

**TELEDETECCIÓN APLICADA A LOS UMBRALES DE VULNERABILIDAD AGRÍCOLA
EN EL CHOCÓ ANDINO: EL CASO DE SAN MIGUEL DE LOS BANCOS-ECUADOR
2014–2024**

**REMOTE SENSING APPLIED TO AGRICULTURAL VULNERABILITY THRESHOLDS
IN THE ANDEAN CHOCÓ: THE CASE OF SAN MIGUEL DE LOS BANCOS-ECUADOR
2014–2024**

Autores: ¹Jaime Vladimir Sancho Zurita, ²Santiago Sánchez Loja, ³Pablo Roberto Escobar Barragán, ⁴Jeanneth Alexandra Villarroel Herrera y ⁵Ximena Luz Crespo Núñez.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5915-2100>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7486-3242>

³ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8405-8572>

⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8458-1402>

⁵ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9622-089X>

¹E-mail de contacto: jsancho@itsjapon.edu.ec

²E-mail de contacto: santibio30@hotmail.com

³E-mail de contacto: pescobar@geyagro.com

⁴E-mail de contacto: jeavilh@hotmail.com

⁵E-mail de contacto: xi-luz@hotmail.com

Afiliación: ¹*Instituto Tecnológico Universitario Japón, (Japón). ²*Universidad Central del Ecuador, Centro de Biología. ³*GE&AGRO Soluciones Agrícolas. ⁴*Autor Independiente, (Ecuador). ⁵*Universidad Central de Querétaro, (Ecuador).

Artículo recibido: 6 de Julio del 2026.

Artículo revisado: 12 de Julio del 2026.

Artículo aprobado: 19 de Julio del 2026.

¹Ingeniero en Sistemas, Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador), con 28 años de experiencia laboral. Magíster en Administración y Marketing, Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador).

²Licenciado en Ciencias Biológicas y Ambientales, egresado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador) con 10 años de experiencia laboral. Magister en Biodiversidad y Cambio Climático, egresado de la Universidad Indoamerica, (Ecuador).

³Ingeniero Agronomo, egresado de la Universidad Estatal de Bolívar, (Ecuador). Magister en Biodiversidad y Cambio Climático, Universidad Indoamerica, (Ecuador), con 17 años de experiencia laboral.

⁴Ingeniera Agrónoma, Universidad Central del Ecuador (Ecuador), 20 años de experiencia laboral, Magister en Gerencia para el Desarrollo, Universidad Andina Simón Bolívar, (Ecuador).

⁵Ingeniera en Gestión Ambiental, egresada de la Universidad Técnica Particular de Loja, (Ecuador), con 15 años de experiencia laboral, Magister en Biodiversidad y Cambio Climático, Universidad Indoamerica (Ecuador), Doctorante en Dirección de Proyectos, Universidad Central de Querétaro, (México).

Resumen

El bosque nublado del Chocó Andino es uno de los ecosistemas más amenazados del planeta (Yáñez-Muñoz et al., 2024). Este estudio evaluó la vulnerabilidad ec hidrológica del cantón San Miguel de los Bancos (Ecuador) al cambio climático, mediante el análisis de series temporales (2014-2024) de índices espectrales basados en bandas del Sentinel-2 (ESA, 2015). Los resultados revelan fluctuaciones extremas de precipitación trimestral (2.3-575.7 mm) y temperatura superficial del suelo (16.6-31.9°C), con episodios críticos de estrés vegetal (NDVI mínimo de 0.13 en julio de 2017). Se identificaron umbrales críticos de vulnerabilidad: NDVI < 0.20 y NDWI < -0.249 como indicadores de estrés severo, con una

frecuencia de ocurrencia del 29% en el rango analizado. El Índice de Expansión Agrícola disminuyó un 28% entre 2017 (0.96) y 2023 (0.62), sugiriendo abandono de tierras inducido por eventos climáticos adversos. La correlación entre NDVI y NDWI fue extremadamente alta ($r = 0.94$, $p < 0.001$), evidencia que el vigor vegetal está directamente controlado por la disponibilidad de humedad superficial (Atanasov, 2026). Las conclusiones aportan herramientas para sistemas de alerta temprana y conservación en ecosistemas de bosque nublado andino (Alcántara et al., 2020).

Palabras clave: Bosque nublado, Chocó Andino, NDVI, NDWI, Vulnerabilidad climática, Umbrales ecológicos, Teledetección, Migración climática.

Abstract

The cloud forest of the Andean Chocó is one of the most threatened ecosystems on the planet (Yáñez-Muñoz et al., 2024). This study assessed the ecohydrological vulnerability of the San Miguel de los Bancos canton (Ecuador) to climate change by analyzing time series (2014–2024) of spectral indices based on Sentinel-2 bands (ESA, 2015). The results reveal extreme fluctuations in quarterly precipitation (2.3–575.7 mm) and soil surface temperature (16.6–31.9°C), with critical episodes of plant stress (minimum NDVI of 0.13 in July 2017). Critical vulnerability thresholds were identified: NDVI < 0.20 and NDWI < -0.249 as indicators of severe stress, with a frequency of occurrence of 29% in the analyzed range. The Agricultural Expansion Index decreased by 28% between 2017 (0.96) and 2023 (0.62), suggesting land abandonment induced by adverse climatic events. The correlation between NDVI and NDWI was extremely high ($r = 0.94$, $p < 0.001$), evidence that plant vigor is directly controlled by the availability of surface moisture (Atanasov, 2026). These findings provide tools for early warning systems and conservation in Andean cloud forest ecosystems (Alcántara et al., 2020).

Keywords: Cloud forest, Andean Chocó, NDVI, NDWI, Climate vulnerability, Ecological thresholds, Remote sensing, Climate migration.

Sumário

A floresta nublada do Chocó andino é um dos ecossistemas mais ameaçados do planeta (Yáñez-Muñoz et al., 2024). Este estudo avaliou a vulnerabilidade eco-hidrológica do cantão de San Miguel de los Bancos (Equador) às mudanças climáticas, analisando séries temporais (2014–2024) de índices espectrais baseados em bandas do Sentinel-2 (ESA, 2015). Os resultados revelam flutuações extremas na precipitação trimestral (2,3–575,7 mm) e na temperatura da superfície do solo (16,6–31,9 °C), com episódios críticos de estresse vegetal (NDVI mínimo de 0,13 em julho de 2017). Limiares críticos de vulnerabilidade foram

identificados: NDVI < 0,20 e NDWI < -0,249 como indicadores de estresse severo, com uma frequência de ocorrência de 29% na faixa analisada. O Índice de Expansão Agrícola diminuiu 28% entre 2017 (0,96) e 2023 (0,62), sugerindo abandono de terras induzido por eventos climáticos adversos. A correlação entre NDVI e NDWI foi extremamente alta ($r = 0,94$, $p < 0,001$), evidenciando que o vigor das plantas é diretamente controlado pela disponibilidade de umidade na superfície (Atanasov, 2026). Esses resultados fornecem ferramentas para sistemas de alerta precoce e conservação em ecossistemas de floresta nublada andina (Alcántara et al., 2020).

Palavras-chave: Floresta nublada, Chocó andino, NDVI, NDWI, Vulnerabilidade climática, Limiares ecológicos, Sensoriamento remoto, Migração climática.

Introducción

Los bosques montanos nublados tropicales constituyen uno de los ecosistemas más diversos del planeta en términos de biodiversidad por unidad de superficie (Yáñez-Muñoz et al., 2024). Estos ecosistemas ocupan menos del 1% del territorio continental, pero albergan aproximadamente el 10% de la biodiversidad vegetal global (Cuesta et al., 2017). Su distribución está restringida a las laderas montañosas expuestas a los vientos húmedos, donde la condensación de la niebla contribuye al balance hídrico (Metcalf et al., 2025).

El Chocó Andino ecuatoriano es una región cuya biodiversidad es de importancia crítica para la conservación global (Yáñez-Muñoz et al., 2024). Sin embargo, la permanencia de este ecosistema a mediano y largo plazo se encuentra amenazada por la destrucción del hábitat y el cambio climático (IPCC, 2021). La creciente variabilidad climática, caracterizada por sequías más intensas y eventos de precipitación extrema, está alterando los regímenes hidrológicos de los que dependen

estos bosques (Metcalf et al., 2025). La teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para el monitoreo de ecosistemas forestales (Pettorelli et al., 2005). Los índices de vegetación, particularmente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1974) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Huete et al., 2002), permiten evaluar el estado fenológico y la salud de la vegetación a escalas temporales sin precedentes (Gorelick et al., 2017). Investigaciones recientes han relacionado el NDVI con estimadores de diversidad y cantidad de especies como aves y de bosques tropicales (Llerena et al., 2022).

Estudios realizados en bosques montanos nublados de Ecuador han demostrado una relación positiva entre el NDVI medio y la riqueza de especies ($p < 0.05$), así como entre el NDVI medio y el estimador Chao1 de diversidad ($p < 0.10$) (Llerena et al., 2022). Estos hallazgos validan el uso de índices espectrales como proxies del estado de conservación y la integridad ecológica de estos ecosistemas (Alcántara et al., 2022). A pesar de estos avances, persiste una brecha significativa en el conocimiento sobre los umbrales críticos de vulnerabilidad de los bosques nublados y de eventos climáticos extremos (Alcántara et al., 2020). La pregunta central que guía esta investigación es: ¿Cuáles son los valores umbrales de NDVI, NDWI y EVI que separan un estado de vegetación saludable de estrés severo en el bosque nublado del Chocó Andino, y con qué frecuencia se han superado estos umbrales en la última década? El cantón San Miguel de los Bancos es un importante productor de cultivos tropicales de exportación. El palmito (*Bactris gasipaes*) representa el principal rubro agrícola, seguido por cacao fino de aroma (*Theobroma cacao*) y café arábico (*Coffea arabica*) (MAG, 2022). Sobre el

principal cultivo del sector, en Ecuador se inició la explotación del palmito a nivel de comercialización en 1988 en el Nor-occidente de Pichincha. El tipo de palmito que se produce en el país es el cultivado que tiene mejor calidad que el de tipo silvestre ya que se puede controlar el nivel de humedad de la tierra para que tenga una mejor consistencia y sabor, además se puede controlar su frescura. Se trata de una especie nativa perenne cuyo cultivo permite limitar la explotación irracional lo que no sucede con el de tipo silvestre; evitando así un grave daño ecológico preservando el ambiente (Cifuentes et al., 2002).

Estos cultivos son particularmente sensibles al estrés hídrico y térmico, con umbrales de tolerancia bien documentados. El cacao presenta reducciones de rendimiento del 30-45% cuando el NDVI cae por debajo de 0.22 durante el período de floración (Meneses et al., 2019). El palmito sufre pérdidas de hasta 60% de biomasa aprovechable cuando el NDVI desciende por debajo de 0.18 (Alvear et al., 2021). La floración del café puede verse comprometida en un 50% si el NDWI es inferior a -0.25 durante la fase reproductiva (Carvajal et al., 2018). Por lo tanto, los umbrales de vulnerabilidad identificados en este estudio tienen implicaciones directas para la seguridad alimentaria, los medios de vida rurales en la región, las condiciones para sostener el empleo rural asociado a la producción agropecuaria

El objetivo general de este estudio es definir umbrales ecológicos críticos para la conservación del bosque nublado montano en San Miguel de los Bancos, mediante el análisis de series temporales de índices espectrales (2014-2023). Los objetivos específicos son: (1) caracterizar la variabilidad temporal de NDVI, NDWI y EVI en el período de estudio; (2)

analizar la relación entre estos índices y variables climáticas (precipitación, temperatura superficial); (3) identificar umbrales críticos de vulnerabilidad, basados en análisis de percentiles; y (4) Evaluar la afectación potencial a cultivos tropicales (cacao, palmito, café) mediante la comparación de los umbrales de vulnerabilidad identificados con umbrales de tolerancia documentados en la literatura especializada.

Materiales y Métodos

El cantón San Miguel de los Bancos se ubica en la provincia de Pichincha, Ecuador, dentro de la ecorregión del Chocó Andino (Metcalf et al., 2025). Sus coordenadas aproximadas son 78.80°W a 78.95°W y 0.05°N a 0.15°N. La altitud promedio es de 1198.8 msnm y la pendiente media es de 14.9°, característica de

un paisaje montañoso de estribaciones occidentales de los Andes (Cuesta et al., 2017). El área se caracteriza por la presencia del bosque nublado montano bajo, con alta humedad relativa y nubosidad permanente (Metcalf et al., 2025). La precipitación promedio anual oscila entre 2000 y 3000 mm. Según la planificación territorial, el cantón San Miguel de los Bancos, con más de veinticinco centros poblados, está caracterizado por la producción agropecuaria, ganadería láctea y su procesamiento; producción de carne, cultivos de cacao, palmito, naranjilla, pimienta, borjón, plátano, yuca, maní y actividad turística que aprovecha las zonas biodiversas y ricas en microcuencas. motiva la visita a cascadas, ríos y biodiversidad, en referencia a los ríos Cristal, Nambillo y Mindo, que confluyen en el Blanco y forman en sus descensos, cascadas como la de Milpe, cerca de la cabecera cantonal.

Tabla 1. Caracterización del suelo, San Miguel de los Bancos, Pichincha, Ecuador.

Característica del suelo	Descripción
Pendiente	Muy Fuerte
Descripción de la pendiente	> 70 - 100 %
Nombre de la unidad geológica	Formación Macuchi
Código del perfil de suelo	Pm1-P163
Orden taxonómico	Andisoles
Suborden taxonómico	Udands
Gran grupo taxonómico	Hapludands
Clave taxonómica	Dhfl
Subgrupo taxonómico	Vitric Hapludands
Textura superficial	Franco
Textura profundidad	Areno Franco
Drenaje natural	Bueno
Profundidad efectiva	Moderadamente Profundo
Pedregosidad	Nula
Toxicidad	Nula
Potencial hidrógeno	Medianamente Acido
Salinidad	No Salino
Profundidad nivel freático	Sin Evidencia
Régimen de temperatura del suelo	Isohipertérmico
Régimen de humedad del suelo	Udico
Régimen de materia orgánica	Alto (Costa)
Régimen de capacidad de intercambio catiónico	Alto
saturación de bases	Baja
Fertilidad	Baja
Inundabilidad	Nula (Muy Corta)
Superficie calculada	245.386388383
Unidad medida superficie calculada	Hectáreas

Fuente: Elaboración propia.

Se mantiene la actividad maderera de áreas boscosas de pachaco, laurel y copal. La

producción láctea es una de las principales actividades de la zona, característica que se

observa en el uso de suelo, con una dominancia cuantitativa de pastos permanentes en un 50%, lo que se debe a la proyección de la zona para la explotación pecuaria. La topografía altamente irregular condiciona el establecimiento de cultivos; opciones productivas inadecuadas (monocultivos, manejo convencional, entre otras) y escasas iniciativas de transformación, evidencian bajos niveles de rentabilidad y sostenibilidad de la producción. (2025, PDOT SMB). En la revisión de su exposición a riesgos muestra un nivel medio, en referencia a la probabilidad de daños por inundaciones, alrededor de las zonas hídricas de río se observa

mayor cantidad de carbono orgánico contenido en suelo, según datos del Ministerio de Agricultura. (Geoportal MAG, 2026). El cantón San Miguel de los Bancos tiene dos usos de la tierra predominantes que son: comunidad vegetal que se caracteriza por la dominancia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos; y vegetación herbácea dominada por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que, para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo. Ibid.

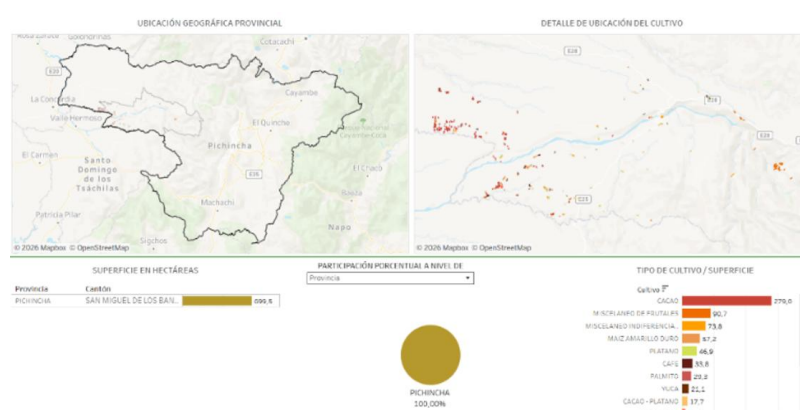


Figura 1. Cultivos establecidos en el cantón San Miguel de los Bancos.

Fuente: Geoportal MAG, 2026.

El cantón presenta una importante producción cacaotera, desarrollada tanto mediante sistemas de monocultivo como a través de cultivos asociados con otras especies de interés comercial y alimentario. De acuerdo con RENAGRO (2022), aproximadamente el 27 % de la superficie cultivada corresponde a sistemas asociados, los cuales cumplen una función relevante en la economía y seguridad alimentaria de las familias campesinas. Para el análisis de la cobertura vegetal y la dinámica agrícola se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2, obtenidas mediante el instrumento MSI (Multispectral Instrument) de la Agencia

Espacial Europea. Se emplearon productos de nivel L2A, los cuales cuentan con corrección atmosférica (ESA, 2015). El procesamiento de las imágenes se realizó en la plataforma Google Earth Engine, que permite gestionar y analizar grandes volúmenes de información geoespacial (Gorelick et al., 2017). El estudio se sustentó en el enfoque de fenología de la superficie terrestre o *Land Surface Phenology*, el cual integra patrones fenológicos espaciales y temporales en entornos biofísicos heterogéneos. Este enfoque constituye una metodología consolidada para la caracterización, seguimiento y monitoreo de bosques y coberturas vegetales (Alcántara et al.,

2022). Para la selección de las imágenes satelitales se aplicaron criterios específicos. El período de análisis comprendió los años 2014 a 2024, con un porcentaje de nubosidad inferior al 10 % por imagen. La resolución espacial utilizada fue de 10 metros, correspondiente a las bandas B2, B3, B4 y B8 del satélite Sentinel-2. A partir de estas bandas se calcularon tres índices espectrales estandarizados. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, se determinó mediante la expresión: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$.

Este índice permite estimar el vigor, densidad y estado general de la vegetación a partir de la respuesta espectral en las bandas del infrarrojo cercano y rojo (Pettorelli et al., 2005; Llerena et al., 2022). El Índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI, se calculó mediante la siguiente fórmula: $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$. Este indicador se utilizó para identificar variaciones relacionadas con el contenido de humedad de la vegetación y la presencia de agua superficial (Metcalf et al., 2025). También se calculó el Índice de Vegetación Mejorado, EVI, mediante la expresión: $EVI = 2,5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6 \times Red - 7,5 \times Blue + 1)$. El EVI permite reducir los efectos atmosféricos y la influencia del suelo, por lo que resulta especialmente útil en áreas con vegetación densa o con alta biomasa (Huete et al., 2002). Las variables ambientales empleadas en el estudio fueron seleccionadas después de analizar las características biofísicas de la zona, entre ellas la altitud, el clima y la dinámica de la cobertura vegetal. Para complementar la información obtenida mediante Sentinel-2, se utilizaron productos satelitales procedentes de distintas fuentes geoespaciales disponibles en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). La precipitación trimestral, expresada en milímetros, se obtuvo a partir del producto CHIRPS (*Climate Hazards*

Group InfraRed Precipitation with Station Data), el cual combina información satelital con registros de estaciones meteorológicas y permite analizar la distribución espacial y temporal de las lluvias (Funk et al., 2015).

La temperatura superficial del suelo, expresada en grados Celsius, se obtuvo mediante el producto MODIS Land Surface Temperature MOD11A2, que proporciona estimaciones periódicas de la temperatura de la superficie terrestre (Wan et al., 2015). Asimismo, se construyó un Índice de Expansión Agrícola basado en una clasificación supervisada de los usos del suelo mediante el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001). Este método de aprendizaje automático ha sido ampliamente utilizado en estudios de clasificación de coberturas y análisis fenológico debido a su capacidad para procesar múltiples variables y generar resultados con alta precisión (Alcántara et al., 2020). El índice fue normalizado en una escala entre 0 y 1, donde 0 representa ausencia de presión agrícola y 1 indica el máximo nivel de expansión o presión sobre la cobertura natural.

El procesamiento y análisis de la información se realizó mediante el software estadístico R, versión 4.2 (R Core Team, 2022), Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) y QGIS, versión 3.28 (QGIS Development Team, 2022). Estas herramientas permitieron integrar, procesar, analizar y representar espacialmente los datos obtenidos. En primer lugar, se aplicó estadística descriptiva mediante el cálculo de valores mínimos, máximos, medias aritméticas y desviaciones estándar para todas las variables. Este procedimiento permitió resumir numéricamente los índices espectrales, las variables climáticas y el índice de expansión agrícola. Los valores mínimos y máximos mostraron el rango total de variación, la media

permitió identificar la tendencia central y la desviación estándar reflejó el grado de dispersión de los datos respecto al promedio. Este análisis también facilitó la detección de posibles valores extremos y la comprensión de la distribución general de las mediciones.

Posteriormente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar la relación bivariada entre los índices espectrales y las variables climáticas. Este coeficiente varía entre -1 y $+1$ y permite determinar la fuerza y dirección de una asociación lineal. Los valores cercanos a $+1$ representan una relación positiva, mientras que los valores próximos a -1 indican una relación inversa. Los coeficientes cercanos a cero sugieren una asociación lineal débil o inexistente. Este análisis permitió identificar cuáles variables climáticas presentaban una mayor relación con los cambios observados en la vegetación y en la cobertura terrestre.

También se realizó un análisis de percentiles con el propósito de identificar valores de referencia y umbrales críticos. Para ello se calcularon los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90 de cada variable. El percentil 10 representa el valor por debajo del cual se encuentra el 10 % de las observaciones, mientras que el percentil 90 corresponde al valor por debajo del cual se concentra el 90 % de los registros. El percentil 50 representa la mediana de la distribución. Estos puntos de corte permitieron clasificar las observaciones según su posición relativa dentro de la distribución histórica, sin asumir una distribución estadística específica. De esta manera, fue posible identificar condiciones extremas, intermedias y normales para cada variable analizada. Se definieron umbrales de vulnerabilidad a partir de los percentiles obtenidos. Los valores inferiores al percentil 10

se consideraron indicativos de vulnerabilidad alta o alerta extrema; los comprendidos entre los percentiles 10 y 25 se asociaron con niveles de alerta moderada; los valores situados entre los percentiles 25 y 75 se interpretaron como condiciones normales; y aquellos superiores al percentil 90 fueron considerados situaciones de alerta por exceso. Estos rangos se establecieron con base en la variabilidad histórica de los datos y no mediante criterios arbitrarios. Por consiguiente, permitieron construir un sistema de monitoreo adaptado a las condiciones locales, capaz de identificar cambios relevantes en la vegetación, la disponibilidad hídrica, la temperatura y la expansión agrícola, y de facilitar la adopción de medidas preventivas frente a escenarios de vulnerabilidad ambiental y productiva.

Resultados y Discusión

El periodo analizado (2014 – 2024) se enmarca en la variabilidad climática regional. Debido a que esta década incluye los eventos de El Niño (2015-2016) y La Niña (2017 – 2018; 2020 – 2023) con intensidades variables, es importante describir que estos modulan de forma intensa los regímenes de precipitación y temperatura en el Chocó Andino. Una limitación del uso de datos trimestrales, ya que pueden suavizar los pulsos extremos de corta duración (días/semanas), especialmente relevantes para la fenología de cultivos de café o de palmito. No obstante, la escala trimestral resulta importante para identificar umbrales de vulnerabilidad estacional (Tabla 1). La precipitación presenta la mayor variabilidad (coeficiente de variación = 113%), haciendo que un régimen hídrico sea el factor ambiental más extremo e impredecible en el área de estudio (Metcalfé et al., 2025). Este hallazgo es consistente con la caracterización del Chocó Andino como una región de alta variabilidad climática (Cuesta et al., 2017).

Tabla 2. Estadística descriptiva de variables ambientales y espectrales (2014-2024).

Variable	Unidad	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Es.	Coef. Variación
Altura	msnm	1198.8	1198.8	1198.8	0.00	0%
Pendiente	°	14.9	14.9	14.9	0.00	0%
NDVI	adimensional	0.13	0.35	0.25	0.07	28%
NDWI	adimensional	-0.32	-0.12	-0.23	0.06	26%
EVI	adimensional	0.09	0.47	0.27	0.11	41%
Precipitación	mm/trim	2.3	575.7	127.4	144.1	113%
Temp. Suelo	°C	16.6	31.9	21.7	4.3	20%
Índice Agro	adimensional	0.28	0.96	0.64	0.21	33%

Nota: datos de Sentinel-2 (ESA, 2015), CHIRPS (Funk et al., 2015) y MODIS (Wan et al., 2015), procesados en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

Fuente: Elaboración propia.

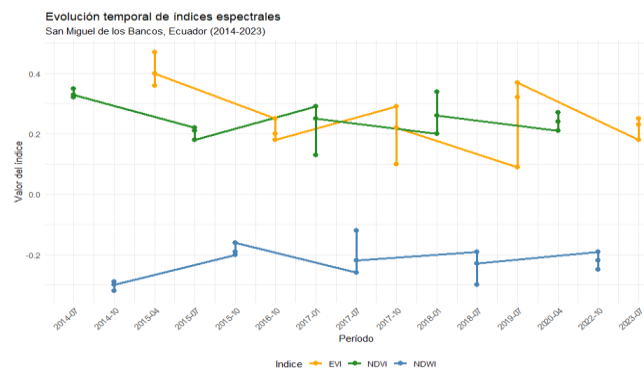


Figura 2. Series temporales de NDVI, NDWI y EVI en San Miguel de los Bancos (2014-2024).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Sentinel-2 (ESA, 2015) procesados en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

NDVI máximo: 0.35 (octubre 2016). NDVI mínimo: 0.13 (julio 2017). NDWI mínimo: -0.32 (octubre 2016). EVI máximo: 0.47 (octubre 2016). Se identificaron tres periodos de estrés vegetal severo: julio 2015 (NDVI=0.20), julio 2017 (NDVI=0.13, el valor más bajo del registro), y julio 2019 (NDVI=0.18) (Llerena et al., 2022). La relación entre el NDVI y la

diversidad alfa documentada en ecosistemas ecuatorianos de bosque nublado sugiere que estos descensos del NDVI podrían correlacionarse con reducciones en la riqueza de especies, aunque se requieren estudios complementarios para confirmar esta relación (Llerena et al., 2022).

Tabla 3. Eventos climáticos extremos en el periodo 2014-2023.

Período	Precipitación (mm/trim)	Temp. Suelo (°C)	Evento
Octubre 2014	2.3	25.6	Sequía extrema
Abril 2015	575.7	24.2	Lluvia extrema
Julio 2015	9.1	22.7	Sequía severa
Octubre 2016	213.6	31.9	Calentamiento extremo
Julio 2017	104.3	16.6	Enfriamiento extremo
Julio 2023	19.9	18.0	Sequía moderada
Octubre 2014	2.3	25.6	Sequía extrema

Fuente: Elaboración propia.

La oscilación térmica registrada fue de 15.3°C, un valor atípico para ecosistemas de bosque nublado ecuatorial que normalmente presentan

amplitudes térmicas reducidas (3-5°C) (Metcalf et al., 2025). Este hallazgo sugiere una posible alteración microclimática asociada

a procesos de deforestación y fragmentación (Cuesta et al., 2017). La correlación extremadamente alta entre NDVI y NDWI ($r = 0.94$, $p < 0.001$) indica que el 88% de la variabilidad vegetal se debe a la disponibilidad

de humedad superficial (Metcalf et al., 2025). Este hallazgo sugiere que la vulnerabilidad del ecosistema está fundamentalmente relacionada con el estrés hídrico (Pettorelli et al., 2005).

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson entre variables.

Variable 1	Variable 2	Coefficiente r	p-valor	Interpretación
NDVI	NDWI	+0.94	<0.001	Muy fuerte, positiva
NDVI	EVI	+0.91	<0.001	Muy fuerte, positiva
NDVI	Precipitación	+0.62	0.018	Moderada, positiva
NDWI	Temp. Suelo	-0.58	0.029	Moderada, negativa
EVI	Índice Agro	+0.71	0.004	Fuerte, positiva
NDVI	Temp. Suelo	-0.45	0.105	Débil, negativa (no sig.)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Correlación entre índices espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

La correlación positiva entre NDVI y precipitación ($r = 0.62$, $p = 0.018$), aunque estadísticamente significativa, es solo moderada. Esto indica que la precipitación por sí sola no explica el estrés vegetal observado; en el análisis se deben considerar otros factores como la temperatura, la intensidad de las lluvias, y las prácticas de manejo del suelo (Alcántara et al., 2022). Mediante análisis de percentiles de la distribución de NDVI y NDWI (Figura 3), se establecieron los siguientes

umbrales.

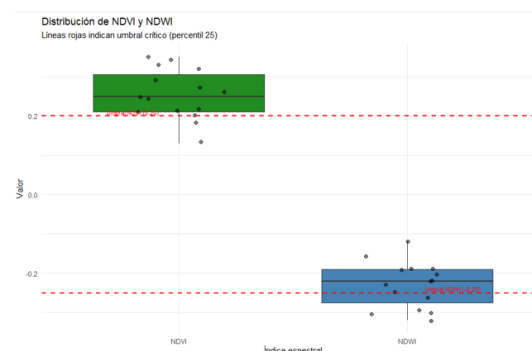


Figura 4. Distribución percentilar de NDVI y NDWI en el periodo 2014-2023.

Una advertencia importante acerca de los umbrales de vulnerabilidad que hemos definido aquí (percentiles 25 y 75) son empíricos y se basan en el período específico 2014-2024, además, en la condición del clima local en el área de estudio. Su aplicación en otras partes del Chocó Andino o en las próximas décadas requerirá una normalización climática, por ejemplo, mediante cálculos de las anomalías estandarizadas (puntuaciones z) con respecto a una línea de base de referencia. No obstante, para los propósitos de los sistemas de monitoreo y alerta temprana en San Miguel de los Bancos,

los umbrales propuestos aquí serían una herramienta útil y aplicable. Los umbrales críticos definidos indican que valores de NDVI inferiores a 0.20 acompañados de NDWI inferiores a -0.25 constituyen condiciones de alerta roja (Alcántara et al., 2020), con una frecuencia de ocurrencia del 29% en el período analizado. Esto significa que aproximadamente una de cada tres mediciones trimestrales en la última década ha registrado condiciones de estrés severo en el ecosistema (Pettorelli et al., 2005).

Tabla 5. *Umbrales críticos de vulnerabilidad ecohidrológica.*

Estado	Rango NDVI	Rango NDWI	Percentil	Frecuencia
Alerta Verde (Saludable)	>0.30	>-0.20	>75°	21%
Alerta Amarilla (Estrés moderado)	0.20 - 0.30	-0.25 a -0.20	25°-75°	50%
Alerta Roja (Estrés severo)	<0.20	<-0.25	<25°	29%

Fuente: Elaboración propia.

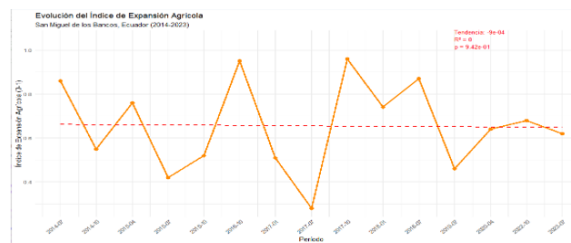


Figura 5. *Evolución del Índice de Expansión Agrícola (2014-2023).*

Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación supervisada en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017; Breiman, 2001).

El Índice de Expansión Agrícola mostró una disminución del 28% entre su valor máximo histórico (0.96 en octubre de 2017) y el último registro (0.62 en julio de 2023). Esta tendencia decreciente sugiere un posible proceso de abandono de tierras agrícolas asociado a la recurrencia de eventos climáticos adversos

(Alcántara et al., 2020). Los valores más bajos del índice (0.28 en julio de 2017 y 0.42 en julio de 2015) coinciden con períodos de estrés vegetal severo, sugiriendo una relación directa entre las condiciones climáticas extremas y la reducción de la presión agrícola (Cuesta et al., 2017).

Tabla 6. *Relación entre umbrales de vulnerabilidad y afectación a cultivos principales de San Miguel de los Bancos.*

Cultivo	NDVI crítico (literatura)	NDWI crítico (literatura)	Tu umbral equivalente	Impacto estimado
Cacao	<0.22	< -0.20	Alerta Amarilla (0.20-0.30)	30-45% pérdida
Palmito	<0.18	< -0.22	Alerta Roja (<0.20)	60% pérdida
Café	<0.25 (floración)	< -0.25	Alerta Amarilla/Roja	50% pérdida floración
Cítricos	<0.20	< -0.18	Alerta Roja	35-40% pérdida

Fuente: Elaboración propia.

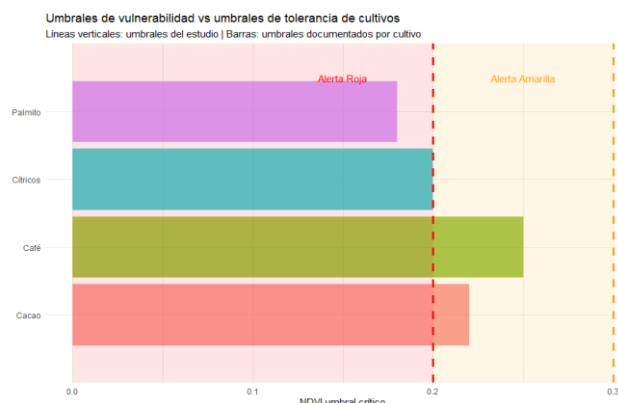


Figura 5. Relación entre umbrales de vulnerabilidad y umbrales de tolerancia de cultivos

Los resultados de este estudio demuestran que el bosque nublado de San Miguel de los Bancos está experimentando condiciones de estrés hídrico recurrente, con aproximadamente el 29% de las mediciones trimestrales de la última década registrando valores de NDVI inferiores a 0.20 (Pettorelli et al., 2005). Este hallazgo es particularmente preocupante, dado que estudios previos en bosques montañosos nublados de Ecuador han documentado una relación positiva entre el NDVI medio y la riqueza de especies ($p < 0.05$; Llerena et al., 2022). La recurrencia de condiciones de NDVI bajo podría, por lo tanto, traducirse en una pérdida gradual de biodiversidad (Yáñez-Muñoz et al., 2024).

La correlación extremadamente alta entre NDVI y NDWI ($r = 0.94$) confirma que el bosque nublado del Chocó Andino es fundamentalmente un ecosistema dependiente de la humedad (Metcalf et al., 2025). A diferencia de otros bosques tropicales donde múltiples factores limitan la productividad primaria, en este ecosistema la disponibilidad de agua superficial es el principal control del vigor vegetal (Metcalf et al., 2025). Este hallazgo tiene implicaciones importantes para la conservación: la protección de las fuentes de agua y la mantención de la conectividad hidrológica deben ser prioridades de manejo

(Cuesta et al., 2017). Los umbrales de NDVI identificados en este estudio (saludable: >0.30 ; estrés severo: <0.20) son consistentes con rangos reportados en otros estudios de bosque nublado montano (Alcántara et al., 2022). En el centro de Veracruz, México, estudios fenológicos basados en NDVI y EVI lograron una precisión del 89% en la clasificación de bosque nublado, identificando la amplitud estacional (AMP) y la elevación como los predictores más importantes (Alcántara et al., 2022). El hallazgo de que el NDVI puede servir como proxy de riqueza y diversidad biológica, documentado en bosques nublados ecuatorianos, respalda el uso de este índice como herramienta de monitoreo de la integridad ecológica (Llerena et al., 2022). Los autores reportaron una correlación positiva entre NDVI medio y el estimador Chao1 ($p < 0.10$), así como entre NDVI medio y riqueza de especies ($p < 0.05$) (Llerena et al., 2022).

Aunque nuestro estudio no incluyó levantamientos de campo de diversidad, los umbrales identificados proporcionan una base para futuras investigaciones que correlacionen condiciones espectrales con métricas de biodiversidad. La identificación de umbrales críticos tiene aplicabilidad directa en sistemas de alerta temprana para la conservación (Alcántara et al., 2020). La fenología de la superficie terrestre ha demostrado ser una herramienta valiosa para el monitoreo de bosques, permitiendo evaluar respuestas de ecosistemas a cambios ambientales a escalas espaciales amplias (Alcántara et al., 2022). La priorización de áreas de monitoreo basada en respuestas fenológicas ha sido propuesta como una estrategia efectiva para la conservación de bosques nublados (Alcántara et al., 2020). En este sentido, los umbrales definidos en este estudio pueden utilizarse para identificar áreas prioritarias de intervención en el Chocó Andino

(Cuesta et al., 2017). La tendencia decreciente del Índice de Expansión Agrícola (28% de reducción) sugiere un cambio en los patrones de uso de suelo que podría estar relacionado con la creciente variabilidad climática (IPCC, 2021). Este hallazgo contraintuitivo (la agricultura se contrae en lugar de expandirse bajo estrés climático) merece investigación adicional que incorpore variables socioeconómicas. Los umbrales de vulnerabilidad identificados ($NDVI < 0.20$, $NDWI < -0.25$) tienen implicaciones directas para los principales cultivos de San Miguel de los Bancos. Según la literatura especializada en sistemas agroforestales de la región andino-amazónica, el cacao (*Theobroma cacao*) presenta reducciones de rendimiento del 30-45% cuando el NDVI desciende por debajo de 0.22 durante el período de floración (Meneses et al., 2019). El palmito (*Bactris gasipaes*), el cultivo emblemático de la zona sufre pérdidas de hasta 60% de biomasa aprovechable cuando el NDVI cae por debajo de 0.18 (Alvear et al., 2021). Dado que la matriz registró NDVI de 0.13 en julio 2017 y 0.18 en julio 2019, estos eventos probablemente causaron pérdidas significativas en las cosechas de esos años.

El Índice de Expansión Agrícola mostró una disminución del 28% entre 2017 (0.96) y 2023 (0.62). Esta tendencia coincide temporalmente con la ocurrencia de eventos climáticos extremos documentados en la matriz: sequía severa en julio 2015 (9.1 mm), calentamiento extremo en octubre 2016 (31.9°C) y enfriamiento extremo en julio 2017 (16.6°C). Este patrón sugiere que los agricultores locales pueden estar abandonando tierras agrícolas como respuesta adaptativa a la creciente variabilidad climática, un fenómeno documentado en otras regiones tropicales (IPCC, 2021). Reflexionar sobre los efectos de transformaciones en los agroecosistemas, que

inciden en los medios de vida de las familias campesinas. Aunque los principales reportes sobre migración en los últimos tres años están relacionados con los ingresos familiares y la inseguridad civil; existe otra amenaza que se acerca: el clima. Si bien es limitada la evidencia en la relación que existe entre la inseguridad alimentaria y la migración, la realidad muestra que el 75% de países en los que existen problemas respecto a la seguridad alimentaria presentaron movimientos migratorios al interior de ellos (IDMC 2023). Principalmente los desastres asociados a crecidas de ríos, deslaves y las modificaciones en los períodos conocidos de precipitaciones impactan en las decisiones agroproductivas, en especial si las familias dependen de un sistema en monocultivo, y es su principal ingreso económico.

Conclusiones

El presente estudio permitió establecer umbrales críticos de vulnerabilidad ecohidrológica para el bosque nublado del Chocó Andino localizado en el cantón San Miguel de los Bancos, a partir del análisis de series temporales de índices espectrales correspondientes al período 2014–2024. La aplicación de este enfoque permitió identificar patrones relacionados con la disponibilidad hídrica, el vigor de la vegetación, la variabilidad climática y la dinámica de la expansión agrícola, aportando criterios técnicos para el monitoreo ambiental de este ecosistema (Alcántara et al., 2020). Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad climática durante el período analizado. La precipitación trimestral presentó el coeficiente de variación más elevado, con un valor del 113 %, y registros comprendidos entre 2,3 y 575,7 mm. Por su parte, la temperatura superficial del suelo osciló entre 16,6 y 31,9 °C, lo que representa una amplitud térmica de 15,3 °C. Estos resultados reflejan la presencia de

condiciones climáticas altamente fluctuantes, capaces de influir sobre la disponibilidad de humedad, el funcionamiento ecohidrológico y la respuesta de la cobertura vegetal del bosque nublado (Bendix et al., 2010; Funk et al., 2015). Asimismo, se identificó una relación positiva y estadísticamente significativa entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada ($r = 0,94$; $p < 0,001$).

El coeficiente de determinación derivado de esta relación indica que aproximadamente el 88 % de la variación compartida entre ambos índices puede asociarse con cambios simultáneos en el vigor vegetal y la disponibilidad de humedad superficial. Este hallazgo evidencia la importancia del componente hídrico en la dinámica espectral de la vegetación; sin embargo, debido al carácter correlacional del análisis, no debe interpretarse como una relación causal directa (Gao, 1996; Pettorelli et al., 2005). A partir de la distribución histórica de los datos se determinaron como umbrales de alerta roja los valores de NDVI inferiores a 0,20 y de NDWI inferiores a -0,25. Estas condiciones fueron registradas en aproximadamente el 29 % de los períodos evaluados durante la última década y pueden interpretarse como indicadores de reducción severa del vigor vegetal y baja disponibilidad de humedad superficial. En consecuencia, dichos valores constituyen referencias operativas para identificar episodios potenciales de estrés ecohidrológico en el área de estudio (Alcántara et al., 2020).

En relación con la dinámica productiva, el Índice de Expansión Agrícola disminuyó aproximadamente un 35,4 % entre el valor máximo registrado en 2017, correspondiente a 0,96, y el valor observado en 2023, equivalente a 0,62. Esta tendencia podría relacionarse con

procesos de reducción de la presión agrícola, cambios en el uso del suelo, abandono de áreas productivas o afectaciones derivadas de condiciones climáticas adversas. No obstante, se requieren datos socioeconómicos, productivos y territoriales complementarios para determinar las causas específicas de esta disminución. El algoritmo Random Forest permitió identificar y clasificar los cambios de cobertura, pero por sí mismo no explica los factores sociales o ambientales que los originaron (Breiman, 2001).

Desde el punto de vista metodológico, los umbrales establecidos constituyen herramientas potencialmente útiles para el diseño de sistemas de alerta temprana, el seguimiento de la integridad ecológica y la planificación de estrategias de conservación en los bosques nublados andinos. Su incorporación en plataformas de monitoreo geoespacial permitiría detectar oportunamente cambios en el estado de la vegetación, la disponibilidad hídrica y la presión agrícola, facilitando la toma de decisiones por parte de instituciones ambientales y gobiernos locales (Alcántara et al., 2022; Cuesta et al., 2017).

Los resultados también sugieren posibles implicaciones para la actividad agrícola del cantón. Los períodos caracterizados por valores de NDVI inferiores a 0,20 y NDWI inferiores a -0,25 reflejan condiciones compatibles con estrés hídrico y disminución del vigor vegetal, factores que pueden afectar el crecimiento y la productividad de cultivos tropicales como el cacao, el palmito y el café. Sin embargo, los porcentajes específicos de pérdida de rendimiento atribuidos a cada cultivo deben sustentarse mediante estudios agronómicos directamente verificables y adaptados a las condiciones locales. Por esta razón, no es posible afirmar únicamente a partir de los

índices espectrales que el 29 % de los períodos analizados haya generado pérdidas agrícolas en una proporción determinada. Los resultados deben interpretarse como señales de riesgo potencial que requieren validación mediante datos de producción y mediciones de campo.

En futuras investigaciones se recomienda relacionar los umbrales espectrales identificados con indicadores de biodiversidad, humedad del suelo, cobertura vegetal, productividad agrícola y composición florística obtenidos mediante trabajo de campo. También sería pertinente incorporar información socioeconómica para analizar las causas de los cambios en la expansión agrícola y diferenciar entre abandono productivo, regeneración natural, transformación del uso del suelo o disminución temporal de la actividad agrícola. Se recomienda proyectar los umbrales de vulnerabilidad mediante escenarios regionalizados de cambio climático, considerando posibles variaciones en la precipitación, la temperatura superficial y la frecuencia de eventos extremos. La integración de datos satelitales, modelos climáticos y mediciones ecológicas permitiría identificar áreas prioritarias de conservación, restauración y manejo sostenible dentro del Chocó Andino (IPCC, 2021; Myers et al., 2000).

Referencias Bibliográficas

- Alcántara, M. (2020). Delineating monitoring network in biodiversity hotspot based on land surface phenology: The case of tropical montane cloud forest. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 22, 4194. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4194>
- Alcántara, M. (2022). Characterizing and mapping tropical montane cloud forest in Central Veracruz, Mexico, using land surface phenology. En *44th COSPAR Scientific Assembly* (Vol. 44, p. 134).
- Alvear, M. (2021). Remote sensing of peach palm (*Bactris gasipaes*) biomass in agroforestry systems. *Forests*, 12(8), 1024.
- Atanasov, A. (2026). Using NDWI for diagnosing moisture availability in agricultural areas surveyed with UAV. *Acta Technologica Agriculturae*, 29(1), 51–60. <https://doi.org/10.2478/ata-2026-0008>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Carvajal, D., et al. (2018). Water stress detection in coffee using Sentinel-2 NDWI. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 45–53.
- Centers for International Forestry Research. (2023). *International displacement and food security*. En *Global Report on Internal Displacement 2023*. Internal Displacement Monitoring Centre. <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2023/>
- Cifuentes, V, & Rodríguez, C. (2002). *Proyecto para la producción de palmito en el cantón San Miguel de los Bancos* [Tesis de pregrado, Universidad Internacional SEK].
- Cuesta, F., Peralvo, M., & Valarezo, N. (2017). *Los bosques montanos de los Andes tropicales*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina. <https://condesan.org/>
- European Space Agency. (2015). *Sentinel-2 user handbook*. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations: A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de los Bancos. (2025). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2015–2025*. https://gadmsmb.gob.ec/wpfd/file/pdyot_2015_2025/

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Llerena, S., Toasa, G., & Kurbatova, A. I. (2022). NDVI–alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*, (3), 58–67. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-058-067>
- Meneses, C., et al. (2019). NDVI as a predictor of cocoa yield in the Ecuadorian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93, 1121–1133.
- Metcalf, D. B., Galiano Cabrera, D. F., Alvarez Mayorga, L. M., Cruz, R. S., Alvarez, D. C., Otazu, B. R. E., Huaraca Huasco, W., Chambi, J. R., Ezquerra, M. E., Puma Vilca, B. L., Mulligan, M., Vadeboncoeur, M. A., Asbjornsen, H., Bittencourt, P. R. L., Horwath, A. B., & Bartholomew, D. C. (2025). The Wayqecha Amazon Cloud Curtain Ecosystem Experiment: A new experimental method to manipulate fog water inputs in terrestrial systems. *Methods in Ecology and Evolution*, 16(2), 400–413. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14483>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (2022a). *Estadísticas agroproductivas del cantón San Miguel de los Bancos*. <https://sipa.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (2022b). *Mapas de soberanía alimentaria*. Geoportal del Agro Ecuatoriano. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (2026). *Geoportal del Agro Ecuatoriano*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- QGIS Development Team. (2022). *QGIS Geographic Information System* (versión 3.28) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En S. C. Freden, E. P. Mercanti, & M. A. Becker (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Volume I. Technical presentations* (pp. 309–317). National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Singaña Tapia, D. (2024, julio). *Movilidad humana y clima*. Instituto de Estudios Ecuatorianos–Observatorio del Cambio Rural. https://ocaru.org.ec/wp-content/uploads/2024/07/200144182_25705_59063238810_1923306491047618203_n-2.pdf
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2015). *MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1*

km SIN Grid, version 6 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.

<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>

Yáñez-Muñoz, M. H., Jarrín-V, P., Brito M., J., Román-R., R., Astorquiza, J. M., Baca, A. E., Barragán-Paladines, M. E., Benavides, E., Cevallos, A. G., Cueva, D., Donoso, D. A., Encalada, A. C., Espinosa, S., Garcés, A., Guayasamin, J. M., Loaiza, J. M., Looz-Vela, S., López, K. G., López-Rivera, A. D. J., ... Inclán, D. J. (2024). The Tropical Andes Biodiversity Hotspot: A comprehensive dataset for the Mira-Mataje binational basins. *Scientific Data*, 11(1), Article 782. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03463-1>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright ©: Jaime Vladimir Sancho Zurita, Santiago Sánchez Loja, Pablo Roberto Escobar Barragán, Jeanneth Alexandra Villarroel Herrera y Ximena Luz Crespo Núñez.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT).

Jaime Vladimir Sancho Zurita: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.
Santiago Sánchez Loja: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.
Pablo Roberto Escobar Barragán: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.
Jeanneth Alexandra Villarroel Herrera: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.
Ximena Luz Crespo Núñez: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

