



ISSN 2215-2202

**AGRONOMÍA COSTARRICENSE**

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>



*Nota técnica*

## Índices de vegetación asociados con café en paisajes del occidente de Honduras

Juan Luis Hernández-Mencía<sup>1\*</sup>, Arlene López-Sampson<sup>2</sup>, Sergio Arriola-Valverde<sup>3</sup>

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: [Juan.Hernandez@catie.ac.cr](mailto:Juan.Hernandez@catie.ac.cr)

<sup>1</sup> Instituto Hondureño del Café, Programa de Agroforestería Ambiente y Clima, Comayagua, Honduras. 

<sup>2</sup> Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Cartago, Costa Rica. 

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica. 

DOI: <https://doi.org/10.15517/s34jkr60>

Recibido el 16 de julio del 2024; Aceptado el 03 de diciembre del 2024

### Resumen

**Introducción.** El café es el cultivo con árboles más importante del mundo. En Honduras, este cultivo representa el 5% de los ingresos totales del país. **Objetivo.** Analizar los índices de vegetación (IV) y el nivel de asociación con diferentes usos de suelo y de cobertura en el occidente de Honduras. **Materiales y métodos.** Se hizo un análisis descriptivo y de asociación entre los usos de suelo e IV de imágenes satelitales y del Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra de la República de Honduras para el 2018. Para los IV se emplearon imágenes Sentinel 2A-2B del programa Copernicus. Los IV utilizados fueron el Índice de Vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Vegetación de humedad de diferencia normalizada (NDMI) y el Índice de Vegetación de Estrés por Humedad (MSI). Los usos de suelos tomados como referencia fueron Bosque Latifoliado (B-L), Bosque de Conífera (B-C), Bosque Mixto (B-M), Cafetales (SAF-C) y Pastos y Cultivo (P-C). **Resultados.** Los usos de suelo clasificados como B-M (75%) y B-L (63%) tienen los mayores porcentajes de píxeles en las categorías más altas en NDVI y P-C (13%) los más bajos. Para SAVI, el SAF-C (94%) y el B-C (91%) obtuvieron los mayores porcentajes de píxeles en las categorías más altas y P-C (75%) fue el más bajo. Para el índice NDMI, los valores ponderados más altos de humedad se encontraron en B-M (48%) y B-L (41%), y el más bajo fue para P-C (1,78%). Para MSI, los valores ponderados más altos los tiene B-M con 36% y el valor más bajo B-L con 1,62%. **Conclusiones.** Los análisis muestran una asociación significativa entre los niveles de IV utilizados y los usos de suelo ( $X^2 = 369,4$ ;  $p\text{-value} = 0,0001$ ). B-L y B-M son los dos usos de suelo que tienen mayor similitud y que

reflejan los niveles más altos de IV. El SAF-C tuvo su mayor asociación con B-C y los usos de suelos que presentaron los niveles más bajos de asociación fueron el de P-C y el SAF-C.

**Palabras clave:** agroforestería; Sentinel-2; sensores remotos; sistemas de información geográfica.

*Technical note*

**Vegetation indices associated with coffee agroforestry systems in western Honduras**

**Abstract**

**Introduction.** Coffee is the most important tree crop in the world. In Honduras, this crop represents 5% of the country's total income. **Objective.** Calculate vegetation indices (VI) and the level of association with different land uses and cover in western Honduras. **Materials and methods.** For the IV's, Sentinel 2A-2B images from the Copernicus program were used. The VI's used were Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), and Moisture Stress Index (MSI). The land uses taken as reference were Broadleaf Forest (B-L), Coniferous Forest (B-C), Mixed Forest (B-M), Coffee plantations (SAF-C), and Pastures and Crops (P-C). **Results.** Land uses classified as B-M (75%) and B-L (63%) have the highest percentages of pixels in the highest NDVI categories, while P-C (13%) has the lowest. For SAVI, SAF-C (94%) and B-C (91%) achieved the highest percentages of pixels in the highest categories, while P-C (75%) had the lowest. For the NDMI index, the highest weighted values of humidity were found in B-M (48%) and B-L (41%) and the lowest was for P-C (1.78%). For MSI, the highest weighted values are B-M with 36% and the lowest value is B-L with 1.62%. **Conclusions.** The analysis shows a significant association between the IV levels used and land uses ( $X^2 = 369.4$ ;  $p$ -value = 0,0001). B-L and B-M are the two land uses that have the greatest similarity and that reflect the highest levels of IV. SAF-C had its greatest association with B-C and the land uses that presented the lowest levels of association were P-C and SAF-C.

**Keywords:** agroforestry; Sentinel-2; remote sensing; geographic information systems.

## Introducción

El uso de sensores remotos multiespectrales (RS) es una metodología confiable y factible para el monitoreo de la vegetación y caracterización del paisaje (Kowalski *et al.* 2020, Bedin *et al.* 2019). La mayoría de los estudios relacionados con el uso de imágenes satelitales utilizan índices de vegetación (IV) para evaluar la respuesta espectral (Nogueira-Martins *et al.* 2021) y el estado de salud de la vegetación por medio de las mediciones de la reflectancia (Abdi *et al.* 2021, Moyao-Calleja *et al.* 2021, Wittke *et al.* 2019). Otro uso de los IV es la evaluación de la composición de los paisajes y los servicios ecosistémicos que estos proveen (Jia *et al.* 2017, Paudyal *et al.* 2020).

Las técnicas de RS representan un enfoque razonable para demostrar la relación entre los parámetros físicos del cultivo y los IV (Freire de Oliveir *et al.* 2021). Los mapas de cobertura terrestre precisos juegan un papel fundamental en una variedad de sectores en el sur global, incluido análisis de cobertura para la determinación de pérdidas de capital natural, modelado hidrológico, la planificación del uso de la tierra, entre otros (Saah *et al.* 2019).

Actualmente, los sistemas de información geográfica (SIG) combinados con el uso de imágenes satelitales son herramientas ampliamente utilizadas para la detección, evaluación y seguimiento espacial y temporal de problemas relacionados con el medio ambiente, lo que facilita la toma de decisiones y la reorientación de las políticas de uso y ocupación del suelo (Ha *et al.* 2019, Aquino y Oliveira 2012). Estas evaluaciones en muchos casos se apoyan en la información obtenida a partir de los IV. Estos son medidas cuantitativas, basadas en valores digitales útiles para estimar la biomasa o vigor vegetal (Nguyen-Trong *et al.* 2020, Torres *et al.* 2014).

Estudios de la dinámica socio-temporal de los cambios de usos de suelo (propósito de uso por parte de los usuarios de la tierra del área de cobertura) y cambios de cobertura (características biofísicas de la superficie de la tierra) son cada vez más útiles para el manejo sostenible del capital natural y medios de vida (Morrison *et al.* 2022). Estos estudios se facilitan con las técnicas de RS, SIG y otras herramientas de análisis (Nogueira-Martins *et al.* 2021). Los paisajes contienen una matriz de usos de suelos compleja, y normalmente incluye la retención de árboles y cobertura densa, entre ellos los sistemas agroforestales. Los sistemas agroforestales (SAF) son típicamente, sistemas compuestos por múltiples capas, heterogéneas, complejas e interactivas; a menudo se generaliza como tierras de cultivo (café intercalado), matorrales (pleno sol) o tierras forestales (agroforestales) en muchos países tropicales, lo que hace que su seguimiento y modelado sean bastante desafiantes (Mosomtai *et al.* 2020, Taugourdeau *et al.* 2014).

En este estudio, se utilizaron las herramientas de sensores remotos multiespectrales para el cálculo de cuatro índices de vegetación relacionados con verdor y humedad y su potencial relación con los usos del suelo reportados en el mapa de cobertura forestal y uso de la tierra en Honduras del 2018 localizados en el corredor biológico Cacicque Lempira en el occidente de Honduras (CBCL).

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

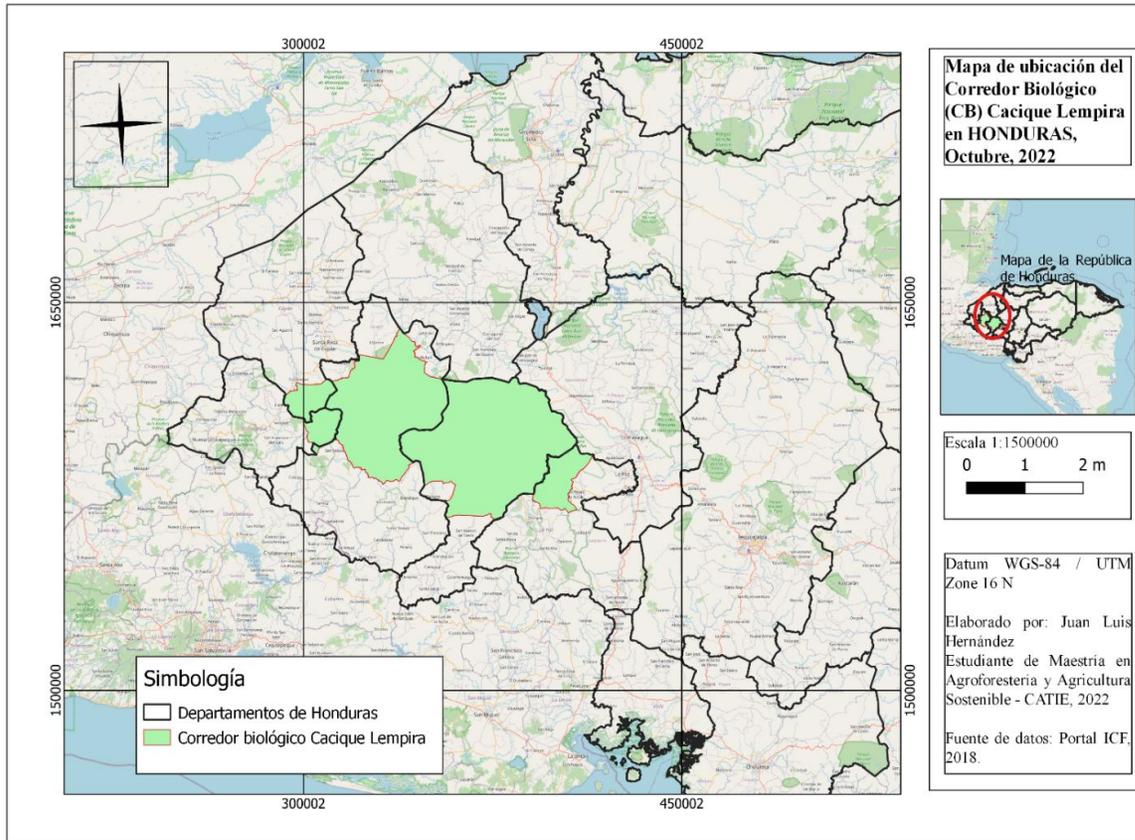
El corredor biológico Cacicque Lempira (CBCL) (**Figura 1.**) está ubicado en la zona de transición del parteaguas del Atlántico y del Pacífico en el Occidente de Honduras, con una época seca bien marcada de noviembre a mayo. Comprende cinco áreas protegidas nacionales: Parque Nacional Montaña de Celaque, Refugio de Vida Silvestre Montaña de Puca, Reserva Biológica Volcán Pacayita, Refugio de Vida Silvestre Montaña de Santa Bárbara y Reserva Biológica de Opalaca.

El territorio presenta elevaciones entre los 600 y los 2849 msnm, donde el Parque Nacional Montaña de Celaque tiene el punto más alto de Honduras (UICN 2020).

### **Análisis y procesamiento de imágenes satelitales**

Para la estimación de los índices de vegetación, se utilizaron imágenes satelitales y el Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra de la República de Honduras para el 2018 (ICF 2018). En el caso de las imágenes de satélite, se usaron las Sentinel-2 del nivel 2A/B proyección UTM/WGS 84, 16-N. Adicionalmente, se descargaron cuatro imágenes satelitales (seis bandas con resolución espacial de 20 m).

Dado que el mapa forestal de Honduras con el cual se hicieron los cruces de información fue elaborado en el 2018, tres de las imágenes que se descargaron son del 12 de abril del 2019 (98,3% del área total) y una del 10 de abril del 2019 (1,7% del área total).



**Figura 1.** Mapa de ubicación del Corredor Biológico Cacique Lempira (CBCL) en el occidente de Honduras.  
**Figure 1.** Geographical location of the Cacique Lempira Biological Corridor (CBCL) in Western Honduras.

En el caso del mapa de cobertura forestal y uso de suelo de Honduras, se diseñó con imágenes Landsat. Se utilizaron 37 tipos de cobertura divididos en categorías y subcategorías mediante el sistema de clasificación Corin Land Cover (CLC). Para esta área de estudio, las categorías de usos de cobertura se redujeron a 21 categorías. De las 21 categorías, se agruparon las cinco cobertura - usos más importantes y que se representaban en mayor volumen para este estudio: Bosque de Conífera (B-C), Bosque Latifoliado (B-L), Bosque Mixto (B-M), Pastos y Cultivo (P-C) y Cafetales (SAF-C).

En abril, se presenta la época seca en Honduras, lo que brinda un panorama amplio del nivel de estrés de la vegetación y la humedad disponible en el dosel arbóreo. Se logró encontrar imágenes que cubrían el 70% del área de estudio con apenas el 1,1% de interferencia por nubes. En el restante 30% del área, se identificaron un promedio de 19% de nubosidad (**Tabla 1**).

El satélite permite descargar imágenes con un procesamiento L2 a nivel BOA (fondo de la atmósfera por sus siglas en inglés), por lo tanto, las imágenes están corregidas para realizar los cálculos en la vegetación existente sin necesidad de hacer un preprocesamiento.

### **Índices de vegetación para análisis de la cobertura de los usos de suelo seleccionados**

En el presente estudio, se calcularon dos IV para definir la escala de verdor del CBCL y dos IV para conocer estrés por humedad en la cobertura del dosel arbóreo y de cultivos (**Tabla 2**). Se tomó como punto de partida que los usos de suelos, denominados bosques, tendrían los niveles más altos de importancia en la generación de servicios ecosistémicos y que el uso de suelos P-C, tendrían los valores más bajos.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un indicador que puede ser usado para estimar la vegetación en un área específica de interés de la superficie terrestre (Do Nascimento *et al.* 2018), como un indicador de crecimiento de la vegetación, y es comúnmente utilizado para evaluar las diferencias de vegetación de clorofila y biomasa (Jia *et al.* 2017, Ortiz *et al.* 2011).

El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) se desarrolló como una modificación del NDVI para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cobertura vegetal es baja (menor o igual a 40%) y la superficie del suelo está expuesta añadiendo el factor L (que significa línea del suelo), a la misma formación del NDVI (Coltri *et al.* 2013, Moyao-Calleja *et al.* 2021). Esto con frecuencia se utiliza en regiones áridas donde la cubierta vegetal es baja y genera valores que van de -1 y +1 (Kaplan y Rozenstein 2021). Entre tanto, en el caso de NDMI (Índice de humedad de diferencia normalizada) y MSI (Índice de estrés por humedad), son IV que basan sus características en la composición de la vegetación que tiene la masa forestal.

**Tabla 1.** Imágenes satelitales Sentinel-2 A/B utilizadas en el procesamiento.

**Table 1.** Sentinel-2 A/B satellite images used in the processing.

Fecha	Identificador	Misión	Instrumento	Nivel de procesamiento	Porcentaje nubes	Porcentaje utilizado
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PCB_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	1,07	70,4
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PDA_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	15,6	27,5
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PCA_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	13,6	0,4
10/4/2019	S2B_MSIL2A_20190410T161839_N0211_R040_T16PBB_20190410T220228	Sentinel-2-B	MSI	Nivel-2A	30,8	1,7

ESA 2018.

El NDMI permite cuantificar el agua y estrés o grado de saturación que posee la cobertura vegetal (EOS 2021, Gao 1996, Alvarado *et al.* 2019). Este IV representa el contenido de agua en las copas de los árboles. La absorción de agua líquida por la vegetación alrededor de 858 nm es insignificante, mientras que alrededor de 2130 nm es muy alta. Si el contenido de agua disminuye, en los canales SWIR, la reflectancia aumenta significativamente; por lo tanto, el valor NDMI disminuye y muestra vegetación seca bajo estrés por sequía (Gulácsi y Kovács 2015).

Los valores de NDMI son normalizados en un rango de -1 a +1 (Campaña-Olaya y Tafur 2021). En el caso del IV MS, los usos incluyen análisis de estrés hídrico del dosel (Wittke *et al.* 2019), aunque la literatura no explica los usos aplicables ni la descripción correcta de los datos obtenidos en el análisis espacial. Para este estudio, se contempló por ser un índice complementario del NDMI y por encontrar similitud en los valores calculados.

### Clasificación de los índices de vegetación NDVI y SAVI

Para este estudio, se realizó una clasificación de seis niveles para los valores de IV en un rango del -1 al +1 (**Tabla 3**). Para el NDVI, los valores se ajustaron a los propuestos por Do Nascimento *et al.* (2018) y para SAVI a los descritos por Torres *et al.* (2014).

**Tabla 2.** Índices de vegetación utilizados para el análisis de los principales usos de suelo encontrados en el corredor biológico Cacique Lempira. Honduras.

**Table 2.** Vegetation indices used for the analysis of the main land uses found in the Cacique Lempira Biological Corridor. Honduras.

Índice de Vegetación	Ecuación usando Sentinel-2	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Kaplan y Rozenstein (2021)
		Navarro <i>et al.</i> (2019)
		Zhang <i>et al.</i> (2018)
		Tomar <i>et al.</i> (2013)
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI, por sus siglas en inglés)	$((B8 - B4) / (B8 + B4 + 0,5)) \times 1,5$	Kaplan y Rozenstein (2021)
		Navarro <i>et al.</i> (2019)
		Wittke <i>et al.</i> (2019)
		Huete (1988)
		Torres <i>et al.</i> (2014)
Índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI, por sus siglas en inglés)	$(B08 - B11) / (B08 + B11)$	EOS (2021)
		Gao (1996)
		Campaña-Olaya y Tafur (2021)
Índice de estrés por humedad (MSI, por sus siglas en inglés)	$B8 / B11$	Wittke <i>et al.</i> (2019)

### Clasificación de los índices de humedad NDMI y MSI

Se realizó una clasificación en rangos de -1 a +1 para los dos IV de humedad, con seis intervalos de clasificación (**Tabla 4**). La descripción para NDMI fue tomada y adaptada de EOS (2021), y para MSI, se propone la clasificación con base en parámetros relacionados al NDMI, así como a los índices de verdor y salud de la vegetación.

Con los IV de vegetación y humedad clasificados en seis niveles y los cinco usos de suelos seleccionados, se prosiguió a cruzar la información. Con la herramienta de Geoprocessing del programa ArcMap 10.8, se extrajo por uso de suelos la cantidad de pixeles en los distintos niveles clasificados de los cuatro IV mostrados en **Tabla 3** y **Tabla 4**, y se ponderaron para sacar el porcentaje de uso de suelo que se asociaba a uno de los seis niveles.

**Tabla 3.** Descripción e intervalos de clasificación de los índices de vegetación relacionados con verdor: NDVI y SAVI.

**Table 3.** Description and classification intervals of vegetation indices related to greenness: NDVI and SAVI.

Categoría	Intervalo del valor del IV	Descripción NDVI	Descripción SAVI
1	-1:0	Suelo desnudo/agua	Infraestructura o nubes
2	0,000001:0.2	Vegetación muy baja	Suelo descubierto o poca vegetación
3	0,200001:0.4	Vegetación baja	Cobertura del dosel media-alta
4	0,400001:0.6	Vegetación moderadamente baja	Cobertura del dosel alta
5	0,600001:0.8	Vegetación moderadamente alta	Cobertura del dosel muy alta
6	0,800001:1	Alta vegetación	Cobertura total del dosel

Adaptado de Do Nascimento *et al.* (2018) y Torres *et al.* (2014).

### Análisis estadístico

Para realizar el análisis del paisaje en el CBCL, se ponderaron los niveles de pixeles de los cuatro IV en categorías de clasificación. Luego, se hizo la separación de los valores por los cinco tipos de usos de suelos. Para analizar si existe asociación entre los usos de suelo y los IV, se utilizaron tablas de contingencia, y a partir del estadístico Chi Cuadrado y su correspondiente *p-value*, se identificó la significancia de la asociación (*p-value* < 0,05). Luego, para visualizar la asociación significativa, se realizó un análisis de correspondencias simple y se obtuvo un gráfico bi-plot.

Además, para complementar la información observada en el gráfico bi-plot, se estimó la distancia Euclidiana con el objetivo de encontrar los usos de suelos con mayor similitud. Las distancias se transformaron a un valor de porcentaje, en relación con respecto a la mayor distancia, es decir, los porcentajes cercanos a 100 reflejan la distancia más larga y los cercanos a cero la más corta, multiplicadas por 100. Estos procesos fueron llevados a cabo con el uso del programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.* 2020).

**Tabla 4.** Descripción e intervalos de clasificación de los índices de vegetación relacionados con humedad: NDMI y MSI.

**Table 4.** Description and classification intervals of vegetation indices related to humidity: NDMI and MSI.

Categoría	Intervalo del valor del IV	Descripción NDMI	Descripción MSI
1	-1:0	Cobertura del dosel casi inexistente No hay indicios de humedad	Contenido de humedad muy bajo
2	0,000001:0.2	Cobertura del dosel media-baja. Estrés hídrico alto	Contenido de humedad bajo
3	0,200001:0.4	Cobertura del dosel media-alta Estrés hídrico bajo	Contenido de humedad moderadamente bajo
4	0,400001:0.6	Cobertura del dosel alta Sin estrés hídrico	Contenido de humedad moderadamente alto
5	0,600001:0.8	Cobertura del dosel muy alta Sin estrés hídrico	Contenido de humedad alto
6	0,800001:1	Cobertura total del dosel Sin estrés hídrico o anegamiento	Contenido de humedad muy alto

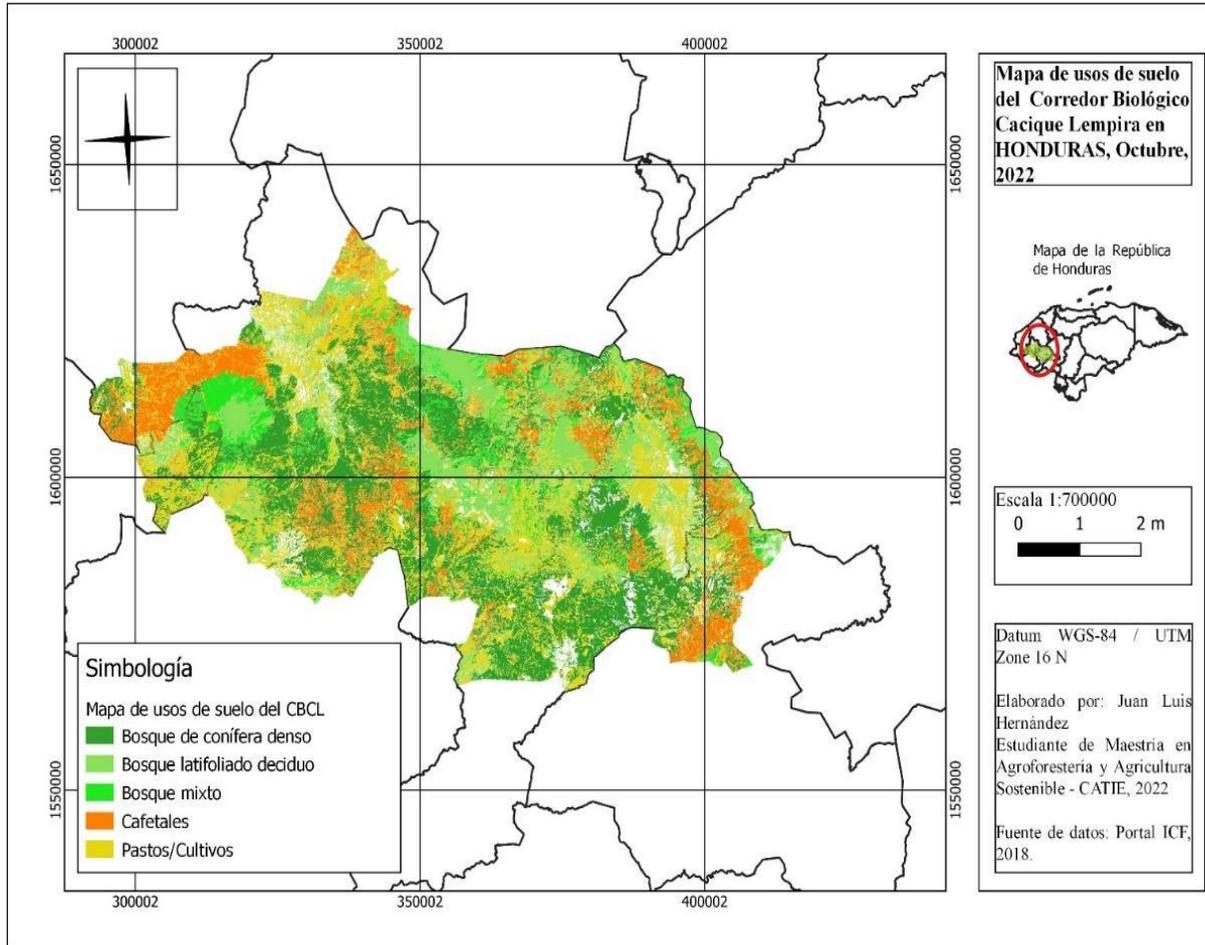
Adaptado de Do Nascimento *et al.* (2018) y Torres *et al.* (2014).

## Resultados

### Cobertura y uso del suelo del CBCL

El bosque de conífera (B-C) (combinación de B-C ralo y B-C denso) representó el 33% del territorio del CBCL, seguido del uso de Pastos y Cultivos (P-C) (combinación de P-C, agricultura tecnificada y arrozales) que representa el 22,4%, el bosque latifoliado (B-L) (combinación de B-L deciduo y B-L húmedo) representa el 17,3%, los cafetales (SAF-C) representaron el 13,6%, y finalmente el bosque mixto (B-M) que representa el 6,8%, para un total de 93% de cobertura con un área de 432 801,53 ha, de las 465 028,47 ha que tiene todo el CBCL (**Figura 2**).

El restante 7% del área que representa 32 226,94 ha se clasificaron entre los usos de suelo de árboles dispersos, área húmeda continental, cuerpos de agua artificial, lagos y lagunas naturales de agua, musácea, pino plagado, ríos y otras superficies de agua, suelo desnudo continental, vegetación secundaria decidua, vegetación secundaria húmeda, zona urbana continua y zona urbana discontinua.



**Figura 2.** Mapa de cobertura y uso de suelos del corredor biológico Cacique Lempira. Honduras.

**Figure 2.** Existing land cover and land use distribution in the Cacique Lempira Biological Corridor. Honduras.

### Índices de vegetación relacionados con verdor en el CBCL: NDVI y SAVI

De acuerdo con las condiciones atmosféricas y de cobertura, así como los usos de suelos en el CBCL, se lograron estimar seis categorías del NDVI y cinco de SAVI en el CBCL (**Figura 3**). Para el NDVI, en términos de distribución en el CBCL, las categorías con los valores ponderados más altos fueron las categorías 5 (Moderadamente alta vegetación) con un 33,8% del área y la categoría 4 (Moderadamente baja vegetación) con un 28,3%. Las categorías 1 (Suelo desnudo/agua) y 6 (Alta vegetación) tuvieron valores ponderados de 0,5 y 12,6%, respectivamente.

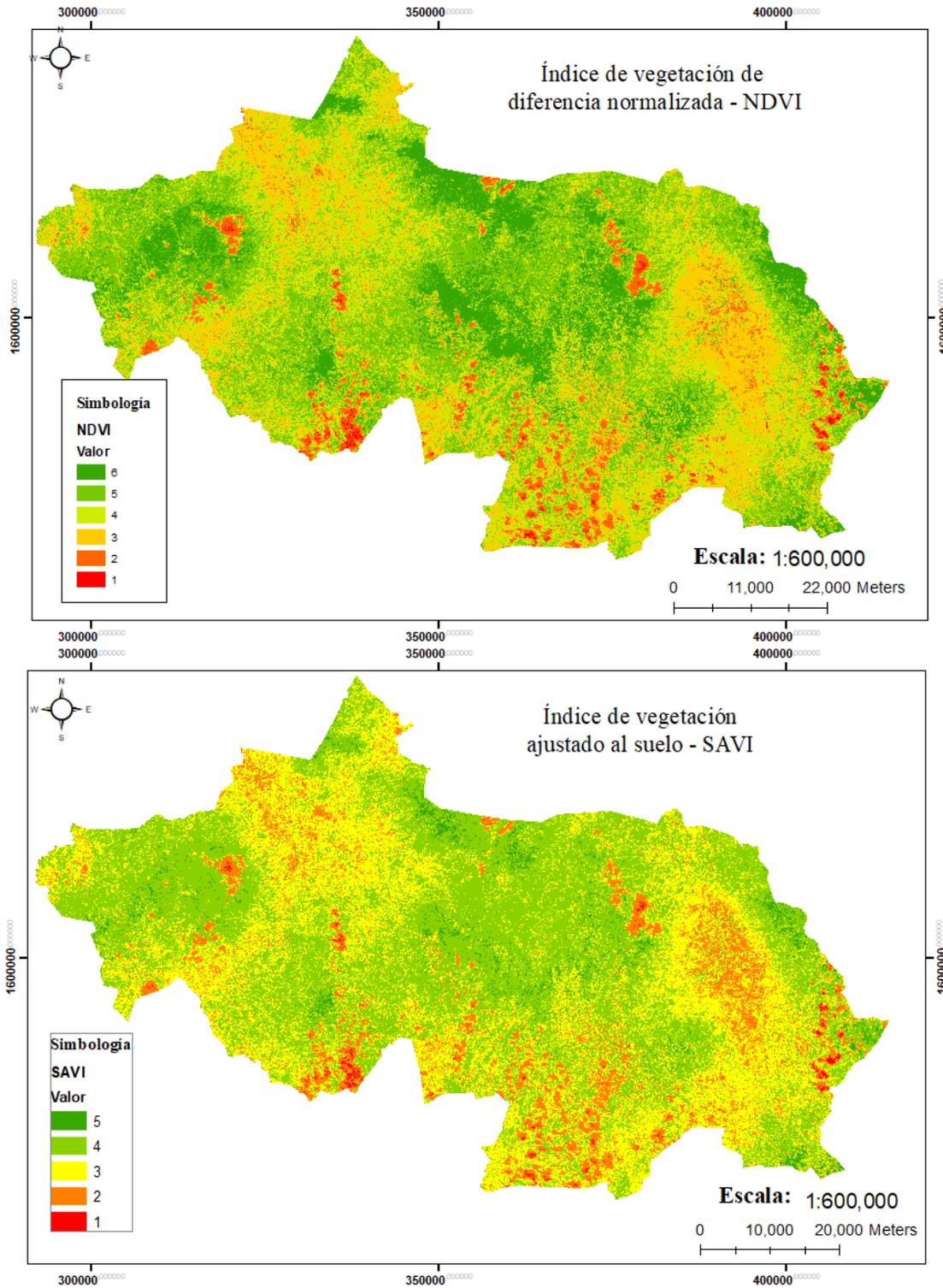
En el caso del SAVI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CBCL fueron las categorías 4 (Cobertura del dosel alta) con un 48,56% y la categoría 3 (Cobertura del dosel media-alta) con un 37,25%. Las categorías 1 (Infraestructura y/o nubes) y 5 (Cobertura total del dosel) tuvieron valores de 0,5y 0%, respectivamente (**Figura 3, Tabla 4**).

En términos de usos de suelos, los niveles más altos de NDVI los obtuvieron los usos B-M y B-L con un 75% y 63%, respectivamente, del área de cobertura entre las categorías 5 y 6, definidas como Moderadamente alta y Alta vegetación. Seguidamente, el SAF-C y el B-C obtuvieron un 84% y 74%, en las categorías 4 y 5 de la clasificación, que corresponden a Baja y moderadamente baja vegetación. Mientras que, como era de esperarse, P-C reportó un 83% del área en las categorías 3 y 4, lo que correspondió a Baja y moderadamente baja vegetación (**Figura 3, Tabla 5**).

El IV SAVI generó valores ponderados en categorías más bajas a las obtenidas en el NDVI para todos los usos de suelo, especialmente, en B-L y B-M. SAF-C tuvo el valor más alto del índice SAVI con un 94% de su cobertura en las categorías 3 y 4 de la clasificación, denominado Cobertura del dosel media-alta y Cobertura del dosel alta, seguido por B-C con un 91%, B-M y B-L con 87% cada uno, siempre en las categorías 3 y 4 de la clasificación, denominado Cobertura del dosel media-alta y Cobertura del dosel alta. Nuevamente, el uso de suelos de P-C se quedó en el nivel más bajo, con un 84% en las categorías 2 y 3, que son suelo descubierto y/o poca vegetación y cobertura del dosel media-alta (**Figura 3, Tabla 5**).

### **Índices relacionados con humedad en CBCL: NDMI y MSI**

De acuerdo con las condiciones atmosférica y de cobertura, y usos de suelos en el CBCL, se lograron estimar cinco categorías del NDMI y seis de MSI en el CBCL (**Figura 4**). Para el NDMI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CBCL son las categorías 1 (Cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad), con un 45,1% y la categoría 2 (Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto), con un 34,1%. Para el índice MSI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CBCL son las categorías 2 (Bajo contenido de humedad), con un 44,7% y la categoría 3 (Moderadamente bajo contenido de humedad), con un 34,2% (**Figura 4**).



**Figura 3.** Índices de vegetación relacionados con verdor (NDVI y SAVI) en el corredor biológico Cacique Lempira, Honduras. Valores de NDVI y SAVI: 1) -1:0; 2) 0.000001:0.2; 3) 0.200001:0.4; 4) 0.400001:0.6; 5) 0.600001:0.8; 6) 0.800001:1.

**Figure 3.** Spatial distribution of the vegetation indices related to greenness (NDVI and SAVI) in the Cacique Lempira Biological Corridor, Honduras. NDVI and SAVI values: 1) -1:0; 2) 0.000001:0.2; 3) 0.200001:0.4; 4) 0.400001:0.6; 5) 0.600001:0.8; 6) 0.800001:1.

**Tabla 5.** Usos de suelo y niveles ponderados (%) de los índices de vegetación (NDVI y SAVI) en el corredor biológico Cacique Lempira. Honduras.

**Table 5.** Land uses and weighted levels (%) of vegetation indices related to greenness (NDVI and SAVI) in the Cacique Lempira Biological Corridor. Honduras.

Categoría	B-L (%)		B-C (%)		B-M (%)		SAF-C (%)		P-C (%)	
	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
1	0,20	0,20	0,50	0,50	0,50	0,50	0,70	0,70	0,40	0,40
2	3,60	6,60	5,00	7,50	4,80	6,20	3,50	4,60	7,90	24,10
3	13,90	27,50	11,60	35,50	5,10	15,50	4,20	20,60	43,60	58,80
4	19,70	59,10	32,00	55,20	14,90	71,10	23,40	73,20	34,90	16,70
5	29,70	6,70	41,50	1,30	41,60	6,70	60,40	0,90	12,60	0,10
6	32,90	0,00	9,40	0,00	33,10	0,00	7,80	0,00	0,60	0,00
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Descripción: B-L: bosque latifoliado; B-C: bosque de conífera; B-M: bosque mixto; SAF-C: cafetales; P-C: pastos y cultivo. Celdas color verde representan el 1er lugar; celdas de color amarillo el 2do lugar. **NDVI** 1: Suelo desnudo/agua; 2: Muy baja vegetación; 3: Baja vegetación; 4: Moderadamente baja vegetación; 5: Moderadamente alta vegetación; 6: Alta vegetación; **SAVI** 1: Infraestructura o nubes; 2: Suelo descubierto o poca vegetación; 3: Cobertura del dosel media-alta; 4: Cobertura del dosel alta; 5: Cobertura del dosel muy alta; 6: Cobertura total del dosel.

Los niveles NDMI, según las categorías de usos de suelos, muestran que los P-C presentan los niveles de NDMI más altos relacionados con no indicio de humedad y estrés hídrico alto, con un 98% de ponderación en los niveles uno (79%) y dos (19%), seguido de B-C, con valores del 80% entre los niveles 1 y 2. El uso de suelo B-M presenta un 81% de ponderación en las categorías 2 y 3, cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto y cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo, respectivamente. En el caso del B-L, un 41,2% de la cobertura se agrupó en la categoría 3 y un 31% en la categoría 1, que corresponden a cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo y cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad, respectivamente. El SAF-C presenta la mayor concentración de píxeles en el nivel dos (61%) (**Figura 4, Tabla 6**).

Para el MSI, los P-C presentaron altos valores en el nivel 2 y 3 con un 97%, que corresponden a un contenido bajo y moderadamente bajo de humedad, respectivamente. El B-M presentó valores de un 69,9% en los niveles 3 y 4, moderadamente bajo y moderadamente alto contenido de humedad, respectivamente. El SAF-C se ubicó en el nivel 3 con un 61%. Los usos de suelo de B-L y B-C no tuvieron valores tan claros, ya que se distribuyeron entre los valores 1, 2 y 3 (**Figura 4, Tabla 6**).

**Asociación entre las categorías ponderadas de los índices de vegetación y los usos de suelo del corredor biológico Cacique Lempira**

De acuerdo con el análisis de contingencia, se identificó que existe una asociación significativa entre los cinco usos de suelo y las tres categorías ponderadas de los cuatro IV en el CBCL ( $X^2 = 369,4$ ;  $p$ -value = 0,0001). Cabe recalcar que esta asociación es válida en el tiempo y área que fueron calculados los IV y con el mapa de usos de suelo utilizado para esa fecha.

La **Figura 5** explica un 96,6% de los datos asociados y el Eje 1 explica la mayor cantidad de información con un 84%, el restante se explica en el Eje 2. El gráfico muestra una correlación positiva de los niveles altos de cobertura arbórea y humedad de los IV con los usos de suelo que tienen una mayor cobertura arbórea. Por ejemplo, los niveles más alto de SAVI, NDMI, NDVI y MSI están cerca de B-L y B-M, en tanto los niveles más bajos están cercanos a P-C.

**Tabla 6.** Usos de suelos y niveles ponderados (%) de los índices de vegetación relacionados con humedad (NDMI, MSI) en el corredor biológico Cacique Lempira. Honduras.

**Table 6.** Land uses and weighted levels (%) of vegetation indices related to humidity (NDMI, MSI) in the Cacique Lempira biological corridor. Honduras.

Categoría	B-L (%)		B-C (%)		B-M (%)		SAF-C (%)		P-C (%)	
	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI
1	30,60	0,20	39,50	0,20	16,40	0,10	22,40	0,04	78,80	0,90
2	26,00	30,40	40,60	30,40	33,50	16,30	60,80	22,30	19,40	77,90
3	41,20	26,20	19,50	26,20	47,90	33,70	16,60	60,90	1,80	19,50
4	2,20	28,90	0,50	28,90	2,20	36,20	0,30	15,00	0,00	1,60
5	0,00	13,60	0,00	13,60	0,00	12,90	0,00	1,60	0,00	0,20
6	0,00	0,80	0,00	0,80	0,00	0,80	0,00	0,10	0,00	0,01
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Descripción: B-L: bosque latifoliado; B-C: bosque de conífera; B-M: bosque mixto; SAF-C: cafetales; P-C: pastos y cultivo. Celdas color verde representan el 1er lugar; celdas de color amarillo el 2do lugar. **NDMI** 1: Cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad; 2: Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto; 3: Cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo; 4: Cobertura del dosel alta, sin estrés hídrico; 5: Cobertura del dosel muy alta, sin estrés hídrico; 6: Cobertura total del dosel, sin estrés hídrico/anegamiento; **MSI** 1: Muy bajo contenido de humedad; 2: Bajo contenido de humedad; 3: Moderadamente bajo contenido de humedad; 4: Moderadamente alto contenido de humedad; 5: Alto contenido de humedad; 6: Muy alto contenido de humedad.

En la **Tabla 7**, se muestran las distancias euclidianas para mostrar qué usos de suelos son más cercanos o distantes con base en las categorías de índices de vegetación. Los usos de suelos que describen bosques son los usos más cercanos, por ejemplo, se observa una mayor similitud entre B-L y B-M con una cercanía del 20% y estos dos usos de suelo se relacionan con B-C con una cercanía del 47%. El SAF-C y el P-C son los dos usos de suelo con las diferencias más grandes; las distancias entre estos dos son de 100%. El tipo de bosque clasificado como B-C es el más similar al SAF-C y a P-C, con una cercanía del 50% y 64%, respectivamente (**Tabla 7**).

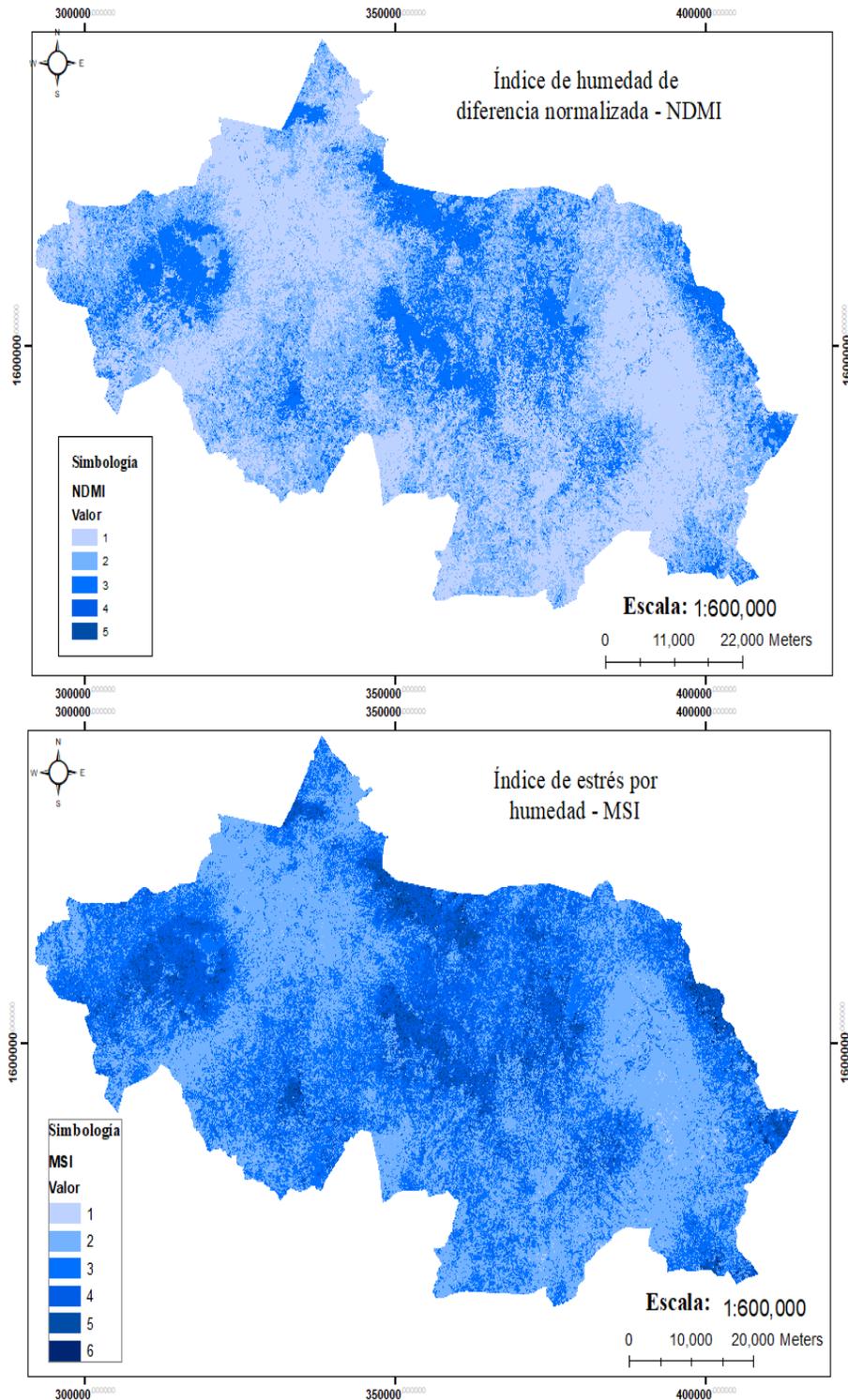
## Discusión

Se utilizaron índices de vegetación para conocer la asociación a nivel exploratorio que existe entre cinco usos de suelo clasificados en el CBCL, con imágenes satelitales Sentinel del 2 de abril del 2019 y el Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras del 2018. Considerando que este estudio se hizo a nivel exploratorio con imágenes tomadas por satélite en el 2019 y el mapa de cobertura forestal y de usos reportado en el 2018 en Honduras, los resultados deben ser validados con puntos de control de campo y compararlos con nuevas firmas espectrales de imágenes actualizadas y de mayor resolución espacial (menor a 20 metros).

Las ventajas de Sentinel es que ofrece 13 combinaciones de bandas espectrales desde visible, seguido de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), hasta infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) y están disponibles con una resolución mejorada de hasta 10 y 20 m, además de contar con una más amplia de 60 m, respectivamente (Jelének y Kopačková-Strnadová 2021, Kaplan y Rozenstein 2021, Torabzadeh *et al.* 2019, Navarro *et al.* 2019, Wittke *et al.* 2019, Pandit *et al.* 2018, Serrano *et al.* 2018).

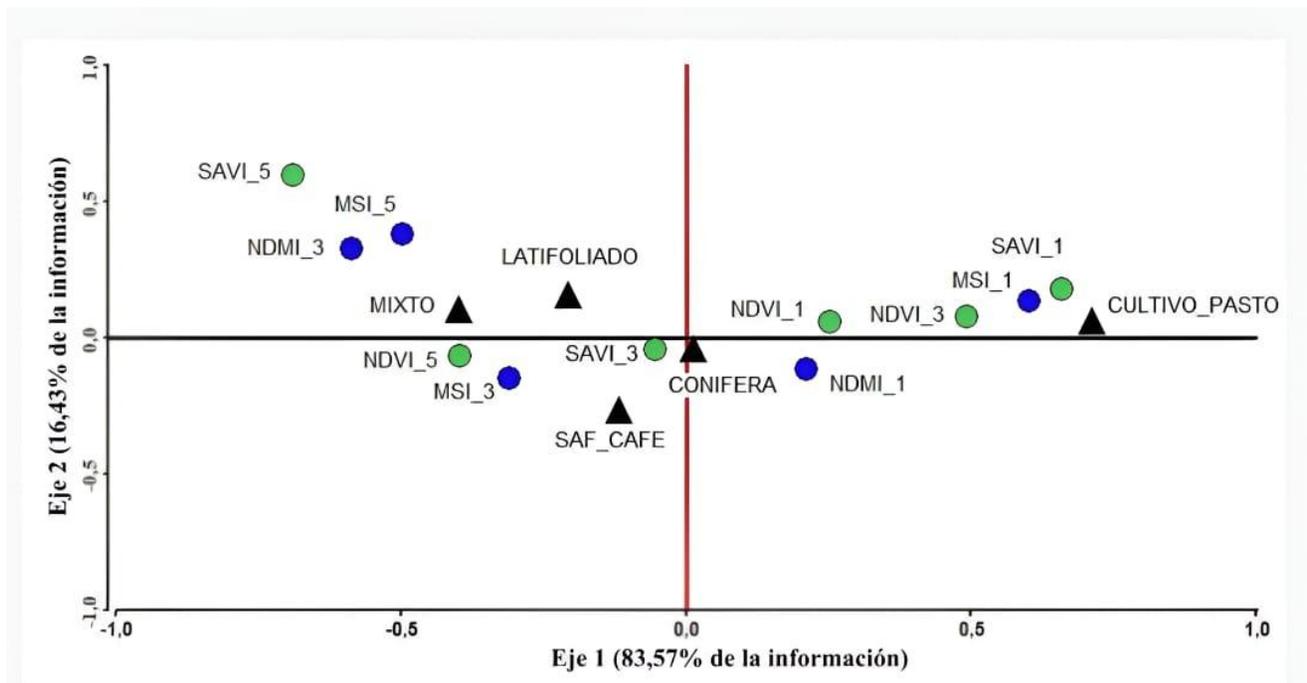
Por su parte, Sentinel 2A/B proporciona una mejora significativa en la cobertura espectral, la resolución espacial y la frecuencia temporal (revisión de 5 días con dos satélites operativos), con respecto a la generación actual de sensores Landsat (Navarro *et al.* 2019, Drusch *et al.* 2012).

En este estudio, se utilizaron dos IV relacionados con verdor (NDVI y SAVI) y dos IV relacionados con humedad (NDMI y MSI), los cuales fueron divididos en seis categorías ponderadas a una escala que va desde -1 a +1, tal como lo hicieron Solís *et al.* 2021, Wittke *et al.* 2019 y Frampton *et al.* 2013. Los IV NDVI y SAVI han sido implementados en algunos estudios cuando se tienen niveles de vegetación con densidades medias y bajas (Navarro *et al.* 2019). El IV NDVI es uno de los índices más utilizados para diferenciar las áreas con vegetación de las áreas sin vegetación y la salud de estas (Tassopoulos *et al.* 2021, Rani *et al.* 2018).



**Figura 4.** Índices de vegetación relacionado con humedad (NDMI y MSI) en el corredor biológico Cacique Lempira, Honduras. Valores de NDMI y MSI: 1) -1:0; 2) 0.000001:0.2; 3) 0.200001:0.4; 4) 0.400001:0.6; 5) 0.600001:0.8; 6) 0.800001:1.

**Figure 4.** Spatial distribution of the Vegetation indices related to humidity (NDMI and MSI) in the Cacique Lempira Biological Corridor, Honduras. NDMI and MSI values: 1) -1:0; 2) 0.000001:0.2; 3) 0.200001:0.4; 4) 0.400001:0.6; 5) 0.600001:0.8; 6) 0.800001:1.



**Figura 5.** Análisis bi-plot de correlación entre los niveles de índices de vegetación y los usos de suelo del Corredor Biológico Cacique Lempira, Honduras. Triángulos negros: usos de suelo (Bosque latifoliado, bosque de conífera, bosque mixto, pastos y cultivo, cafetales). Círculos verdes: NDVI y SAVI (1= cobertura arbórea baja; 2 = cobertura arbórea media; 3 = cobertura arbórea alta). Círculos azules: NDMI y MSI (1 = sin indicios de humedad; 2 = contenido de humedad medio; 3 = contenido de humedad alto).

**Figure 5.** Biplot analysis of the correlation between vegetation index levels and land uses in the Cacique Lempira Biological Corridor, Honduras. Black triangles: soil use (broadleaf forest, coniferous forest, mixed forest, pasture and cropland, coffee plantations) Green circles: NDVI and SAVI (1 = low tree cover; 2 = medium tree cover; 3 = high tree cover). Blue circles: NDMI and MSI (1 = no indication of moisture; 2 = moderate moisture content; 3 = high moisture content).

**Tabla 7.** Distancias Euclidiana entre los usos de suelo según las categorías ponderadas de los IV.  
**Table 7.** Euclidean distances between land uses according to the weighted categories of the vegetation indices.

Cruces comparativos de usos de suelo		Distancia de Euclidianas	Porcentaje de distancia
B-L	B-M	0,5	20
B-C	B-L	1,2	47
B-C	B-M	1,3	47
B-C	SAF-C	1,4	50
B-C	P-C	1,8	64
P-C	B-L	2,2	81
B-M	SAF-C	2,3	84
B-L	SAF-C	2,5	92
P-C	B-M	2,6	95
P-C	SAF-C	2,8	100

Descripción: B-L = bosque latifoliado; B-C = bosque de conífera; B-M = bosque mixto; SAF-C = cafetales; P-C = pastos y cultivos. La distancia en el plano del gráfico bi-plot se explica en porcentajes que van de 0 a 100%. Valores cercanos a 100 tendrán las distancias más largas entre los usos de suelo y valores cercanos a cero tendrán distancias más cortas entre los usos de suelo.

Los análisis indican que los usos de suelo clasificados como bosques (B-M y B-L) tienen los porcentajes de píxeles (área) bajo las categorías más altas en NDVI, que representan mayor cobertura o vegetación y el uso de suelos P-C presentó los valores más bajos (75, 63 y 13% de los píxeles, respectivamente, en categorías 5 y 6). En los análisis de vegetación, NDVI es el IV más importante y el más utilizado a nivel mundial (Freire de Oliveir *et al.* 2021, Caruso *et al.* 2017).

Similares resultados fueron reportados por Chen *et al.* (2019), quienes mencionan que los bosques de coníferas y latifoliados tienen estructuras de rodales relativamente estables, si no se producen perturbaciones graves y que valores mayores a 0,5 (categoría 4, 5, y 6 de este estudio) indican bosques de hoja ancha, de hoja de aguja y bosques de bambú, respectivamente.

Para el índice SAVI, el SAF-C y el B-C obtuvieron los mayores porcentajes de cobertura en las categorías más altas y nuevamente P-C reportó el más bajo (94, 91 y 75% de los píxeles respectivamente en categorías 3 y 4). En los SAF-C, la cantidad de suelo expuesto es consecuencia del espaciamiento entre planta. Cabe destacar que otros autores mencionan que, para ese caso (usos de suelo con SAF-C), SAVI ha sido ampliamente utilizado con el fin de evitar las distorsiones causadas por la respuesta espectral del suelo expuesto en el IV (Coltri *et al.* 2013).

Para el índice NDMI, los valores ponderados más altos relacionados con humedad se encontraron en B-M y B-L y el más bajo fue para P-C (48, 41 y 1,78% de píxeles, respectivamente en la categoría 3). Para MSI, los valores ponderados más altos los tiene B-M con 36% y el valor más bajo B-L con 1,62% de píxeles en la categoría 4. Gulácsi y Kovács (2015) demostraron que los IV relacionados con humedad son capaces de cuantificar las sequías porque existe una fuerte conexión entre la clorofila y el contenido de humedad del dosel de la vegetación. Los IV derivados de datos satelitales se pueden utilizar indirectamente para obtener información sobre la humedad en la zona de raíces del suelo en áreas cultivadas, dado que el perfil de humedad del suelo en muchas regiones del mundo es el principal factor que controla el vigor de la planta (Santos *et al.* 2014).

## Conclusiones

El Corredor biológico Cacique Lempira está dominado por bosques de coníferas, pastos y cultivos, representando 52% del territorio, seguido de bosques latifoliado (17%), SAF-café (14%) y bosques mixtos (7%). El restante 7% del territorio se clasifica como otros usos, que incluye, árboles dispersos, cuerpos de agua, infraestructura, entre otros. El uso de herramienta basadas en sensores remotos multiespectrales resultó en una metodología útil que permitió identificar la existencia de una asociación significativa entre los cinco usos de suelo definidos: bosque latifoliado, bosque de conífera, bosque mixto, pastos y cultivo y SAF-café y las tres categorías ponderadas de los cuatro IV en el CBCL ( $X^2 = 369,4$ ;  $p\text{-value} = 0,0001$ ). Los usos de suelo de bosque mixto y bosque latifoliado presentaron los niveles más altos de los índices de vegetación relacionados con verdor (NDVI y SAVI) y de los índices de vegetación relacionados con humedad (NDMI y MSI). Sin embargo, se observa que, para la mayoría de los usos de suelo, el mayor porcentaje de cobertura está en las categorías de 1 (Infraestructura/nada de vegetación) a 3 (Baja vegetación).

Los análisis de estos índices revelan que el uso de suelo clasificado como SAF-café tiene una relación cercana con el uso de suelo clasificado como bosque de conífera y una asociación muy separada con el uso de suelos clasificado como pastos y cultivos. Además, los usos de suelo que comparten las características más cercanas son los clasificados como bosques latifoliados y bosques mixtos.

### Literatura citada

Abdi, AM; Carri, R; Sidemo-holm, W; Cai, Z; Boke-ol, N; Smith, HG; Eklundh, L; Ekroos, J. 2021. Biodiversity decline with increasing crop productivity in agricultural fields revealed by satellite remote sensing. *Ecological Indicators* 130:108098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108098>

Alvarado, C; Leandro, A; Sarango, D. 2019. Comparación de Índices de Vegetación con imágenes Landsat usando la computación en la nube: zona Pampa de Majes-Siguas, Arequipa Perú (Periodo: Jun 1984 a Nov 2018). *Revista de Investigación de Física* 22(1):27-34 DOI: <https://doi.org/10.15381/rif.v22i1.20280>

Aquino, CMS; Oliveira, JGB. 2012. Estudo Da Dinâmica Do Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada (Ndvi) No Nucleo De São Raimundo Nonato-PI. *GEOUSP - Espaço e Tempo* 31:157-168.

Bedin, DM; De Carvalho, MA; Ampélio, E; Marçal, RG; Cortez, MLJ; Mattioli, MC. 2019. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. *Rev. Ceres, Viçosa* 66 (2):142-153. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201966020009>

Campana-Olaya, J; Tafur, EG; 1. 2021. Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986 - 2019. *Manglar* 18(4):389-395. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.050>

Caruso, G; Tozzini, L; Rallo, G; Primicerio, J; Moriondo, M; Palai, G; Gucci, R. 2017. Estimating biophysical and geometrical parameters of grapevine canopies ('Sangiovese') by an unmanned aerial vehicle (UAV) and VIS-NIR cameras. *Vitis* 56 (2):63-70. DOI: <https://doi.org/10.5073/vitis.2017.56.63-70>

Chen, Y; Li, L; Lu, D; Li, D. 2019. Exploring Bamboo Forest Aboveground Biomass Estimation Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing* 11(1):7. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11010007>

Coltri, PP; Zullo, J; Ribeiro, RG; Romani, LAS; Silveira, HP. 2013. Coffee crop's biomass and carbon stock estimation with usage of high-resolution satellites images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 6(3):1786-1795. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2262767>

Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; González, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2020. Centro de Transferencia InfoStat (en línea), FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. InfoStat versión 2020. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>

Do Nascimento, DA; Da Rocha, OCN; Alves, MM; Dos Santos, AT; De Andrade, EM. 2018. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Ciência Agronômica* 49(3):420-429. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180047>

Drusch, M; Del Bello, U; Carlier, S; Colin, O; Fernandez, V; Gascon, F; Hoersch, B; Isola, C; Laberinti, P; Martimort, P; Meygret, A; Spoto, F; Sy, O; Marchese, F; Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment* 120:25-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

EOS (Earth Observen System). 2021. NDMI (Índice de Humedad de Diferencia Normalizada) (en línea). 09-ag. Disponible en <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/>

ESA (Agencia Espacial Europea). 2018. Sentinel Data Access Overview-Sentinel (online). Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access>

Frampton, WJ; Dash, J; Watmough, G; Milton, EJ. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82:83-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>

Freire de Oliveir, M; Felipe dos Santos, A; Haruna, EK; de Souza Rolim, G; Pereira da Silva, R. 2021. Determination of application volume for coffee plantations using artificial neural networks and remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture* 184:1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106096>

Gao, BC. 1996. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment* 58(3):257-266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Gulácsi, A; Kovács, F. 2015. Drought Monitoring with Spectral Indices Calculated from Modis Satellite Images in Hungary. *Journal of Environmental Geography* 8(3-4):11-20. DOI: <https://doi.org/10.1515/jengeo-2015-0008>

Ha, TV; Amichev, BY; Belcher, KW; Bentham, MJ; Kulshreshtha, SN; Laroque, CP; Van Rees, KCJ. 2019. Shelterbelt Agroforestry Systems Inventory and Removal Analyzed by Object-based Classification of Satellite Data in Saskatchewan, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing* 45(2):246-263. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1540297>

Huete, AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3):295-309. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

ICF (Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre). 2018. Sistema de Información para la Gestión y Monitoreo Forestal (SIGMOF): mapa de cobertura forestal y uso de la tierra 2018 (en línea). Consultado 10 set. 2022 Disponible en <https://sigmof.icf.gob.hn/>

Jelének, J; Kopačková-Strnadová, V. 2021. Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for automatic detection of earthquake-triggered landscape changes: A case study of the 2016 Kaikoura earthquake (Mw 7.8), New Zealand. *Remote Sensing of Environment* 265:112634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112634>

Jia, K; Li, Y; Liang, S; Wei, X; Yao, Y. 2017. Combining estimation of green vegetation fraction in an arid region from Landsat 7 ETM+ data. *Remote Sensing* 9(11):1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9111121>

Kaplan, G; Rozenstein, O. 2021. Spaceborne estimation of leaf area index in cotton, tomato, and wheat using Sentinel-2. *Land* 10(5):505. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10050505>

Kowalski, K; Senf, C; Hostert, P; Pflugmacher, D. 2020. Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92(June). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>

Navarro, A; Catalao, J; Calvao, J. 2019. Assessing the use of Sentinel-2 Time series data for monitoring cork oak decline in Portugal. *Remote sensing* 11(21):2515. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/rs11212515>

Nguyen-Trong, H; Nguyen, TD; Kappas, M. 2020. Land cover and forest type classification by values of vegetation indices and forest structure of tropical lowland forests in Central Vietnam. *International Journal of Forestry Research* 2020:896310. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8896310>

Nogueira-Martins, R; de Carvalho Pinto, FdA; Marçal de Queiroz, D; Magalhães Valente, DS; Fim Rosas, JT. 2021. A novel vegetation index for coffee ripeness monitoring using aerial imagery. *Remote Sensing* 13:263. <https://doi.org/10.3390/rs13020263>

Morrison, K; Lahai-Victor, TS; Kabba-Lamin, R. 2022. Mansaray. Impacts of land-use and land-cover change on rural livelihoods: Evidence from eastern Sierra Leone. *Applied Geography* 147:102784. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102784>

Mosomtai, G; Odindi, J; Abdel-Rahman, EM; Babin, R; Fabrice, P; Mutanga, O; Tonnang, HEZ; David, G; Landmann, T. 2020. Landscape fragmentation in coffee agroecological subzones in central Kenya: a multiscale remote sensing approach. *Journal of Applied Remote Sensing* 14(04):044513. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.jrs.14.044513>

Moyao-Calleja, G; Ramos-Bernal, R; Vázquez-Jiménez, R; Guinto-Herrera, E; Nájera-Ramos, A. 2021. Cálculo de Índices de Vegetación NDVI y SAVI a partir de imágenes multiespectrales obtenidas con un dron. *Academia Journals* 13(4).

Ortiz, BV; Thomson, SJ; Huang, Y; Reddy, KN; Ding, W. 2011. Determination of differences in crop injury from aerial application of glyphosate using vegetation indices. *Computers and Electronics in Agriculture* 77(2):204-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.004>

Pandit, S; Tsuyuki, S; Dube, T. 2018. Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. Remote Sensing 10(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040601>

Paudyal, K; Samsudin, YB; Baral, H; Okarda, B; Phuong, VT; Paudel, S; Keenan, RJ. 2020. Spatial assessment of ecosystem services from planted forests in central Vietnam. Forests 11(8):1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080822>

Rani, M; Kumar, P; Chandra-Pandey, P; Prashant, K; Srivastava, BS; Vandana-Tomar, C; Prasad-Mandal, V. 2018. Multi-Temporal NDVI and Surface Temperature Analysis for Urban Heat Island inbuilt surrounding of Sub-humid Region: A Case Study of two Geographical Regions, Remote Sensing Applications: Society and Environment. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.03.007>

Saah, D; Tenneson, K; Matin, M; Uddin, K; Cutter, P; Poortinga, A; Nguyen, QH; Patterson, M; Johnson, G; Markert, K; Flores, A; Anderson, E; Weigel, A; Ellenberg, WL; Bhargava, R; Aekakkararungroj, A; Bhandari, B; Khanal, N; Housman, IW; Potapov, P; Tyukavina, A; Maus, P; Ganz, D; Clinton, N; Chishtie, F. 2019. Land Cover Mapping in Data Scarce Environments: Challenges and Opportunities. Front. Environ. Sci. 7:150. DOI: <https://doi.10.3389/fenvs.2019.00150>

Santos, WJR; Silva, BM; Oliveira, GC; Volpato, MML; Lima, JM; Curi, N; Marques, JJ. 2014. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. Geoderma 221-222:91-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.006>

Serrano, J; Shahidian, S; Marques da Silva, J. 2018. Monitoring seasonal pasture quality degradation in the Mediterranean Montado Ecosystem: proximal versus remote sensing. water 10(1422):20. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101422>

Solís, AF; Revelo luna, DA; Campo Ceballos, DA; Gaviria López, CA. 2021. Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie *Coffea arabica* con índices espectrales en imágenes. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 19(2):51-68. DOI: <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>

Tassopoulos, D; Kalivas, D; Giovos, R; Lougkos, N; Priovolou, A. 2021. Sentinel-2 imagery monitoring vine growth related to topography in a protected designation of origin region. *Agriculture (Switzerland)* 11(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11080785>

Taugourdeau, S; Avelino, J; Jones, JR; Ramírez, LG; Jara, M; Charbonnier, F; Gómez-delgado, F; Harmand, J; Rapidel, B. 2014. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: an application for coffee agroforestry. «*Agriculture, Ecosystems and Environment*». DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.042>

Tomar, V; Kumar, P; Rani, M; Gupta, G; Singh, J. 2013. A satellite-based biodiversity dynamics capability in tropical forest. *Electron. J. Geotech. Eng.* 18:1171-1180.

Torabzadeh, H; Moradi, M; Fatehi, P. 2019. Estimating aboveground biomass in Zagros forest, Iran, using Sentinel-2 data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W18:1059-1063*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-1059-2019>

Torres, E; Linares, G; Tenorio, MG; Peña, R; Castelán, R; Rodríguez, A. 2014. Índices de vegetación y uso de suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1(3):101-112.

UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2020. Ficha técnica del Corredor Biológico de la Biósfera “Cacique Lempira, Señor de las Montañas” (en línea). Consultado 10 set. 2022. Disponible en <https://www.iucn.org/es>

Wittke, S; Yu, X; Karjalainen, M; Hyypä, J; Puttonen, E. 2019. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 76:167-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>

Zhang, HK; Roy, DP; Yan, L; Li, Z; Huang, H; Vermote, E; Skakun, S; Roger, J. 2018. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. Remote Sensing of Environment 215:482-494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>



Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra licenciada con [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Para mayor información escribir a [rac.cia@ucr.ac.cr](mailto:rac.cia@ucr.ac.cr)