

# Fusion of Sentinel 1 and Alos Palsar Data to Separate Palm Oil Plantations from Forest Cover Mapping using Pauli Decomposition Approach

Muñoz Erith, Zozaya Alfonso, Lindquist Erik

**Abstract**—In this work, a multi-sensor approach to extract misclassification oil palm plantations from forest cover map using a modified Pauli Decomposition technique is presented. The proposed method includes the generation of a primary forest cover map built using a Landsat-based Normalized Difference Fraction Index, and then the palm oil plantation is filtered out using scattering mechanisms through the Modified Pauli Decomposition technique based on the fusion of Sentinel 1 and Alos Palsar data. Accuracy assessment of the final product, produces accuracy values of 0.946 for forest class, while the classification accuracy for non-forest class is 0.92.

**Index Terms**—SAR, PolSAR, NDFI, Modified Pauli Decomposition, Forest Mapping, Landsat.

## I. INTRODUCCIÓN

Las Técnicas de Teledetección Satelital (TTS's), se han convertido en un componente imprescindible dentro de los Sistemas Nacionales de Monitoreo de Bosques (SNMB) de muchos países, en el contexto del programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD+) [1], [2], [3]. En el contexto de REDD+, la implementación de TTS's ha permitido a los países partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), disminuir tanto los tiempos como los costos asociados con el monitoreo de sus bosques [4], [5], [6]. Las plataformas satelitales incluyen observaciones en los rangos visible (VIS), infrarrojo (IR), y microondas (MW) del espectro electromagnético; lo que permite el monitoreo de coberturas de bosque a partir de una amplia variedad de enfoques metodológicos [7], [8]. Entre los principales enfoques utilizados actualmente resaltan: (i) análisis espectral [9], (ii) análisis de series temporales [10], [11], (iii) análisis espacial [12], análisis de mecanismos de interacción electromagnética [13], o fusión de datos VIS, IR, y MW [14], entre otros.

Actualmente, la mayoría de los SNMB utilizan exclusivamente imágenes VIS para la clasificación y mapeo de coberturas de bosque a partir de imágenes satelitales; tales como las provistas por Landsat 8 y Sentinel 2 [15]. Este tipo de enfoque limita la capacidad de análisis de la cobertura a metodologías basadas principalmente en análisis espectral.

Una limitación importante que se deriva de utilizar exclusivamente imágenes satelitales multispectrales, es la dificultad para discriminar entre algunos tipos de coberturas que pueden tener firmas espectrales similares. Un ejemplo particular de estas coberturas son la cobertura de bosque y la cobertura de palma africana. En la tabla I, se han tabulado las firmas espectrales de la cobertura de bosque y palma africana para las principales bandas de Landsat 8. Estas firmas espectrales fueron generadas tomando áreas de interés de 200 píxeles para cada cobertura y promediando en números digitales la reflectancia en tope de atmósfera para cada banda del sensor Landsat 8. De esta tabla, es posible determinar que la diferencia porcentual global en reflectancia para estas coberturas es en promedio de 10,74%, y en el caso de análisis visual, la diferencia porcentual considerando las bandas azul, verde y roja es en promedio de 15,01%. Estas diferencias porcentuales tan bajas, implican que la probabilidad de cometer errores al discriminar entre estas clases, utilizando como base imágenes Landsat 8, y similares, es considerablemente alta.

TABLA I  
SIMILITUD ESPECTRAL DE COBERTURAS DE BOSQUE Y PALMA AFRICANA CON REFERENCIA A LAS BANDAS DE LANDSAT 8

Banda	Nombre	Bosque	Palma africana	Diferencia %
B1	AC	132	111	15.90
B2	Azul	188	157	16.48
B3	Verde	363	388	6.44
B4	Rojo	176	226	22.12
B5	NIR	3355	3987	15.85
B6	SWIR1	1235	1403	11.97
B7	SWIR2	469	508	7.67
B10	TIRS1	2941	2941	0.0
B11	TIRS2	2910	2903	0.24

En este contexto, el uso de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés), y muy particularmente la Polarimetría de Radar de Apertura Sintética (PolSAR), proporciona información complementaria que puede ser utilizada para mejorar las capacidades de discriminación de los sensores multispectrales.

Una característica importante de los datos polarimétricos, es la coherencia; que permite relacionar rasgos estructurales de la cobertura a partir del nivel de coherencia que existe en el eco recibido por el sensor SAR. En síntesis, el eco recibido por un sensor SAR, está dado como la superposición de un gran número de ecos generados por la cobertura irradiada.

The Food and Agriculture Organization (FAO), Quito-Ecuador, e-mail: erith7@gmail.com

Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM), Santiago de Chile-Chile, e-mail:a.zozayas@utem.cl

The Food and Agriculture Organization (FAO), Roma-Italia, e-mail:Erik.Lindquist@fao.org

Esta superposición, puede ser coherente o no, dependiendo de la estructura física de la cobertura. Por ejemplo, en el caso de cobertura de bosque, en donde la canopia tiene generalmente una estructura aleatoria, el eco recibido por el radar tendrá una coherencia baja en su fase como consecuencia de la alta aleatoriedad de los ecos contribuyentes. Por otra parte, en el caso de la palma africana, la geometría de esta cobertura por lo general tiene un patrón repetitivo, que tiene como consecuencia la generación de ecos coherentes en la señal que recibe el sensor SAR [16].

Este principio, generalmente conocido como mecanismos de interacción, es la base para la implementación de técnicas PolSAR para la clasificación de coberturas [17]. Las técnicas de descomposición polarimétrica, permiten desagregar el eco recibido por el radar, para recuperar los tipos de interacciones bases que lo conforman, y en base a la complejidad de las interacciones obtener información sobre la estructura de la cobertura. En este trabajo, se propone la Descomposición Modificada de Pauli [18], para llevar a cabo el proceso de descomposición de imágenes de polarimetría completa, construidas a partir de la fusión de imágenes Sentinel 1 y Alos Palsar, con el fin de extraer de la cobertura de bosque de un área piloto, coberturas de plantaciones de palma africana que persisten a pesar del proceso de clasificación mediante imágenes Landsat. Aunque existen otras técnicas de descomposición polarimétrica, se ha optado por la Modificada de Pauli, ya que esta puede ser calculada a partir de las amplitudes del dato PolSAR, y estos datos son proporcionados con acceso libre por Google Earth Engine (GEE) tanto para Sentinel 1 como para los mosaicos anuales de Alos Palsar.

De esta forma, esta investigación propone la implementación de una técnica novedosa en la que se integran datos SAR de acceso libre y de diferentes frecuencias como lo son Sentinel 1 y Alos Palsar a partir de PolSAR, para resolver una limitación intrínseca de los sensores multiespectrales de resolución media como Landsat 8 para extraer coberturas de palma africana de la cobertura de bosque en procesos de clasificación supervisada.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Análisis de NDFI

El Índice Normalizado de Diferencias de Fracciones (NDFI, por sus siglas en inglés), es un índice obtenido a partir de la descomposición de mezclas espectrales de imágenes multiespectrales, como lo son las imágenes Landsat. La descomposición de mezclas espectrales, permite descomponer la información multiespectral de un pixel a partir de fracciones de candidatos de clases puras [19], [20], [21]. Las proporciones de las diferentes fracciones que contiene cada candidato de clase pura, permite clasificar el pixel de cobertura de bosque en un tipo de cobertura específico, tales como bosque estable, bosque degradado, bosque regenerado, deforestación, etc. A partir de este principio, NDFI fue propuesto como un índice que permite calibrar en una sola magnitud, una variable que permita realizar la clasificación de modo directo, a partir de la ecuación 1 [22].

$$NDFI = \frac{GV_{Sh} - (NPV + So)}{GV_{Sh} + NPV + So} \quad (1)$$

donde  $GV_{Sh}$  relaciona a la fracción de vegetación verde  $GV$  con la fracción de sombras  $Sh$  mediante la ecuación 2.

$$GV_{Sh} = \frac{GV}{100 - Sh} \quad (2)$$

$NPV$  es la fracción de vegetación no fotosintética,  $So$  es la fracción de suelo. NDFI es un índice cuyo rango de valores va desde -1 a 1; cuando vale 1, la sumatoria  $NPV+So$  tiende a cero, y este es el caso de cobertura de bosque denso y verde, mientras que cuando vale -1 la vegetación verde tiene a cero, lo que corresponde a deforestación o cobertura no vegetal. En los valores intermedios es posible identificar regeneración y degradación forestal.

### B. Introducción a PolSAR

El análisis de Polarimetría de Radar de Apertura Sintética permite combinar los diferentes modos de polarización capturados por las plataformas SAR, para caracterizar objetos en la superficie de la Tierra a partir de sus mecanismos de interacción electromagnética [23], [24], [25]. En general, la polarimetría toma en consideración los modos de transmisión del pulso electromagnético emitido por el sensor satelital y la recepción del eco retrodispersado por la cobertura de la superficie. En el contexto de las plataformas satelitales SAR, las combinaciones de polarizaciones posibles son HH, HV, VH, y VV. La primera letra indica la polarización de la onda enviada desde el sensor, y la segunda corresponde a la polarización capturada por el sensor en forma de eco retrodispersado por la cobertura. De este modo, la letra H hace mención a que la onda se transmite o recibe de forma horizontal respecto al plano proyectado de la antena del sensor, y la V hace referencia al caso vertical.

El análisis polarimétrico puede llevarse a cabo a partir de diferentes técnicas. Una de las principales técnicas polarimétricas usadas en el contexto de análisis de cobertura y uso de la tierra es la Descomposición Polarimétrica Coherente (CPD, por sus siglas en inglés). CPD permite descomponer la información polarimétrica de un píxel, en mecanismos de interacción electromagnética bases como lo son dispersiones lineales, dispersiones dobles, y dispersiones volumétricas. Estos mecanismos de interacción permiten realizar clasificaciones de las coberturas considerando características físicas intrínsecas. En este contexto, es importante considerar que el campo eléctrico  $E^s$  del eco que vuelve al sensor después de la interacción con la cobertura, está relacionado con el campo eléctrico incidente  $E^i$  mediante la matriz de Sinclair, como lo indica la ecuación 3

$$\begin{pmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{pmatrix} = \frac{e^{-jk_r}}{r} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{pmatrix} \quad (3)$$

La ecuación 3 relaciona a las polarizaciones horizontales y verticales de los campos eléctricos incidentes ( $E_H^i$  y  $E_V^i$ ) y dispersados por la cobertura ( $E_H^s$  y  $E_V^s$ ), con el medio de propagación y con las propiedades de interacción de

la cobertura. El primer factor del miembro derecho de la ecuación 3, considera la información correspondiente al medio de propagación de la onda mediante la fase del campo eléctrico, donde  $\kappa$  es el número de onda y  $r$  es la distancia que viaja la onda desde el sensor hasta la cobertura en la superficie. El segundo factor corresponde a la matriz de dispersión de Sinclair, donde los sub-índices H y V corresponden a las polarizaciones horizontal y vertical del campo eléctrico, y los componentes  $S_{qp}$  de la matriz de Sinclair  $[S]$  se denominan coeficientes complejos de dispersión y contienen la información sobre la interacción del pulso emitido por el sensor SAR y la cobertura en superficie. El tercer factor corresponde a las componentes del campo eléctrico incidente en el blanco. Un hecho físico importante de resaltar de la ecuación 3, es que la matriz de Sinclair contiene la información física de la interacción del campo eléctrico enviado por el radar, y el eco retrodispersado por la cobertura. Por este motivo, el tratamiento, comprensión, y solución de la matriz  $[S]$  permite identificar características particulares de la cobertura. Entre los métodos de descomposición polarimétrica coherentes más conocidos, para descomponer la matriz  $[S]$  en mecanismos de dispersión simples, resaltan: (i) descomposición de Pauli, (ii) descomposición de Krogager, y (iii) descomposición de Cameron [16]. Particularmente, en este trabajo se describirá la descomposición de Pauli, en donde la matriz  $[S]$  se expresa como la combinación lineal de tres matrices bases, en la que cada una está asociada a un mecanismo de interacción electromagnética simple, tal y como muestra la ecuación 4 [26].

$$\begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

La solución de la ecuación 4, consiste en obtener los valores para  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ , que satisfacen la condición de dependencia de la ecuación. Donde  $\alpha$  corresponde a mecanismos de interacción simple que generalmente tiene lugar en blancos con superficies simples como suelo desnudos y cuerpo de agua,  $\beta$  mecanismo de interacción de doble rebote que tiene lugar en infraestructuras o rebotes ocasionados por troncos de árboles, y  $\gamma$  mecanismo de interacción volumétrico que se asocia con blancos complejos como la canopia de árboles [16], [27]. Una solución de la ecuación 4 se muestra en las ecuaciones 5, 6, y 7.

$$\alpha = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{2} * S_{HV} \quad (7)$$

Para visualizar los mecanismos de descomposición de Pauli, se construye la combinación  $RGB = \beta^2, \gamma^2, \alpha^2$ . En esta combinación, el color rojo, verde, y azul, presentes en la imagen resultante, corresponden a los mecanismos de interacción lineal, doble y volumétrico respectivamente, mientras que las tonalidades intermedias, corresponden a mezclas de estos mecanismos base.

### C. Descomposición de Pauli Modificada

La solución y análisis de la ecuación 4, muestra la necesidad intrínseca de disponer de datos SAR con 4 polarizaciones (quad polarization), o al menos con tres polarizaciones (full polarization), considerando que el principio de reciprocidad satisface que  $S_x = S_{HV} = S_{VH}$ , para poder resolver la matriz de Sinclair. Para asegurar la correlación espacial y temporal de las mecanismos de interacción [28], las diferentes polarizaciones se espera sean capturadas desde el mismo sensor, y de forma simultánea. Este requerimiento representa una limitación para combinar, por ejemplo, las polarizaciones HH, HV capturadas con Alos Palsar, con las polarizaciones VV, y VH capturadas con Sentinel 1, disponibles gratuitamente. La posibilidad de combinar polarizaciones de Alos Palsar y Sentinel 1, en un método de descomposición polarimétrica es prometedor y esperanzador, ya que permitiría generar información a escalas sin precedentes para el monitoreo de las coberturas de bosque del planeta. La opción propuesta en esta investigación, para realizar la fusión de las polarizaciones de Alos Palsar y Sentinel 1; consiste en la modificación de la matriz de Sinclair, de manera tal que, las polarizaciones cruzadas de ambos sensores sean utilizadas en lugar de la de un único sensor, mediante la matriz mostrada en la ecuación 8.

$$[S] = \begin{pmatrix} |S_{HH}^L| & |S_{HV}^L|e^{j(\phi_{HV}^L - \phi_0)} \\ |S_{HV}^L|e^{j(\phi_{HV}^L - \phi_0)} & |S_{VV}^C|e^{j(\phi_{VV}^C - \phi_0)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

En la ecuación 8, los superíndices  $L$  y  $C$ , representan las frecuencias de operación de los sensores Alos Palsar y Sentinel 1 respectivamente. Los subíndices representan las polarizaciones de la dispersión recibida por el sensor SAR. La polarización cruzada de Alos Palsar  $S_{HV}^L$  fue seleccionada en lugar de la de Sentinel 1  $S_{VH}^C$ , con la finalidad de priorizar la mayor penetración que se obtiene al utilizar banda L. La solución de la matriz modificada de Sinclair, conduce al conjunto de ecuaciones 5, 6, and 7, como consecuencia de la implementación de la Descomposición de Pauli [16]. En este documento, este procedimiento será nombrado desde este apartado como Descomposición Modificada de Pauli. Este procedimiento permite extraer de las coberturas de bosque a las plantaciones de palma africana que puedan ser clasificadas incorrectamente como clase bosque a partir de imágenes multiespectrales [18], y en este trabajo es integrado en una metodología de mapeo de clases de bosque y no bosque.

### III. ENFOQUE METODOLÓGICO

En esta sección, se detalla el enfoque metodológico propuesto para extraer coberturas de palma africana de un mapa bosque-no bosque clasificado de forma supervisada usando imágenes Landsat 8, a partir de la integración de datos ópticos y SAR. Para esto, se genera un mapa bosque-no bosque (BNB) del área de interés utilizando NDFI, y posteriormente se extraen áreas de plantaciones de palma africana mediante la Descomposición Modificada de Pauli. Es importante mencionar, que el mapa BNB, es un mapa de clases en el que todas las coberturas del áreas de estudio que no sean

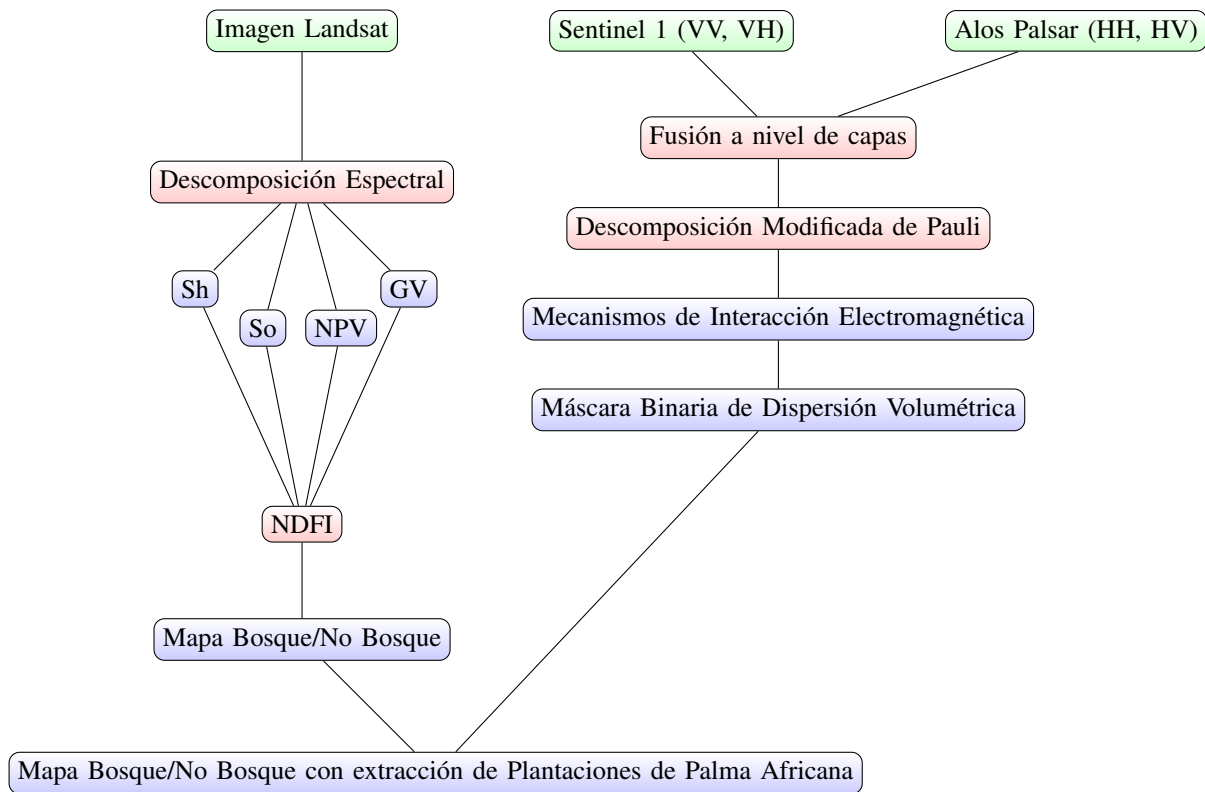


Fig. 1. Diagrama de la propuesta metodológica. En color verde se resaltan los datos usados, en rojo las metodologías integradas, y en azul los productos intermedios y final. El resultado final es un mapa BNB en el cual han sido extraídas las plantaciones de palma africana.

bosque se agrupan en la clase *no bosque* (NB), mientras que la cobertura de bosque es una clase única (clase B). Cuando la cobertura de palma africana es clasificada como bosque, entonces esta cobertura es un factor de incertidumbre al ser excluida de la clase *no bosque*, y esto tiene como efecto un aumento irreal de la cobertura de bosque.

La Fig. 1, muestra el esquema general de la propuesta metodológica planteada, donde con fines didácticos, se muestran los datos de entrada en color verde, las técnicas utilizadas en color rojo, y los productos intermedios y final en color azul. El procedimiento implica, el procesamiento por separado de la imagen Landsat y el de las imágenes SAR. La imagen Landsat, es utilizada para el cálculo de candidatos puros a partir de la descomposición espectral. Para esto, la imagen debe contener las bandas verde (green), rojo (red), infrarrojo cercano (nir), infrarrojo de onda corta 1 (swir1), e infrarrojo de onda corta 2 (swir2). Esto permitirá descomponer la imagen en los candidatos puros sombra (Sh), suelo (So), vegetación no fotosintética (NPV), y vegetación verde (GV). A partir de los candidatos puros, se calcula NDFI mediante la ecuación 1. NDFI, es utilizado para construir umbrales en base a puntos de control utilizando imágenes satelitales de 3.5 metros de resolución espacial, y generar un mapa BNB.

Por otra parte, el par de imágenes SAR integrado por Sentinel 1 y Alos Palsar, es procesado para crear una imagen con las polarizaciones VV, VH, HH, y HV, a una resolución espacial de 30m, para garantizar la compatibilidad espacial con las imágenes Landsat. Luego, se utilizan las ecuaciones 5, 6, y 7 para construir una imagen sintética en paleta RGB de los

mecanismos de dispersión. A partir de esta imagen, se genera una máscara binaria en la que se asigna 1 a los píxeles donde predomine la dispersión volumétrica, y 0 al resto. Finalmente, este mapa binario es combinado con el mapa BNB generado con NDFI, para filtrar las plantaciones de palma africana del mapa BNB definitivo.

#### A. Área de Estudio

Con la finalidad de mostrar el alcance práctico de la metodología propuesta, se ha seleccionado como área piloto una región al noreste del Ecuador, en donde se ha identificado la existencia de cobertura de bosque y cobertura de palma africana. En la Fig. 2 se muestra a modo de referencia la ubicación del área de estudio en el Ecuador, y cabe destacar que es una región fronteriza entre las provincias de Sucumbíos y Orellana. Esta zona se caracteriza por presentar un desarrollo continuo en las últimas dos décadas, y además una alta dinámica en el cambio de uso de suelo, principalmente por la aparición de nuevos asentamientos y las plantaciones de palma africana.

#### B. Datos y Herramientas Utilizadas

Tanto el producto NDFI, como la descomposición modificada de Pauli, fueron realizados en la plataforma SEPAL [29], a partir de scripts desarrollados en Javascript utilizando el editor de códigos de Google Earth Engine [30]. De igual modo, utilizando la plataforma SEPAL se construyó un compuesto de imágenes Landsat para las fechas comprendidas entre el

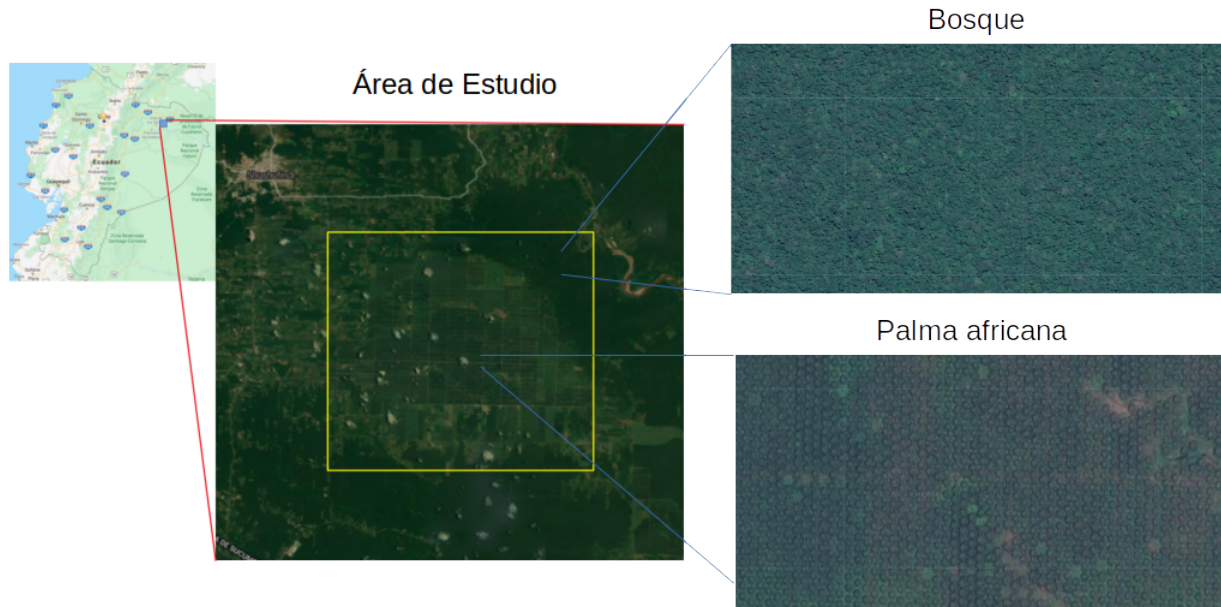


Fig. 2. Ubicación relativa del área de estudio, y características de la cobertura actual a partir de una imagen satelital con resolución espacial de 3.5 metros. El polígono amarillo dentro del área de estudio, ha sido resaltado intencionalmente, debido a que en esta área es donde predomina la plantación de palma africana. Al lado derecho de esta imagen se han ampliado una muestra de la cobertura de bosque, y una muestra de la cobertura de palma africana para resaltar las diferencias en textura y geometría que favorecen la implementación de PolSAR.

01/01/2018 y el 31/12/2018. Este mismo rango de fecha fue utilizado para construir un compuesto de Sentinel 1, y en el caso de Alos Palsar se utilizó el mosaico anual de 2018.

### C. Aspectos Geométricos para el uso de PolSAR

En la parte derecha de la Fig. 2 se observan muestras ampliadas de la cobertura de bosque y de la palma africana. La cobertura de bosque se caracteriza por canopías y distribución de árboles aleatoria, que conllevan a una textura carente de patrones y geometrías repetitivas, que favorecen a dispersiones incoherentes características de mecanismos de interacción volumétricos. Por otra parte, la cobertura de palma africana, presenta árboles regularmente distribuidos, y con doseles que tienen una geometría repetitiva. Por estas características, la retrodispersión generada por la cobertura de palma africana es coherente, y conduce a mecanismos de dispersión de doble rebote y simple. Esta diferencia estructural entre ambas coberturas, permiten su discriminación a partir del uso de PolSAR.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan, discuten y analizan los principales resultados que se han derivado de este trabajo. A continuación se enlistan y desarrollan cada uno de ellos:

### A. Análisis de la Cobertura

En la Fig. 3, se muestra el compuesto Landsat 8 utilizado para realizar el análisis de cobertura del área de estudio. La

combinación de colores RGB= nir, swir1, red, utilizada para la interpretación visual de la imagen muestra: (i) el suelo desnudo y zonas urbanas en color verde, (ii) zonas agrícolas en color naranja, (iii) zonas boscosas en tonos marrones; las más densas en tono marrón oscuro, y las menos densas en marrón claro, y (v) cuerpo de agua en color negro.

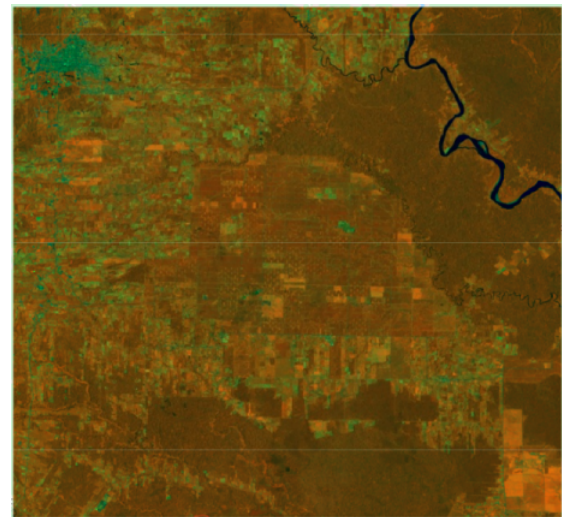


Fig. 3. Compuesto Landsat 8 para el área de estudio en combinación RGB = nir, swir1, red. Este compuesto fue generado utilizando la plataforma SEPAL [29].

De la Fig. 3 se deduce que aunque existen algunas diferencias apreciables de modo visual, entre la cobertura bosque y la plantaciones de palma africana, la diferencia de

tonos es muy suave, por lo que no resulta factible hacer una separación de clases con estos insumos, garantizando altos niveles de exactitud. En este contexto, la posibilidad de generar esta separación usando Descomposición Modificada de Pauli representa una solución factible para esta limitación.

### B. Descomposición Espectral

Si bien es cierto, que es técnicamente factible generar una máscara de bosque directamente de la imagen mostrada en la figura 3, realizar esta tarea de la forma más automáticamente posible, facilita y posibilita su implementación operativa en el contexto de escala nacional, para países que realizan reportes a la CMNUCC. La Fig. 4, muestra los candidatos puros resultantes del procedimiento de descomposición espectral realizado a la imagen Landsat 8. En las subfigura 4a, se muestra la fracción de vegetación verde.

Esta fracción muestra valores similares tanto para la cobertura de bosque como para las plantaciones de palma africana. Por su parte, la subfigura 4b, muestra la fracción de sombras. Esta fracción, como es de esperarse muestra valores de sombras más altos para la cobertura de bosque que para la cobertura de palma africana. Por este motivo, en algunas investigaciones se ha tomado ventaja de esta propiedad para construir árboles de decisión orientados a separar bosque intacto, de bosque degradado y de áreas deforestadas [22]. Es importante notar, que para la fracción de sombras, la cadena de píxeles en blanco mostrado en la parte superior derecha de la subfigura 4b, corresponde a un río en superficie, y es apreciable un nivel de contenido de sombras máximo para esta cobertura. La explicación para este efecto radica en el hecho de que el comportamiento espectral del agua del río no se parece mucho a los otros candidatos, y por mayor similitud es clasificado exclusivamente como sombra. Por otra parte, la fracción NPV, que esta vinculada con vegetación no verde, mostrada en la subfigura 4c denota bajos niveles de presencia tanto en la cobertura de bosque como en las plantaciones de palma africana, lo que permite descartar la existencia de materia orgánica degradada por incendios o vegetación con despigmentación fotosintética. Esta fracción sin embargo, muestra niveles de presencia en coberturas agrícolas. La fracción de suelo mostrada en la subfigura 4d, muestra niveles de presencia importantes en las zonas urbanas y en las zonas agrícolas, sin embargo se nota que está prácticamente ausente tanto en la cobertura de bosque como en la de plantaciones de palma africana.

La integración holística de las fracciones mostradas en la figura 4, facilita detectar las condiciones de presencia y/o ausencia de los candidatos, para detectar coberturas de bosques y cobertura de plantaciones de palma africana, así como también separar otras clases no bosque como lo son coberturas urbanas, cuerpos de agua, y agrícolas. Sin embargo, la observación de las 4 fracciones no permite identificar rasgos que permitan separar espectralmente entre si a la cobertura de bosque de la cobertura de las plantaciones de palma africana, lo que confirma la hipótesis inicial, que establece la dificultad para separar estas coberturas desde imágenes Landsat.

### C. Descomposición Modificada de Pauli

La Fig. 5, muestra los mecanismos de interacción electromagnética (MIE) resultantes de la implementación de la Descomposición Modificada de Pauli, a partir de la fusión de las imágenes Sentinel 1 y Alos Palsar. En esta figura, a diferencia del mosaico Landsat de la Fig. 3, se observa que la cobertura de palma africana ha sido extraída de la clase de bosque, y agregada a la clase no bosque. Es importante destacar, que ha diferencia de la Fig. 4, en donde no existe separación visual entre la palma africana y la cobertura de bosque; en la Fig. 5, la cobertura de palma africana está clasificada correctamente como clase no bosque a partir de la dispersión simple y doble rebote denotada en tonos púrpura. Esto es una consecuencia directa de las diferencias estructurales asociadas a cada una de las coberturas, que causan diferentes MIE's. El resultado mostrado en la figura 5, permite crear una máscara para extraer del mapa BNB construido mediante NDFI, las plantaciones de palma africana, conjuntamente con otras clases no bosque asociadas con dispersión no volumétrica.

### D. Mapa BNB y Filtrado de Plantaciones de Palma Africana

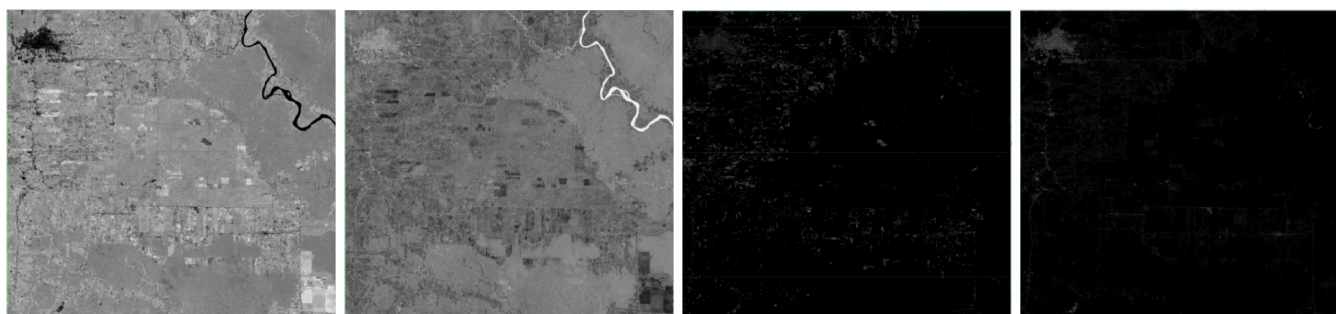
En la Fig. 6, se muestra la máscara BNB obtenida a partir de la clasificación de NDFI. Esta máscara fue construida considerando a los píxeles con NDFI mayores a 0.80 como clase de bosque (color verde) y al resto como clase no bosque (color blanco). Para la definición de este umbral, se tomaron 150 puntos de control, levantados a partir de imágenes multispectrales de 3.5 metros de resolución espacial. Este producto define los píxeles con escasa vegetación verde como clase no bosque, sin embargo es posible apreciar que la cobertura de palma africana está clasificada de modo incorrecto como clase bosque.

Por su parte, la Fig. 7 es una máscara en la cual los píxeles verdes representan la clase bosque en donde predomina el mecanismo de dispersión volumétrica, mientras que los píxeles blancos, donde predominan el doble rebote, y la dispersión simple, corresponden a la clase no bosque. Es importante destacar, que la máscara BNB creada con la Descomposición Modificada de Pauli, ha realizado la clasificación correcta de la cobertura de palma africana al identificarla como clase no bosque. La Fig. 8, es el mapa BNB resultante de la fusión entre los mapas generados por separado mediante NDFI y Descomposición Modificada de Pauli.

### E. Análisis de Exactitud

Con la finalidad de proporcionar una estimación de la exactitud del mapa BNB mostrado en la figura 8, se ha realizado un proceso de validación a partir del módulo de análisis de incertidumbre de la plataforma SEPAL [29]. La evaluación fue realizada para las clases bosque y no bosque, con un total de 75 muestras para cada clase, a una confiabilidad del 99.5%. Los resultados obtenidos son 0.946 de exactitud a nivel de productor y 0.933 a nivel de usuario para la clase de bosque; mientras que para la clase no bosque se obtuvo 0.92 de exactitud a nivel de productor y 0.906 a nivel de usuario.





(a) Vegetación Verde (GV)      (b) Sombras (Sh)      (c) Veg. No Fotosintética (NPV)      (d) Suelo (So)

Fig. 4. Candidatos puros obtenidos a partir del proceso de descomposición espectral de la imagen Landsat 8. En cada caso, las imágenes representan fracciones, cuyo valor está normalizado entre 0 y 1. El valor 0, que corresponde al color negro representa ausencia del candidato puro, mientras que 1 que se representa con colores blancos representan presencia máxima del candidato. Para un píxel cualquiera, la sumatoria de los valores de las 4 fracciones mostrada es 1.

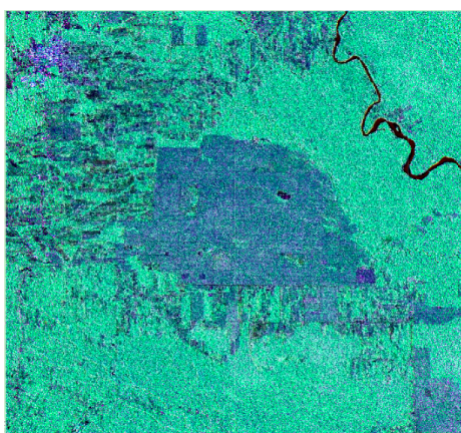


Fig. 5. Mecanismos de interacción electromagnética en combinación  $RGB = \beta^2, \alpha^2, \gamma^2$ . Se observa que predomina la dispersión volumétrica (verde) asociada con cobertura de bosque, y dispersión de doble rebote (azul y púrpura) que se asocia a plantaciones de palma africana e infraestructura.

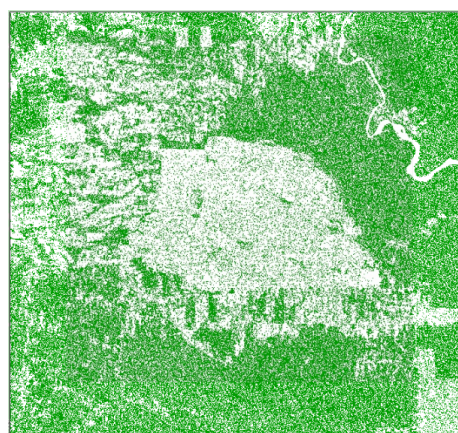


Fig. 7. Clasificación BNB mediante la Descomposición Modificada de Pauli. En este mapa la clase bosque se representa en color verde, e incluye los píxeles donde predomina la dispersión volumétrica. La clase no bosque se representa en color blanco, e incluye los píxeles donde predomina la dispersión simple y de doble rebote.

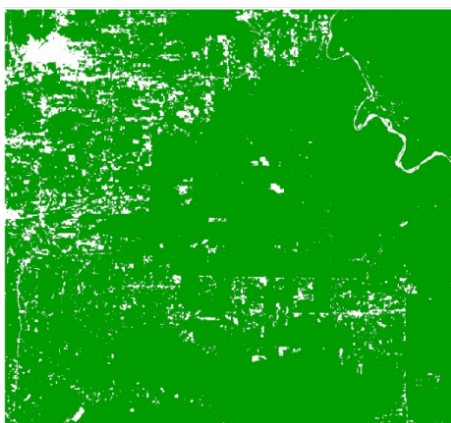


Fig. 6. Máscara bosque- no bosque (BNB), generada a partir de la clasificación realizada con NDFI. El color blanco corresponde a la clase no bosque, y el color verde a la clase bosque.

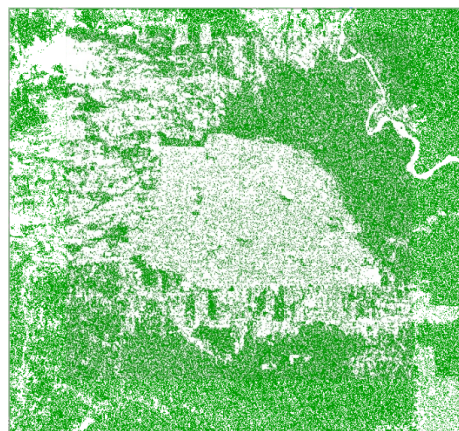


Fig. 8. máscara BNB, obtenida mediante la fusión de NDFI y la Descomposición Modificada de Pauli. Los píxeles en verde representan la clase de bosque, y los blancos la clase no bosque.

**F. Generalidad de los Resultados**

Desde el punto de vista geoespacial, el enfoque metodológico propuesto en este trabajo es aplicable para cualquier cobertura de bosque en el planeta, siempre que se

cumpla con las siguientes condiciones: (i) tener disponibilidad de cobertura de datos del mosaico anual de Alos Palsar proporcionado por Google Earth Engine, (ii) disponibilidad de

cobertura de Sentinel 1 para las polarizaciones VH y VV, en el caso de topografías complejas, se debe analizar la necesidad de realizar un procesos de corrección topográfica adicional en los datos de Sentinel 1 y Alos Palsar, especialmente en donde se identifique saturación radiométrica.

Con fines demostrativos, se ha evaluado el desempeño de los mecanismos de dispersión de Pauli en otra localidad, ubicada al noroeste del Ecuador con amplia cobertura de plantaciones de palma africana en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. El área de prueba está ubicada al sur de La Concordia, y las coberturas que predominan en el área de análisis son bosque, suelo desnudo, plantaciones de palma africana, pastos, e infraestructura, tal como lo muestra la subfigura 9a. En la subfigura 9b, se ha resaltado en los polígonos marrón claro a la cobertura de palma africana, y en la subfigura 9c, se muestran los mecanismos de dispersión de Pauli, en color verde la dispersión volumétrica que está relacionada con la clase bosque, mientras que en púrpura, azul, y negro se observan los mecanismos de dispersión simple y doble rebote que relacionados con la clase no bosque. En la figura 9, se confirma la potencialidad de la metodología propuesta para diferenciar la palma africana de la cobertura de bosque, lo que en un contexto de complemento con imágenes Landsat, puede incrementar los niveles de exactitud para clasificar coberturas de bosque, en donde exista posibilidad de mezcla con plantaciones de palma africana.

#### G. Importancia de los Resultados

Los resultados derivados de esta investigación muestran la potencialidad de esta propuesta para separar a plantaciones de palma africana del mapeo de cobertura de bosque a partir de Descomposición Modificada de Pauli y la fusión de datos Alos Palsar y Sentinel 1. Tomando ventaja de las diferencias identificadas en los mecanismos de interacción electromagnética entre la cobertura de bosque y la palma africana, los mecanismos de dispersión calculados mediante la Descomposición de Pauli permitieron realizar la extracción de la palma africana de forma directa, esto es sin tener que realizar un proceso de clasificación previo sobre la identificación de la cobertura de palma africana. Esta capacidad representa una reducción importante en tiempo y costo para mapear coberturas de bosque en donde puedan existir plantaciones de palma africana.

Al momento de escritura de este trabajo, los autores no identificaron en la literatura una propuesta similar, en donde se realice el filtrado de la palma africana a partir de técnicas PolSAR usando datos de acceso libre. Sin embargo, es importante mencionar que se identificaron trabajos de investigación cuyo objeto es el de identificar cobertura de palma africana utilizando datos de acceso libre. Por ejemplo, en [31] desarrollaron un algoritmo basado en inteligencia artificial para detectar palma africana utilizando imágenes Landsat 8 y Sentinel 1 reportando una exactitud de 0.9013 para la clasificación de la clase. El resultado obtenido, fue comparado con clasificadores supervisados ampliamente utilizados en el campo de la teledetección satelital como lo son Randon Forest, CART, SVM, entre otros, y la propuesta

mejoró en todas las pruebas la exactitud de clasificación proporcionada por los métodos mencionados.

De igual modo, los resultados obtenidos confirman los resultados compilados en el trabajo de [32] sobre la capacidad de las técnicas PolSAR para generar información relevante para la detección de palma africana a partir de mecanismos de dispersión. Particularmente, en el trabajo de [32] se resalta la potencialidad que tiene la combinación de las bandas HH, HV, VV, y VH para detectar rasgos sobre la cobertura de la palma africana, que puede ser complementaria a la generada por imágenes multiespectrales. En el trabajo de [32], también se establece que el análisis multifrecuencia, incorporando imágenes en banda C y L, aumenta la capacidad de detectar características de coberturas de palma africana, respecto a cuando se usa una sola banda. El desarrollo de este trabajo, confirma la potencialidad de combinar datos de banda C y L en un contexto PolSAR para separar la palma africana de la cobertura de bosque.

#### V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación, confirman la potencialidad relacionada con la fusión de datos Alos Palsar y Sentinel 1 para separar palma africana de cobertura de bosque a partir de la Descomposición de Pauli. En este contexto, el uso de NDFI permitió caracterizar las coberturas vegetales a partir de las descomposición espectral de las coberturas, mientras que los mecanismos de dispersión electromagnética permitieron distinguir propiedades físicas intrínsecas de las coberturas vegetales; para distinguir entre las plantaciones de palma africana y la cobertura de bosque.

Desde el punto de vista operativo, la limitante existente para la implementación efectiva de esta metodología, es el hecho de que para este trabajo se ha utilizado los compuestos anuales de Alos Palsar, que se encuentran disponibles en la plataforma de Google Earth Engine para el periodo de años comprendido entre 2007 y 2018. Por su parte, las imágenes Sentinel 1 están disponibles desde el año 2014, lo que al ser combinadas con las imágenes Alos Palsar permite realizar monitoreo para las fechas comprendidas entre 2014 y 2018.



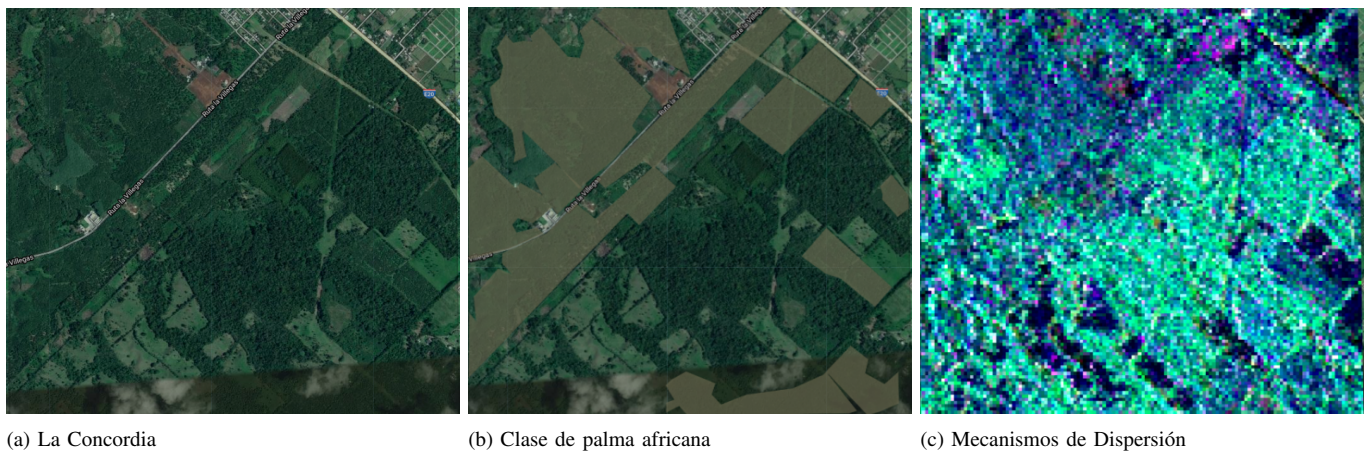


Fig. 9. Mecanismos de dispersión de Pauli en La Concordia. En la subfigura 9a se muestra el área de prueba La Concordia, en la subfigura 9b se muestra en polígonos de color marrón la clase palma africana, y en la subfigura 9c se muestra los mecanismos de dispersión de Pauli para La Concordia.

## REFERENCES

- [1] K. Calders, I. Jonckheere, J. Nightingale, and M. Vastaranta, "Remote sensing technology applications in forestry and redd+," 2020.
- [2] A. Miranda, A. Lara, A. Altamirano, C. Zamorano-Elgueta, H. J. Hernández, M. E. González, A. Pauchard, and Á. Promis, "Monitoreo de la superficie de los bosques nativos de Chile: un desafío pendiente," *Bosque (Valdivia)*, vol. 39, no. 2, pp. 265–275, 2018.
- [3] E. Honorio Coronado and T. R. Baker, "Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos," 2010.
- [4] F. Team *et al.*, "From reference levels to results reporting: Redd+ under the united nations framework convention on climate change," 2020.
- [5] S.-M. Joo and J.-S. Um, "Evaluating mrv potentials based on satellite image in un-redd opportunity cost estimation: A case study for mt. geum-gang of north korea," *Spatial Information Research*, vol. 22, no. 3, pp. 47–58, 2014.
- [6] D. Müller, S. Suess, A. A. Hoffmann, and G. Buchholz, "The value of satellite-based active fire data for monitoring, reporting and verification of redd+ in the lao pdr," *Human ecology*, vol. 41, no. 1, pp. 7–20, 2013.
- [7] R. Meng, J. Wu, F. Zhao, B. D. Cook, R. P. Hanavan, and S. P. Serbin, "Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques," *Remote Sensing of Environment*, vol. 210, pp. 282–296, 2018.
- [8] P. Hyde, R. Dubayah, W. Walker, J. B. Blair, M. Hofton, and C. Hunsaker, "Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (lidar, sar/insar, etm+, quickbird) synergy," *Remote Sensing of Environment*, vol. 102, no. 1-2, pp. 63–73, 2006.
- [9] M. Vohland, J. Stoffels, C. Hau, and G. Schuler, "Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis," *Silva Fennica*, vol. 41, no. 3, p. 441, 2007.
- [10] A. Banskota, N. Kayastha, M. J. Falkowski, M. A. Wulder, R. E. Froese, and J. C. White, "Forest monitoring using landsat time series data: A review," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 40, no. 5, pp. 362–384, 2014.
- [11] E. Muñoz, A. Zozaya, and E. Lindquist, "Satellite remote sensing of forest degradation using ndfi and the bfast algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 07, pp. 1288–1295, 2020.
- [12] G. P. Asner, M. Keller, R. Pereira Jr, and J. C. Zweede, "Remote sensing of selective logging in amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, landsat etm+, and textural analysis," *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no. 3, pp. 483–496, 2002.
- [13] C. Dickinson, P. Siqueira, D. Clewley, and R. Lucas, "Classification of forest composition using polarimetric decomposition in multiple landscapes," *Remote sensing of environment*, vol. 131, pp. 206–214, 2013.
- [14] J. C. Vogeler and W. B. Cohen, "A review of the role of active remote sensing and data fusion for characterizing forest in wildlife habitat models," *Revista de Teledetección*, (45): 1-14., no. 45, pp. 1–14, 2016.
- [15] "CMNUC Conversión marco de las naciones unidas para el cambio climático," <https://redd.unfccc.int/submissions.html>, accessed: 2021-02-18.
- [16] A. Zozaya, "Electromagnetic interaction models for the characterization of targets in sar scenes: preliminary literature review," *Revista Ingeniería UC*, vol. 22, no. 1, pp. 26–63, 2015.
- [17] X. Mei, W. Nie, J. Liu, and K. Huang, "Polsar image crop classification based on deep residual learning network," in *2018 7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [18] M. Erith, Z. Alfonso, and L. Erik, "A multi-sensor approach to separate palm oil plantations from forest cover using ndfi and a modified pauli decomposition technique," in *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2020, pp. 4481–4484.
- [19] D. Roberts, M. Smith, and J. Adams, "Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in aviris data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 44, no. 2-3, pp. 255–269, 1993.
- [20] C. Souza Jr, L. Firestone, L. M. Silva, and D. Roberts, "Mapping forest degradation in the eastern amazon from spot 4 through spectral mixture models," *Remote sensing of environment*, vol. 87, no. 4, pp. 494–506, 2003.
- [21] N. Keshava, "A survey of spectral unmixing algorithms," *Lincoln laboratory journal*, vol. 14, no. 1, pp. 55–78, 2003.
- [22] C. M. Souza Jr, D. A. Roberts, and M. A. Cochrane, "Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires," *Remote Sensing of Environment*, vol. 98, no. 2-3, pp. 329–343, 2005.
- [23] B. R. Parida and S. P. Mandal, "Polarimetric decomposition methods for lulc mapping using alos l-band polsar data in western parts of mizoram, northeast india," *SN Applied Sciences*, vol. 2, pp. 1–15, 2020.
- [24] M. Musthafa, U. Khati, and G. Singh, "Sensitivity of polsar decomposition to forest disturbance and regrowth dynamics in a managed forest," *Advances in Space Research*, vol. 66, no. 8, pp. 1863–1875, 2020.
- [25] D. Hernández and D. Pinilla, "Realización de mapas de cobertura de la tierra a partir de imágenes polarimétricas," *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, no. 39, pp. 119–124, 2013.
- [26] L. Zhang, J. Zhang, B. Zou, and Y. Zhang, "Comparison of methods for target detection and applications using polarimetric sar image," *Piers online*, vol. 4, no. 1, pp. 140–145, 2008.
- [27] X. Huang, N. Torbick, and B. Ziniti, "Study of a simple volume scattering model on burned forest using polarimetric palsar-2 data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 1872–1876, 2018.
- [28] R. Natsuaki, T. Shimada, and A. Hirose, "Effect of temporal baseline in pixel-by-pixel scattering mechanism vector optimization for polinsar," in *EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. VDE, 2018, pp. 1–3.
- [29] FAO, "Sepal," 2020.

- [30] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [31] K. Xu, J. Qian, Z. Hu, Z. Duan, C. Chen, J. Liu, J. Sun, S. Wei, and X. Xing, "A new machine learning approach in detecting the oil palm plantations using remote sensing data," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 2, p. 236, 2021.
- [32] K. L. Chong, K. D. Kanniah, C. Pohl, and K. P. Tan, "A review of remote sensing applications for oil palm studies," *Geo-spatial Information Science*, vol. 20, no. 2, pp. 184–200, 2017.



**Erith Muñoz** have a degree in Physics (2007) and a Master degree in Electrical Engineering (2012) of the University of Carabobo, Carabobo-Venezuela. Master in Space Applications of Alert and Early Warning to Natural Emergencies (2014) by the National University of Cordoba, Cordoba-Argentina. In 2012 worked as visitant researcher at the Italian National Research Council (CNR-Italy), receiving training in atmospheric remote sensing and numerical weather models development. In 2014 he worked as a researcher in the Ecuadorian Army

Geographical Institute in areas of Remote Sensing, Atmospheric Physics, and Numerical Model Development. He currently works as a Regional Expert in Remote Sensing for Latin America and The Caribbean for the Food and Agriculture Organization of United Nations. Between his research interest there are computational electromagnetism, Digital signal Processing of SAR data, High Performance Computing, Parallel Programming, Remote Sensing and Computer Vision.



**A. J. Zozaya:** received the B.Sc. degree in Electronic Engineering, with a major in Telecommunication, from the Polytechnic Institute of the National Armed Forces of Venezuela (I.U.P.F.A.N.), Maracay, Venezuela, in 1991, and his PhD degree from the Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, in the area of Signal Theory and Communications in 2002. He worked as a Professor at the University of Carabobo, Valencia, Venezuela from 1994 to 2014. He worked as a senior researcher at the Ecuadorian

Space Institute, Quito, Ecuador, in the area of synthetic aperture radars in the periods from September 2014 to September 2015 and from August 2016 to August 2017. Currently, he is with the Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile, where he works as a Full Professor at the Department of Electricity. His research areas of interest are applied electromagnetic, computational electromagnetic, digital signal processing, RF circuits design, antenna engineering, synthetic aperture radars, and UWB radars.



**Erik Lindquist:** is currently a Forestry Officer with the United Nations Food and Agriculture Organization based in Quito, Ecuador. He has 23 years of experience in remote sensing and GIS. He started his career working for the US Forest Service as a plant ecologist in the Wind River Mountains of Wyoming. He then moved to central Africa and worked with the Wildlife Conservation Society leading botanical and wildlife surveys in the Democratic Republic of Congo. His current focus with FAO is creating platforms that facilitate

the use of geospatial data for autonomous land surface monitoring at national scales, especially in developing countries. In collaboration with the international Global Forest Observations Initiative, national research institutions, and Ministries of Environment the FAO has launched a cloud-based computing platform called SEPAL (System for Earth Observation Data Acquisition, Processing and Analysis for Land Monitoring). SEPAL is a big-data processing platform that combines super-computing power, open-source geospatial data processing software and modern geospatial data infrastructures like Google's Earth Engine to enable researchers and technicians anywhere in the world to create data and produce locally relevant results that can affect decision making. Erik has a Bachelor's degree in Botany from Miami University (Ohio) and a PhD in Geospatial Science and Engineering from South Dakota State University.