

Martínez-Barbáchano, R. (2025). Identificación de monocultivos de musáceas (*Musa sp.*) en el norte de Costa Rica mediante reescalado de imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel 1A. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (Artículos), 35, 121-135. <https://dx.doi.org/10.21138/GF.791>

IDENTIFICACIÓN DE MONOCULTIVOS DE MUSÁCEAS (*MUSA SP.*) EN EL NORTE DE COSTA RICA MEDIANTE REESCALADO DE IMÁGENES RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR) SENTINEL 1A

Rubén Martínez-Barbáchano 

Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

ruben.martinezbarbachano@ucr.ac.cr

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 deforestación. 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 transmisora y receptora, definidas como canales polarimétricos. La utilización de la polarización vertical/vertical se mostró eficiente para estimar la extensión de las áreas deforestadas y la identificación de monocultivos de musáceas en el norte de Costa Rica. Para ello se utilizaron imágenes captadas por el sensor Sentinel 1A, de la Agencia Espacial Europea, mediante un flujo de calibración/procesamiento y un reescalado posterior que permitió discriminar áreas forestales y monocultivos con mayor eficacia que los índices de vegetación radar basados en polarización cruzada.

Palabras clave: Teledetección; radar; SAR; polarimetría; bosques; cultivos.

IDENTIFICATION OF MUSACEOUS CROPS (*MUSA SP.*) IN NORTHERN COSTA RICA USING RESCALING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR) SENTINEL 1A IMAGERY.

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar (SAR) polarimetry is a remote sensing technique known for being applied to monitoring and surface and deforestation. Polarimetry aims to characterise land surface by analyzing the properties of the signal that is scattered when using different combinations of polarization of the transmitting and receiving antennas, defined as polarimetric channels. The use of vertical/vertical polarization proved to be efficient for estimating the extent of deforested areas and musaceous monocrops

Recepción: 05/10/2022

Editora al cargo: Dra. Alaitz Zabala

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

Aceptación definitiva: 23/05/2025

www.geofocus.org

discrimination in northern Costa Rica. To that end, Sentinel-1 images from the European Space Agency have been used, with a calibration/workflow process and a subsequent rescaling that allowed to draw a clear distinction between forested areas and monocrops more effectively than radar vegetation index based on cross-polarization.

Keywords: Remote Sensing; radar; SAR; polarimetry; forests; crops.

1. 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). Sin embargo, en zonas tropicales la cobertura nubosa es constante y abundante, 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 globo terráqueo; hoy se han incrementado hasta cubrir un 62 % y dentro de 20 años podrían superar el 80 % de manera irreversible (Moreira *et al.* 2013).

En cuanto a la longitud de onda, estos sistemas trabajan en un rango que va de los 0,1 cm y 1 m. La observación de la superficie terrestre en este rango del espectro presenta dificultades complejas, como la presencia de ruido en las imágenes o la dificultad de discriminación de cubiertas con características morfológicas análogas, 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.

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). Ello implica que este tipo de sensores transmiten/reciben la señal en dos o más polarizaciones:

- Vertical/Vertical
- Vertical/Horizontal
- Horizontal/Vertical
- Horizontal/Horizontal

Muchos son los estudios que han identificado y caracterizado cultivos a partir de la intensidad de la señal retrodispersada (Kussul *et al.* 2016, Nguyen *et al.* 2016, Bargiel 2017, Van Tricht *et al.* 2018, Mandal *et al.* 2018, Whelen and Siqueira 2018, Arias *et al.* 2020). De igual manera se pueden encontrar múltiples estudios sobre fenología vegetal y ratios de las distintas intensidades de la señal retrodispersada (Nelson *et al.* 2014, De Bernardis *et al.* 2015, Nguyen *et al.* 2016, Lasko *et al.* 2018, Singha *et al.* 2019, Fikriyah *et al.* 2019).

Para el presente estudio se utilizó el parámetro gamma cero (γ_0) y la polarización vertical/vertical. El parámetro gamma cero (γ_0) tiene en cuenta el ángulo de incidencia local y su relación con el relieve, lo que combinado con la rugosidad del dosel forestal hacen su uso preferible al de sigma cero (aunque en zonas totalmente llanas de suelo descubierto el resultado puede ser similar). Se utilizó el producto de intensidad (GRDH, *Ground-Range Detected High-resolution*) por su compromiso en cuanto a posibilidad de reducción de ruido mediante filtros *Speckle* y el menor volumen de datos necesario para cubrir áreas extensas, a pesar de que este nivel de producto tiene una resolución menor que el anterior, ya que se pierde la información de fase, es decir, sólo proporciona la potencia retrodispersada. Gamma cero (γ_0) es una de las tres variables de calibración que pueden obtenerse a partir de Sentinel 1, y representa la potencia retrodispersada que el sensor está midiendo normaliza por el área A_γ . Por otra parte, se utilizó el nivel de producto SLC (*Single Look Complex*) para generar dos índices de vegetación radar que contuvieran la información de fase.

El objetivo del presente estudio fue aprovechar las diferentes respuestas obtenidas en el análisis de la retrodispersión que proporcionan los monocultivos intensivos de musáceas de las llanuras del norte de Costa Rica, así como las áreas forestales y las deforestadas. Los primeros devuelven al sensor un valor mucho más alto, mientras que las segundas tienden típicamente a exhibir una menor señal retrodispersada, facilitando el mapeo de áreas deforestadas en algunas regiones (Shimada *et al.* 2014).

2. Materiales, datos y métodos

2.1. El caso de estudio

El norte de Costa Rica está formado por un mosaico de llanuras agrícolas, fragmentos de bosque tropical lluvioso y pastizales de vocación agrícola y ganadera, entre las provincias de Heredia, Alajuela y Limón. En esta región, el monocultivo intensivo de varias especies de musáceas (*Musa sp.*) conforma extensas parcelas que definen una parte importante del paisaje. Su importancia es clave desde el punto de vista económico y social no sólo en Costa Rica, ya que otros países como Colombia o Ecuador basan, al menos parte de su economía, en su exportación (Canto *et al.* 2015). Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico las diferentes especies de musáceas (plátano y banano) fueron el segundo producto agrícola que más exportó Costa Rica en el periodo de 1994 a 2015 (OECD 2017). Frente a los monocultivos intensivos (para exportación) otra parte de la producción tradicional o convencional en Costa Rica usa el cultivo para una economía de subsistencia y consumo en el hogar.

El ciclo fenológico del cultivo de banano se puede dividir en tres grandes etapas, iniciando desde la fase infantil, hasta la fase reproductiva de la planta. La duración del ciclo fenológico en promedio oscila en 404 días y está determinada por la variedad, la altitud, latitud y las condiciones edafoclimáticas de cada una de las regiones productivas. En el Caribe costarricense el ciclo del cultivo de banano tiene una duración aproximada entre treinta y cinco a treinta y siete semanas después de la siembra (Vargas Céspedes 2017). Cuando el cultivo se encuentra en fase de producción se colocan bolsas especiales de polietileno para proteger los racimos de daños físicos, las cuales son impregnadas con insecticidas registrados para el cultivo; otra razón para el embolsado de los racimos es que crean un microclima óptimo para la formación y llenado del fruto.



Figura 1. Monocultivo de musáceas en Matina, Costa Rica. Fuente: Víctor Cortés Granados.

2.1.1. Delimitación espacial

Con una elevación media de 150 m, estas llanuras presentan clima tropical lluvioso todo el año, con una temperatura promedio anual de 24°C. La precipitación media anual para el registro de lluvias va desde los 2.000 mm a los 6.000 mm; en las partes altas las lluvias son de 4.000 mm a 6.000 mm, en la parte media de 2.000 mm a 3.000 mm y en la parte baja de 3.000 mm a 5.000 mm. El área de estudio se encuentra situada en las coordenadas 11° 04' 47'' de latitud norte y 84° 16' 42'' oeste, en la provincia de Limón (cantones de Pococí, Guácimo, Siquirres, Matina y Limón).

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



Figura 2. Localización de la zona de estudio en el norte de Costa Rica

2.1.2. Delimitación temporal

El presente estudio se realizó con un total de 12 imágenes correspondientes a julio y agosto de 2011. La razón de las fechas escogidas es comprobar la efectividad del uso de imágenes radar en períodos de alta cobertura nubosa y precipitaciones, que comprometen la disponibilidad de imágenes ópticas. La mayor parte de las parcelas estudiadas se encontraban en fase productiva, con una alta proporción de racimos ya embolsados.

2.2. Materiales y Técnicas de análisis

Todo el procesamiento de imágenes que sustenta la presente metodología se realizó con el programa SNAP desarrollado por la Agencia Espacial Europea.

Se utilizaron imágenes del sensor Sentinel-1A, con objeto de estimar la superficie forestal y cultivos a lo largo de las llanuras aluviales del norte del país durante el año 2021. Las escenas 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). Se utilizaron también imágenes SLC (*Single Look Complex*) para generar dos índices de vegetación radar y comparar los resultados con índices de vegetación obtenidos a partir de Sentinel 2. Se descargaron y procesaron imágenes mensuales en modo GRD y SLC de junio de 2021 a junio de 2022, con un total de 48 imágenes para la zona de estudio.

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el software SNAP Desktop, en su versión 8.0, desarrollado por la 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.

El flujo de procesamiento (ver tabla 1) de las imágenes obtenidas en modo GRD para la calibración gamma cero (γ_0) a partir de la intensidad de la señal fue el siguiente:

Tipo de procesamiento	Herramientas de software
Corrección orbital	<i>Apply orbit file</i>
Eliminación del ruido termal	<i>Thermal noise removal</i>
Eliminación del ruido de bordes	<i>Border noise removal</i>
Calibración radiométrica de las imágenes.	<i>Radiometric / Calibrate</i>
Aplicación de filtro Speckel	<i>Single Product Speckle filter</i>
Corrección geométrica.	<i>Range Doppler Terrain Correction</i>
Conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles.	<i>Linear to/from dB</i>
Reescalado de la escala de valores para comparación de imágenes	<i>Data conversion</i>

Tabla 1. Flujo de procesamiento de las imágenes Sentinel 1 GRD

Para la obtención de índices de vegetación radar el flujo de procesamiento (ver tabla 2) requiere la información de fase de las imágenes, por lo que se procesaron imágenes SLC con la siguiente secuencia:

Tipo de procesamiento	Herramientas de software
Corrección orbital	<i>Apply orbit file</i>
Eliminación del ruido termal	<i>Thermal noise removal</i>
Eliminación del ruido de bordes	<i>Border noise removal</i>
Calibración radiométrica de las imágenes.	<i>Radiometric / Calibrate</i>
Aplicación de filtro <i>Speckle</i>	<i>Single Product Speckel filter</i>
Corrección geométrica.	<i>Range Doppler Terrain Correction</i>
Obtención de las matrices C11 y C22	DpRVI y CpRVI

Tabla 2. Flujo de procesamiento de las imágenes Sentinel 1 SLC

Un paso importante en el procesamiento de imágenes radar es eliminar 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). La herramienta para solucionarlo en SNAP (*Border noise removal*) resulta satisfactoria en tierra, pero no en océanos (Luo y Flett 2018).

Se procede entonces con la calibración radiométrica. El objetivo de la calibración de imágenes SAR es ofrecer imágenes en las que los valores de 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 al.* 2007). No obstante, para el cálculo de la retrodispersión (sigma) debe calcularse beta, que expresa a través de la función:

$$\beta_j = 10 \times \log_{10} [(DN_j^2 + A3)A2j]$$

Siendo DN_j el valor digital que representa la magnitud de j-ésimo píxel, $A3$ un desplazamiento fijo y $A2j$ el valor de ganancia de escalado de j-ésimo píxel en una dirección de rango oblicuo.

Por su parte, para la conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles (dB) se realizó una transformación de los valores de Sigma a dB, utilizando la herramienta de SNAP “Linear to/from dB”, que aplica la siguiente transformación a escala logarítmica.

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

Para comparar los resultados de intensidad con los de fase, se optó por utilizar varios índices de vegetación radar. Uno de ellos fue una modificación del índice de vegetación radar:

$$RVI = 4 \sigma^0_{HV} / \sigma^0_{HH} + \sigma^0_{HV}$$

La modificación de este índice fue propuesta por Charbonneau *et al.* (2005) para los casos en los que no hay polarización horizontal disponible, como las imágenes Sentinel 1. En tal caso, la expresión utilizada fue:

$$RVI = 4 \sigma^0_{VH} / \sigma^0_{VV} + \sigma^0_{VH}$$

Dicho índice está pensado para medir la retrodispersión por volumen en polarización dual, características acordes con la estructura regular de las parcelas de monocultivo de musáceas estudiadas.

El índice de vegetación radar dual polarimétrico (DpRVI) ha mostrado ser un buen indicador de la dinámica de crecimiento vegetal en parcelas experimentales de cultivo en Manitoba, Canadá (Mandal *et al.* 2020a).

Por otra parte, Índice de Vegetación Radar de Polarización Compacta (CpRVI) se correlaciona con la densidad de plantas por superficie y con el tipo de cultivo, especialmente con el índice PAI (*Plant Area Index*-PAI) y en menor medida con el contenido en agua de la vegetación (Mandal *et al.* 2020b).

3. Descripción y análisis de resultados

El procesamiento y calibración de las imágenes Sentinel 1 (de intensidad y fase) reveló el potencial de uso de estas imágenes el estudio y seguimiento de monocultivos de musáceas bajo condiciones meteorológicas de nubosidad y lluvia persistentes, que impedirían el trabajo con imágenes ópticas. La polarización vertical-vertical se mostró como la más efectiva para discriminar monocultivos intensivos de musáceas frente a otras coberturas presentes en la zona, como pastizales y áreas forestales, lo que a su vez revela un potencial uso para monitorización de la deforestación.

El procesamiento de las imágenes de intensidad (GRDH) a gamma cero y su posterior reescalado (Figura 3) demostró una mayor capacidad para discriminar el monocultivo en cuestión, probablemente debido a la alta señal retrodispersada por doble rebote en el interior de las parcelas.

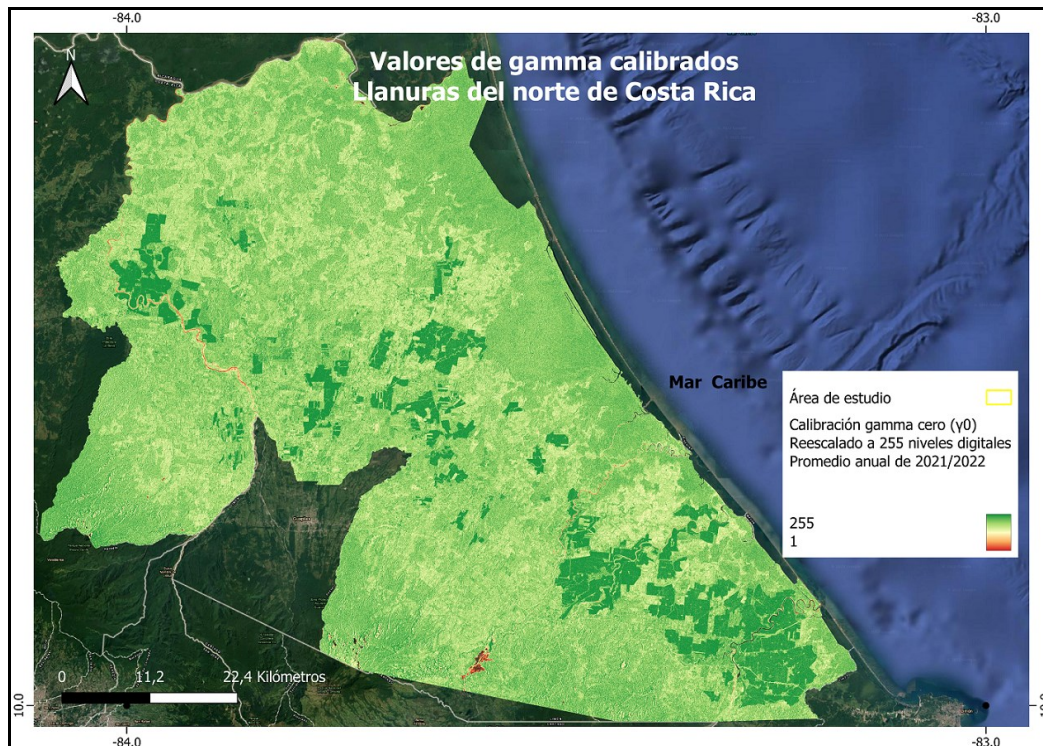


Figura 3. Calibración gamma cero (γ_0)

El índice de vegetación radar o RVI (Figura 4) aunque tradicionalmente se ha correlacionado con biomasa en monocultivos de musáceas, como herramienta de mapeo mostró una menor capacidad de discriminación, aunque con valores análogos a los de un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido a partir de Sentinel-2.

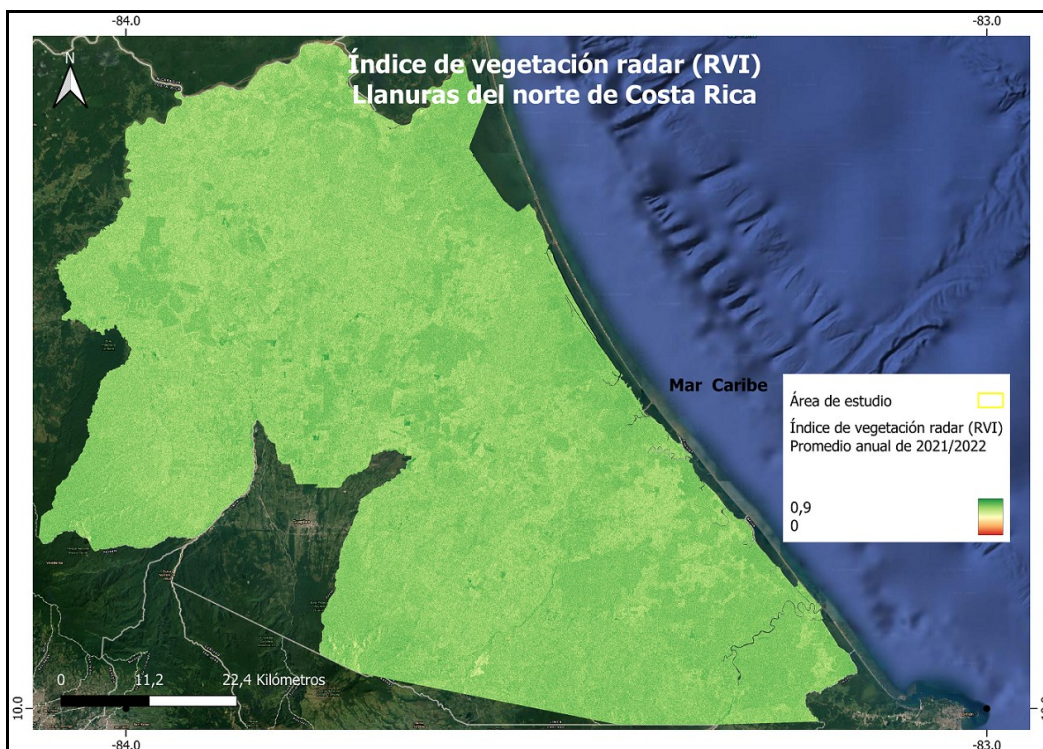


Figura 4. Índice de vegetación radar (RVI) con polarización dual VV

El DpRVI, (*Dual Polarimetric Radar Vegetation Index*), mostró una mayor correlación con el NDVI (Figura 5) que el CpRVI (Figura 6). Para este tipo de índices se utilizaron los datos polarimétricos basados en la fase, es decir, el nivel de producto *Single Look Complex* (SLC). En este caso el índice DpRVI se mostró más eficiente que el CpRVI para discriminar el monocultivo de otras coberturas.

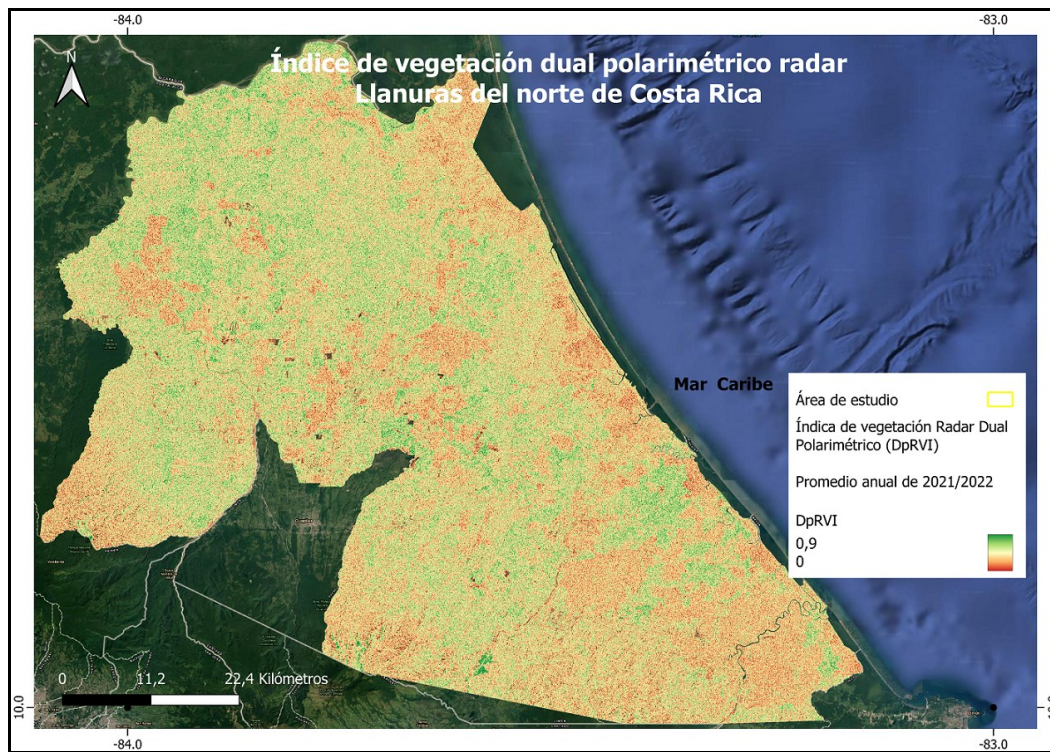


Figura 5. Índice de vegetación radar dual polarimétrico (DpRVI)

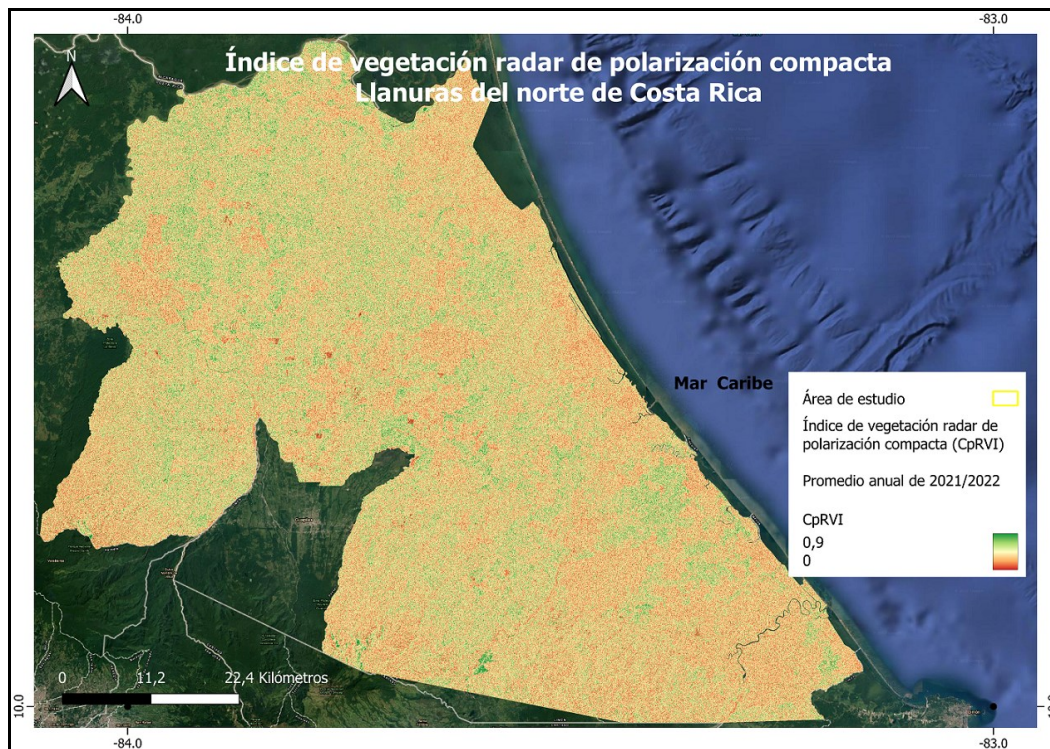


Figura 6. Índice de vegetación radar de polarización compacta (CpRVI)

La validación de resultados se estableció mediante una correlación lineal entre los NDVI (obtenidos a partir de Sentinel 2) con la calibración gamma cero (γ_0) de Sentinel 1 (producto GRD de intensidad) y con los tres índices de vegetación radar con información de fase: el RVI modificado propuesto por Charbonneau *et al.* (2005) y los índices CpRVI y DpRVI propuestos por Mandal (2020a y 2020b).

La validación estadística mostró correlaciones superiores a 0,8 en todos los casos (figura 7) aunque con matices importantes:

- En primer lugar, hay que mencionar que tanto la calibración gamma como el índice RVI mostraron los máximos valores de R^2 , lo que indica que la intensidad de la señal retrodispersada (el nivel de producto GRDH de Sentinel-1) se relaciona más estrechamente con las características morfológicas del monocultivo. Valores superiores a 0,9 son incluso superiores a los esperables con índices de vegetación obtenidos mediante imágenes ópticas.
- En segundo lugar, los índices obtenidos a partir de las imágenes de fase (nivel de producto SLC de Sentinel-1) mostraron igualmente altos valores de correlación con respecto a los NDVI obtenidos a partir de Sentinel-2. Sin embargo, los valores de R^2 inferiores (con respecto a la calibración gamma y al RVI) evidenciaron que la información de fase (SLC) no se correlaciona de forma tan lineal con las características morfológicas del monocultivo.

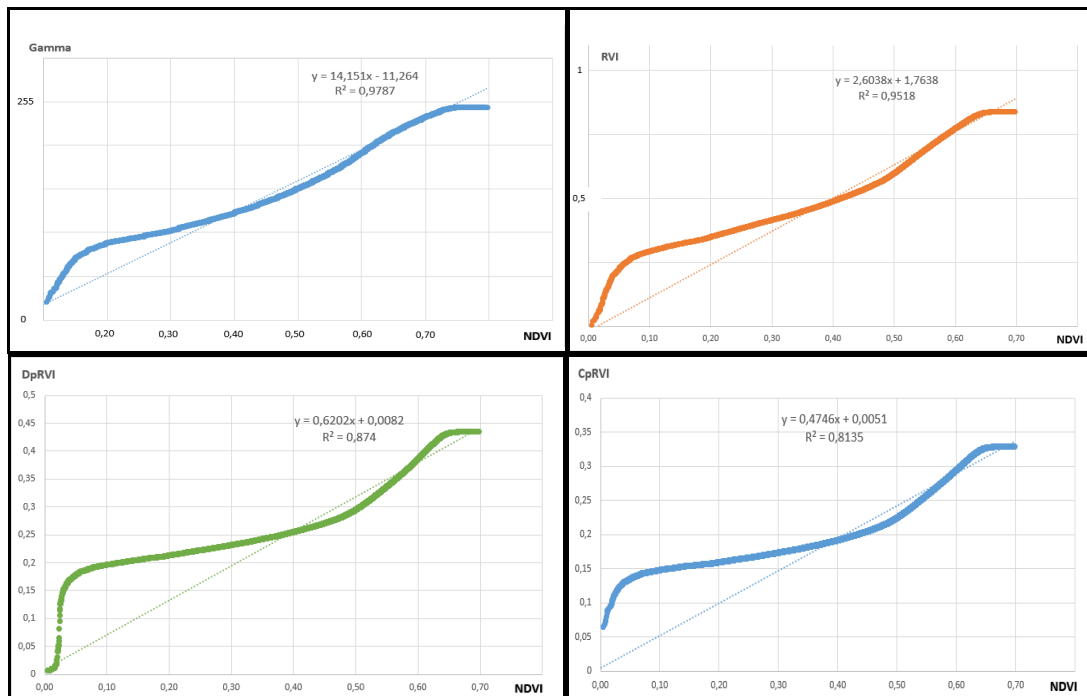


Figura 7. Índices de correlación y R^2 de los índices radar con respecto al NDVI de la zona de estudio.

Junto con establecimiento de correlaciones estadísticas, se realizó un muestreo aleatorio de validación de campo en las parcelas estudiadas (Figura 8). Para ello se establecieron 50 puntos de muestreo en el interior de las parcelas, con una coincidencia del 100 % entre puntos muestreados y existencia de monocultivo de musáceas.



Figura 8. Puntos de verificación en campo con presencia de monocultivo de musáceas dentro del área de estudio (Provincia de Limón. Costa Rica)

Los resultados mostrados en este estudio evidencian el potencial de uso de imágenes radar para el estudio y monitoreo de monocultivos agroforestales de musáceas bajo condiciones meteorológicas de nubosidad y lluvia persistentes, típicas en áreas tropicales como Costa Rica. 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 caracterización y estimación de superficie de los extensos monocultivos de musáceas (banano de exportación). De las dos polarizaciones disponibles para imágenes Sentinel-1, la que mejores resultados proporcionó para discriminar cultivos intensivos fue la polarización VV, permitiendo discriminar con claridad zonas forestales, deforestadas y monocultivos de musáceas. Para las zonas forestales y pastizales se hizo una verificación en campo mediante tecnología GNSS para 40 ubicaciones (Figura 9).

El presente estudio reveló, además, que gamma cero (γ_0) reproduce mejor que ninguna otra variable o índice la señal retrodispersada en el interior de estos monocultivos de musáceas, permitiendo igualmente discriminar sectores de bosque secundario de pastizales (figura 3). El reescalado a 255 niveles digitales permitió eliminar píxeles de baja frecuencia en el histograma, resultando en un mayor contraste de la imagen, cuyos píxeles quedaron agrupados en 3 umbrales, siendo los pastizales los valores más bajos (entre 20 y 60) los bosques valores intermedios (entre 60 y 120) y los valores máximos (más de 200) resultaron corresponder casi en su totalidad con monocultivos de musáceas.

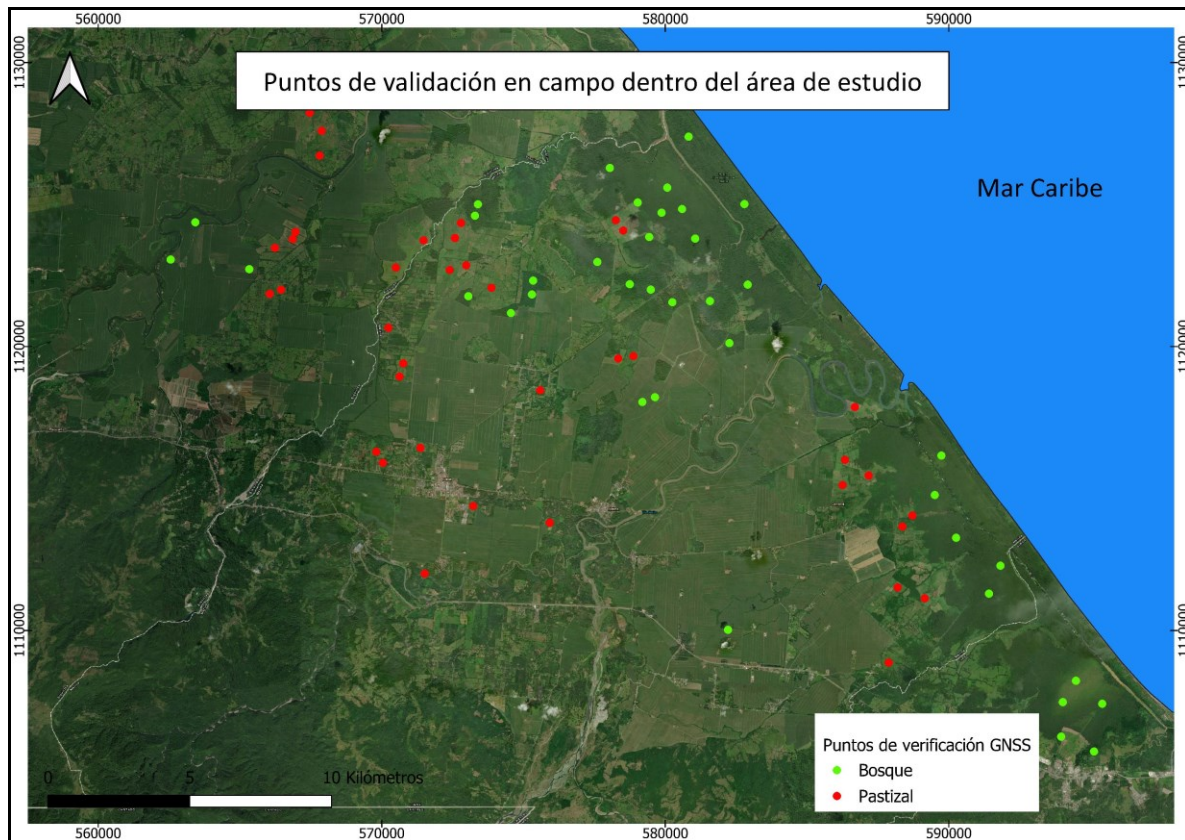


Figura 9. Puntos de verificación en campo con presencia de pastizales y bosques dentro del área de estudio (Provincia de Limón. Costa Rica)

Por otra parte, y aunque todos los índices mostraron valores R^2 superiores a 0,7 el que mostró mayor capacidad de discriminación de monocultivos fue el índice de vegetación radar o RVI. El DpRVI mostró una mayor correlación con el NDVI que el CpRVI. Este tipo de índices requieren de datos polarimétricos basados en la fase, pero índices basados en polarización dual pueden ser ventajosos a la hora de monitorizar cultivos en áreas extensas (Mandal *et al.* 2020). La ventaja operativa es evidente en este caso, al permitir cubrir bimensualmente un área de casi 500.000 hectáreas.

Por otra parte, el índice de vegetación radar o RVI podría correlacionarse con biomasa en monocultivos de musáceas, dado que valores por encima de 0,35 se asocian con volúmenes de biomasa de 23 kg/m³ en cultivos de maíz (Kim y Van Zyl 2004).

4. Discusión y valoración de hallazgos

Cabe resaltar que las imágenes Sentinel-1 únicamente poseen dos bandas que corresponden a las polarizaciones vertical/vertical y vertical/horizontal, lo que obliga a utilizar índices como los propuestos, en ausencia de polarización horizontal. La ventaja de utilizar polarización vertical/vertical es que es sensible a la rugosidad del terreno y a la dispersión por doble rebote (Small 2011) lo que resulta óptimo para discriminar cubiertas como los monocultivos tropicales, muy homogéneos en su morfometría. La morfometría o estructura de estos cultivos, de hecho, podría introducir teóricamente una dificultad a la hora de separar o discriminar musáceas de otros cultivos de la zona (como papaya o piña). Pero su característica estructura interna (una altura por planta en torno a los 2 metros y una separación entre plantas de unos 3 metros) se traduce en una respuesta característica, sistemática y predecible, próxima a los 255 niveles digitales después de la aplicación de reescalado a la imagen en escala logarítmica

(decibeles). Ello permitiría eventualmente utilizar tanto las imágenes calibradas en gamma como los índices expuestos para realizar análisis multitemporales de monitoreo de monocultivos en áreas tropicales.

Otro aspecto crítico en el procesamiento de imágenes radar de apertura sintética es el efecto de desplazamiento por relieve o *foreshortening*, el sombreado topográfico y las variaciones locales de resolución, que son frecuentemente ignoradas o incorrectamente modeladas (Small 2011) pero en el área de estudio dichos problemas no se presentan (al menos de forma significativa) al tratarse de llanuras aluviales de topografía extremadamente plana. Para áreas montañosas se recomienda sustituir la calibración de coeficientes de retrodispersión convencional, basada en el elipsoide, por otra de coeficientes corregidos a topografía plana (Dostálová *et al.* 2022).

5. Conclusiones

Los resultados del presente estudio mostraron que la utilización de la intensidad (gamma) y fase, con polarización dual (vertical/vertical y vertical/horizontal) en Sentinel 1 son suficientes para delimitar y caracterizar la fase productiva de plantaciones de musáceas. Sin embargo, hay algunos aspectos que requieren una profundización en los mecanismos de retrodispersión en banda C, como la heterogeneidad a nivel intraparculario. Para comparaciones multitemporales, por ejemplo, podría resultar útil la desviación estándar de señal retrodispersada intraparcularia. Esta variable también podría resultar clave a la hora de generar clasificaciones.

Otro aspecto a tener en cuenta es la influencia del agua en la señal retrodispersada, dado que las imágenes utilizadas pertenecían a Sentinel 1A, que cubría el área de estudio en la noche (después de las tormentas y precipitaciones diarias, habitualmente producidas en la tarde). Idealmente se podría haber trabajado con Sentinel 1B (que proporcionaba datos matinales en Costa Rica) pero debido a una anomalía relacionada con la fuente de alimentación de la electrónica del instrumento, Sentinel 1B dejó de entregar datos en diciembre de 2021.

A pesar de todo ello, el presente estudio reveló que gamma cero (γ_0) en intensidad, y los índices de vegetación de polarización dual determinan la señal retrodispersada en el interior de estos monocultivos de forma igual o más efectiva que los tradicionales índices de vegetación obtenidos con imágenes ópticas. Todo ello a pesar de que las imágenes Sentinel-1 únicamente poseen dos bandas que corresponden a las polarizaciones vertical/vertical y vertical/horizontal, lo que obliga a usar índices o ratios en ausencia de polarización horizontal. Este hecho se parcialmente compensado por la característica estructura interna (una altura por planta en torno a los 4 metros y una separación entre plantas de unos 3 metros) que favorece una respuesta en la retrodispersión característica, sistemática y predecible.

6. Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica y a la Escuela de Geografía por el apoyo en las investigaciones que el autor está desarrollando en materia de análisis y monitoreo de la deforestación y cambios en la cobertura vegetal en Centroamérica mediante integración multifrecuencia de radar.

Referencias

Canto, B., Orozco, M., Martínez, L., Manzo, G., James, A., Rodríguez, C., Islas, I., Beltrán, M., Guzmán, S., Garrido, E., Higuera, I., & Sandoval, J. (2015). Bananos y plátanos, frente al cambio climático. En *Hacia dónde va la ciencia en México: Ecosistemas, plagas y cambio climático* (pp. 61-77). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Charbonneau, F.; Trudel, M.; Fernandes, R. 2005. Use of Dual Polarization and Multi-Incidence SAR for soil permeability mapping. In *Proceedings of the 2005 Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) Workshop*, St-Hubert, QC, Canada.

Curlander, J. C., & McDonough, R. N. 1991. Synthetic aperture radar (Vol. 11). Wiley, New York.

De Bernardis, C.G., Vicente-Guijalba, F., Martinez-Marin, T., Lopez-Sanchez, J.M., March 2015. Estimation of key dates and stages in rice crops using dual-polarization SAR time series and a particle filtering approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8 (3), 1008–1018. Doi: [10.1109/JSTARS.2014.2372898](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2372898)

Dostálová, Alena & Navacchi, Claudio & Greimeister-Pfeil, Isabella & Small, David & Wagner, Wolfgang. (2022). The effects of radiometric terrain flattening on SAR-based forest mapping and classification. *Remote Sensing Letters*, 13. 855-864. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/2150704X.2022.2092911>

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>

Fikriyah, V.N., Darvishzadeh, R., Laborte, A., Khan, N.I., Nelson, A. 2019. Discriminating transplanted and direct seeded rice using Sentinel-1 intensity data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 76, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.007>

Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Bahadur, R., & Cherrington, E. (Eds.). (2019). The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. *SERVIR Global Science*. <https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>

Lasko, K., Vadrevu, K.P., Tran, V.T., Justice, C., 2018. Mapping double and single crop paddy rice with Sentinel-1A at varying spatial scales and polarizations in Hanoi, Vietnam *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11 (2), 498–512. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2784784](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2784784)

Luo, Y., & Flett, D. (2018). Sentinel-1 Data Border Noise Removal and Seamless Synthetic Aperture Radar Mosaic Generation. *Proceedings*, 2(7), 330. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ecrs-2-05143>

Moreira, Alberto *et al.* 2013. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine (GRSM)*. 1. 6-43. 10.1109/MGRS.2013.2248301. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>

Mandal, Dipankar & Kumar, Vineet & Ratha, Debanshu & Dey, Subhadip & Bhattacharya, Avik & Lopez-Sanchez, Juan & McNairn, Heather & Rao, Ys. 2020a. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*. 247. 111954. 10.1016/j.rse.2020.111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>

Mandal, D., Ratha, D., Bhattacharya, A., Kumar, V., McNairn, H., Rao, Y.S., Frery, A.C. 2020b. A radar vegetation index for crop monitoring using compact polarimetric sar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(9), 6321–6335. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2976661>

Mandal, D., Kumar, V., Bhattacharya, A., Rao, Y.S., Siqueira, P., Bera, S., 2018. Sen4Rice: a processing chain for differentiating early and late transplanted rice using timeseries Sentinel-1 SAR data with Google

Earth engine. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 15 (12), 1947–1951. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2865816>

Moreira, A., Prats, I. P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. y Papathanassiou, P. 2013. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1:6-43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>

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.

Nelson, A., Setiyono, T., Rala, A., Quicho, E., Raviz, J., Abonete, P., Maunahan, A., Garcia, C., Bhatti, H., Villano, L., *et al.* 2014. Towards an operational SAR-based rice monitoring system in Asia: examples from 13 demonstration sites across Asia in the RIICE project. *Remote Sensing*, 6 (11), 10773–10812. <https://doi.org/10.3390/rs6110773>

Nguyen, D.B., Gruber, A., Wagner, W., 2016. Mapping rice extent and cropping scheme in the Mekong Delta using Sentinel-1A data. *Remote Sensing Letters*, 7 (12), 1209–1218. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1225172>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OECD]. (2017). Agricultural Policies in Costa Rica. OECD Publishing. http://www.oecd.org/countries/costarica/AgPol_CR_en.pdf

Kim, Y., and van Zyl, J. 2004. Vegetation effects on soil moisture estimation. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. *Proceedings. 2004 IEEE International*, Vol. 2, pp. 800-802. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1368525>

Kussul, N., Lemoine, G., Gallego, F.J., Skakun, S.V., Lavreniuk, M., Shelestov, A.Y., 2016. Parcel-based crop classification in Ukraine using Landsat-8 data and Sentinel-1A. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(5), 1959–1970. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2560141>

Shen, W., Li, M., Huang, C., Tao, X., Li, S., & 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>

Shimada, Masanobu & Itoh, Takuya & Motohka, Takeshi & Watanabe, Manabu & Shiraishi, Tomohiro & Thapa, Rajesh & Lucas, Richard. (2014). New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, 155. 10.1016/j.rse.2014.04.014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014>

Singha, M., Dong, J., Zhang, G., Xiao, X., 2019. High resolution paddy rice maps in cloudprone Bangladesh and Northeast India using Sentinel-1 data. *Scientific Data*, 6 (1), 26. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0036-3>

Small, D. (2011). Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 3081-3093. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>

Rojas, N. (2011). Cuencas hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

Song, Y.-S., Sohn, H.-G., & Park, C.-H. (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>

Van Tricht, K., Gobin, A., Gilliams, S., Piccard, I., 2018. Synergistic use of radar Sentinel-1 and optical Sentinel-2 imagery for crop mapping: a case study for Belgium. *Remote Sensing*, 10 (10), 1642. <http://doi.org/10.3390/rs10101642>

Vargas Céspedes, A., Watler, W., Morales, M., Vignola, R. (2017). Prácticas efectivas para la reducción del impacto por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. Editado por el Ministerio de Agricultura de Costa Rica (MAG). Ficha técnica. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8205.pdf>

Whelen, T., Siqueira, P., 2018. Time-series classification of Sentinel-1 agricultural data over North Dakota. *Remote Sensing Letters*, 9 (5), 411–420. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1450121>

