

Estimación de la superficie afectada por inundaciones mediante polarimetría con imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel 1A en la cuenca hidrográfica del río Frío (Costa Rica)

Estimation of flooded areas on Frío river basin (Costa Rica) using polarimetry with synthetic aperture radar (SAR) of Sentinel 1A imagery

Estimativa da área afetada por inundações através de polarimetria com imagens Sentinel 1A Synthetic Aperture Radar (SAR) na bacia do rio Frío (Costa Rica)

Rubén Martínez Barbáchano¹
Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Resumen

La polarimetría con radar de apertura sintética (SAR) es una técnica conocida en teledetección por sus aplicaciones en el monitoreo de cambios sobre la superficie terrestre y en cuerpos de agua. El objetivo de la polarimetría radar es caracterizar la superficie terrestre analizando las propiedades de la señal que se dispersa cuando se utilizan diferentes combinaciones de polarización de las antenas transmisoras y receptoras, definidas como canales polarimétricos. La utilización de la polarización cruzada (vertical/horizontal) se mostró eficiente para estimar la extensión de las inundaciones producidas entre el 22 y el 25 de julio de 2021 en la cuenca del río Frío (Costa Rica). Para ello se utilizaron imágenes captadas por el sensor Sentinel 1A, de la Agencia Espacial Europea, mediante un flujo de procesamiento y una composición RGB posterior que permitió establecer una

1 Geógrafo especializado en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: rubenztm@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9176-3112>

clara distinción entre las zonas inundadas de los cuerpos de agua permanentes. La utilización de imágenes ópticas para el mapeo de inundaciones está limitada por las condiciones climáticas, especialmente por la presencia de nubes. Las mediciones con SAR son independientes de la hora del día y de las condiciones climáticas, proporcionando valiosa información para el monitoreo de inundaciones (Horritt, 2006, p 187). Además, la extensión de las inundaciones es un factor crítico para la calibración y validación de modelos hidráulicos. La extensión de las inundaciones puede usarse también para evaluación y gestión del riesgo, y pueden beneficiarse de ello rescatastas durante las inundaciones (Corbley, 1999, p 1).

Palabras clave: Teledetección, radar, SAR, polarimetría, inundaciones.

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) polarimetry is a remote sensing technique known for being applied to monitoring of land surface and water bodies. Polarimetry aims at charactering the land surface through the analysis of its response under different combinations of transmitting and receiving antennas polarization, called polarimetric channels. The use of cross-polarization (vertical/horizontal) proved to be efficient for estimating the extent of the floods between July 22nd and July 30th in the Frio river basin (Costa Rica). To that end, Sentinel-1 images from the European Space Agency have been used, with a workflow process and RGB composition that allowed to draw a clear distinction between flooded and permanent water bodies. The use of optical imagery for flood mapping is limited by weather conditions, specially by the presence of clouds. SAR measurements are independent of daytime and weather conditions, providing valuable information for monitoring flood events. Furthermore, flood extent is a critical factor for the calibration and validation of hydraulic models (Horritt, 2006). Flood extent can be also used for damage assessment and risk management and can be of benefit to rescuers during flooding (Corbley, 1999).

Keywords: Remote sensing, radar, SAR, polarimetry, flooding

Resumo

A polarimetria por radar de abertura sintética (SAR) é uma técnica conhecida em sensoriamento remoto por suas aplicações no monitoramento de mudanças na superfície terrestre e em corpos d'água. O objetivo da polarimetria de radar é caracterizar a superfície terrestre analisando as propriedades do sinal que é espalhado quando são utilizadas diferentes combinações de polarização das antenas transmissoras e receptoras, definidas como canais polarimétricos. O uso da polarização cruzada (vertical/horizontal) mostrou-se eficiente para estimar a extensão das inundações produzidas entre 22 e 25 de julho de 2021 na bacia do rio Frio (Costa Rica). Para isso, foram utilizadas imagens captadas pelo sensor Sentinel 1A da Agência Espacial Europeia, através de um fluxo de processamento e posterior composição RGB que permitiu distinguir claramente as áreas inundadas dos corpos d'água permanentes. O uso de imagens ópticas para mapeamento de inundações é limitado pelas condições climáticas, especialmente pela presença de nuvens. As medições de SAR são independentes da hora do dia e das condições meteorológicas, fornecendo informações valiosas para o monitoramento de enchentes (Horritt, 2006, p.187). Além disso, a extensão da inundação é um fator crítico para a calibração e validação de modelos hidráulicos. A extensão das inundações também pode ser usada para avaliação e gestão de risco e pode beneficiar os socorristas durante as inundações (Corbley, 1999, p. 1).

Palavras-chave: Inundações; Polarimetria; Radar; SAR; Sensoriamento remoto.

Introducción

La teledetección con sensores ópticos requiere de observaciones sin nubes o sombras de nubes para minimizar la confusión espectral de los datos (Shen *et al.*, 2019, p 2). Sin embargo, en zonas tropicales las coberturas nubosas son constantes y abundantes, por lo que su aplicación resulta limitada (Flores *et al.*, 2019). En este sentido, el uso de las imágenes radar despeja la limitante de la nubosidad y permite la obtención continua de información (Flores *et al.*, 2019). Hace escasos veinte años estas perturbaciones comprendían aproximadamente el 48 % del planeta; hoy se han incrementado hasta cubrir un 62 % y dentro de 20 años podrían superar el 80 % de manera irreversible (Moreira *et al.*, 2013, p 38).

En Costa Rica existen zonas que anualmente están expuestas a eventos extremos de inundación recurrentes. Por ello, se eligió un evento extremo particular de inundación (entre el 22 y el 25 de julio de 2021) para resaltar las ventajas de utilizar imágenes radar de apertura sintética (SAR) bajo condiciones de nubosidad y lluvia, referido en especial a la cuenca del río Frío, en el extremo norte de Costa Rica (Figura 1).

Figura 1. Comunidades anegadas en Caño Ciego. Fotografía tomada de San Carlos Digital (año 2021)



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la teledetección mediante SAR ha experimentado un renovado impulso en los últimos años, con nuevos sensores y plataformas que han permitido la obtención de variables geofísicas de enorme valor geográfico. En este sentido, destacan iniciativas como el programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea, un ambicioso programa espacial de observación de la Tierra, que desde 2011 proporciona información de la superficie terrestre y de la atmósfera de forma sistemática, actualizada y de fácil acceso con el objetivo de comprender y mitigar los efectos del cambio climático a través de los datos procedentes de más de 30 satélites. Entre dichos satélites, cabe mencionar las cinco familias de misiones Sentinel, comenzando por las imágenes radar de Sentinel-1, el cual desde 2014, nos proporciona observaciones de la superficie de la Tierra en cualquier condición meteorológica, sea día o sea noche.

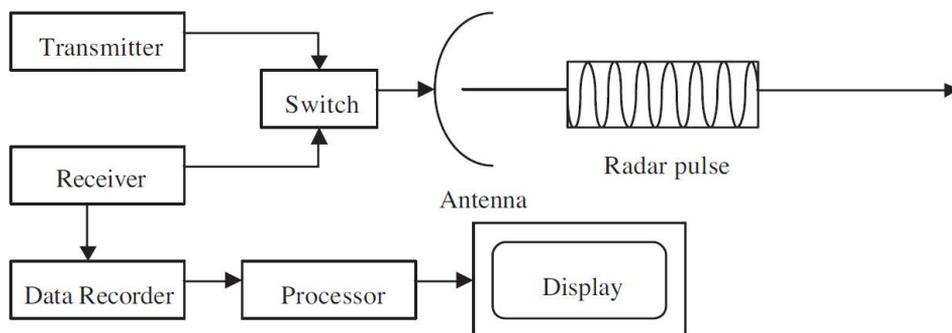
Desde el punto de vista del espectro electromagnético, los sistemas RADAR trabajan en el rango de las microondas como sensores activos, debido a

que la emitancia de los objetos es difícilmente perceptible en esa banda (Chuvieco, 2010, p 73). Entre las técnicas recientes más utilizadas con radar destaca la polarimetría. Esta técnica opera considerando la polaridad de la señal electromagnética emitida y las propiedades de polarización de la señal de retorno (dado que se trata de sensores activos). Una onda polarizada horizontalmente (H) o verticalmente (V) al incidir sobre un objeto genera otra onda de retorno que puede leerse en ambas polarizaciones H y V.

Marco conceptual

Radar es un término que se deriva del acrónimo inglés (Radio Detection and Ranging), un sistema basado en ondas electromagnéticas que puede medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos móviles o estáticos. Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de onda de radio, cuyo reflejo en los objetos es captado por el sensor (Figura 2). A partir de esa señal reflejada o eco, puede obtenerse una gran cantidad de información de los objetos de la superficie (información de carácter morfométrico).

Figura 2. Diagrama de funcionamiento de un sistema radar (Chan y Koo, 2008, p 32).



Fuente: Chan y Koo, 2008, p 32.

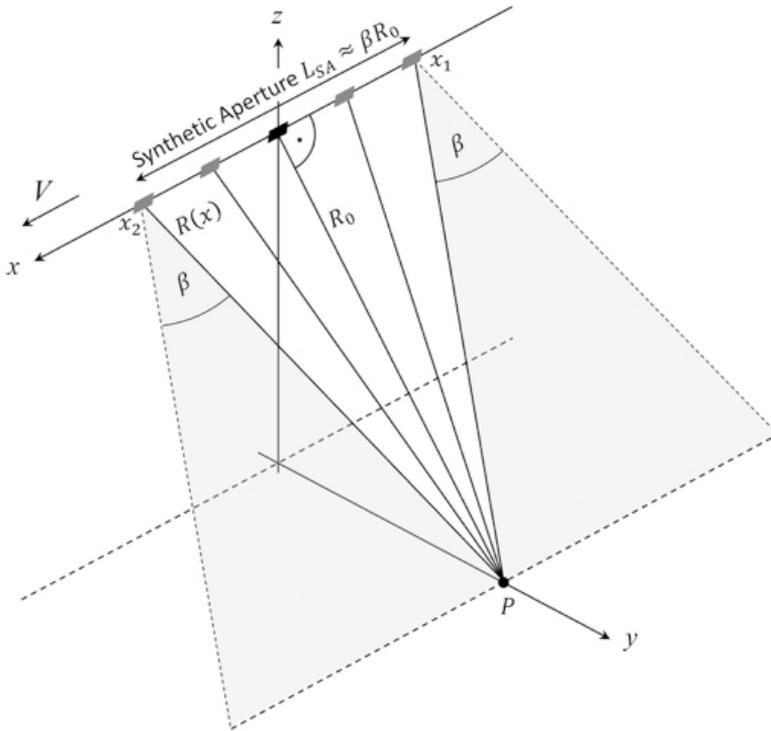
Aunque el primer sistema de pulso radar fue desarrollado en 1934, no es hasta la década de 1950 cuando se desarrolla el Side Looking Airborne Radar (SLAR) utilizado principalmente para reconocimiento militar, el cual debió esperar hasta la década de 1960 para acceder a la primera imagen de alta resolución SLAR desclasificada para uso científico (Chan & Koo, 2008), p 28.

En cuanto a la longitud de onda, estos sistemas trabajan en un rango que va de los 0,1 cm hasta 1 m. La observación de la superficie terrestre en este rango del espectro presenta dificultades complejas, pero su principal ventaja reside en que es prácticamente transparente a la cobertura nubosa y las influencias atmosféricas debido a que trabaja en longitudes de onda mayores a 0,1 mm, que es el tamaño habitual de las gotas de agua.

Una imagen radar se compone de una matriz de píxeles que representan el coeficiente de retrodispersión de la superficie del terreno, con valores directamente proporcionales a la intensidad de la señal de retorno. A diferencia de los sensores pasivos que trabajan en el espectro óptico, la principal virtud o ventaja que ofrece la tecnología radar es que puede trabajar en cualquier condición atmosférica (Chuvieco, 2010). Este hecho hace del radar de apertura sintética un sistema de teledetección particularmente adecuado para países tropicales. Además, al tratarse de un sensor activo que provee su propia fuente de iluminación, puede trabajar tanto de día como de noche (Chan Y Koo, 2008, p 28).

La apertura sintética en radar es una técnica que utiliza el procesamiento de la señal para mejorar su resolución, más allá de la limitación impuesta por la apertura de la antena física (Curlander & McDonough, 1991). En este sistema, los movimientos hacia al frente de la antena real se utiliza para imitar una antena de mayor longitud y obtener así una apertura de mayor amplitud (Figura 3).

Figura 3. Geometría de observación de un radar de apertura sintética (Meyer, 2018, p.3).



Fuente: (Meyer, 2018, p.3).

De hecho, resulta habitual encontrar sensores RADAR con distintas bandas de observación, diferentes alturas, diferentes ángulos de observación, diferentes polarizaciones y antenas de tamaño diverso. La polarización de la señal describe la orientación del plano de oscilación de la señal propagada por la antena. En los sistemas de polarización lineal, la orientación de este plano de oscilación es constante a lo largo de la ruta de propagación de la onda electromagnética (Meyer, 2018, p 3). Ello implica que este tipo de sensores transmiten y reciben la señal en dos o más polarizaciones: Vertical-vertical, vertical-horizontal, horizontal-vertical y horizontal-horizontal. Con base en lo expuesto, el objetivo del presente estudio es aprovechar las diferentes respuestas obtenidas en el análisis de la retrodispersión que proporcionan el agua y la tierra, debido a que la

primera actúa como una superficie lisa o especular, la cual devuelve una retrodispersión muy baja; mientras que la segunda, devuelve al sensor un valor mucho más alto que el del agua, lo que permite fácilmente reconocer el límite entre ambos elementos (Bioresita Hayati, 2016, p. 193).

Las aplicaciones de los sistemas SAR han demostrado la versatilidad de esta técnica, con ejemplos en la minería (Lynne y Taylor, 1986) el estudio de monitoreo marítimo y comportamiento de capas de hielo (Kwok, Rignot, & Drive, 1990) el monitoreo de la nieve (Storvold, R., *et ál.*, 2006) los derrames de petróleo (Hovland, Johannessen, y Digranes, 1994) la cobertura de suelo (Lim, *et al.*, 1989) la oceanografía (Romeiser, 2013) o la estimación de la extensión de las inundaciones (Cunjian, *et al.*, 2001)

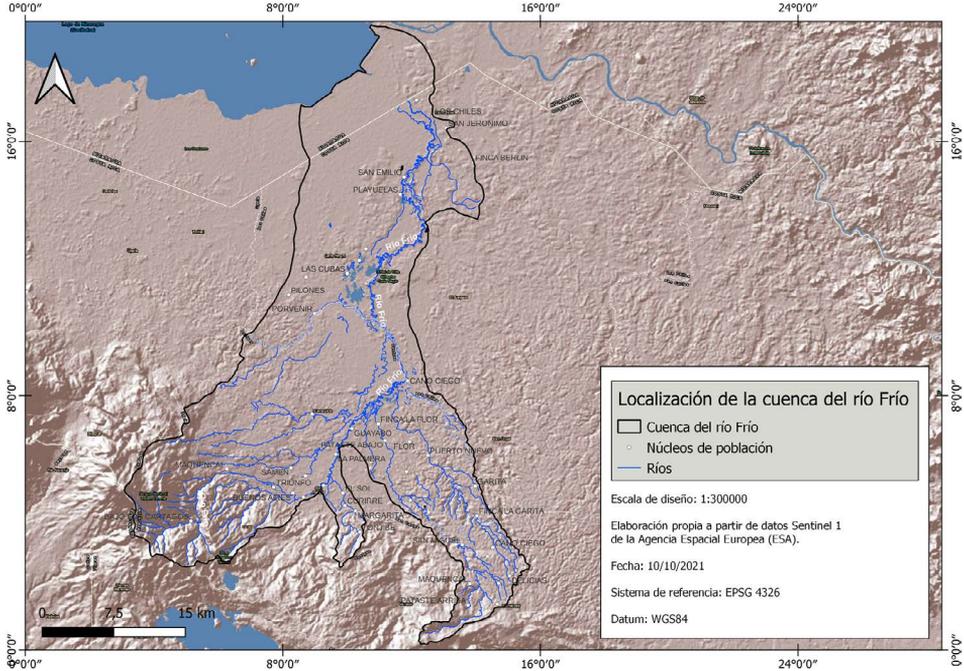
Área geográfica de estudio

La cuenca del río Frío se extiende desde la cima de las cordilleras Volcánica Central, Tilarán y Guanacaste hasta la frontera con Nicaragua. Esta región es parte de la gran cuenca binacional del río San Juan. Esta cuenca tiene un área de drenaje de 1779,38 km², lo que corresponde a un 3,5 % de la superficie de Costa Rica. La cuenca se ubica entre las coordenadas 11°07'17" de latitud norte, 10°31'12" de latitud sur, 84°37'25" de longitudeste y 85°00'42" de longitud oeste.

Se trata de un espacio de elevada riqueza ambiental, pero también, es uno de las más rezagados en términos de desarrollo humano del país (Barrantes-Sotela, O., *et al.* 2016). En dicha cuenca, el índice de desarrollo humano (IDH) que para el año 2011, en el que los cantones de Los Chiles y Guatuso ocupan las últimas posiciones del indicador de los 81 cantones de Costa Rica (Los Chiles (74), Guatuso (76) y Upala (59) (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD, 2013, p 21).

En la parte central de su cuenca se encuentra el Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro, que cuenta con algunas lagunas de carácter permanente asociadas al cauce del río Frío.

Figura 4. Mapa de ubicación de la cuenca del río Frío en Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia.

La geología de la zona de estudio muestra rocas volcánicas del Mioceno, Plio-Pleistoceno y Pleistoceno, así como rocas sedimentarias marinas someras del Mioceno. En la parte baja predominan las rocas continentales del Holoceno (Rojas, 2011).

En esta cuenca el rasgo típico climático es el régimen de precipitación del Caribe, el cual se caracteriza por presentar un período lluvioso a lo largo de casi todo el año, con disminución de lluvias y lapsos cortos sin lluvia en los meses de marzo y abril. La precipitación media anual para el registro de lluvias va desde los 2.000 a los 6.000 mm; en la cuenca en la parte alta las lluvias son de 4.000 a 6.000 mm, en la parte media de 2.000 a 3.000 mm y en la parte baja de 3.000 a 5.000 mm. Los meses de julio y agosto suelen ser los más lluviosos, los cuales aportan aproximadamente un 14% del promedio anual de precipitaciones. Los meses menos lluviosos suelen ir desde enero hasta abril, con lluvias promedio que no sobrepasan los 120 mm (Rojas, 2011, p 306). En la cuenca se presenta un promedio de

203 días con lluvia. (estación de San Jorge, Los Chiles, Instituto Meteorológico Nacional, IMN) y según la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica, el período de recurrencia de las inundaciones en esta cuenca es de dos años. El río Frío, junto a otros como el Samén, Aguas Negras, Buena Vista y El Sol generan anegamientos frecuentes en las poblaciones aledañas (ver Figura 3) durante eventos de lluvias extraordinarias, favorecidos por un deterioro en la capacidad hidráulica de sus cuencas, que han sufrido un aporte alto de sedimentos en los últimos años. Dicho fenómeno continúa cada vez que se presenta un evento extremo en la zona y aumenta la erosión de las partes altas de la cuenca (Sánchez Ureña, *et al.* 2020, p 9). Las cercanas subcuencas de Zapote, Guacalillo y Cabeza de León tienen un reconocido historial de inundaciones (Quesada Román, *et ál.* 2020, p 3). Por otra parte, el incremento de las lluvias es un fenómeno habitual en el Pacífico de Costa Rica durante La Niña. De hecho, en términos de precipitación anual los valores pueden incrementarse hasta un 50% por encima de la media (Quesada Román, *et ál.* 2019, p 9).

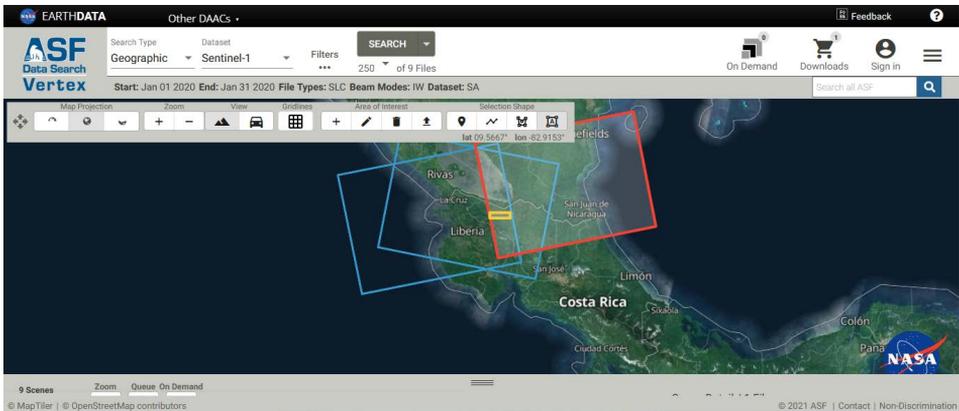
Materiales y métodos

Se utilizaron dos imágenes del sensor Sentinel-1A, con el objeto de estimar la superficie inundada a lo largo de la cuenca del río Frío durante las inundaciones ocurridas entre el 22 y el 25 de julio de 2021. Las imágenes fueron obtenidas mediante el método Interferometric Wide Swath (IW) que comprende imágenes con nivel de procesamiento en alta resolución y capturadas mediante el modo Ground Range Detected (GRD). Según Aulard Macler (2012) la resolución espacial de este producto es de 10 metros y su precisión posicional absoluta es de 7 metros (p 33). Posteriores estudios realizados por Schubert *et ál.* (2017) señalan que en pruebas de precisión posicional se pueden alcanzar precisiones más altas, incluso hasta los 5 metros aproximadamente (p 11). La cobertura de las imágenes es de 250 kilómetros de anchura, con una adquisición de datos en polarización dual (vertical/vertical y vertical/horizontal). Concretamente, se probaron las capacidades de las imágenes Sentinel-1 adquiridas en polarización vertical-horizontal (VH) para la detección de áreas inundadas, a pesar de que la polarización horizontal-horizontal (HH) es más apropiada en la detección de agua (Henry, 2006, p 1925) ésta no está disponible en Sentinel-1.

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el software SNAP Desktop, en su versión 8.0, desarrollado por la Agencia Espacial Europea, ESA y distribuido de forma libre bajo los términos de General Public License (GNU) junto con las herramientas contenidas en la Sentinel-1 Toolbox, que permite realizar correcciones de efemérides, radiométricas y geométricas a diferentes productos radar.

Dado que la técnica polarimétrica se basa en la orientación del haz de energía relativa a la superficie de la Tierra, y que Sentinel 1 opera en modalidad polarimétrica (al emitir y recibir energía polarizada) el primer paso consistió en escoger las imágenes inmediatamente anteriores y posteriores a las inundaciones ocurridas entre el 22 y el 25 de julio de 2021. Las imágenes Sentinel 1 están disponibles para libre descarga en el sitio web Alaska Satellite Facility (Figura 4), una instalación de procesamiento de datos y una estación terrestre de rastreo satelital dentro del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks (en colaboración con la National Aeronautics and Space Administration, NASA) que proporciona acceso gratuito y abierto a los productos de usuario de la misión radar SAR Sentinel-1.

Figura 5. Sitio web de Alaska Satellite Facility



Fuente: <https://search.asf.alaska.edu/>

Las imágenes utilizadas correspondían a los días entre el 18 de julio y 30 de julio de 2021, del satélite Sentinel 1A, en modo Interferometric Wide Swath (IW) nivel de producto GRD (ground range detected) que implica un barrido de 3 franjas paralelas dirigiendo la antena a tres posiciones

across-track (a lo ancho del barrido) cuyo resultado es un ancho de escena de 250 km con una resolución de 5 x 20 m. Las imágenes seleccionadas para el presente estudio fueron las más cercanas al evento de inundación de la cuenca del río Frío.

El flujo de procesamiento de las imágenes radar en polarimetría se divide en varias fases, tal y como muestra el cuadro 1:

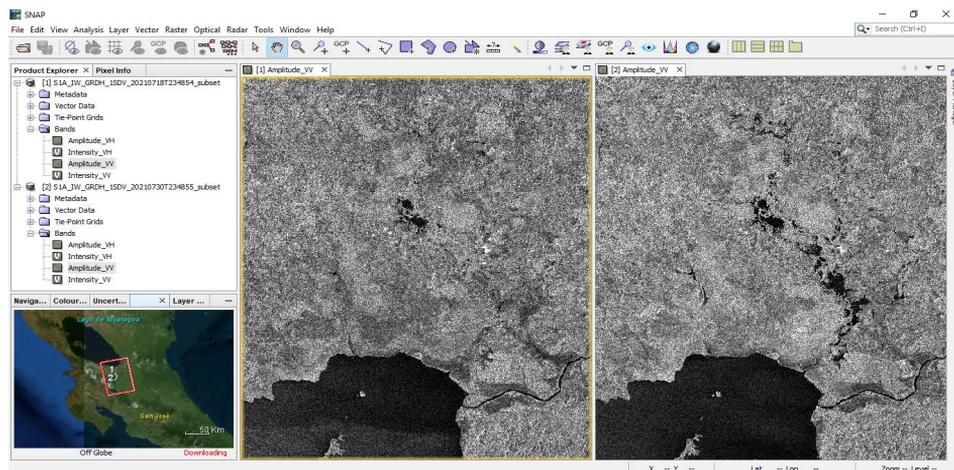
Cuadro 1. Flujo de procesamiento de Sentinel 1A para inundaciones.

Tipo de procesamiento	Herramientas de software
1. Corrección orbital	Apply orbit file
2. Eliminación del ruido termal	Thermal noise removal
3. Eliminación del ruido de bordes	Border noise removal
4. Calibración radiométrica de las imágenes.	Radiometric / Calibrate
5. Aplicación de filtro Speckel	Single Product Speckel filter
6. Corrección geométrica.	Range Doppler Terrain Correction
7. Conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles.	Linear to/from dB
8. Corregistro de imágenes.	Radar / Corregistration / Stack toos / Create stack.

Fuente: Elaboración propia a partir de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>

Como paso previo al procesamiento, se realizó un subset consistente en seleccionar únicamente la cuenca del río Frío en ambas imágenes (18 y 30 de julio de 2021) tal y como muestra la Figura 6:

Figura 6. Creación de un subset del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el subset de franjas de barrido, el siguiente paso fue la corrección orbital de ambas imágenes. Los productos Sentinel 1 cuentan con los vectores de sus órbitas satelitales dentro de los metadatos. El problema es que dichos vectores no cuentan con la precisión necesaria, por lo que resulta conveniente actualizar dichos metadatos con órbitas más precisas, que proporcionen a las imágenes posiciones y velocidad del satélite en el momento preciso de adquisición. Para lograr esa mayor precisión se optó por seleccionar la descarga de órbitas precisas basadas en efemérides (Precise Orbit Ephemerides o POE), que abarcan aproximadamente 28 horas y contienen vectores de órbita a intervalos fijos de 10 segundos (Veci, 2015).

El siguiente paso consistió en eliminar el ruido termal. Este se produce en forma de un ruido aditivo que puede ser identificado, especialmente en áreas con una baja retrodispersión, como el mar en calma, lagos, etc (Hajduch, *et al.* 2017, p 1). Los metadatos de las imágenes Sentinel 1 contienen los vectores de corrección de este ruido que tiene su origen en las mismas ganancias aplicadas a la señal real, de tal manera que siendo P_S y P_N el poder de la señal y el ruido, respectivamente, el poder de la señal resultante en los productos GRD de Sentinel 1 es:

$$P_{SN} = G(P_S + P_N)$$

Donde G es la ganancia total aplicada durante la formación de la imagen SAR (Won *et ál.* 2017, p 1556).

Seguidamente se procedió a eliminar de las imágenes el ruido de los bordes. En este caso se trata de un bandeo o franja estrecha que aparece a lo largo de los bordes de la dirección de rango y acimut. La causa está en fallos de procesamiento al documentar áreas con una señal inválida, debida a cambios en la curvatura terrestre (Filipponi, 2019, p 2). La herramienta para solucionarlo en SNAP (Border noise removal) resulta satisfactoria en tierra, pero no en océanos (Luo, y Flett., 2018, p 2).

Se procede entonces con la calibración radiométrica. El objetivo de la calibración de imágenes SAR es ofrecer imágenes en las que los valores del píxel se pueden relacionar directamente con la retrodispersión del radar de la escena. Para ello, hay que convertir los valores digitales (DN) a coeficientes de retrodispersión (Song *et ál.*, 2007, p 288). No obstante, para el cálculo de la retrodispersión (sigma) debe calcularse beta, que expresa a través de la función:

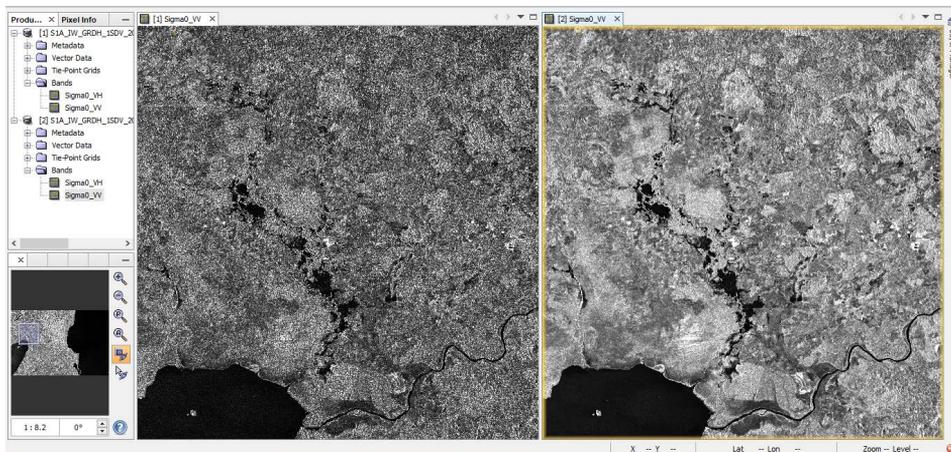
$$\beta_j^0 = 10 \times \log_{10} [(DN_j^2 + A_3) A_{2j}]$$

Siendo DN_j el valor digital que representa la magnitud de j-ésimo píxel, A_3 un desplazamiento fijo y A_{2j} el valor de ganancia de escalado de j-ésimo píxel en una dirección de rango oblicuo.

A partir de los productos calibrados del paso anterior, se aplicó un filtro mediante la herramienta Single Product Speckel filter. Las imágenes Sentinel 1 (y por extensión todas las imágenes radar) contienen un ruido multiplicativo denominado speckle o moteado, que se origina por la interferencia y contribución de distintos reflectores presentes durante la adquisición de la imagen. Ello provoca una degradación de la información contenida y conlleva errores en la interpretación por parte del observador (Choi, 2019, p 1). Para evitar este problema, Lee (1981) propuso la aplicación de un filtro para reducir ruidos radiométricos basándose en la aplicación de medidas estadísticas. El filtro Lee se basa en asumir que la media y la varianza del píxel considerado son iguales a la media y la varianza local de los píxeles de la ventana móvil definida por el usuario. En el caso que nos ocupa (monitoreo de inundaciones) se ha podido comprobar, mediante índices de calidad, que reduce los píxeles relacionados con el ruido

speckle, lo que muestra la efectividad del filtro en una sola pasada (Parra, *et ál.* 2015, p 15) como se muestra en Figura 7. De hecho, el filtro Lee se muestra superior respecto de otros filtros speckle para la interpretación visual, por su habilidad para preservar bordes, elementos lineales, objetivos puntuales e información textural (Filipponi, 2019, p 4).

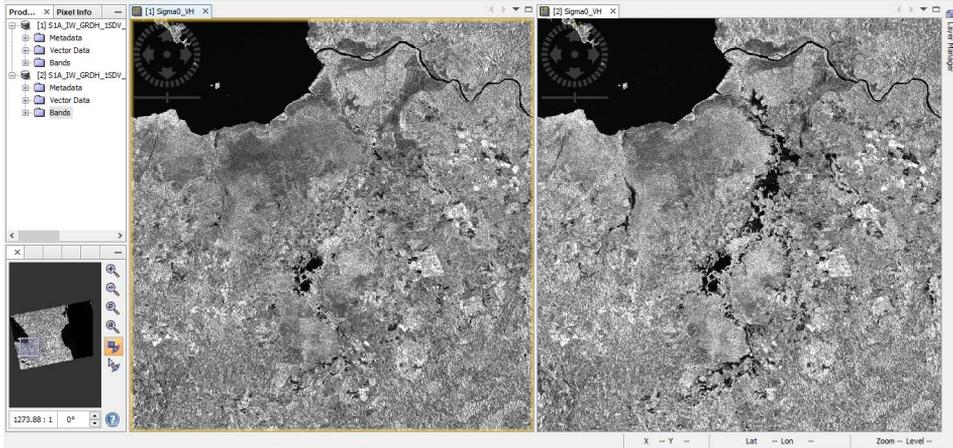
Figura 7. Imágenes del área de estudio antes (izquierda) y después (derecha) de la aplicación del filtro Lee para reducción del ruido speckle.



Fuente: Elaboración propia

El siguiente procesamiento, de acuerdo con la Figura 8, fue la corrección geométrica de las escenas radar mediante la herramienta de SNAP Range Doppler Terrain Correction. Para ello se requiere la información precisa de las órbitas del satélite y un modelo digital de elevación del área abarcada. SNAP permite descargar automáticamente de internet tanto las órbitas (vistas anteriormente) como la información topográfica (modelo digital de elevaciones). Para el presente estudio se utilizó el modelo digital SRTM 1 sec HGT, un producto de la NASA (Shuttle Radar Topography Mission), generado a partir de datos radar SAR de banda C y X con una resolución de 3 arcosegundos, es decir, 30 metros. El método de remuestreo para alinear los puntos de la imagen subordinada con los de la imagen de referencia fue el de interpolación bilineal, recomendada para conjuntos de datos continuos sin límites definidos.

Figura 8. Imágenes del área de estudio el 17 de julio (izquierda) y el 30 de julio (derecha) después de la aplicación de la herramienta Range Doppler Terrain Correction en SNAP.



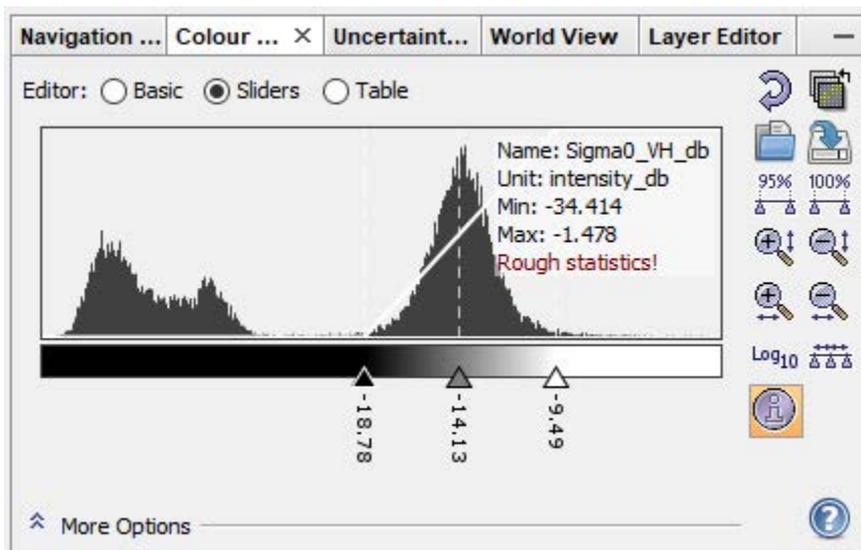
Fuente: Elaboración propia

El último paso del flujo de procesamiento fue la conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles (dB). Para realizar la transformación de los valores de Sigma a dB, se utilizó la herramienta de SNAP Linear to/from dB”, que aplica la siguiente transformación a escala logarítmica.

$$\text{decibel} = 10 * \log_{10} (\text{linear})$$

Dicha transformación se aplica a las bandas con la corrección geométrica de terreno del paso anterior. De acuerdo con los histogramas de las imágenes, se estableció un umbral de -18,78 a 9,49 para distinguir los cuerpos de agua de la tierra (Figura 9).

Figura 9. Histograma de una de las dos imágenes radar convertida a decibeles.

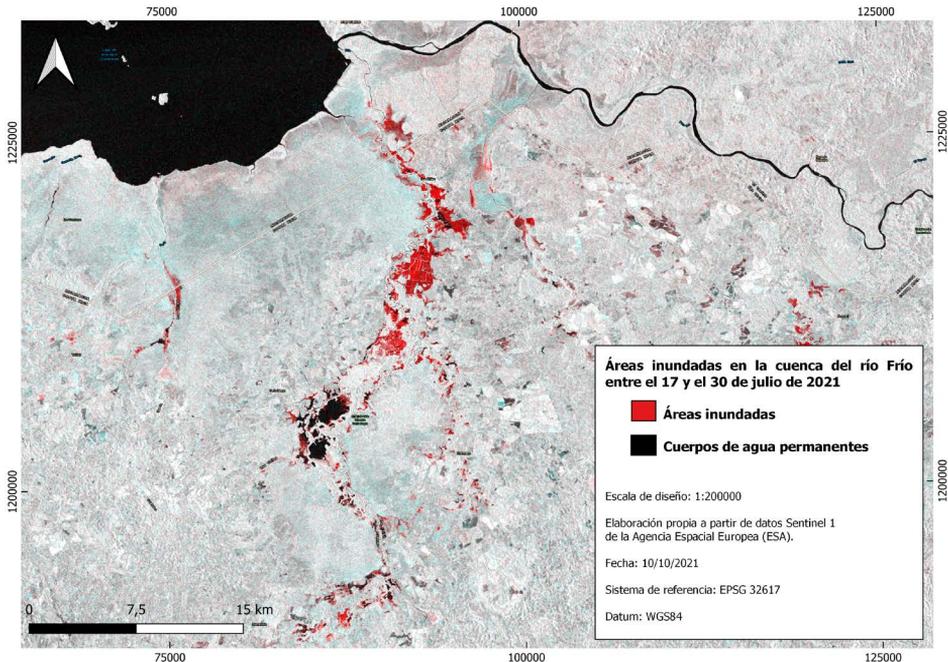


Fuente: Elaboración propia a partir de datos Sentinel 1

Resultados

Para visualizar la extensión de las inundaciones con respecto a la tierra no inundada y los cuerpos de agua permanentes (como las lagunas de Caño Negro) se generó una composición RGB, con la herramienta de SNAP Create Stack, asignando al canal rojo del software la banda de polarización Vertical/Horizontal en decibeles del 18 de julio, mientras que a los canales verde y azul se les asignó la banda Vertical/Horizontal en decibeles del 30 de julio del año 2020(ver Figura 10).

Figura 10. Mapa de inundaciones en julio de 2021 en la cuenca del río Frio a partir de datos radar Sentinel 1.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos Sentinel 1

La verificación de resultados obtenidos en el mapeo de las áreas inundadas se basó en un muestreo de campo mediante tecnología GNSS. Se ubicaron 20 puntos de alta fiabilidad en ubicaciones inundadas y 10 en puntos no inundados, pero debido a problemas de accesibilidad (por las propias inundaciones) y a restricciones sanitarias, solo se pudieron verificar 12 de los 30 puntos planteados.

La generación de estadísticas de área y posterior vectorización de los resultados dio una superficie inundada de 4,943 hectáreas, de las cuales, la mayor parte se concentraron en zonas pantanosas de inundación recurrente (depósitos aluviales y coluviales) y, secundariamente, planicies aluviales con influencia lacustre del lago Nicaragua (facies distales de rocas volcánicas recientes).

Discusión de resultados

El presente artículo ha optado por una metodología de obtención de superficies inundadas que no dependa de unas condiciones meteorológicas que, en contextos de fuerte precipitación e inestabilidad atmosférica condicionan (cuando no impiden) el uso de imágenes ópticas.

La fiabilidad de las estimaciones con Sentinel. 1 se encuentra dentro del rango de los 10 metros de resolución espacial. Una delimitación de sectores con depresiones propensos a inundarse en el área perilagunar y sectores en dirección norte con respecto a la laguna de Caño Negro requeriría de un mapeo histórico de las inundaciones en el área de estudio, y dada la topografía predominantemente llana, de un modelo digital de elevaciones de mayor resolución, que pudiera describir la tendencia del agua que se acumularía en un punto determinado y la pendiente local, que indicarían eventualmente el efecto gravitacional en el movimiento del agua para delimitar con mayor precisión las áreas más propensas a inundarse.

Los 12 puntos de muestreo de campo se encontraban sobre superficies inundadas con una profundidad variable, y esta es precisamente otra de las limitaciones de la tecnología radar, ya que esta aporta información de la señal retrodispersada sobre agua frente a otras coberturas, pero no aporta información sobre la profundidad de la lámina de agua. Combinar la información obtenida de radar de apertura sintética (Sentinel 1) con índices de sequedad y vegetación derivados de imágenes ópticas es una posibilidad, dado que los valores más altos de estos índices indican terrenos que presentan una cobertura de biomasa seca o leñosa o de suelo desnudo seco (Vidal Quini, *et ál.* 2021, p 237). Sin embargo, ello requeriría de la disponibilidad de imágenes ópticas libres de nubosidad inmediatamente antes y después del evento de inundación, algo que no ocurrió.

Desde el punto de vista del efecto de las inundaciones, cabe indicar que la Ruta 35 y la Ruta 138 Upala - Caño Negro - Los Chiles (una de las escasas vías de comunicación que comunican la zona de este a oeste) se vieron parcialmente inundadas, aunque no las poblaciones de Los Chiles, Barrio San Jerónimo I y II y Barrio Achiotal.

Conclusiones

Los resultados mostrados en este estudio han evidenciado el potencial de uso de imágenes radar para el estudio y monitoreo de inundaciones,

dado que este tipo de eventos se suelen producir bajo condiciones meteorológicas de nubosidad y lluvia. Todo ello, a pesar de que la aplicación de sucesivos filtros para poder reducir el efecto de moteado, supone una merma en la resolución de las imágenes, con el consiguiente efecto en la estimación de la superficie de inundación. En este caso la superficie inundada, excluyendo los cuerpos de agua permanentes (humedal de Caño Negro) fue de 4,943 hectáreas.

De las dos polarizaciones disponibles para imágenes Sentinel 1, la que mejores resultados proporcionó fue la polarización VH, generando áreas de inundación más extensas que las obtenidas con polarización VV.

Por otra parte, la presente metodología de composición RGB tiene la ventaja de permitir una clara distinción entre las zonas inundadas temporalmente, en color rojo (ver Figura 10) de las zonas de inundación permanente, en color negro. Diferenciar áreas inundadas de cuerpos de agua permanentes resulta muy complejo mediante umbrales de calibración, en cambio la composición RGB nos aporta información de retrodispersión por lámina de agua en dos fechas distintas (antes y después de la inundación).

Finalmente, la presencia de áreas con una topografía accidentada, en el extremo sur de la cuenca del río Frío, pueden dar lugar a áreas oscuras o de sombra, con coeficientes de retrodispersión similares a los que se dan en zonas inundadas. Sin embargo, para el presente estudio la mayor parte de las inundaciones se dieron en los sectores medio y bajo de la cuenca, con una altitud media inferior a los 100 metros sobre el nivel del mar, por lo que la sobrerrepresentación de áreas inundables no constituyó un problema.

Referencias

- Aulard-Macler, M. (2012). Sentinel-1 Product definition. s1-rsmda-52-7440. Technical report, MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. Google Scholar.
- Barrantes-Sotela, O. y Sandoval-Murillo, L. (2016). Uso/cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. *Revista Geográfica de América Central*, 56, 59-91.
- Bioresita, F. y Hayati, N. (2016). Coastline Changes Detection Using Sentinel-1 Satellite Imagery in Surabaya, East Java, Indonesia. *Geoid*, 11 (2), 190-190. DOI: [10.12962/j24423998.v11i2.1265](https://doi.org/10.12962/j24423998.v11i2.1265).

- Corbley, K. (1999). Radar imagery proves valuable in managing and analyzing floods red river flood demonstrates operational capabilities. *Earth Observation Magazine*, 8 (10).
- Chan, K & Koo, V. (2008). An introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 2, 27–60, 2008. Faculty of Engineering & Technology Multimedia University Jalan Ayer Keroh Lama, Bukit Beruang, 75450 Melaka, Malaysia.
- Choi, H. y Jeong, J. (2019). Speckle noise reduction technique for sar images using statistical characteristics of speckle noise and discrete wavelet transform. *Remote Sensing*, 11 (10). <https://doi.org/10.3390/rs11101184>.
- Cunjian, Y. yiming, W., Siyuan, W., Zeng-xiang, Z. y Shifeng, H. (2001). Extracting the flood extent from satellite SAR image with the support of topographic data. 2001 International Conferences on Info-Tech and Info-Net. *Proceedings* (1 1), 87-92.
- Curlander J. C. and McDonough R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar*. Publisher: Wiley Interscience, New York, USA
- Chuvieco, E. (2010. Edición actualizada octubre de 2010). “Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio”. Ariel Ciencia. Editorial Planeta, S.A. (Barcelona). Impreso en España por Huertas Industrias Gráficas, S.A. Barcelona: Ariel. ISBN 978-84-344-3498-1. Depósito legal: M. 35.932 - 2010.
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, 18 (1), 11-. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>
- Flores-Anderson, A., Herndon, K. BahadurThapa, R. y Cherrington, E. (Eds). (2019). The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. <https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>
- Hajduch, Guillaume & Miranda, Nuno & Piantanida, Riccardo & Meadows, Peter & Vincent, Pauline & Franceschi, Niccolò. (2017). Thermal Denoising of Products Generated by the S-1 IPF.
- Henry, J., Chastanet, P., Fellah, K & Desnos, Y. L. (2006). Envisat Multi-Polarized ASAR Data for Flood Mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (10), 1921-1929. <https://doi.org/10.1080/01431160500486724>

- Horritt M. (2006). A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. *Journal of Hydrology*, Volume 326, Issues 1–4, 326:153–165
- Hovland, H., Johannessen, J. y Digranes, G. (1994). Slick detection in SAR images. *Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [Simposio]*, 4, 2038–2040. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399647>
- Kwok, R., Rignot, E. y Drive, G. (1990). Synthetic aperture radar polarimetry of sea ice. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 88, 1525–1528.
- Lee, J. S. (1981). Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer graphics and image processing*, 17(1), 24-32.
- Lim, H., Swartz, A. yueh, H., Kong, J., Shin, R. y Van Zyl, J. (1989). Classification of earth terrain using polarimetric synthetic aperture radar images. Title. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94. <https://doi.org/0148-0227>
- Lynne, G. y Taylor, G.. (1986). Geological assessment of SIR- B imagery of the amadeus basin. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing, ge-*. 24 (4), 575–581.
- Luo, Y. y Flett, D. (2018). Sentinel-1 Data Border Noise Removal and Seamless Synthetic Aperture Radar Mosaic Generation. *Proceedings*, 2 (7), 330-. <http://dx.doi.org/10.3390/ecrs-2-05143>
- Moreira, A., Prats, I. younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. y Papathanassiou, P. (2013). A . *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 1, 6-43. Meyer, F. (2018). Spaceborne Synthetic Aperture Radar – Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R. y Cherrington, E. (Eds). NASA. 2019. <https://doi.org/10.25966/ez4f-mg98>
- Meyer, Franz. 2018. Spaceborne Synthetic Aperture Radar – Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E. NASA. 2019. DOI: [10.25966/ez4f-mg98](https://doi.org/10.25966/ez4f-mg98)

- Parra, J. y Hernández-De la Rosa, J. (2015). Estudio de reducción del ruido en Imágenes SAR para el Análisis de Inundaciones. *Ingenium*, 16, (32), 9-18.
- PNUD. (2013). *Informe nacional sobre desarrollo humano 2013*. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo(Ed) PNUD Costa Rica.
- Quesada-Román, A., Fallas-López, B., Hernández-Espinoza, K., Stoffel, M. y Ballesteros-Cánovas, J. (2019). Relationships between earthquakes, hurricanes, and landslides in Costa Rica. *Landslides*. 16 (8) 1539-1550. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01209-4>
- Quesada-Román, A. y Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*. 120 (2) 142-155. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Shen, W., Li, M., Huang, C., Tao, X., Li, S. y Wei, A. (2019). Mapping annual forest change due to afforestation in Guangdong Province of China using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing*. 11 (5) 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs11050490>
- Romeiser, R. (2013). The future of SAR-based oceanography: High-resolution current measurements by along-track interferometry. *Oceanography*. 26 (2) 92–99. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.37>.
- Rojas, N. (2011). *Cuencas hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.
- Sánchez-Ureña, B. y Esquivel-Valverde, L. (2020). *Análisis de riesgo para varias comunidades aledañas a los cauces de los ríos a intervenir por la Municipalidad de Guatuso*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Unidad de Investigación y Análisis de Riesgo. Informe técnico CNE-UIAR-INF-0300-20.
- Schubert, A., Miranda, N., Geudtner, D. y Small, D. (2017). Sentinel-1A/B combined product geolocation accuracy. *Remote Sensing*, 9 (6) 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9060607>
- Song, Y., Sohn, H. y Park, C. (2007). Efficient Water Area Classification Using Radarsat-1 SAR Imagery in a High Relief Mountainous Environment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 73 (3) 285-296. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.3.285>

- Storvold, R., Malnes, E., Larsen, Y., Høgda, K., Hamran, S., Müller, K. y Langley, K. (2006). Sar Remote Sensing of Snow Parameters in Norwegian Areas — Current Status and Future Perspective. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 20 (13) 1751–1759. <https://doi.org/0.1163/156939306779292192>
- Veci, L. (2015). Toolbox Interferometry Tutorial. Sentinel-1 Toolbox. Issued March 2015. Array Systems Computing Inc. <http://www.array.ca/> and ESA <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Strip-map%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>.
- Vidal-Quini N. y Geraldí A. (2021). Sinergia de imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 A para la delimitación de humedales a partir de un enfoque ecohidrogeomórfico. *Cuadernos Geográficos*. 60 (3) 233-252. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.18039>
- Won Jeong, J. -W. Park, A. A. Korosov, M. Babiker, S. Sandven. (2017). Efficient Thermal Noise Removal for Sentinel-1 TOPSAR Cross-Polarization Channel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. PP. 1-11. 10.1109/TGRS.2017.2765248.