativa para aplicaciones territoriales a partir de imágenes polarimétricas”* (Fernández et al., 2015; Posada et al., 2010).

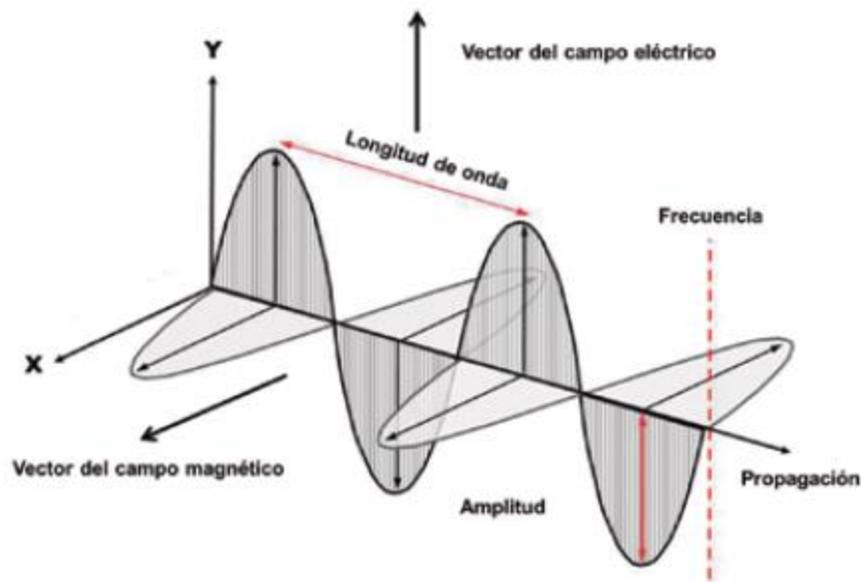


Figura 26. Componentes de una onda electromagnética. Fuente: Fernández., et al., 2015.

La polarización de las ondas resalta la relación entre la señal emitida, el objeto y la señal recibida. Un referente importante para entender este proceso son las ecuaciones de Maxwell, en donde se explica que los campos eléctrico y magnético oscilan juntos, de manera perpendicular entre sí, y perpendicular a la dirección de propagación. Los sensores SAR tienen la capacidad de polarizar estas ondas en varias direcciones (HH, VV, HV y VH), tal como se muestra en la Figura 27, la primera letra se refiere a la polarización de la señal transmitida y la segunda indica la polarización recibida, en algunos casos los sensores cuentan con polarización

cuádruple, esto quiere decir que capturan los cuatro modos de polarización simultáneamente y, además, miden las diferencias de fase y amplitud de las ondas. La rugosidad, la morfología y la humedad del terreno son los principales factores que afectan la intensidad del retorno de la señal (Fernández et al., 2015; Posada et al., 2010).

Señales vertical y horizontalmente polarizadas de transmisión (envío) y recepción (retrodispersión)

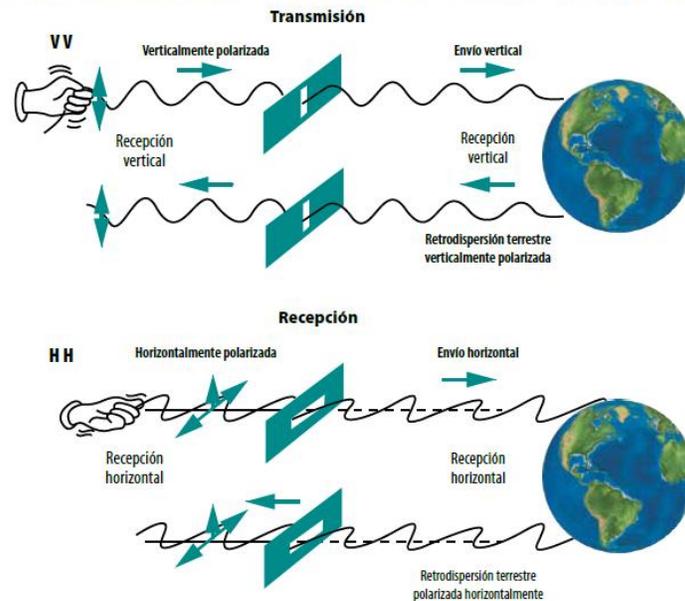


Figura 27. Ondas polarizadas en VV y HH. Fuente: *Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat-2*, (Fernández et al., 2019).

De igual manera, la longitud de onda tiene un efecto sobre la polarización, al combinar imágenes de diferente polarización y longitud de onda se pueden generar las combinaciones de color que ayudan a discriminar la naturaleza de diversas superficies.

Las aplicaciones derivadas a partir de datos de RADAR polarímetro son diversas, destacan la Agricultura, Silvicultura, Detección y Monitoreo de la línea costera, detección de capas de petróleo, detección de navíos e hidrología. En este último campo de investigación registra un historial basto de aplicación, como la estimación de humedad del suelo, cartografía de la cobertura de nieve y cartografía de zonas inundadas (Posada et al., 2010).

4.4 Metodología

Para la elaboración de este trabajo se descargaron seis imágenes de satélite Sentinel 1, por medio del portal web *Alaska Satellite Facility* las primeras dos imágenes se utilizaron para estimar las inundaciones en localidades del estado de Nayarit con fechas del 2018-10-14 (Antes), 2018-10-26 (Después), y las otras cuatro para el estado de Veracruz. El primer par de imágenes con fechas del 2018-10-08 (Antes), 2018-10-20 (Después) y el segundo par de imágenes con fechas del 2018-10-16 (Antes), 2018-10-28 (Después).

Los productos de la misión Sentinel pueden ser adquiridos de forma gratuita y en tres diferentes situaciones, se entregarán dentro de una hora de recepción para la respuesta de emergencias en tiempo casi real (NRT por sus siglas en ingles), dentro de las tres horas para zonas prioritarias de NRT, y dentro de las 24 horas para datos archivados sistemáticamente. Estos productos están disponibles en polarización simple (VV o HH) para el modo Wave y polarización dual (VV + VH o HH + HV) o polarización simple (HH o VV) para los modos SM, IW y EW.

Como se mencionó anteriormente existen diferentes niveles de productos en las imágenes Sentinel 1, los cuales dependen del uso que les dará cada usuario; el nivel 1 refiere a los productos Single Look Complex (SLC) y Ground Range Detected (GRD). Para fines de este trabajo, se utilizaron imágenes de Detección del Alcance del Suelo (GRD), este tipo de archivo consiste en datos SAT que se han detectado, examinado y proyectado al alcance del suelo, utilizando un modelo de elipsoide de la Tierra (ESA).

Las imágenes de RADAR sufren una serie de distorsiones debido a su naturaleza de adquisición de información, por ello es necesario realizar algunas correcciones a las imágenes descargadas para poder obtener la información que es de interés. Autores como Tamayo (2019), mencionan que la calidad de la información adquirida por medio de imágenes de satélite depende en gran medida, por las correcciones previas y resalta que las más importantes son:

1.- La corrección topográfica: es la compensación de las diferencias de iluminación solar que aparecen por las variaciones altitudinales del terreno.

2.- Corrección geométrica: es la corrección que se centra en las distorsiones en la geometría de la imagen esta corrección abarca las distorsiones en las posiciones de los píxeles.

3.- Corrección radiométrica: esta corrección trata las anomalías que afectan a los niveles digitales de los píxeles propios de cada imagen. Esta corrección es fundamental para obtener información más cercana a la situación real del terreno.

A continuación, en las Tablas 7, 8 y 9 se describen las características de las imágenes descargadas, la información contenida en cada tabla, enlista la fecha de descarga de cada par de imágenes, así como los principales componentes de cada imagen.

Imágenes utilizadas para el estado de Nayarit		
Fecha de las imágenes	2018-10-14 (Antes)	2018-10-26 (Después)
Modo del haz (Beam mode)	IW Interferometric Wide (5x20 m de resolución)	IW Interferometric (5x20 m de resolución)
Ancho de barrido	250 km	250 km
Tipo de producto	(GRD) Ground Range Detection	(GRD) Ground Range Detection
Polarización	1SDV: (dual VV+VH)	1SDV: (dual VV+VH)
Frecuencia	Banda C	Banda C
Modo de la imagen	Ascendente	Ascendente

Tabla 7. Características de las imágenes Sentinel 1, para el evento de inundación en el estado de Nayarit. Fuente: elaboración propia.

Primer par de imágenes utilizadas para el estado de Veracruz		
Fecha de las imágenes	2018-10-08 (Antes)	2018-10-20 (Después)
Modo del haz (Beam mode)	IW Interferometric Wide (5x20 m de resolución)	IW Interferometric (5x20 m de resolución)
Ancho de barrido	250 km	250 km
Tipo de producto	(GRD) Ground Range Detection	(GRD) Ground Range Detection
Polarización	1SDV: (dual VV+VH)	1SDV: (dual VV+VH)
Frecuencia	Banda C	Banda C
Modo de la imagen	Ascendente	Ascendente

Tabla 8. Características de las imágenes Sentinel 1, para el evento de inundación en el estado de Veracruz. Fuente: elaboración propia.

Segundo par de imágenes utilizadas para el estado de Veracruz		
Fecha de las imágenes	2018-10-16 (Antes)	2018-10-28 (Después)
Modo del haz (Beam mode)	IW Interferometric Wide (5x20 m de resolución)	IW Interferometric Wide (5x20 m de resolución)
Ancho de barrido	250 km	250 km
Tipo de producto	(GRD) Ground Range Detection	(GRD) Ground Range Detection
Polarización	1SDV: (dual VV+VH)	1SDV: (dual VV+VH)
Frecuencia	Banda C	Banda C
Modo de la imagen	Ascendente	Ascendente

Tabla 9. Características de las imágenes Sentinel 1, para el evento de inundación en el estado de Veracruz. Fuente: elaboración propia.

Una vez descargadas estas imágenes, mediante el programa SNAP de la Agencia Espacial Europea, se utilizó la técnica de polarimetría RADAR para el análisis de inundaciones, en la Figura 28 se aprecia el diagrama de trabajo, utilizado para el tratamiento de estas imágenes.

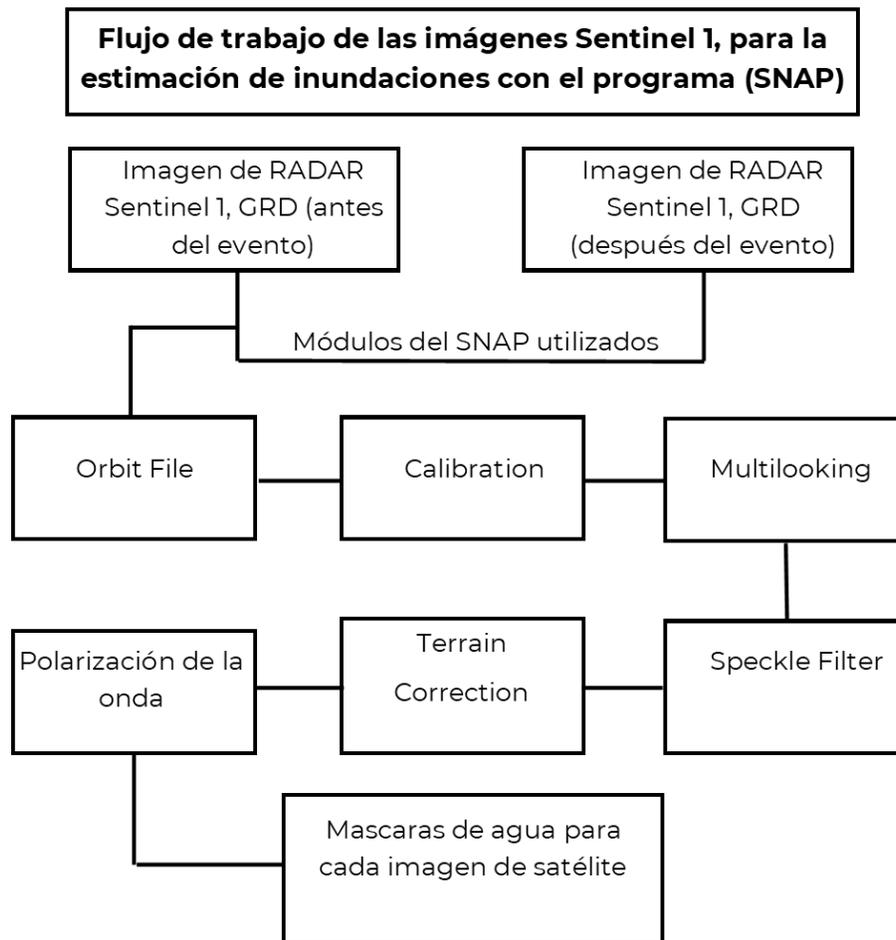


Figura 28. Diagrama de flujo para el procesamiento de imágenes Sentinel 1, para identificar inundaciones por medio de la técnica polarimetría RADAR. Elaboración propia.

A demás de haber generado el software SNAP, la Agencia Espacial Europea dispone del Sentinel 1 Toolbox, una caja de herramientas destinadas al procesamiento de datos de las misiones SAR de la ESA. En Sentinel 1 Toolbox se incluyen herramientas para la calibración, filtrado de manchas, correregistro,

ortorrectificación, creación de mosaicos, conversión de datos, polarimetría e interferometría.

El primer paso después de descargar estas imágenes fue transportarlas al programa SNAP, dentro de este, se pueden arrastrarlas aún en formato *zip*. Una vez abiertas, es posible visualizarlas en un formato “crudo” sin ninguna corrección o tratamiento, como se muestra en las Figuras 29 y 30.

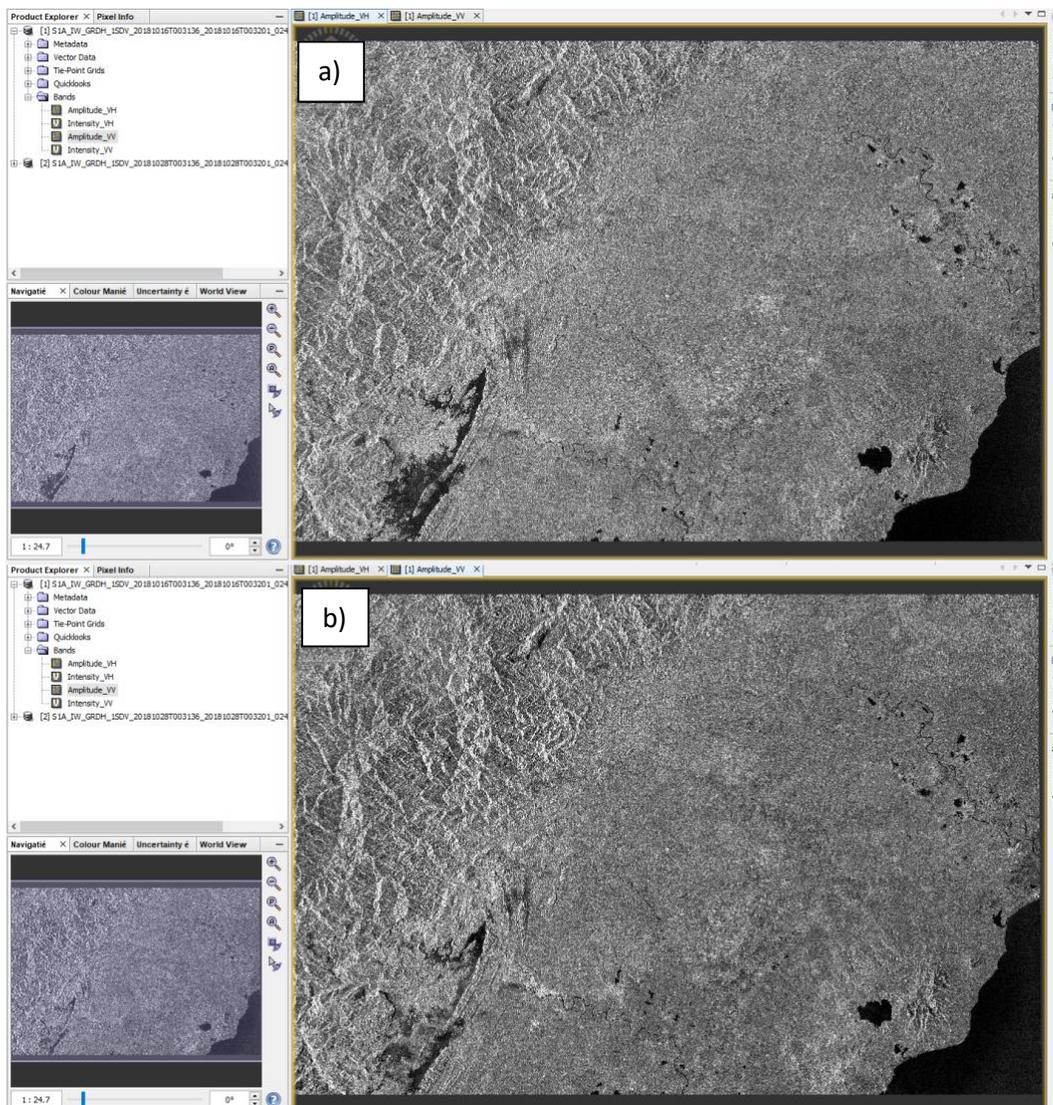


Figura 29. Se muestra la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el Estado de Veracruz, así mismo se visualizan las bandas en polarización VH como VV. Así es como se muestra una imagen Sentinel 1-A, GRD antes de aplicarle alguna corrección o proceso. Elaboración propia.

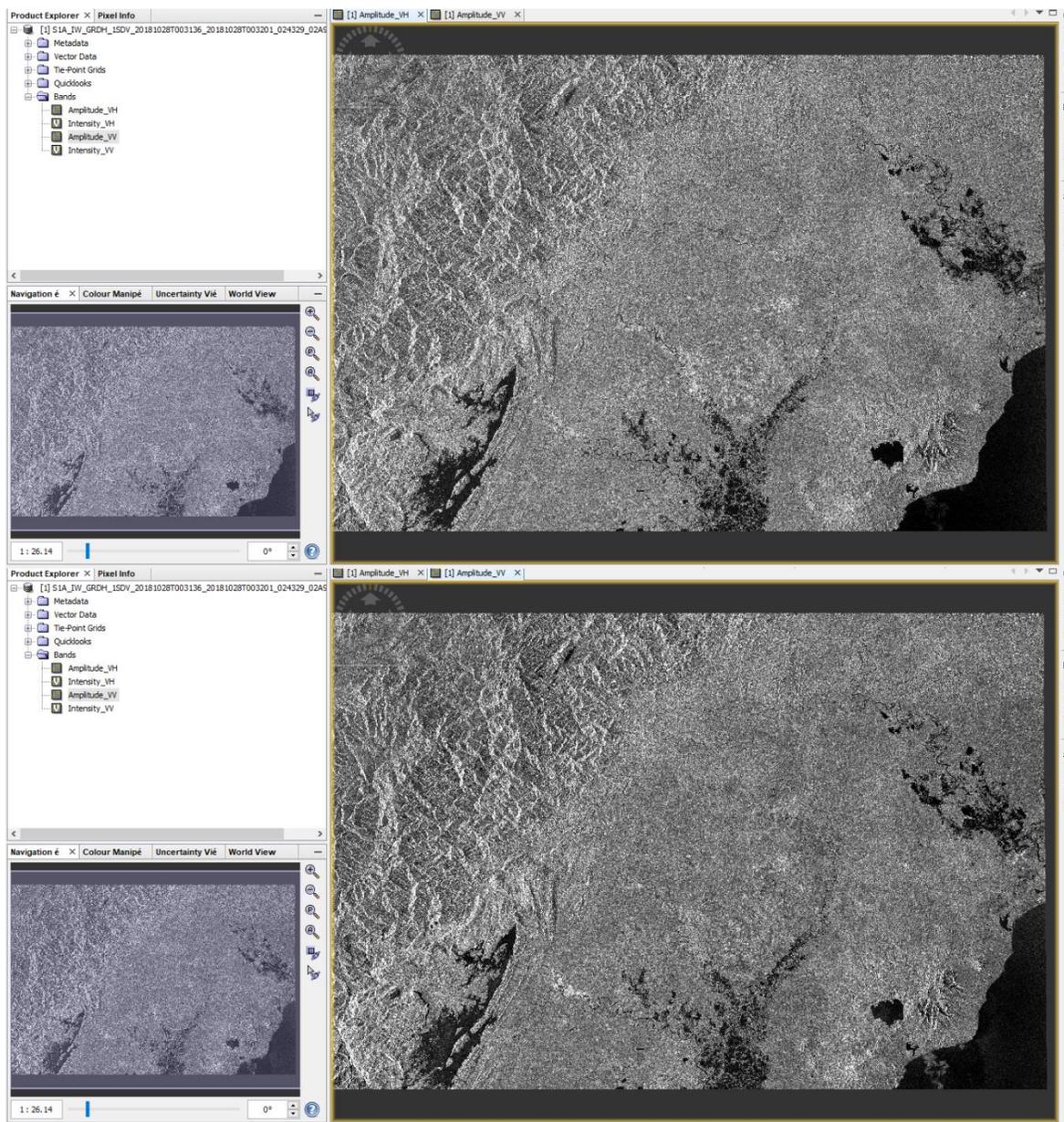


Figura 30. Se muestra la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el Estado de Veracruz, así mismo se visualizan las bandas en polarización VH como VV. Elaboración propia.

Orbit File

Posteriormente el primer comando utilizado dentro del Sentinel 1 Toolbox fue el *Orbit file*. Es necesario realizar este paso debido a que las orbitas precisas de los satélites se determinan y están disponibles días o semanas después de la generación del producto. Para esto, el programa SNAP permite la descarga y actualización automática de los vectores de estado de orbita para proporcionar una información precisa de la posición y velocidad del satélite (Figuras 31 y 32) (Filipponi, 2019).

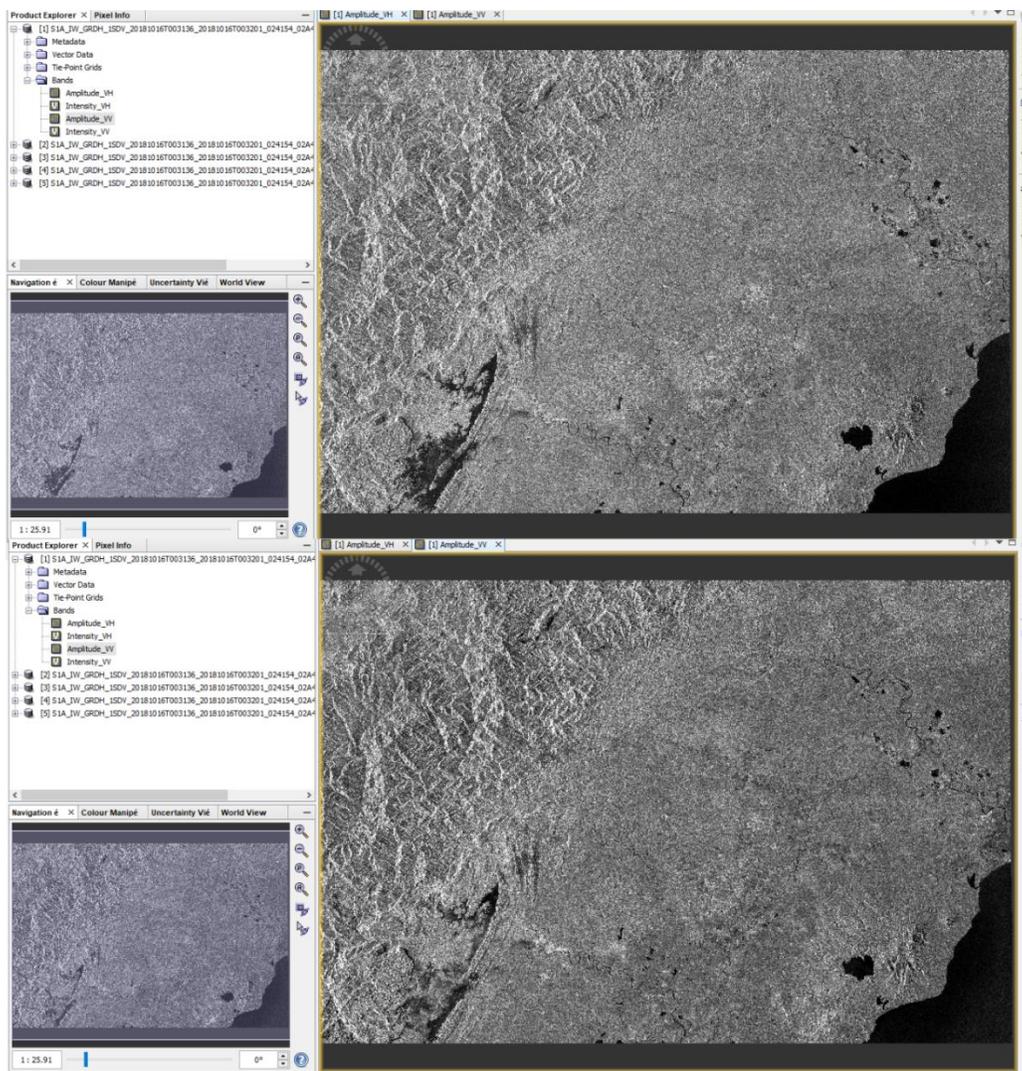


Figura 31. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Orbit File*, este paso provee a la imagen información más precisa sobre los metadatos de las correcciones orbitales. Elaboración propia.

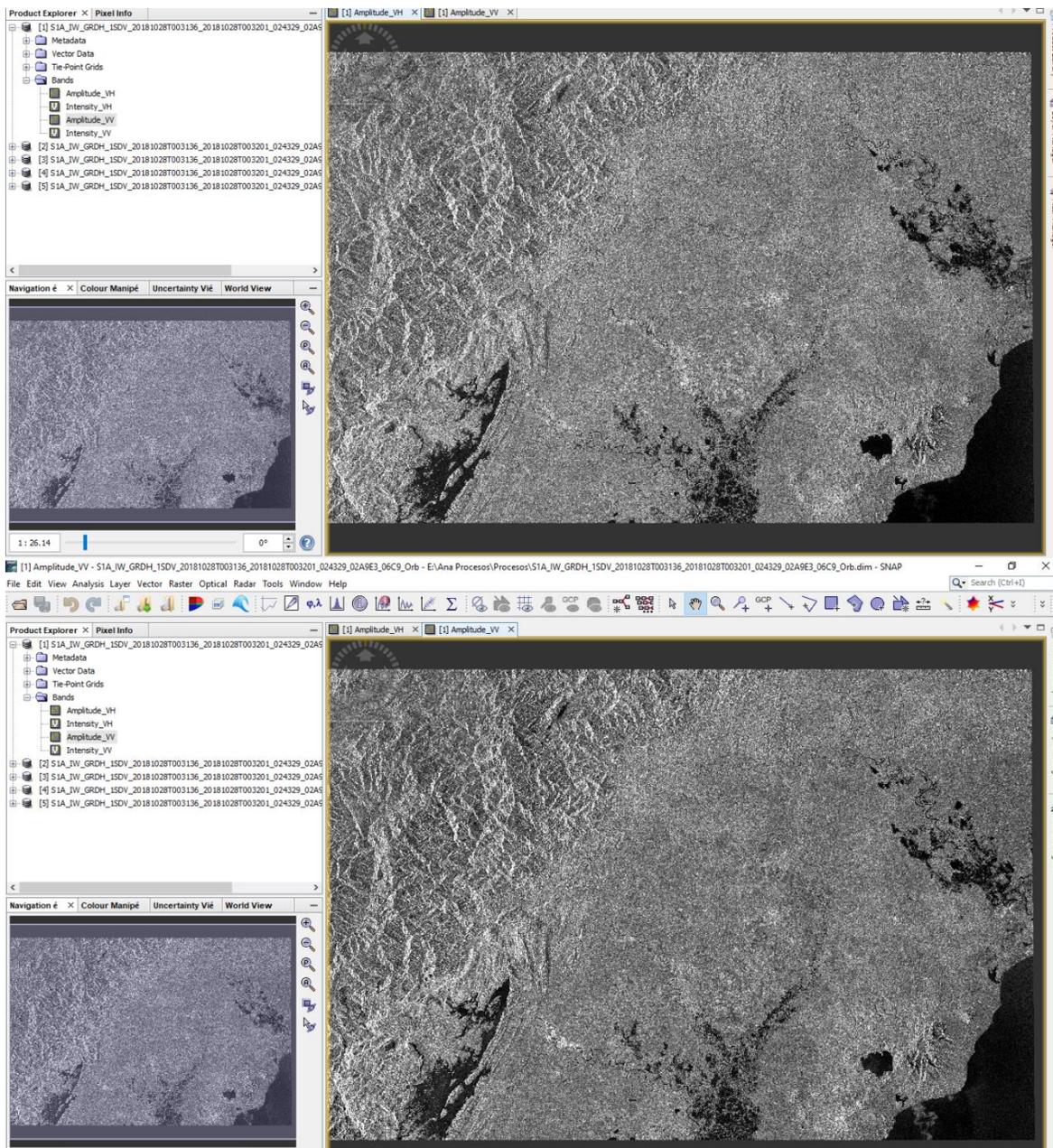


Figura 32. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Orbit File*, este paso provee a la imagen información más precisa sobre los metadatos de las correcciones orbitales. Elaboración propia.

Calibration

La presencia de distorsiones radiométricas se debe principalmente a la pérdida de la señal al propagarse, el patrón no uniforme de radiación de la antenna, las diferencias en cambios de ganancia, la saturación y el ruido de speckle (National Aeronautics and Space Administration, 2016).

La calibración radiométrica se utiliza para ajustar los posibles cambios temporales en la ganancia de la antenna, además de mejorar las condiciones de saturación de la señal. Durante este procesamiento son convertidos los valores de amplitud de cada pixel en valores de coeficiente o de brillo, como se muestra en las Figuras 33 y 34, es decir, elimina valores altos debido a la perturbación de la señal en áreas con topografía compleja (Filipponi, 2019; Fernández et al., 2019; Hernández, 2018).

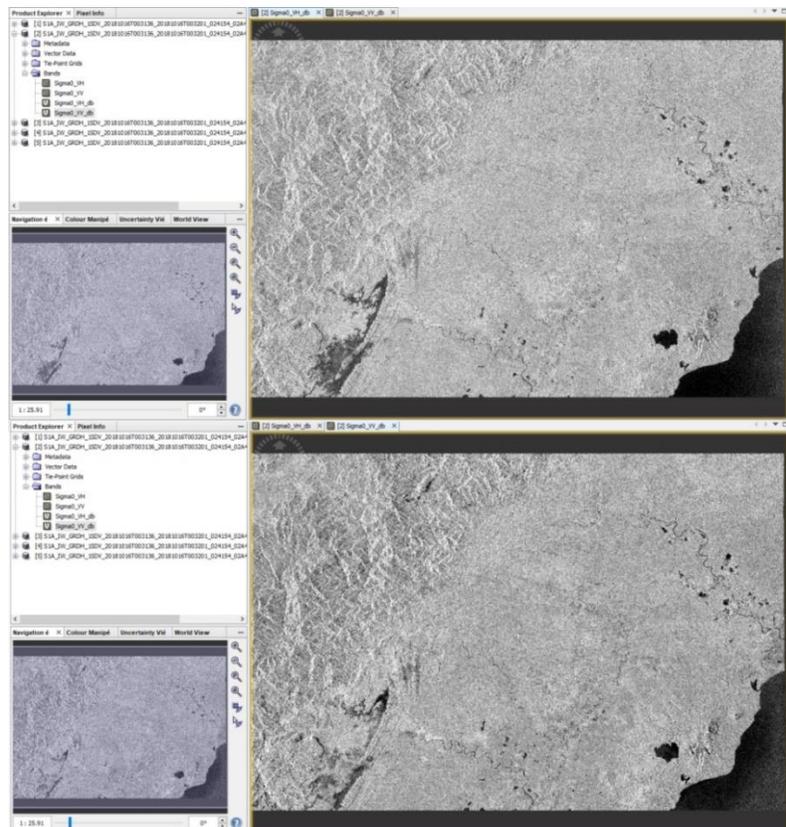


Figura 33. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado la calibración radiométrica. Durante este paso el vector de calibración incluido en el producto Sentinel 1 GRD permite la conversión simple de los valores de intensidad en valores sigma cero. Elaboración propia.

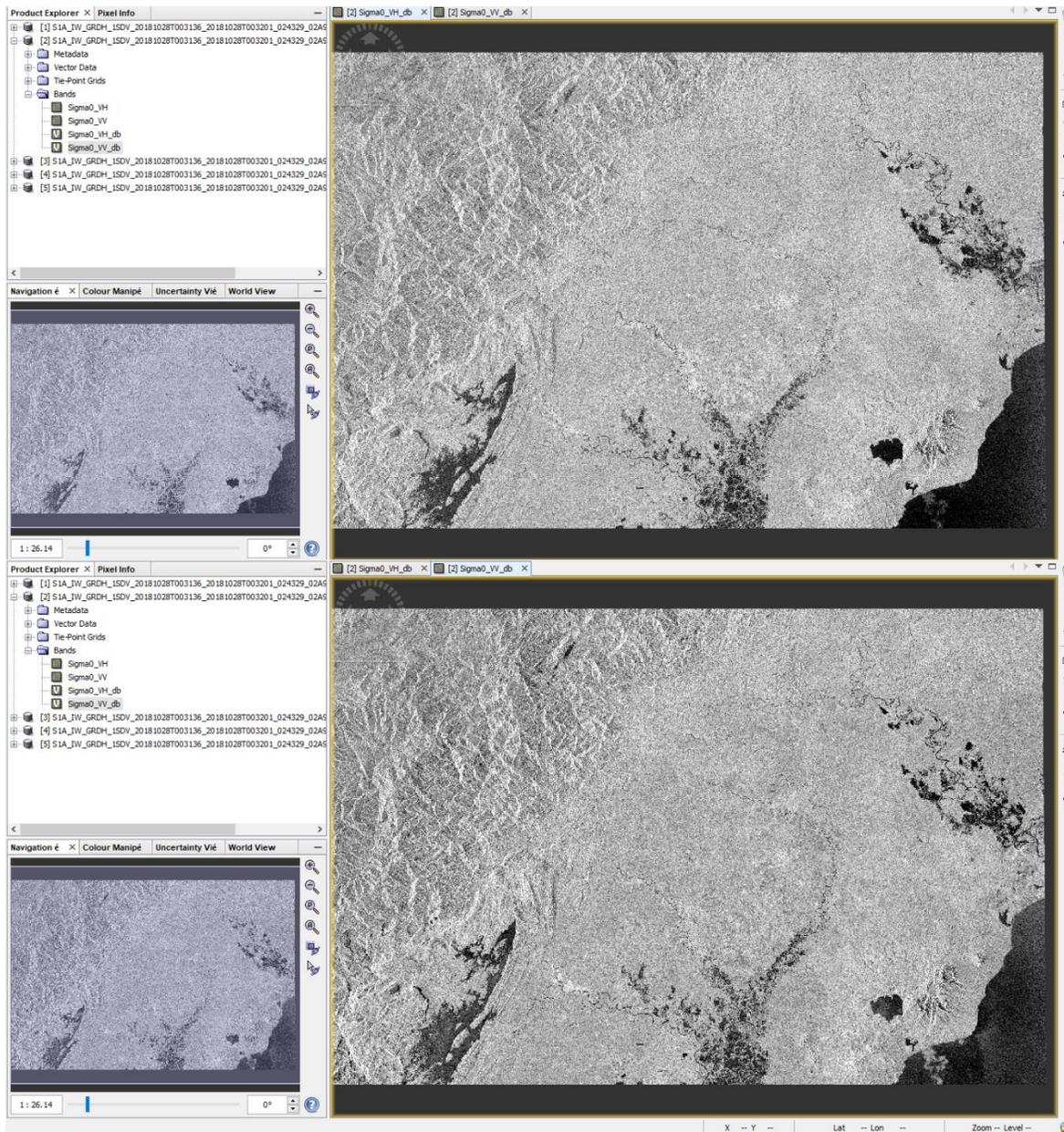


Figura 34. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado la calibración radiométrica. Durante este paso el vector de calibración incluido en el producto Sentinel 1 GRD permite la conversión simple de los valores de intensidad en valores sigma cero. Elaboración propia.

Multilooking

De acuerdo con Fernández et al., (2019), el multilooking consiste en dividir el haz del RADAR en varios subhaces (más angostos). Cada subhaz proporciona un look independiente al área iluminada. Este paso se puede utilizar para generar un producto con un tamaño de pixel de imagen nominal (Figuras 35 y 36), mejorando así también la resolución radiométrica, aunque se ve afectada en menor medida la resolución de la imagen (ESA, 2021).

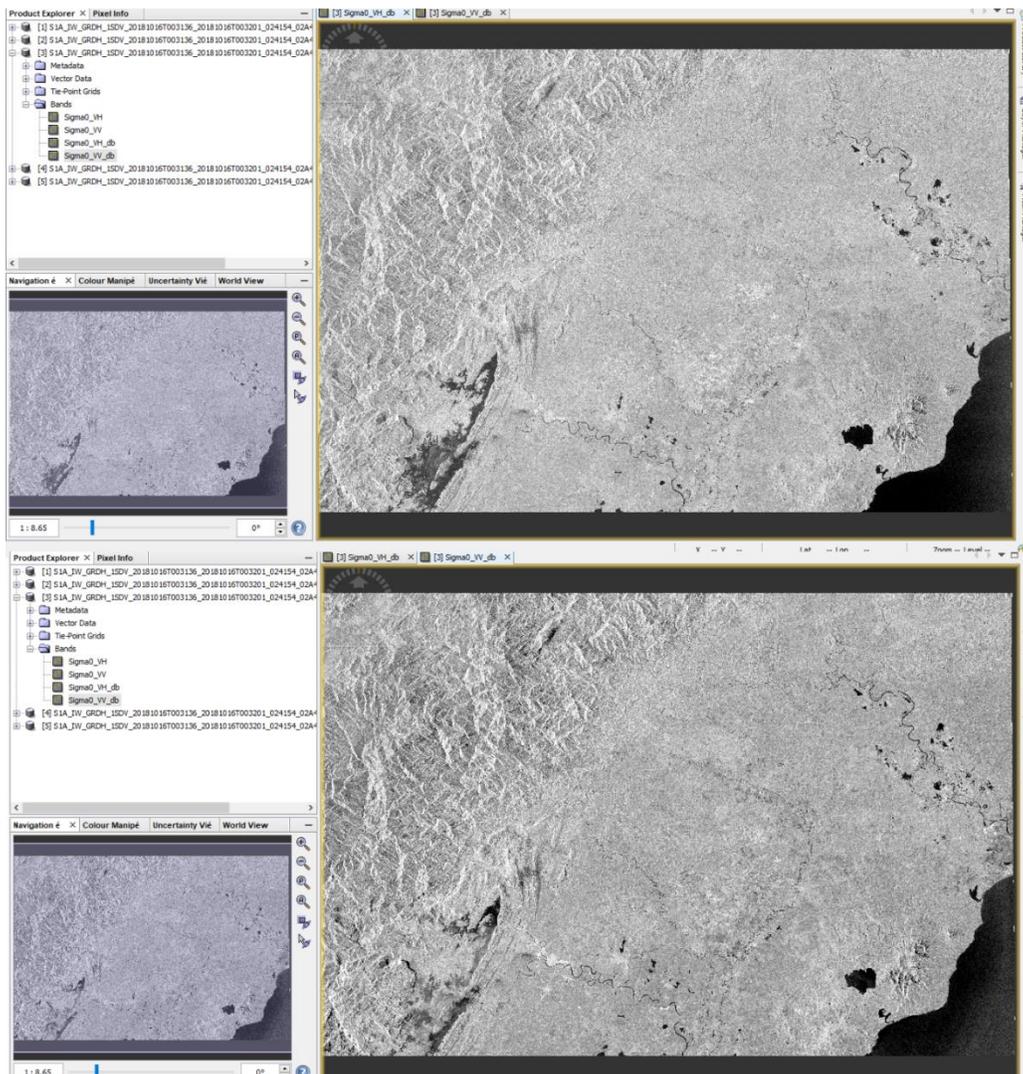


Figura 35. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Multilook*. Como resultado de este proceso, la imagen nueva contiene menos ruido y una mejor geometría Fuente: Introduction to Interpreting Digital RADAR Images, 2012. Elaboración propia.

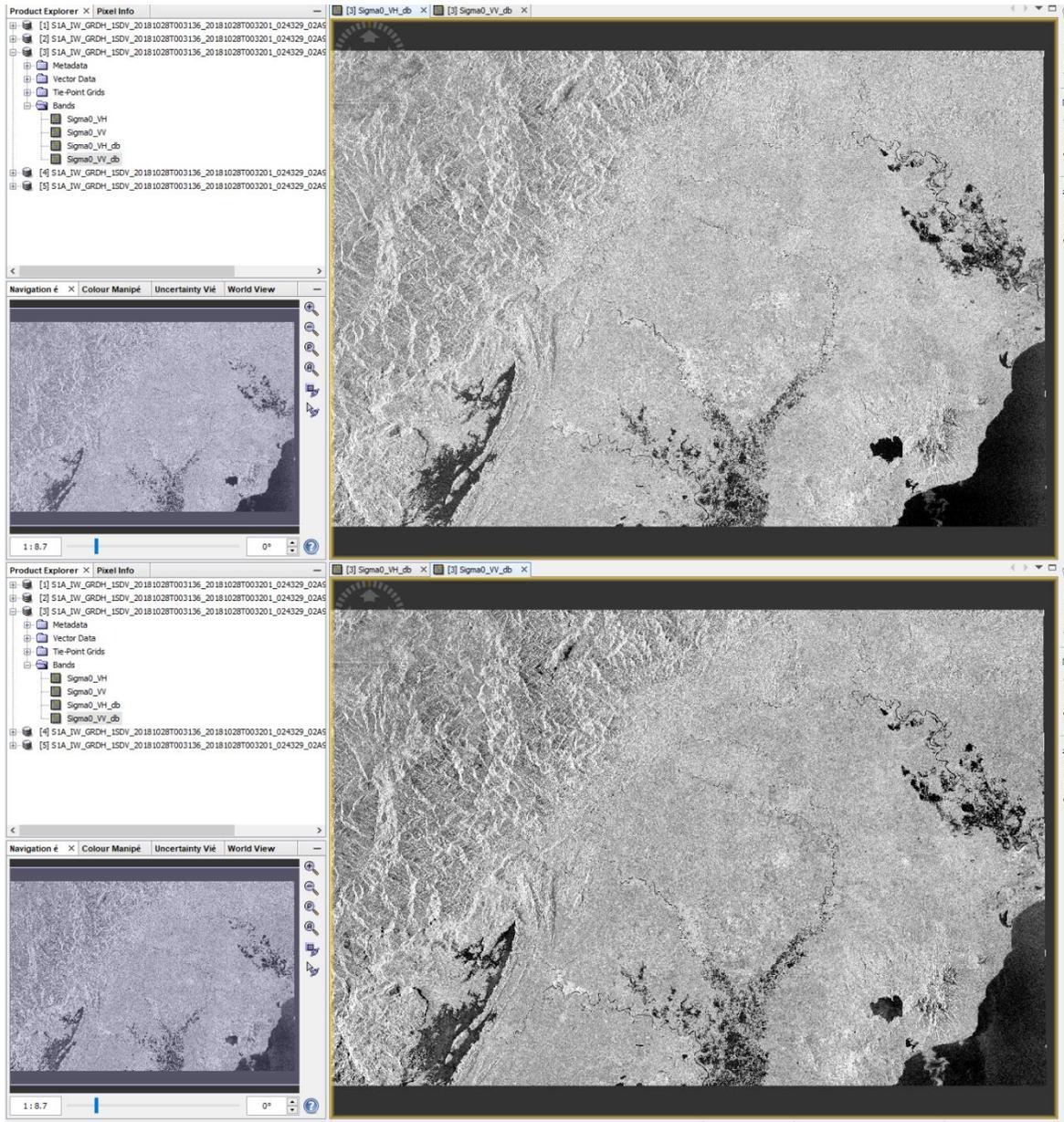
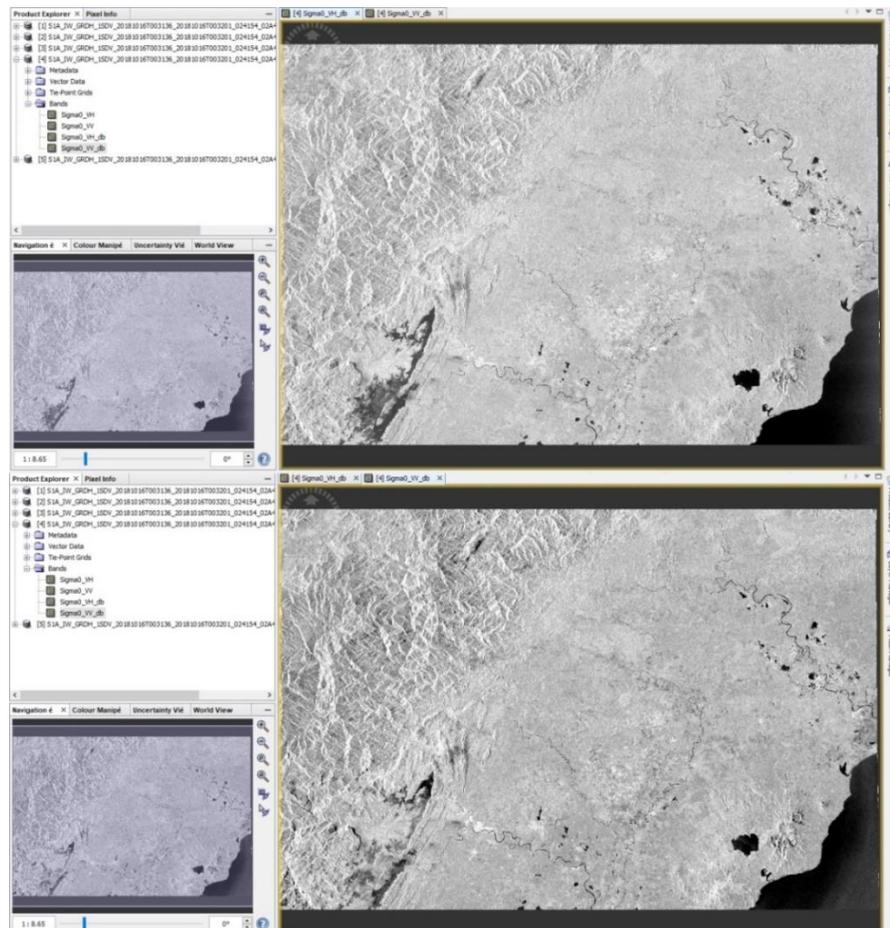


Figura 36. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Multilook*. Como resultado de este proceso, la imagen nueva contiene menos ruido y una mejor geometría Fuente: Introduction to Interpreting Digital RADAR Images, 2012. Elaboración propia.

Speckle Filtering

El *speckle* se refiere al ruido¹⁴ que se manifiesta en las imágenes SAR y se visualiza como puntos claros y oscuros, este ruido es originado por la retrodispersión de la señal de RADAR y su interacción con los objetos en la superficie, provocando una distorsión en la información de la imagen. Aunque el procesamiento *Multilook* reduce este ruido no lo elimina por completo, por ello es necesario utilizar un filtro para reducir aún más este efecto (Fernández et al., 2019; Smith, 2012). De acuerdo con Flipponi (2019), el filtro Lee parece tener mejores resultados, con respecto a otros filtros moteados de un solo producto, para la interpretación visual, debido a su capacidad para preservar los bordes, las características lineales y la información de objetivo de punto y textura.



¹⁴ El ruido se refiere a una distorsión que degrada la calidad de las imágenes SAR. Se produce por la dispersión de la señal que ocasionan los objetos que hay en el área de iluminación del RADAR.

Figura 37. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Speckle Filtering*. Como resultado de este filtro se aumenta la calidad de la imagen al reducir el efecto granular en la misma. Fuente: Introduction to Interpreting Digital RADAR Images, 2012. Elaboración propia.

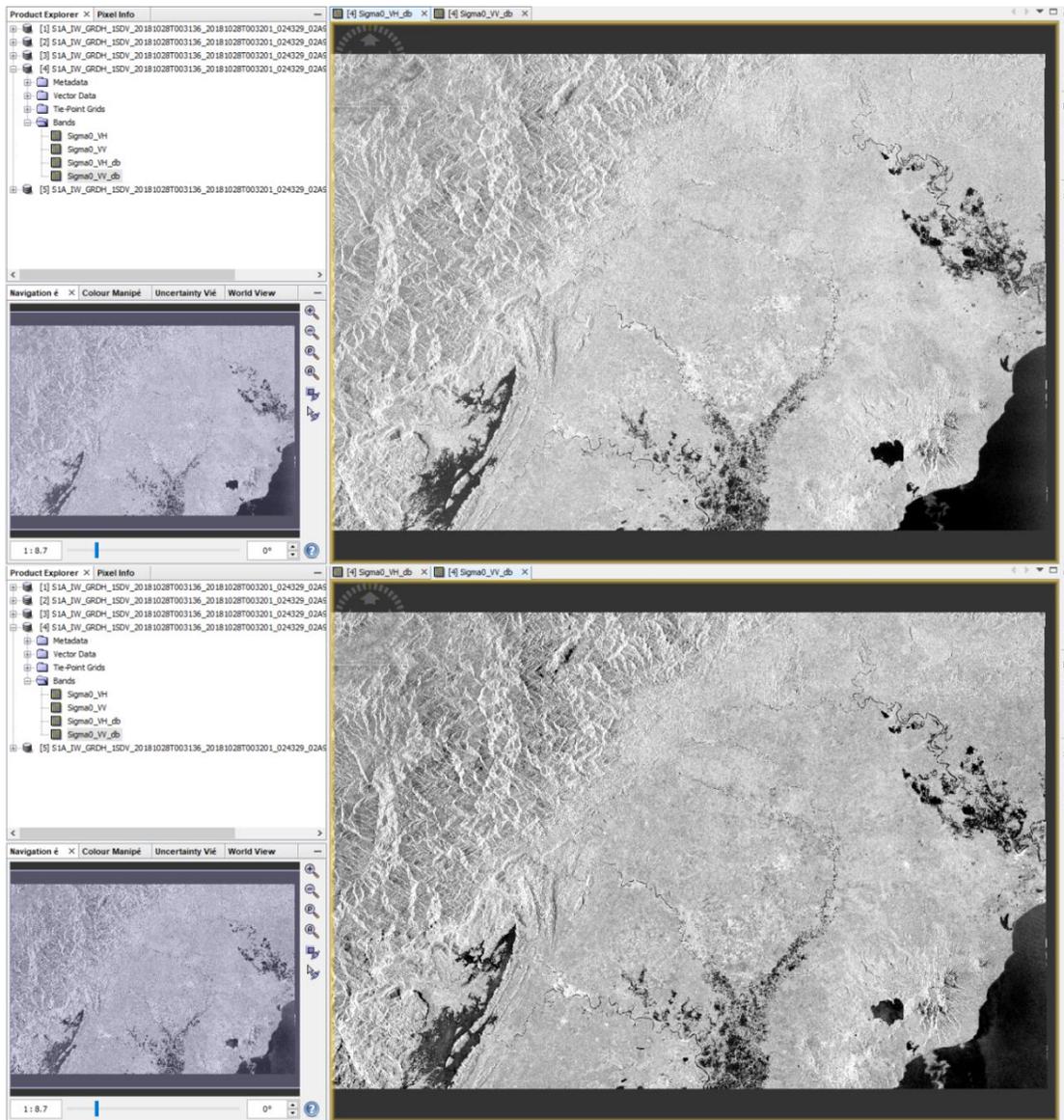


Figura 38. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Speckle Filtering*. Como resultado de este filtro se aumenta la calidad de la imagen al reducir el efecto granular en la misma. Fuente: Introduction to Interpreting Digital RADAR Images, 2012. Elaboración propia.

Terrain Correction

Uno de los pasos finales dentro del programa SNAP fue aplicar una corrección geométrica. Las imágenes de RADAR se adquieren como imágenes con un ángulo de visión variable, que distorsiona las posiciones relativas de las características del suelo. Estas distorsiones se deben principalmente al rango oblicuo, la inversión del relieve, las sombras y al desplazamiento del sensor frente al nadir. Por ello es necesario compensar estas distorsiones para que la representación geométrica de la imagen (Figuras 39 y 40) sea lo más parecida a las características reales de la superficie terrestre. Al utilizar la corrección de terreno de rango Doppler se implementa un método de ortorectificación con el apoyo de un modelo digital de elevación (Fernández et al., 2019; Smith, 2012).

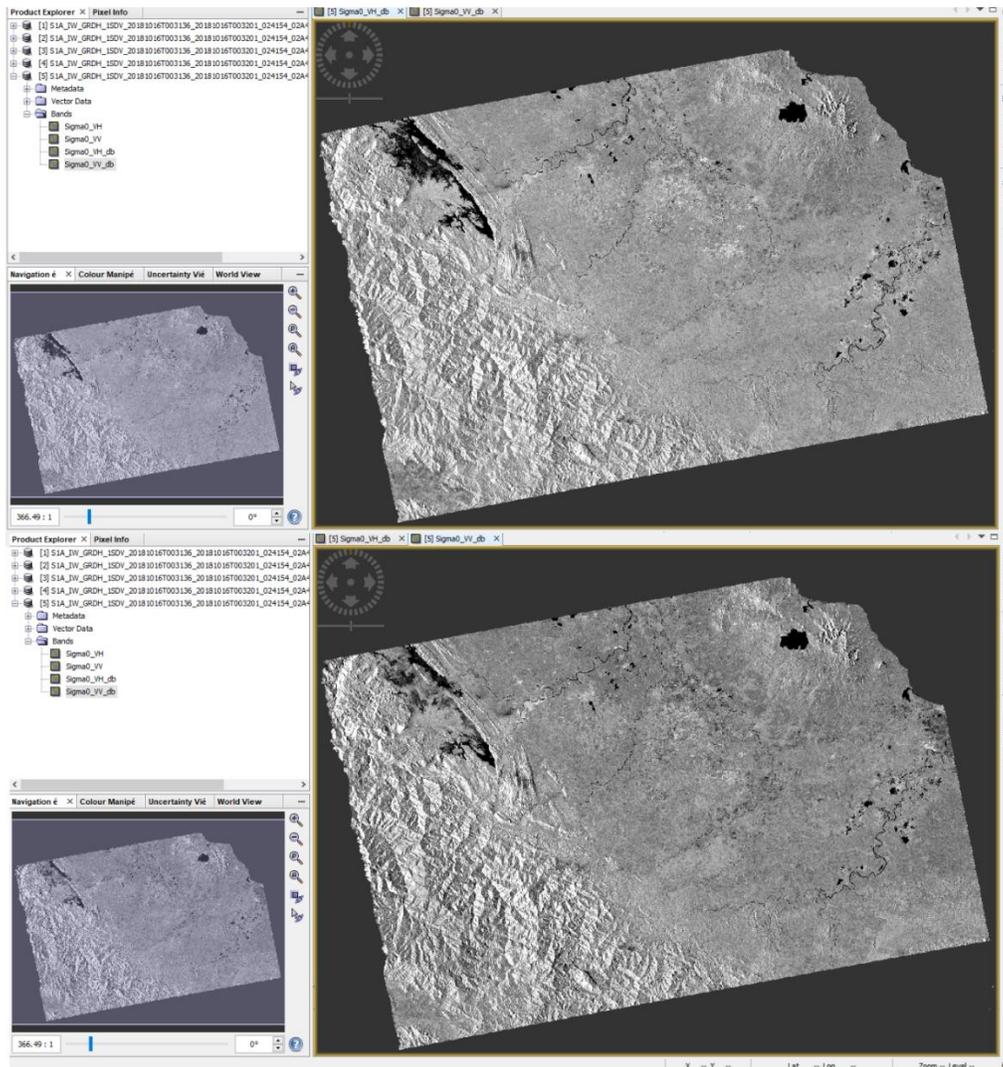


Figura 39. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Terrain Correction*. Se muestra como la imagen está orientada de manera correcta, debido a que ya cuenta con un sistema de coordenadas (Veci, Braun, 2021). Elaboración propia.

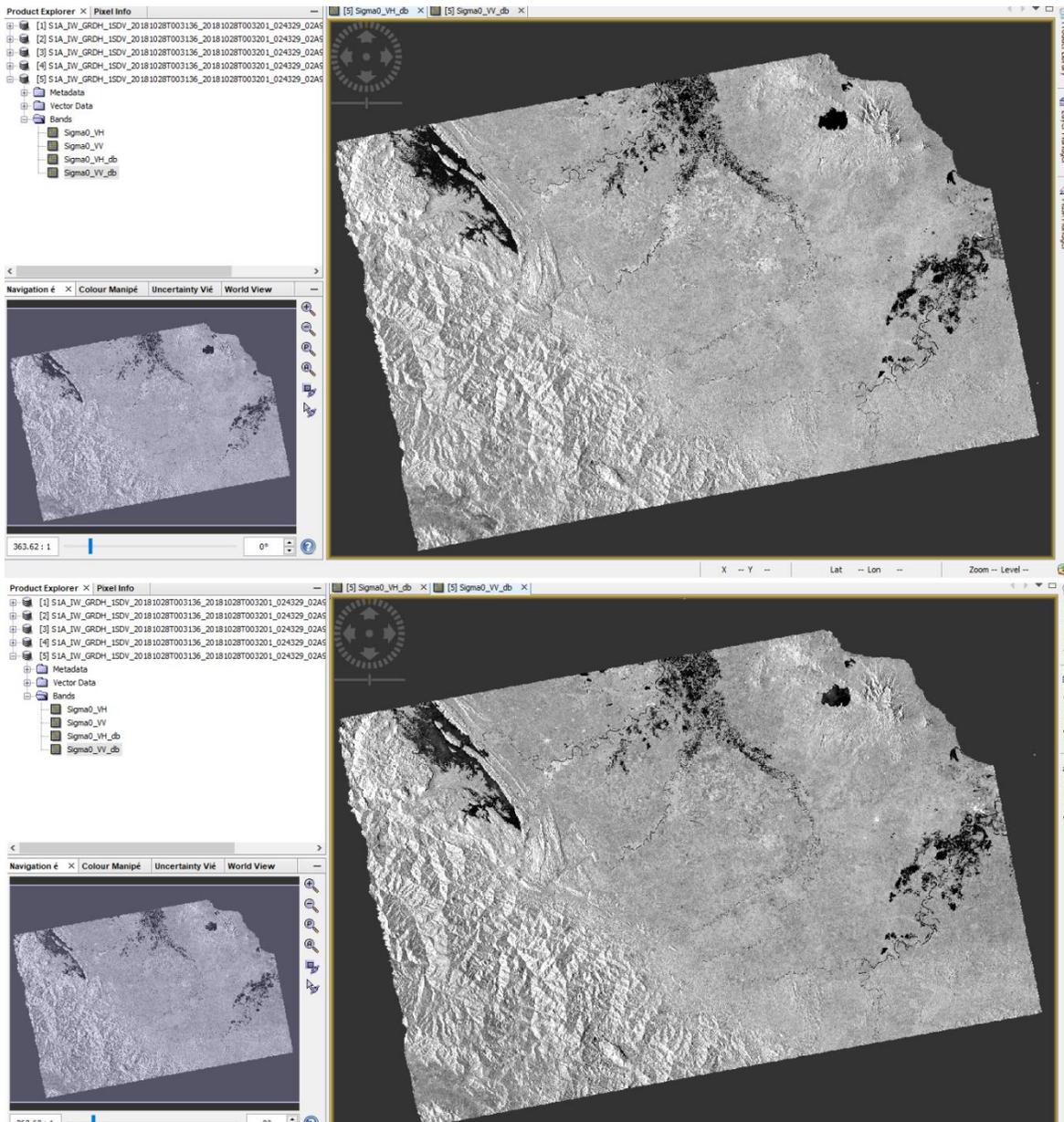


Figura 40. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el estado de Veracruz, después de haberle aplicado el *Terrain Correction*. Se muestra como la imagen está orientada de manera correcta, debido a que ya cuenta con un sistema de coordenadas (Veci, Braun, 2021). Elaboración propia.

4.5 Resultados

Una vez realizado el preprocesamiento de cada imagen, se llevó a cabo la conversión de bandas; en este paso se cambiaron valores de sigma a decibeles, de esta forma se representan los valores de retrodispersión. Dentro de las imágenes de RADAR cada pixel representa la retrodispersión normalizada de un área en la superficie; cuando son observadas áreas oscuras estas indicaran valores bajos por la escasa energía devuelta al RADAR y las áreas más brillantes representarían valores altos debido a que una porción importante de energía fue rebotada de vuelta (Fernández, et al., 2019).

Posterior a este paso, fueron exportadas estas imágenes en formato GeoTIFF. A continuación, se presentan las seis imágenes Sentinel 1 (Figuras 41, 42, 43, 44, 45 y 46), posterior a la metodología antes mencionada.

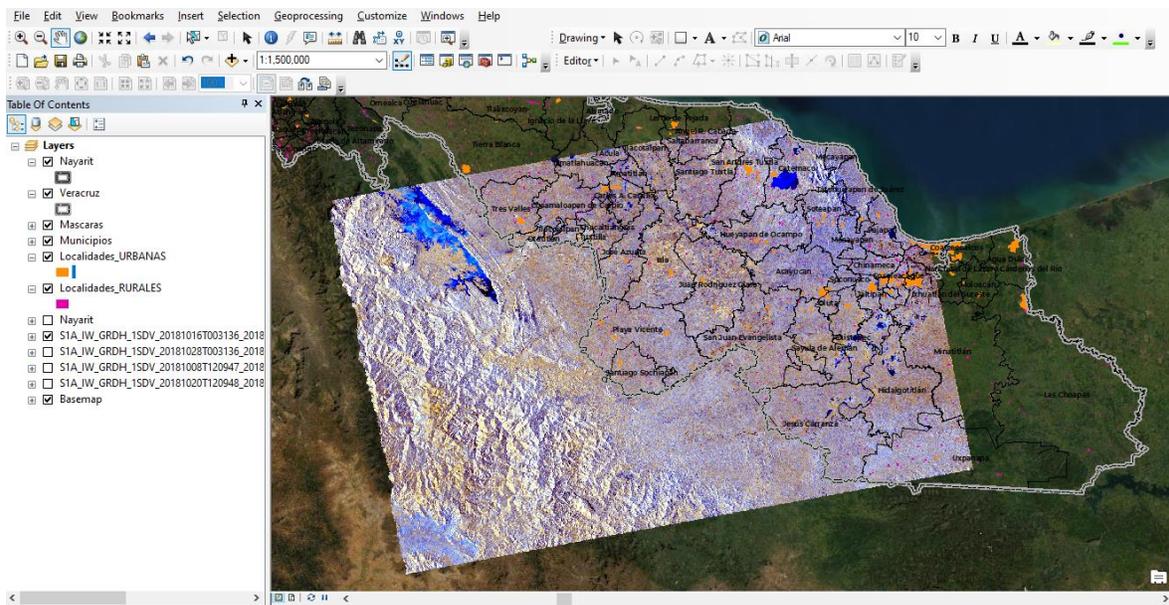


Figura 41. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/16) en el estado de Veracruz dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

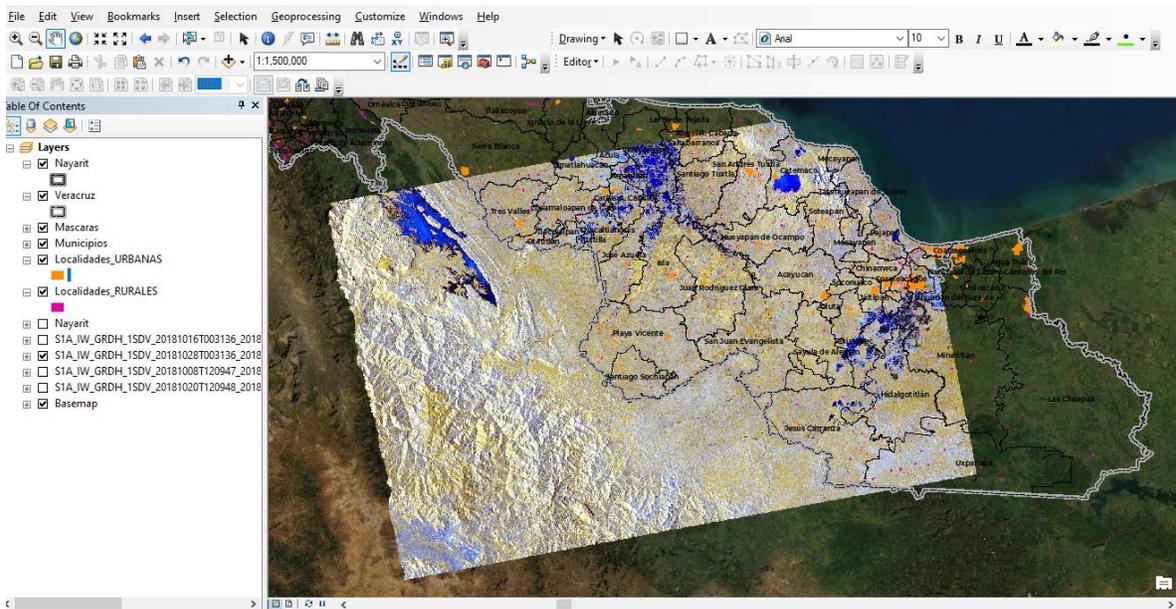


Figura 42. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/28) en el estado de Veracruz dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

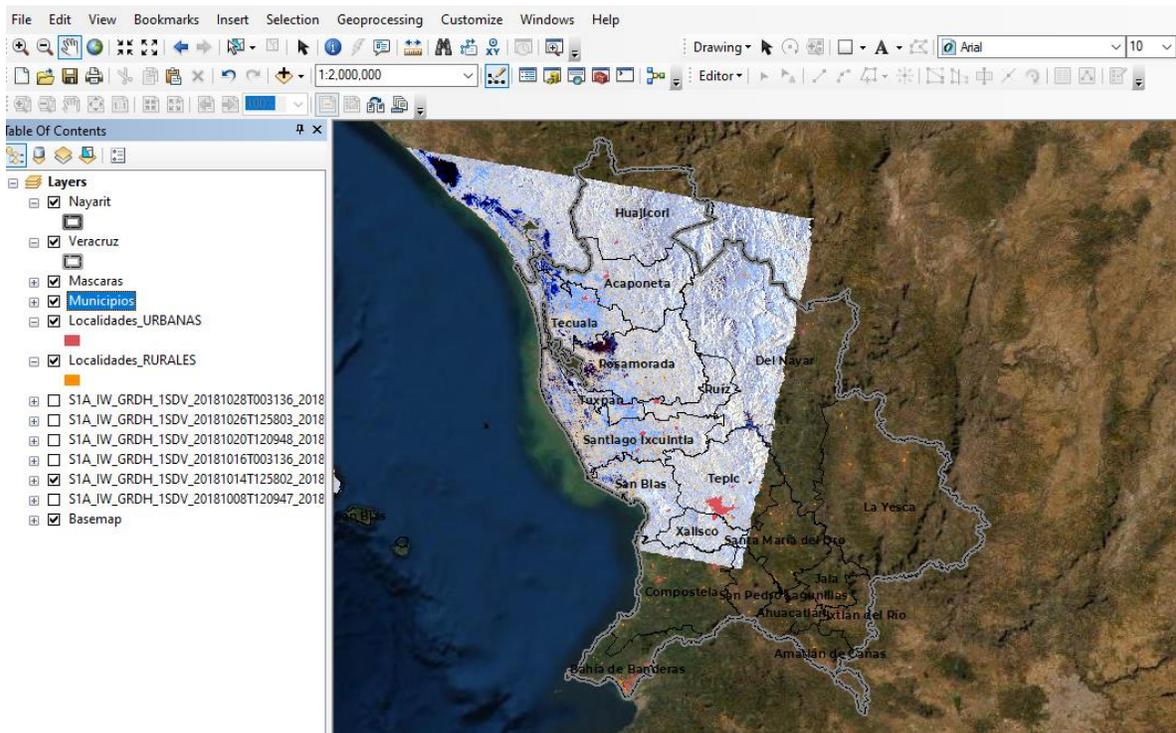


Figura 43. Se visualiza la imagen previa a las inundaciones (2018/10/14) en el estado de Nayarit dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

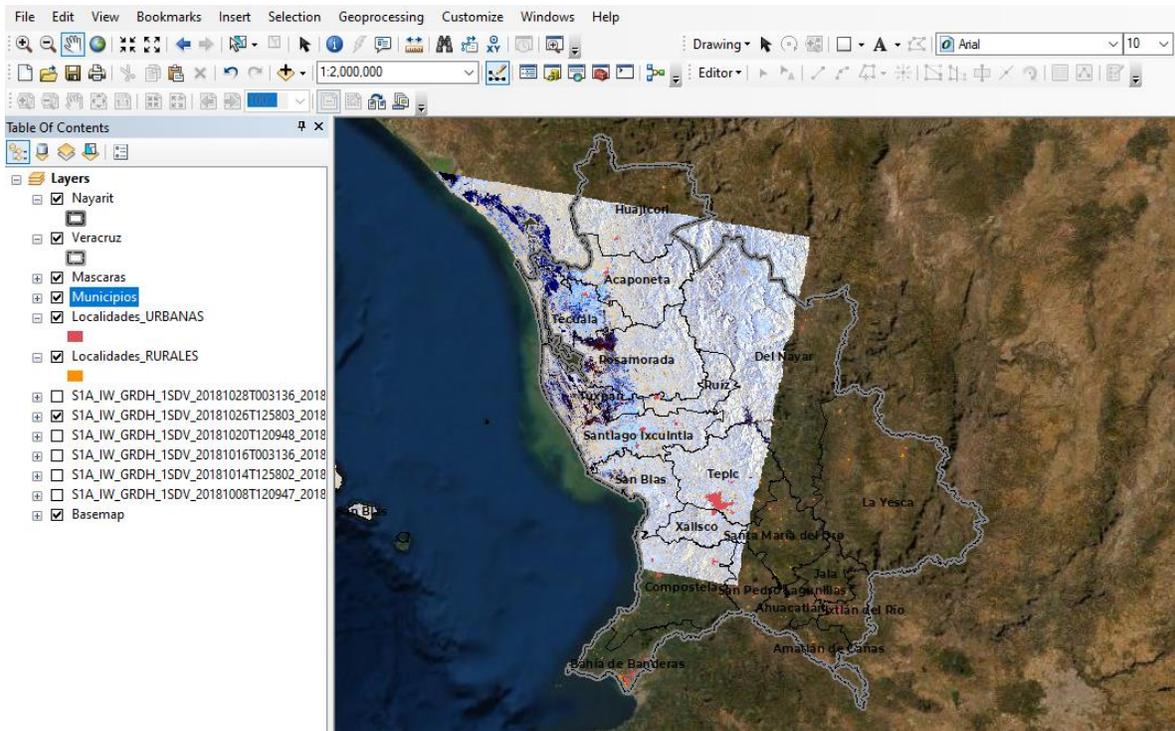


Figura 44. Se visualiza la imagen durante las inundaciones (2018/10/26) en el estado de Nayarit dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

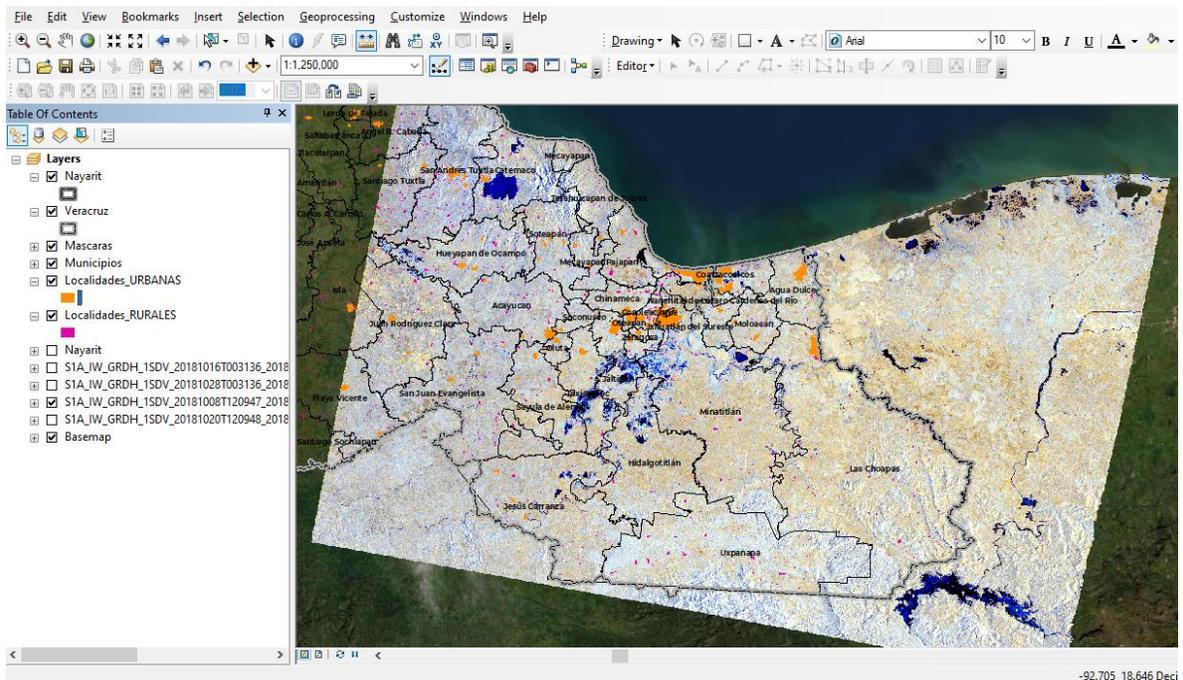


Figura 45. Se visualiza la imagen del segundo par de imágenes antes de las inundaciones (2018/10/08) en el estado de Veracruz, dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

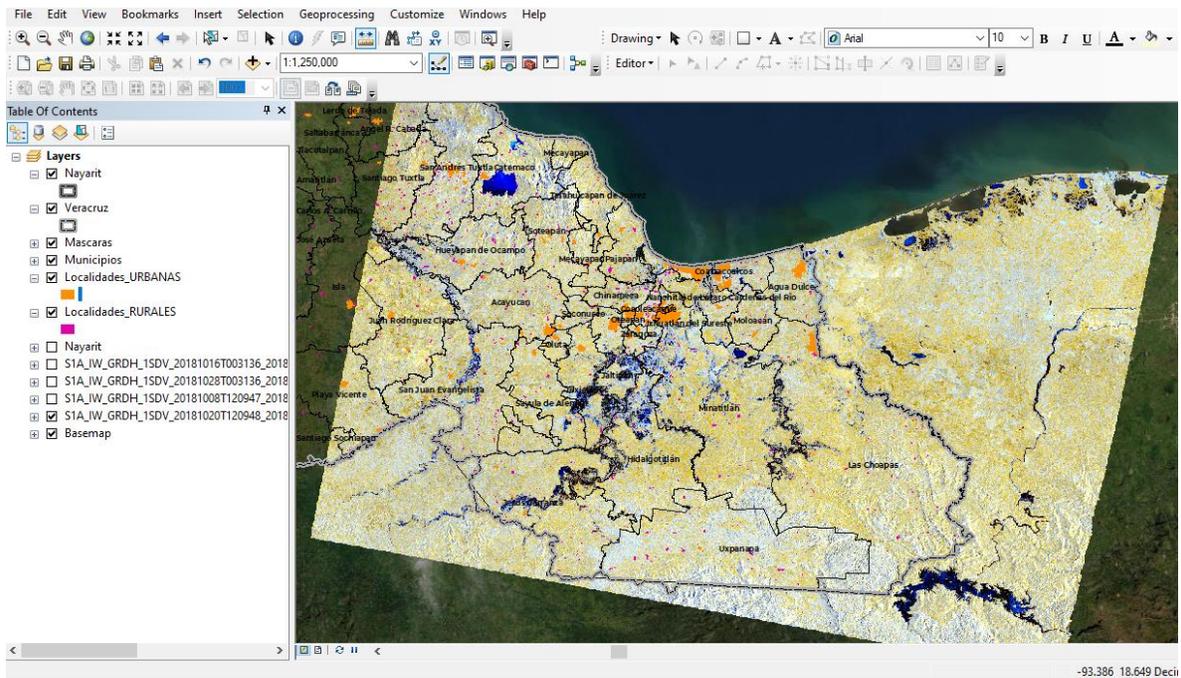


Figura 46. Se visualiza la imagen del segundo par de imágenes antes de las inundaciones (2018/10/20) en el estado de Veracruz, dentro del programa ArcGIS, posterior a su preprocesamiento y conversión a imagen RBG. Elaboración propia.

Finalmente, para cada par de imágenes fueron generadas las máscaras de agua correspondientes a cada inundación (Figura 47). Mediante el programa SNAP se llevó a cabo un análisis del histograma para poder identificar el umbral que separa las zonas con presencia de agua y las que no. Una vez obtenida la máscara de agua de cada imagen se procedió a exportarla en formato GeoTIFF para su manipulación en el programa ArcGIS.

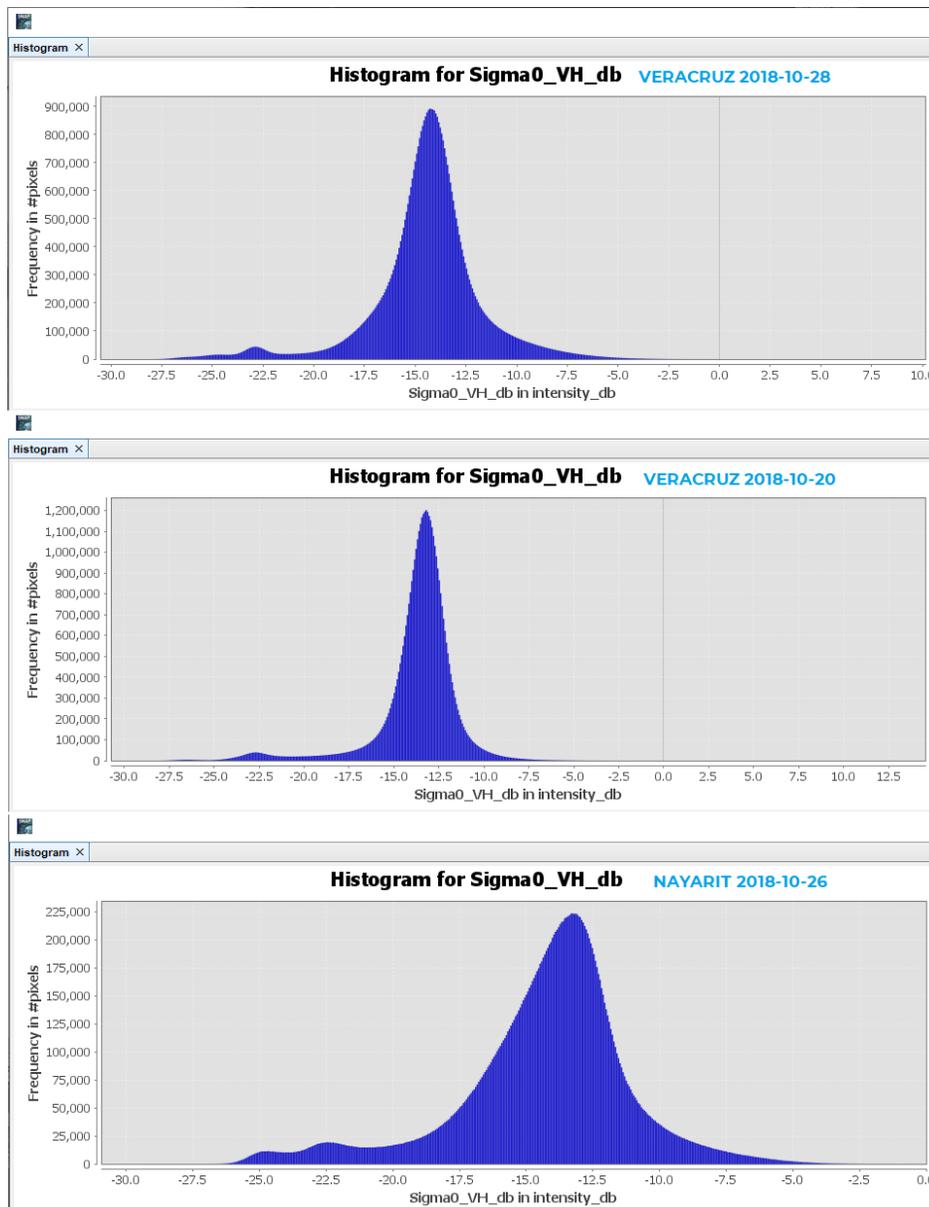


Figura 47. Se muestran los histogramas correspondientes de cada imagen durante el evento de inundación. Los cuales sirvieron para discriminar las zonas inundadas.

En lo que respecta al estado de Nayarit; se calculó una superficie inundada de 476 km², con relación a la superficie total del estado corresponde al 1.7 % del territorio. Derivado del desbordamiento del río San Pedro, en el municipio de Tuxpan se realizó una evacuación de 2,000 personas, así mismo los municipios de Rosamorada, Ruíz y Santiago Ixcuintla resultaron afectados en cuanto al sector agrícola, ganadero y de infraestructura.

Estimación de áreas inundadas en el estado de Nayarit, mediante imágenes de satélite Sentinel 1

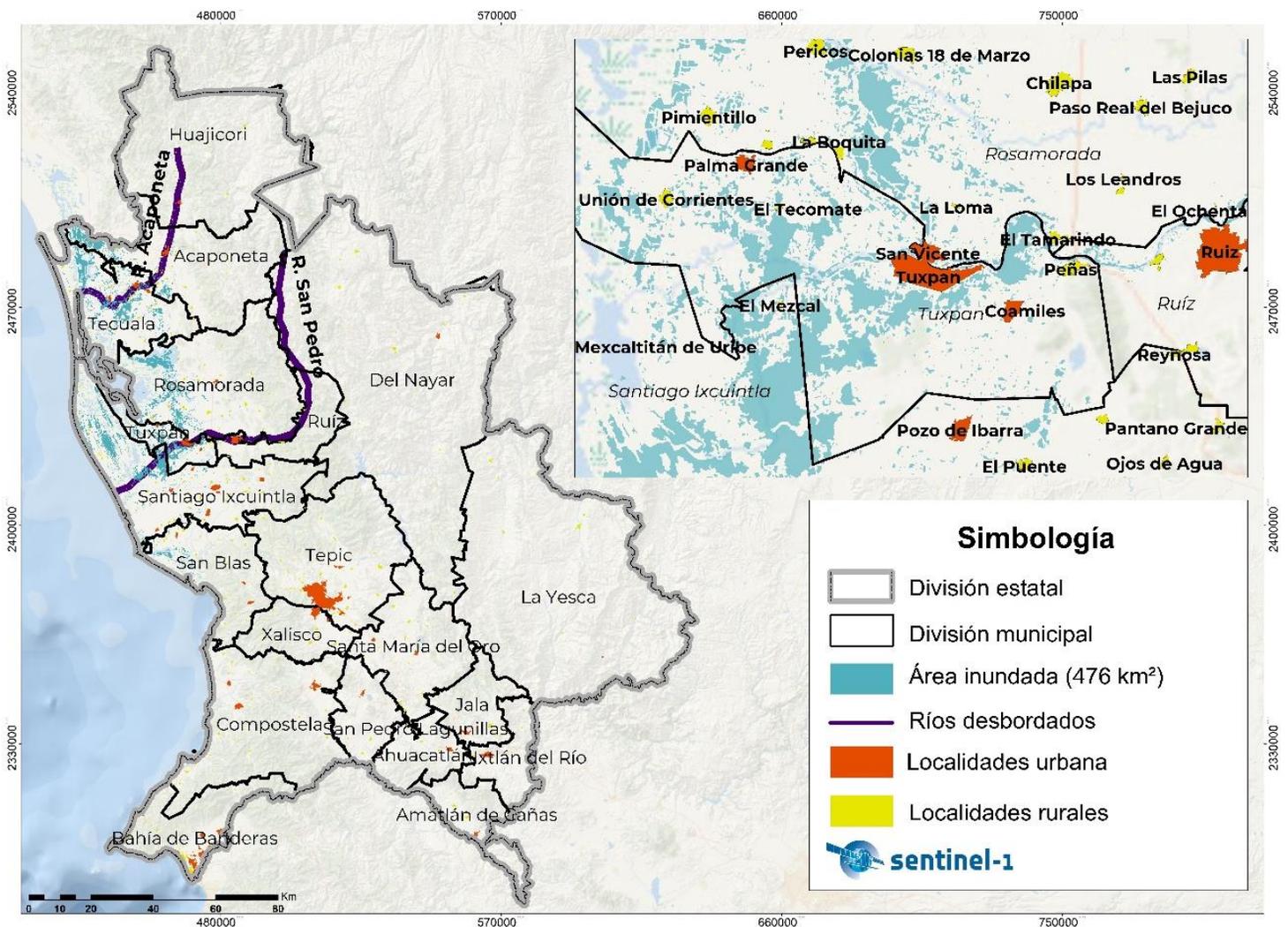


Figura 48. Se muestra el área de inundación estimada del estado de Nayarit; así mismo se muestra la afectación entre los municipios de Tuxpan y Rosamorada. De acuerdo con información documental, el agua permaneció estancada hasta 48 horas en las partes bajas del municipio. Elaboración propia.

En Veracruz, el área inundada estimada fue de 670 km² lo que corresponde al 0.9 % del total del territorio del estado. En dicha entidad el municipio de Carlos A. Carrillo fue uno de los más afectados, resultado del desbordamiento de los ríos Papaloapan y Tesechoacan. En donde quedaron damnificadas un aproximado de 800 familias y la estimación de daños en cultivos.

Estimación de áreas inundadas en el estado de Veracruz, mediante imágenes de satélite Sentinel 1

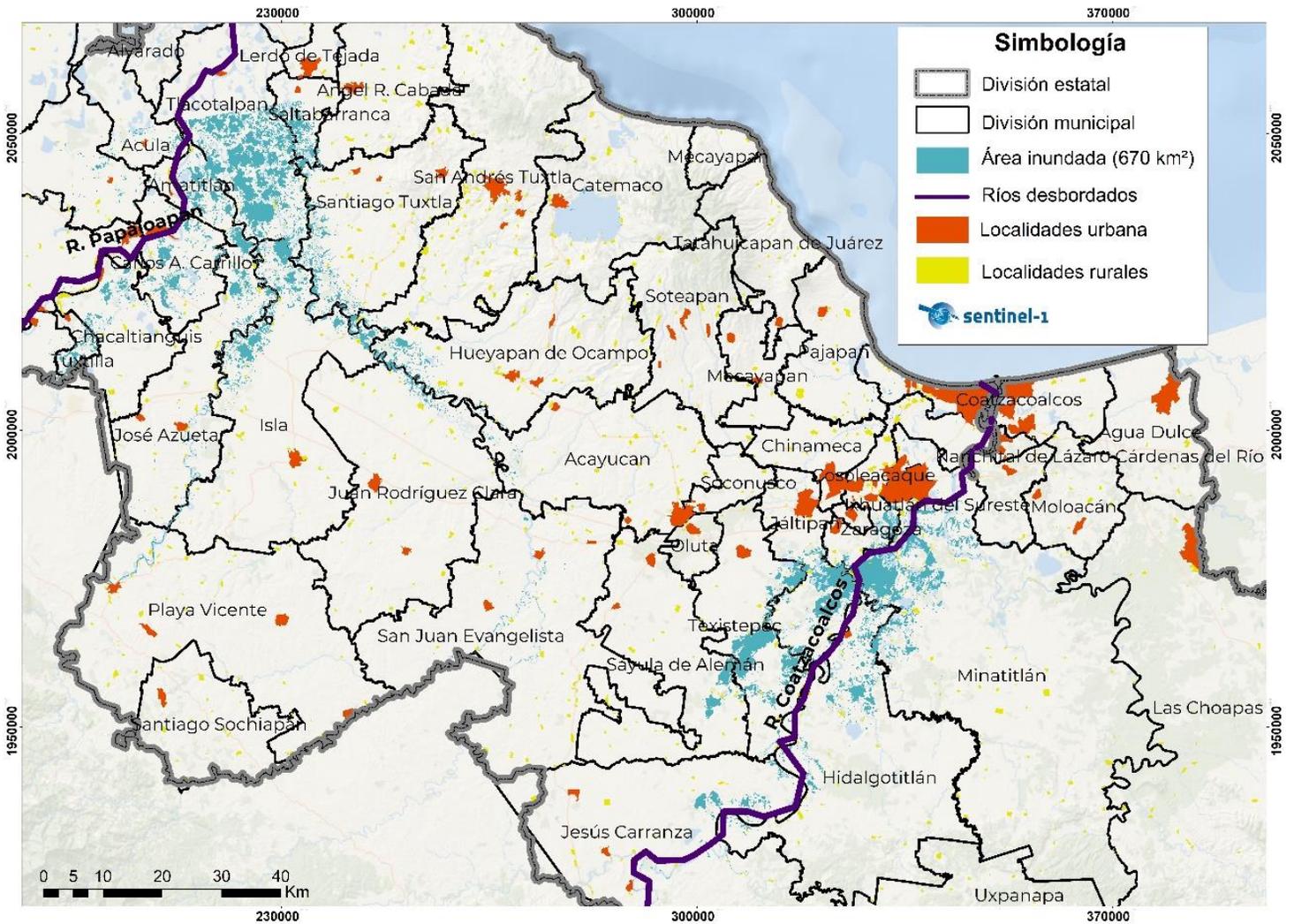


Figura 49. Inundación estimada en el estado de Veracruz; la zona rural fue la más afectada durante este fenómeno. Mediante la declaratoria de emergencia se obtuvieron recursos por medio del FONDEN, los cuales fueron destinados para atender las necesidades alimenticias y de salud de la población afectada.

Elaboración propia.

Conclusiones

Año con año en nuestro país se desarrollan fenómenos hidrometeorológicos tanto en la zona del Pacífico como en el Golfo, que, ante la vulnerabilidad histórica de las comunidades originan desastres que traen consigo cuantiosas pérdidas humanas y económicas, afectando así poblaciones y ciudades enteras.

Autores como Arreguín, et al., (2016), mencionan que las afectaciones ambientales provocadas por las actividades humanas también han ocasionado un incremento en la intensidad de lluvias y ocurrencia de ciclones tropicales más intensos. Determinar el costo de las inundaciones puede resultar complejo debido a la diversidad de daños que pueden ocasionar, el impacto en zonas urbanas, la afectación a zonas agrícolas, industriales y comerciales, son solo algunas de las vertientes que conlleva el impacto de este fenómeno. Por eso existe un interés cada vez mayor con relación al aprovechamiento y producción de información geoespacial, proveniente de diversas constelaciones satelitales.

Desde su implementación, las imágenes de satélite de tipo óptico han sido relevantes por la información que proveen para el conocimiento de las condiciones y características terrestres, sin embargo, se han visto limitadas en zonas donde generalmente existe la presencia de nubosidad o importantes perturbaciones atmosféricas. Actualmente el uso de imágenes de tipo SAR ha destacado como una mejor herramienta para el estudio de los recursos naturales terrestres, y el monitoreo de fenómenos naturales, como es el caso de las inundaciones.

En el presente trabajo se destaca la aplicación de la Percepción Remota con imágenes Sentinel 1 sobre todo por la ventaja de obtener imágenes de RADAR en diferentes polarizaciones. Mediante su polarimetría es posible generar imágenes que realcen los atributos y formas de los objetos en el terreno debido a que cuentan con una sensibilidad variada ante las propiedades y características terrestres, lo cual se traduce a una mejor discriminación de estos elementos (Ríos, 2014; Posada et al., 2010).

Algunas de las desventajas identificadas a lo largo de la elaboración de este trabajo, es que la manipulación y tratamiento de las imágenes de tipo RADAR es diferente en comparación a las imágenes ópticas. Al utilizar este tipo de imágenes se requieren de diferentes técnicas y conocimientos para su explotación ya que existe una serie de distorsiones que deben corregirse para interpretarlas adecuadamente.

La metodología planteada podría enriquecerse con trabajos de campo que ayuden a diferenciar mediante puntos georeferenciados los diferentes elementos en el territorio o zona de estudio.

En eventos de inundaciones como fue el caso de los estados de Nayarit y Veracruz, es necesario llevar a cabo en un corto plazo la valorización de daños y la gestión de los recursos dirigidos a los sectores más afectados. El aporte del presente trabajo es mostrar una metodología para la gestión de emergencias en estados que regularmente sufren el impacto de fenómenos hidrometeorológicos, para ello es importante tener a disposición imágenes de satélite gratuitas así como un equipo de cómputo adecuado para su procesamiento.

La participación de profesionistas, como los geógrafos, ayuda a contar con una visión integral de los fenómenos que ocurren en el territorio. Que junto con la ayuda de herramientas digitales y datos espaciales podrán generar y compartir información que contribuya a la toma de decisiones para la prevención y mitigación del efecto de fenómenos naturales que continuamente se presentan en nuestro país.

Bibliografía

1. Ángeles, R., (2019), Detección de cambios de la cobertura de manglar en la Barra de Tecoaapa Guerrero aplicando técnicas de percepción remota, tesis para licenciatura en geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 125 pp.
2. Arreguín, F., López, M., Marengo, H., (2016), Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. Tecnología y ciencias del agua, Vol. VII, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México 5-13 pp.
3. Base de datos de eventos de emergencia, (EM-DAT), Centro de Investigaciones sobre Epidemiología de los desastres, recuperado el 20 de febrero de 2022, de; <https://www.emdat.be/>.
4. Basterra, I., (s.a.), Teledetección – Imágenes Satelitales – Procesamiento Digital de Imágenes, Catedra de fotointerpretación, Departamento de Geociencias, 33 pp.
5. Bella, D., Posse, G., Beget, M., Fischer, M., Mari, N., Veron, S., (2008), La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones, Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente, 39 – 52 p.
6. Belmonte, I., Caamaño, S., (2009), Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina, Facultad de Matemática, Astronomía y Física, 109 pp.
7. Borden, B., Cheney, M., (2013), *Radar Imaging, Inverse Problems*, recuperado el 23 de enero de 2020, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0266-5611/29/5/050301>.
8. Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2014), Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México, Versión Electrónica 2014, 225 pp.
9. Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2004), Fascículo de Inundaciones, Versión Electrónica 2019, 55 pp.
10. Chuvieco, E., (1990), Fundamentos de Teledetección Espacial, 449 pp.

11. Cervantes, E., (2014), Clasificación de imágenes de satelitales mediante el uso de Memorias Asociativas, tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Telecomunicaciones, Instituto Politécnico Nacional, 99 pp.
12. Collado R., Gama L., Díaz H., (2015), Percepción Remota: elementos básicos, Revista Kuxulcab', XXI, 23-29 pp.
13. Dávila, H., (2011) Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X), para obtener el grado de doctor en Ciencias de la Tierra, 153 pp.
14. Díaz, G., (2018), Identificación de depósitos de Hierro en Sierra Leona, África con técnicas de Percepción Remota, tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional Autónoma de México, 104 pp.
15. Donezar, U., Larrañaga, A., Támes, A., Sánchez, C., Albizua, L., Ciriza, R., Del Barrio, F., (2017), Aplicación de imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS, Asociación española de teledetección, 49-57 pp.
16. European Space Agency, (2019), *Sentinel-1 Toolbox; SAR Basics Tutorial*, recuperado el 20 de febrero de 2020, de: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>.
17. European Space Agency, (s.a.), *Sensors*, recuperado el 10 de mayo de 2020, de: https://www.esa.int/Education/5._Sensors.
18. Fernández, O., Escalona, M., Valdez, L., (2015) Avances y Perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas, 66 pp.
19. Fernández, O., Soria, R., Brigitte, L., Macedo C., Ramírez, G., Escalona, M., (2019), Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat-2, Revista Internacional de Estadística y Geografía, 21 pp.
20. Filiponni, F., (2019), *Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow*, Revista *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 4 pp.
21. Fontal, B., (2005), El espectro electromagnético y sus aplicaciones, Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química, Mérida, Venezuela, 151 pp.

22. Franco, F., (2010), Respuestas y propuestas ante el riesgo de inundación de las ciudades colombianas, Revista de Ingeniería, pp. 97 -108.
23. González, J., (2015), La percepción remota y su aplicación a desastres naturales, número 40, recuperado el 25 de febrero de 2020, de: <https://saberesyciencias.com.mx/2015/06/01/la-percepcion-remota-y-su-aplicacion-a-desastres-naturales/>.
24. Hernández, G. (2018), Análisis morfo-estructural para determinar la posible presencia de una caldera en el campo volcánico río Santa María, como fuente de emisión de las ignimbritas santa maría-el órgano mediante el uso de técnicas geomáticas, Trabajo para obtener el grado de Maestra en Ciencias en Geología Aplicada.
25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (s.a.), Imágenes de Satélite Elementos de percepción remota, 28 pp.
26. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (s.a.), Información Económica y Estatal de Nayarit, recuperado el 13 de mayo de 2022, de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135840/nayarit.pdf>.
27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (s.a.), Presentación de resultados del Censo 2020 de Nayarit, recuperado el 20 de mayo de 2022, de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_nay.pdf.
28. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (s.a.), Presentación de resultados del Censo 2020 de Veracruz, recuperado el 21 de mayo de 2022, de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_ver.pdf.
29. Labrador, M., Évora, J., Arbelo, M., (2012), Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio, 66 pp.
30. Ley General de Protección Civil. Publicada en el Diario Oficial de La Federación el 06 de junio de 2012.
31. Lira, J., (1987), La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio, La ciencia para todos, núm. 33, Fondo de Cultura Económica, pp. 50.

32. Lobo, A., Martínez, T., (2005), Apoyo de los sensores ópticos y de Radar de apertura sintética a la información forestal, 135-140 pp.
33. Luque, J., (2012), Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico, Autores Científico Técnicos y Académicos, Núm. MF062, Categoría; Ciencia y Tecnología, 15 pp.
34. Maldonado, A., (2019), Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergente ante el cambio climático. Economía, sociedad y territorio, pp. 543-574.
35. Millán, G., (s.a.), La conquista del espacio, Real Academia de Ciencias, 207 – 220 p.
36. Monterroso, M., (s.a.) Guía práctica: clasificación de imágenes satelitales, recuperado el 17 de febrero de 2021, de: <https://arcgeek.com/descargas/ClasImMF.pdf>.
37. Pereyra D., Pérez J., Salas M., (2010), Hidrología, Universidad Veracruzana, recuperado el 25 de febrero de 2020, de: <https://cdigital.uv.mx/>.
38. Podest, E., (2017), Introducción a la Interferometría SAR, *National Aeronautics and Space Administration*, recuperado el 4 de septiembre de 2019, de: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day2/S4P1-span.pdf.
39. Podest, E. (2017), *Synthetic Aperture Radar or SAR*, [Archivo de video]. Recuperado de: <https://youtu.be/YshNd9jqI58>.
40. Posada, E., Ramírez, H., Castro, I., (2010), Aplicaciones de la polarimetría radar en observaciones de la tierra, recuperado el 4 de septiembre de 2019, de: https://www.researchgate.net/publication/276919824_Aplicaciones_de_la_polarimetria_de_radar_en_observacion_de_la_tierra.
41. Reuter, F., (2019), Principios de teledetección, Catedra de Teledetección y Cartografía, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, 74 pp.
42. Rosengaus, M., Jiménez, M., Vázquez, M., (2002), Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México, CENAPRED, IMTA, 108 pp.

43. Ruiz, A., Tejeda, A., Miranda, S., Flores, R., (s.a.), Climatología, Universidad Veracruzana, recuperado el 25 de febrero de 2020, de: <https://cdigital.uv.mx/>.
44. Secretaría de Marina, (2009), Percepción Remota, recuperado el 20 de febrero de 2020, de: <http://2006-2012.semarn.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>.
45. Smith, R., Introduction to interpreting digital RADAR images, recuperado el 10 de mayo de 2020, de: <https://www.microimages.com/documentation/Tutorials/radar.pdf>.
46. Sosa, M., Torrealba, R., Olvera, J., Corona, Aa., (2016), Propiedades dieléctricas de maíz mexicano: blanco y pigmentado, Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos, 20 – 25 p.
47. Tamayo, C. (2019) Análisis e interpretación de imágenes radar para la identificación y prevención de desastres naturales por inundación, trabajo para la obtención de ingeniero geógrafo y del medio ambiente.
48. Universidad de Ciencias y Humanidades, (2018), ¿Qué son las imágenes satelitales?, recuperado el 24 de abril de 2021, de: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>.
49. Universidad Nacional Autónoma de México, (2015), Lluvias e inundaciones, recuperado el 4 de septiembre de 2019, de: <https://www.unam.mx/medidas-de-emergencia/lluvias-e-inundaciones>.
50. Vázquez, L., Palazuelos, I., (2017), Principales retos y pendientes ante las inundaciones en México, Revista Mirada Legislativa, Núm. 138, 21 pp.
51. Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J., Alarcón, L., Galván, U., (2011), La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental, Política y Cultura, Núm. 36 Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, 45-69 pp.
52. Villegas, H., (2008), Introducción a la Percepción Remota y sus aplicaciones geológicas, recuperado el 3 de enero de 2021, de: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>.

53. Zaragoza, R., (2006), Cartografía de formación vegetal del Área de Protección de Flora y Fauna Cuatrociénegas a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 7 ETM+, tesis para licenciatura en geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 105 pp.
54. Zozaya A., (2016), *Synthetic apertura radars: conceptual desing procedure*, Revista Ingeniería, Vol 23, No 2, 97 - 115 p.