



Aplicación de SIG en análisis de NDVI para cultivos de cacao con precisión geográfica

Application of GIS in NDVI analysis for cocoa crops with geographical precision

Aplicação de SIG na análise de NDVI para culturas de cacau com precisão geográfica

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.350>

Oscar Xavier Bermeo Almeida¹
obermeo@uagraria.edu.ec

William Jair Dávila Vargas¹
williamjair94@hotmail.com

Verónica Isabel Guevara Arias²
veroguear@hotmail.com

¹Universidad Estatal de Milagro. Milagro, Ecuador

²Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador

Artículo recibido: 14 de enero 2025 / Arbitrado: 24 de febrero 2025 / Publicado: 01 de mayo 2025

RESUMEN

El cacao es un cultivo tradicional y estratégico en la costa ecuatoriana, conocido por su diversidad genética y su importancia económica para el país. En este contexto, el presente estudio se realizó con el objetivo de analizar la cobertura vegetal y su evolución en los cantones Milagro, Vinces y Naranjal de la costa ecuatoriana, durante el período 2020 a 2023. La investigación se enfocó en el cultivo de cacao, evaluando su potencial y las condiciones ambientales para su desarrollo. Se empleó un enfoque cuantitativo y descriptivo, utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como herramienta principal. Se analizaron imágenes satelitales de los años, 2020, 2021, 2022 y 2023 obtenidas de la plataforma USGS Earth Explorer. La información se procesó y analizó en el software ArcMap para generar mapas de NDVI y cuantificar la cobertura vegetal en diferentes categorías. Los resultados del estudio revelan una tendencia positiva en la cobertura vegetal de los cuatro cantones analizados, con un aumento gradual de las áreas con alta densidad vegetal (NDVI > 0.40) entre 2020 y 2023. Esta tendencia se asocia a la reforestación, recuperación de áreas degradadas y prácticas de manejo sostenible del suelo. Se concluye que el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se ha convertido en una herramienta fundamental para el monitoreo y la gestión efectiva de los cultivos de cacao.

Palabras clave: Cacao; Cobertura vegetal; NDVI; Reforestación; SIG

ABSTRACT

Cacao is a traditional and strategic crop in the Ecuadorian coast, known for its genetic diversity and economic importance for the country. In this context, the present study was conducted with the objective of analyzing the vegetation cover and its evolution in the cantons of Milagro, Vinces, and Naranjal on the Ecuadorian coast, during the period from 2020 to 2023. The research focused on cacao cultivation, evaluating its potential and environmental conditions for its development. A quantitative and descriptive approach was employed, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as the main tool. Satellite images from the years 2020, 2021, 2022, and 2023 were analyzed, obtained from the USGS Earth Explorer platform. The information was processed and analyzed using ArcMap software to generate NDVI maps and quantify vegetation cover in different categories. The study results reveal a positive trend in vegetation cover in the four analyzed cantons, with a gradual increase in areas with high vegetation density (NDVI > 0.40) between 2020 and 2023. This trend is associated with reforestation, recovery of degraded areas, and sustainable soil management practices. It is concluded that the use of Geographic Information Systems (GIS) and the analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has become a fundamental tool for the effective monitoring and management of cacao crops.

Key words: Cacao; Vegetal Cover; NDVI; Reforestation; GIS

RESUMO

O cacau é um cultivo tradicional e estratégico na costa equatoriana, conhecido por sua diversidade genética e importância econômica para o país. Nesse contexto, o presente estudo foi realizado com o objetivo de analisar a cobertura vegetal e sua evolução nos cantões de Milagro, Vinces e Naranjal na costa equatoriana, durante o período de 2020 a 2023. A investigação se concentrou no cultivo de cacau, avaliando seu potencial e as condições ambientais para seu desenvolvimento. Foi empregada uma abordagem quantitativa e descritiva, utilizando o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) como ferramenta principal. Imagens satelitais dos anos 2020, 2021, 2022 e 2023 foram analisadas, obtidas da plataforma USGS Earth Explorer. As informações foram processadas e analisadas no software ArcMap para gerar mapas de NDVI e quantificar a cobertura vegetal em diferentes categorias. Os resultados do estudo revelam uma tendência positiva na cobertura vegetal dos quatro cantões analisados, com um aumento gradual das áreas com alta densidade vegetal (NDVI > 0.40) entre 2020 e 2023. Essa tendência está associada à reflorestação, recuperação de áreas degradadas e práticas de manejo sustentável do solo. Conclui-se que o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a análise do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) se tornou uma ferramenta fundamental para o monitoramento e a gestão eficaz dos cultivos de cacau.

Palavras-chave: Cacao; Cobertura Vegetal; NDVI; Reforestamento; SIG

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao*) constituye un cultivo estratégico en la economía global, sustentando medios de vida para más de 6 millones de pequeños productores en latitudes tropicales. Su relevancia trasciende lo comercial, actuando como eje socioecológico en paisajes agroforestales de África Occidental, Sudamérica y el Sudeste Asiático. El 70% de la producción mundial se concentra en países con alta vulnerabilidad climática, donde las plantaciones funcionan como corredores biológicos y sumideros de carbono (2.5 t CO₂/ha/año) (1). No obstante, su sostenibilidad enfrenta amenazas multifactoriales: patógenos como *Moniliophthora roreri* reducen rendimientos en 40-70%, mientras eventos climáticos extremos alteran ciclos fenológicos críticos. A esto se suman presiones de mercados volátiles, donde el precio internacional mostró fluctuaciones del 38% entre 2020-2023, complicando la planificación agrícola. Estas dinámicas exigen enfoques integrados que armonicen productividad con resiliencia ecosistémica (2,3).

Por otra parte, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas tecnológicas que integran datos espaciales, como coordenadas, imágenes satelitales o mapas, para analizar y representar información georreferenciada. En la agricultura, su aplicación es clave para la agricultura de precisión, permitiendo optimizar el uso de recursos como fertilizantes y agua. Por

ejemplo, mediante mapas detallados del suelo, los agricultores identifican variaciones en nutrientes o humedad, ajustando las prácticas de cultivo a zonas específicas. Esto reduce costos y minimiza el impacto ambiental, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (4).

De este modo, los SIG combinados con drones o satélites, facilitan el monitoreo de cultivos en tiempo real. Detectan estrés hídrico, plagas o enfermedades mediante índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Además, ayudan a planificar sistemas de riego eficientes, utilizando datos de humedad del suelo y predicciones climáticas. Esta tecnología mejora la resiliencia ante fenómenos extremos, como sequías, al permitir estrategias de adaptación basadas en datos espaciales (5).

En este sentido, en el trabajo de Cumba (6), en 2022 en la ciudad del Sacha, se aplicó el procesamiento de imágenes multiespectrales para evaluar plantaciones de cacao. Se calcularon varios índices de vegetación, como NDVI, NDRE y SAVI, que son fundamentales para la detección de la plaga monilia. Los resultados indicaron que estos índices permiten identificar la presencia de la enfermedad, facilitando así la evaluación del estado de salud de los cultivos. Esta técnica es crucial para la agricultura de precisión, ya que permite monitorear y gestionar eficientemente los cultivos, reduciendo pérdidas y mejorando la

productividad. Además, su implementación puede ser escalada para otros cultivos y enfermedades, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola.

Además, los SIG también apoyan la planificación territorial agrícola, identificando áreas aptas para cultivos o zonas de riesgo de erosión. Al integrar datos históricos y modelos predictivos, los SIG estiman rendimientos futuros y optimizan la rotación de cultivos. Esto promueve prácticas sostenibles y seguridad alimentaria. Además, son esenciales en la gestión de riesgos, mapeando vulnerabilidades a desastres naturales y diseñando planes de mitigación, lo que fortalece la capacidad de respuesta del sector agrícola (7,8).

De esta forma, Gaspari (9), en el 2007, realizó un estudio enfocado en la elaboración de un plan de ordenamiento territorial para cuencas serranas degradadas por erosión hídrica, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se creó una base de datos con información hidrológica estandarizada para determinar la pérdida de suelo y aplicar técnicas SIG para identificar áreas afectadas y su potencial de recuperación ecológica. El plan se basó en las limitantes naturales existentes, diferenciando ambientes biológicos, geomórficos e hidrográficos. Se confeccionaron mapas temáticos y se cuantificó el caudal sólido mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), lo que permitió una evaluación integral del territorio y su gestión sostenible.

En este contexto, la aplicación de tecnologías avanzadas, como los SIG y el análisis de imágenes de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se ha convertido en una herramienta indispensable para monitorear y gestionar de manera efectiva los cultivos de cacao. El NDVI es un indicador clave de la salud y el vigor vegetal, que se calcula a partir de las mediciones de la reflectancia de la superficie terrestre en el espectro visible e infrarrojo cercano (10).

La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con análisis espectral del NDVI ha revolucionado el monitoreo agroforestal en cacaotales, particularmente en ecosistemas tropicales complejos. El NDVI, cuantifica la actividad fotosintética con precisión submétrica (resolución 10 m). Estudios recientes, como el de Anyimah et al. (11), demuestran su eficacia en la detección temprana de estrés hídrico en *Theobroma cacao*, en noviembre de 2018, el 90.7% de las granjas en Offinso North estaban estresadas, en comparación con el 15.6% en Offinso Municipal. En diciembre de 2018, las cifras fueron del 13.5% contra el 0.8%, respectivamente, y en enero de 2019, del 1.9% contra el 0.1%. Los SIG permiten espacializar estos datos, identificando patrones de productividad (kg/ha) y correlacionándolos con variables edáficas (pH, CIC). Esta sinergia tecnológica optimiza la zonificación de clones resistentes (CCN-51, ICS-95) y la planificación de riegos deficitarios, reduciendo hasta un 22% el consumo hídrico en épocas secas (12).

El uso de SIG permite la integración, análisis y visualización de datos espaciales y temporales relacionados con el cultivo de cacao, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la gestión agrícola. Al combinar el análisis de NDVI con las capacidades de los SIG, es posible obtener información detallada sobre el estado de salud de los cultivos, la detección temprana de enfermedades o estrés hídrico, la evaluación de la cobertura vegetal y la planificación de prácticas agrícolas sostenibles (13).

A medida que los desafíos asociados con el cambio climático y la demanda creciente de cacao continúan aumentando, es imperativo adoptar enfoques innovadores y basados en datos para garantizar la viabilidad y resiliencia de los sistemas de producción de cacao. En este contexto, los SIG y el análisis de NDVI representan soluciones prometedoras que pueden revolucionar la forma en que se gestiona y monitorea el cultivo de cacao, contribuyendo así a un desarrollo agrícola más sostenible y rentable (14).

Por consiguiente, se pretende demostrar cómo la combinación de estas tecnologías puede proporcionar información valiosa para mejorar la producción y manejo de este cultivo. A lo largo del trabajo se analizará la definición de los SIG, su importancia en el análisis de imágenes del NDVI y se presentarán diferentes aplicaciones de esta tecnología en el cultivo de cacao. Así, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la cobertura

vegetal y su evolución en los cantones Milagro, Vinces y Naranjal de la costa ecuatoriana, durante el período 2020 a 2023.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de corte longitudinal y alcance descriptivo, centrado en evaluar la cobertura vegetal mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en tres cantones de la costa ecuatoriana: Vinces (Provincia de Los Ríos), Milagro y Naranjal (Provincia del Guayas). La selección de estas áreas se basó en su relevancia agroproductiva y su exposición a dinámicas ambientales contrastantes. El período de análisis abarcó de 2020 a 2023, con el objetivo de capturar variaciones temporales asociadas a prácticas agrícolas, reforestación y factores climáticos.

Para la adquisición de datos, se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2, obtenidas de la plataforma USGS Earth Explorer. Estas imágenes poseen una resolución espacial de 30 metros (Landsat) y 10 metros (Sentinel-2), adecuadas para discriminar patrones de vegetación en cultivos de cacao. Se priorizaron escenas libres de nubosidad (<10%) correspondientes a los meses de mayor actividad fotosintética (enero a abril), asegurando consistencia en las condiciones de iluminación.

El procesamiento inicial incluyó correcciones radiométricas y atmosféricas mediante el módulo Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) en QGIS 3.28, aplicando el modelo COST para minimizar efectos de dispersión atmosférica. Posteriormente, se calcularon los valores de NDVI usando la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

donde NIR: luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano y Red: luz reflejada en el rango rojo del espectro.

Las imágenes se clasificaron en cuatro categorías según umbrales establecidos en la literatura: suelo desnudo ($NDVI < 0.24$), vegetación escasa ($0.25-0.31$), moderada ($0.32-0.38$) y densa (>0.40).

La integración espacial se realizó en ArcMap 10.8, empleando herramientas de álgebra de mapas para generar composiciones anuales. Se aplicó un filtro de mediana 3x3 para reducir ruido espectral, seguido de una reclasificación basada en los intervalos de NDVI. La validación de los resultados se apoyó en 150 puntos de control distribuidos aleatoriamente, verificados mediante visitas in situ y fotografías georreferenciadas con GPS de precisión (error ± 3 m). Adicionalmente, se generaron mapas temáticos con leyendas graduadas y se calcularon métricas de fragmentación paisajística (índice de Shannon) para evaluar la heterogeneidad vegetal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el cantón Vinces, Provincia de Los Ríos, desde 2020 hasta 2023, muestra una visión detallada sobre la salud y densidad de la vegetación en esta región agrícola clave. Este índice es fundamental para evaluar el potencial agrícola, especialmente en cultivos como el cacao, que dependen de condiciones específicas de cobertura vegetal para prosperar. Los resultados reflejan variaciones significativas en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, lo que puede estar influido por factores como el clima, el uso del suelo y las prácticas agrícolas. Estas fluctuaciones pueden estar relacionadas con eventos climáticos extremos, cambios en los patrones de precipitación y la expansión de monocultivos intensivos. Además, el NDVI permite identificar áreas críticas para implementar estrategias de manejo sostenible, asegurando la resiliencia del sistema agrícola frente a desafíos ambientales.

El análisis de la cobertura vegetal del cantón Vinces de la Provincia de Los Ríos (2020), muestra una distribución favorable para el cultivo de cacao, con un 62% de áreas con alta cobertura vegetal ($NDVI > 0.40$) que brindan sombra, regulan la humedad del suelo y protegen contra la erosión. Un 10% presenta vegetación moderada ($NDVI 0.32$ a 0.38) con potencial para el cultivo bajo prácticas sostenibles. Sin embargo, un 5% de zonas con poca

o nula vegetación (NDVI 0.25 al 0.31) y un 23% de áreas desnudas (NDVI < 0.24) requieren medidas urgentes de reforestación y restauración ecológica para recuperar el suelo y proteger el medio ambiente Figura 1.

En 2021, el cantón Vinces presentó un panorama favorable para el cultivo de cacao, con un 58% del territorio cubierto por densa vegetación, ideal para proporcionar sombra, regular la humedad del suelo y proteger contra la erosión. Este entorno es crucial para optimizar el rendimiento del cacao, un cultivo sensible a las condiciones ambientales. Además, un 22% del territorio contaba con vegetación moderada, que podría ser aprovechada mediante prácticas agrícolas sostenibles para incrementar su productividad. Sin embargo, las áreas con poca o nula vegetación representaban un desafío significativo, ya que requieren atención urgente para evitar la degradación del suelo, conservar la biodiversidad y mitigar los efectos negativos del cambio climático. Estas dinámicas señalan la importancia de una gestión adecuada del uso del suelo en la región Figura 1.

En 2022, el 65% del cantón Vinces exhibió una alta cobertura vegetal, lo que favorece significativamente el cultivo de cacao al proporcionar condiciones óptimas para su desarrollo. Esta cobertura densa es esencial para

mantener la humedad del suelo, proteger contra la erosión y ofrecer sombra, elementos clave para el éxito del cacao. Un 24% del territorio contaba con vegetación moderada, con un notable potencial para el cultivo si se implementan prácticas agrícolas sostenibles. Sin embargo, el 8% de las zonas presentaba poca o nula vegetación, y el 3% eran áreas completamente desnudas, lo que requiere medidas urgentes de reforestación y restauración ecológica para mantener la salud del ecosistema y prevenir la degradación ambiental Figura 1.

En 2023, el cantón Vinces mantuvo una distribución favorable para el cultivo de cacao, con un 65% de áreas cubiertas por alta cobertura vegetal, ideal para proporcionar sombra y proteger el suelo. Un 24% del territorio mostraba vegetación moderada, con potencial para mejorar mediante prácticas agrícolas sostenibles. Sin embargo, un 8% del territorio tenía poca o nula vegetación, y un 3% eran áreas completamente desnudas. La gestión sostenible del cultivo de cacao debe enfocarse en conservar las zonas de alta cobertura vegetal, implementar prácticas sostenibles en áreas moderadas, reforestar zonas con poca vegetación y controlar la erosión en áreas desnudas para optimizar la productividad y proteger el medio ambiente Figura 1. Esto asegura la resiliencia del ecosistema y el éxito a largo plazo del cultivo.

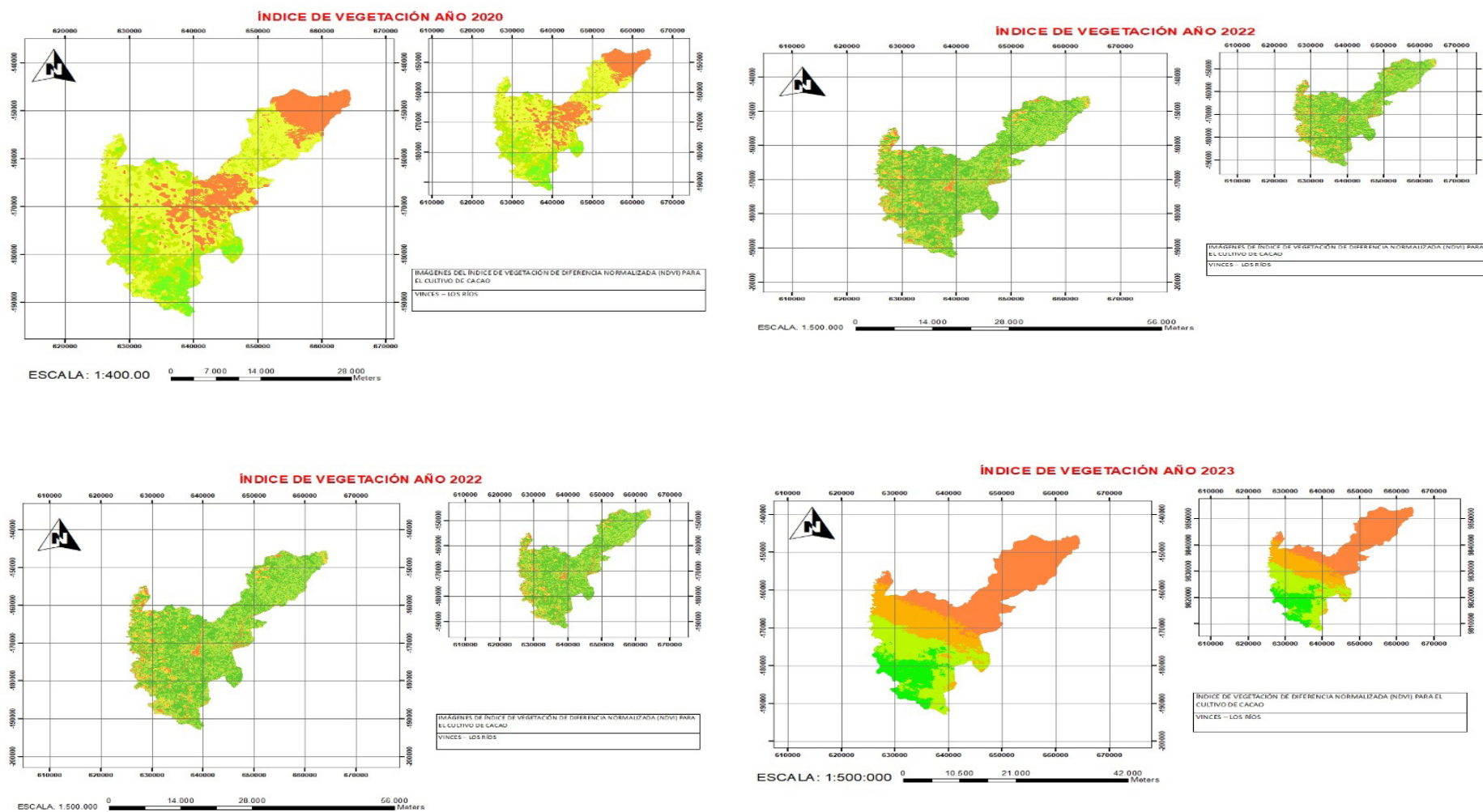


Figura 1. Índice de vegetación año 2020, 2021, 2022 y 2023 del cantón Vines – Provincia de Los Ríos.

El análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el cantón Milagro, Provincia del Guayas, desde 2020 hasta 2023, ofrece una visión detallada sobre la salud y densidad de la vegetación en la región. Este índice, ampliamente utilizado en la teledetección, permite evaluar la biomasa verde y el estado de la vegetación a través de imágenes satelitales. Los resultados muestran variaciones significativas en la cobertura vegetal a lo largo de los años, lo que puede estar relacionado con factores climáticos, uso del suelo y prácticas agrícolas Figura 2.

En el año 2020, el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el cantón Milagro reveló una distribución variada de la cobertura vegetal. Aunque el 60% del territorio mostraba baja vegetación, indicada por colores naranjas y rojos, un 40% presentaba valores de NDVI entre 0.5 y 1.0, lo que sugiere una vegetación más densa y saludable, especialmente en áreas centrales y occidentales. Esta distribución indica un potencial mixto para la agricultura y la conservación, dependiendo de las condiciones específicas de cada zona. Las áreas con mayor cobertura vegetal podrían ser ideales para cultivos que requieren sombra y humedad, mientras que las zonas con menor vegetación podrían necesitar intervenciones para mejorar su productividad y sostenibilidad Figura 2.

En 2021, el cantón Milagro presentó una cobertura vegetal significativa, con un 60%

del territorio cubierto por vegetación densa o moderada. La distribución mostró un 35% de vegetación densa, un 25% de vegetación moderada, y un 20% de vegetación escasa o suelo desnudo. Estos resultados sugieren un buen potencial para la agricultura y la conservación de la biodiversidad, destacando la importancia de gestionar adecuadamente los ecosistemas existentes. Las áreas con vegetación densa son ideales para cultivos que requieren sombra y humedad, mientras que las zonas con vegetación moderada pueden ser mejoradas con prácticas agrícolas sostenibles. Las áreas con poca vegetación necesitan acciones urgentes para evitar la degradación del suelo y mantener la salud del ecosistema Figura 2.

En 2022, la cobertura vegetal en el cantón Milagro experimentó una ligera disminución, con un 55% del territorio cubierto por vegetación densa o moderada. La distribución indicó un 30% de vegetación densa, un 25% de vegetación moderada, y un aumento en áreas con vegetación escasa o suelo desnudo. A pesar de esta disminución, el cantón sigue teniendo un buen potencial para la agricultura y la conservación, aunque requiere atención a los cambios en el uso del suelo y las condiciones climáticas. Es crucial implementar prácticas sostenibles para mitigar la erosión y mejorar la productividad agrícola, especialmente en cultivos como el cacao y la caña de azúcar, que son predominantes en la región Figura 2. Además,

la gestión adecuada del agua y la biodiversidad es esencial para mantener la salud del ecosistema.

En 2023, el cantón Milagro mostró una recuperación en la cobertura vegetal, con un 59% del territorio cubierto por vegetación densa o moderada. La distribución indicó un 32% de vegetación densa, un 27% de vegetación moderada, y una disminución en áreas con vegetación escasa o suelo desnudo. Estos resultados sugieren un buen potencial para la

agricultura y la conservación, destacando la importancia de mantener prácticas sostenibles para preservar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas Figura 2. La recuperación de la vegetación es crucial para cultivos como el cacao, que es predominante en la región. Además, la gestión sostenible del suelo y la biodiversidad es esencial para asegurar la resiliencia del ecosistema y el éxito a largo plazo de las actividades agrícolas.

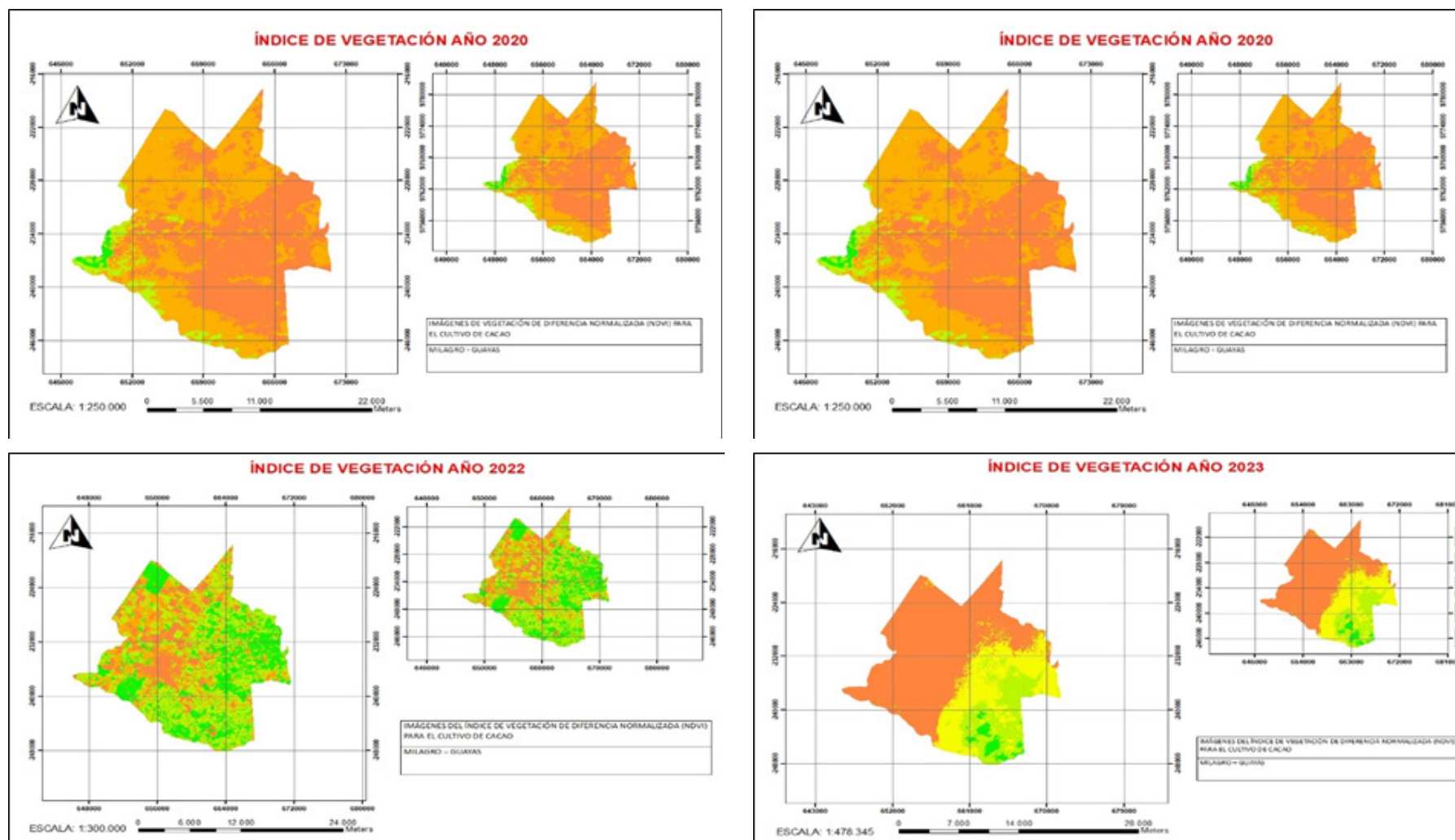


Figura 2. Índice de vegetación año 2020, 2021, 2022 y 2023 del cantón Milagro – Provincia Guayas.

El cantón Naranjal experimentó cambios significativos en cuanto a su cobertura vegetal en los últimos años, lo que ha permitido identificar tendencias y cambios significativos en su paisaje. La distribución de la vegetación en esta región es crucial para entender su potencial agrícola y su capacidad para conservar la biodiversidad. A lo largo de los años, se han observado variaciones en la cobertura vegetal que reflejan tanto la salud general del ecosistema como posibles impactos del uso del suelo y las condiciones climáticas. Estos cambios ofrecen una visión detallada sobre la dinámica ambiental del cantón y su importancia para el equilibrio ecológico regional.

En el año 2020, el cantón Naranjal presentó una distribución significativa de cobertura vegetal. El 38% del territorio estaba cubierto por vegetación densa, mientras que el 30% correspondía a vegetación moderada. Esto suma un total del 68% del territorio cubierto por vegetación densa o moderada, lo que indica un buen potencial para la agricultura y la conservación de la biodiversidad. Solo el 10% del territorio tenía suelo desnudo o vegetación muy escasa, lo que sugiere una saludable condición general de la vegetación en la zona. Esta cobertura vegetal es crucial para cultivos como el cacao. Además, la biodiversidad local se beneficia de la preservación de estos ecosistemas (Figura 3).

En 2021, el cantón Naranjal mostró una ligera disminución en la cobertura vegetal densa, que

pasó del 38% al 35%. La vegetación moderada también disminuyó ligeramente, del 30% al 28%. Sin embargo, el porcentaje de suelo desnudo o vegetación muy escasa aumentó al 15%. A pesar de esto, el 63% del territorio seguía cubierto por vegetación densa o moderada, lo que indica que el cantón mantenía un buen nivel de cobertura vegetal (Figura 3). La gestión sostenible de los ecosistemas es esencial para mantener la biodiversidad y la productividad agrícola, especialmente en áreas con suelos sensibles a la erosión, como los Entisoles y Alfisoles presentes en el cantón.

En 2022, la cobertura vegetal en el cantón Naranjal continuó disminuyendo. La vegetación densa cubría solo el 30.8% del territorio, mientras que la vegetación moderada representaba el 27%. Esto suma un total del 57.8% de cobertura vegetal densa o moderada, lo que es una disminución respecto a años anteriores. La vegetación escasa y el suelo desnudo aumentaron, lo que podría indicar cambios en el uso del suelo o condiciones climáticas adversas (Figura 3). Esta disminución en la cobertura vegetal puede afectar negativamente la biodiversidad local y la productividad agrícola, especialmente en el cultivo del cacao. Es importante poder desarrollar prácticas sostenibles para revertir esta tendencia y proteger los ecosistemas del cantón.

En 2023, el cantón Naranjal presentó una distribución similar a la de años anteriores,

con un 35% de vegetación densa y un 30% de vegetación moderada. Esto indica una estabilidad en la cobertura vegetal densa y moderada, que cubría el 65% del territorio. La vegetación escasa aumentó ligeramente al 25%, mientras que el suelo desnudo o vegetación muy escasa disminuyó al 10%. Esto sugiere que, aunque hay variaciones, el cantón mantiene una buena base de cobertura vegetal (Figura 3). Esta estabilidad es crucial para la agricultura y la conservación de la biodiversidad, permitiendo el desarrollo sostenible de cultivos como el cacao. Además, la gestión adecuada de la vegetación es esencial para proteger los ecosistemas y mitigar los efectos del cambio climático.

Por último, el análisis realizado del NDVI en los cantones Vinces, Milagro y Naranjal entre 2020 y 2023 revela tendencias variadas. En Vinces

se mantuvo una alta cobertura vegetal, con un aumento significativo en 2022 y estabilidad en 2023, lo que favorece el cultivo de cacao. En Milagro se experimentó una disminución en 2022, pero se recuperó en 2023, mostrando fluctuaciones posiblemente debido a cambios climáticos o en el uso del suelo. Mientras en Naranjal se presentó una disminución progresiva hasta 2022, estabilizándose en 2023. En general, en Vinces se muestra estabilidad favorable para la agricultura, mientras que en Milagro y en Naranjal requieren atención para mantener la sostenibilidad ambiental y agrícola. Estas fluctuaciones resaltan la importancia de prácticas sostenibles para proteger los ecosistemas y asegurar la productividad a largo plazo.

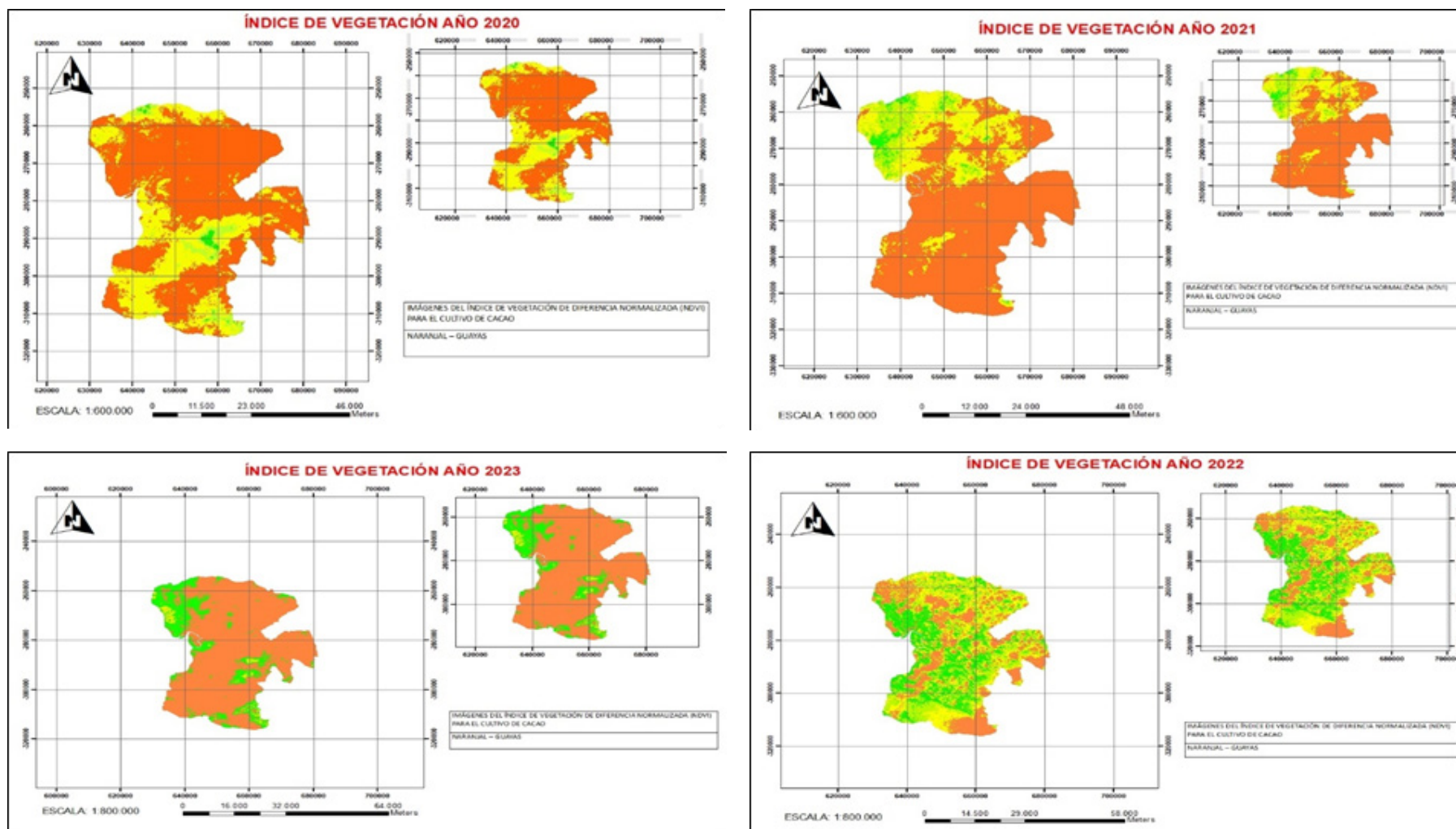


Figura 3. Índice de vegetación años 2020, 2021, 2022 y 2023 del cantón Naranjal – Provincia Guayas.

Discusión

La integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) proporciona un valioso conjunto de herramientas para analizar y monitorear las plantaciones de cacao. Además, las principales ventajas de este enfoque son la evaluación de la salud y viabilidad de los cultivos de cacao a lo largo del tiempo e identificar áreas de problemas y estrés en las plantas (15). Esta información es importante para tomar decisiones correctas sobre prácticas agrícolas como la aplicación de fertilizantes o el control de plagas. El NDVI es sensible a los cambios en la fisiología de las plantas y puede detectar signos tempranos de estrés hídrico, nutricional o por enfermedades. Esta detección temprana puede prevenir daños a los cultivos y reducir las pérdidas económicas. El NDVI se puede utilizar para estimar la biomasa y el rendimiento potencial de las plantaciones de cacao. Esta información es útil para la planificación y comercialización de cultivos.

En este contexto, los resultados obtenidos en este estudio, que evidencian un incremento progresivo de áreas con alta densidad vegetal (NDVI > 0.40) en los cantones Vinces, Milagro y Naranjal entre 2020 y 2023, coinciden parcialmente con investigaciones previas que resaltan el potencial del NDVI para monitorear la dinámica vegetal en cultivos tropicales. Por ejemplo, López et al. (16),

en el 2023, señala que el NDVI permite identificar patrones de recuperación en zonas degradadas, vinculados a prácticas agrícolas sostenibles, lo cual se alinea con la tendencia positiva observada en Ecuador.

Sin embargo, estudios como el de Anyimah et al. (11), en el 2021, en Ghana reportaron fluctuaciones más abruptas en la cobertura vegetal de cacaotales, asociadas a variaciones climáticas extremas, un factor menos pronunciado en la costa ecuatoriana durante el período analizado. Esta divergencia sugiere que los factores locales, como políticas de reforestación o manejo del suelo, podrían modular la resiliencia de los ecosistemas ante presiones externas.

La estabilidad relativa en la cobertura vegetal de Naranjal, a pesar de fluctuaciones anuales, contrasta con hallazgos en regiones como en la parroquia Palmira, Chimborazo, donde la determinación del NDVI, mostró valores promedio de 0.62. La distribución de la cobertura vegetal señaló que el 43.32% del área tenía alto vigor, el 24.36% medio vigor, el 18.99% bajo vigor, y el 13.31% sin cubierta vegetal. La menor presión antrópica en los cantones ecuatorianos, junto con iniciativas como el Programa Nacional de Restauración Forestal, podrían explicar esta diferencia. No obstante, la persistencia de áreas con NDVI < 0.24 en Vinces (8% en 2023) refleja desafíos similares a los identificados por Navarro et

al. (17), en el 2021 en Perú, donde la fragmentación de hábitats limita la recuperación ecológica. Estos paralelismos subrayan la necesidad de estrategias transfronterizas para abordar la degradación del suelo en ecosistemas tropicales.

La correlación entre NDVI elevado y condiciones óptimas para el cultivo de cacao concuerda con trabajos como el de Villaláz et al. (18), en el 2024, quienes asociaron valores superiores a 0.40 con mayor productividad en plantaciones de Costa Rica. No obstante, en Milagro, donde solo el 32% del territorio alcanzó $\text{NDVI} > 0.40$ en 2023, se observó una menor eficiencia en la retención de humedad comparada con Vinces (65%). Esta disparidad podría relacionarse con diferencias edafológicas, ya que estudios en Loja (Ecuador) por Colmet-Daage et al. (19), en el 1965, demostraron que suelos arcillosos, predominantes en Vinces, favorecen la estabilidad hídrica frente a los limosos de Milagro. Tal variabilidad resalta la importancia de adaptar los umbrales de NDVI a contextos pedológicos específicos para optimizar su aplicabilidad.

Por otro lado, la detección temprana de estrés hídrico mediante el índice NDVI encuentra respaldo en investigaciones como las de Revelo et al. (20), en el 2020, quienes validaron este índice para monitorear café bajo déficit hídrico en Colombia. Sin embargo, la ausencia de datos *in situ* sobre contenido de agua en el suelo en el presente estudio limita la precisión de dicha

asociación. Esta discrepancia sugiere que, aunque el NDVI es una herramienta valiosa, su eficacia aumenta significativamente al combinarse con métricas complementarias, como índices hídricos específicos para el cultivo de café. Este enfoque integrado es recomendable para futuros trabajos en la región, mejorando la precisión en el monitoreo del estrés hídrico y optimizando la gestión de recursos hídricos.

El incremento de vegetación moderada (NDVI 0.32–0.38) en Milagro entre 2021 y 2023 coincide con hallazgos de Olivares y López (21), en el 2019, en Venezuela, donde prácticas agroforestales incrementaron la heterogeneidad paisajística. No obstante, en Naranjal, la reducción de áreas densas (38% a 35%) entre 2020 y 2021 contrasta con tendencias globales que vinculan políticas de conservación con recuperación vegetal continua. Una posible explicación radica en la expansión de cultivos transitorios, no considerados en este análisis, que podrían generar dinámicas espaciales no capturadas por las categorías NDVI empleadas. Esta limitación, también señalada por Girimonte y García (22), en el 2020, enfatiza la necesidad de incluir clasificaciones de uso de suelo en modelos predictivos.

En cuanto a la metodología, la aplicación de SIG para mapear NDVI demostró ser eficaz, tal como lo respaldan Pérez et al. (10), en el 2023, quienes destacaron su utilidad en la gestión de cultivos perennes. Sin embargo, la resolución

espacial de 10-30 metros utilizada en la presente investigación puede subestimar microvariaciones en parcelas pequeñas, un problema documentado por Carbajal y Onofre (23), en el 2020, en México. Tecnologías emergentes, como drones multiespectrales con resolución submétrica, podrían superar esta barrera, ofreciendo datos granulares para agricultura de precisión. A pesar de esto, el enfoque adoptado provee una base sólida para escalar análisis a nivel regional, priorizando accesibilidad frente a costos elevados.

La estabilización de NDVI en Naranjal hacia 2023 refleja un equilibrio entre prácticas sostenibles y presiones agrícolas, fenómeno similar al descrito por Núñez et al. (24), en el 2018, en la cordillera andina colombiana. No obstante, la falta de datos socioeconómicos limita la comprensión de los impulsores detrás de estas tendencias. Estudios como los de Contreras et al. (25), en el 2019, en Centroamérica integraron encuestas a productores, revelando que incentivos económicos impulsan la adopción de técnicas agroecológicas. Incorporar dicha dimensión en futuras investigaciones enriquecería el análisis, vinculando dinámicas biofísicas con factores humanos.

Asimismo, la variabilidad intercantonal en cobertura vegetal subraya la heterogeneidad ambiental de la costa ecuatoriana, un aspecto crítico para políticas públicas. Mientras Vines muestra resiliencia climática, Milagro requiere

intervenciones focalizadas, como sistemas de riego eficientes, avalados por Villaláz et al. (18), en el 2024. Estas diferencias territoriales respaldan la tesis de Estacio et al. (26), en el 2021, quienes abogan por planes de manejo adaptativos, basados en diagnósticos locales, en lugar de enfoques genéricos. La integración de NDVI y SIG, como se demostró aquí, ofrece un marco metodológico para dicha personalización, aunque su éxito dependerá de la capacitación de actores locales en el uso de estas tecnologías.

CONCLUSIÓN

El empleo integrado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se consolida como un marco metodológico esencial para la evaluación y gestión sostenible de cultivos tropicales, particularmente en ecosistemas sensibles como los cacaotales. Los resultados de este estudio refuerzan la capacidad de estas herramientas para identificar tendencias espaciotemporales en la cobertura vegetal, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia. La correlación entre valores elevados de NDVI y condiciones agroecológicas óptimas subraya su utilidad en la planificación agrícola, aunque su interpretación requiere adaptarse a variables locales como la composición edáfica y las prácticas de manejo.

No obstante, la variabilidad interregional observada resalta la heterogeneidad ambiental de los sistemas tropicales y la necesidad de enfoques diferenciados en políticas de conservación. Mientras algunas áreas muestran resiliencia vinculada a iniciativas de reforestación, otras enfrentan desafíos persistentes, como la fragmentación de hábitats, que demandan intervenciones multisectoriales. Estos resultados coinciden con estudios globales que enfatizan la interdependencia entre prácticas agrícolas sostenibles, salud del ecosistema y productividad a largo plazo, especialmente en contextos afectados por cambio climático.

En este contexto, la detección temprana de estrés vegetal mediante NDVI, aunque prometedora, evidencia limitaciones cuando se aplica de forma aislada. Su integración con datos in situ y tecnologías emergentes, como sensores de humedad o imágenes de alta resolución, podría optimizar su precisión, tal como lo sugieren experiencias en otras latitudes. Esto apunta a la importancia de adoptar modelos híbridos que combinen teledetección con mediciones terrestres, garantizando una visión holística de la dinámica agroecológica.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. Chávez R, Carbo C, Lombeida E, Cobos J. Estudio socio-económico del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la parroquia Febres Cordero, cantón Babahoyo los ríos-Ecuador. *Obs Econ Latinoam*. 2019;(2):37. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9633824>
2. Correa J, Castro S, Coy J. Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agronómica*. 2014;63(4):388-99. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v63n4.42747>
3. Gil R, Guillermo J. Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Rev Protección Veg*. 2016;31(1):42-9. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1010-27522016000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
4. FAO. Newsroom. 2025. Un nuevo informe de las Naciones Unidas aporta perspectivas sobre cómo la tecnología geoespacial puede impulsar la agenda mundial de seguridad alimentaria. <https://n9.cl/od061>
5. Ponvert D, Lau A. Uso de las imágenes de satélites y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola. *Rev Cienc Téc Agropecu*. 2013;22(4):75-80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542013000400013&lng=es&nrm=iso&tlng=en
6. Cumba J. Análisis e implementación de un sistema de detección de la plaga monilia en cultivos de cacao basado en procesamiento de imágenes multiespectrales en la ciudad del Sacha. [Riobamba, Ecuador]: Escala Superior Politécnica de Chimborazo; 2022. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/20780>
7. Guzmán M, Matuz M de J, Arana Y, López E, Vázquez V, Cárdenas N. Avances y perspectivas de la agricultura de precisión para la sostenibilidad agrícola. *XIKUA Bol Científico Esc Super Tlahuelilpan*. 2024;12(24):1-6. <http://dx.doi.org/10.29057/xikua.v12i24.12790>

8. Perez-Garcia C, Pérez-Atray J, Hernández-Santana L, Gustabello-Cogle R, Armas E. Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara. *Rev Cuba Cienc Informáticas*. 2019;13(2):30-46. <https://www.redalyc.org/journal/3783/378362738003/html/>
9. Gaspari F. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.) [masterThesis]. [Andalucía, España]: Universidad Internacional de Andalucía; 2007. <https://dspace.unia.es/handle/10334/59>
10. Pérez A, Sosa I, Machado N, Ruiz E. Herramientas SIG, revisión de sus fundamentos, tipos y relación con las bases de datos espaciales. *Rev Cienc Téc Agropecu*. 2023;32(3):1-11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-005420230003000010&lng=es&nrm=iso&tlng=en
11. Anyimah F, Osei E, Nyamekye C. Detection of stress areas in cocoa farms using GIS and remote sensing: A case study of Offinso Municipal and Offinso North district, Ghana. *Environ Chall*. 2021;4:100087. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100087>
12. Quintana F, Gómez S, García A, Martínez N. Caracterización de tres índices de cosecha de cacao de los clones CCN51, ICS60 e ICS 95, en la montaña santandereana, Colombia. *Rev Investig Agrar Ambient*. 2015;6(1):252-65. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/29298>
13. Vergara R, Realpe M. Diseño y desarrollo de una herramienta de visualización para el manejo y monitoreo agrícola en haciendas de producción de cacao. [Magister en Ciencias de Datos]. [Guayaquil, Ecuador]: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2022. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54271>
14. Zambrano-Garcia O, Vlassova L. Algoritmo de inteligencia artificial para la detección de cultivos de cacao (*Teobroma cacao* L.), banano (*Musa paradisiaca* L.) y palma africana (*Elaeis guineensis* J.). Editorial Grupo AEA; 2023. 109. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/algoritmo-de-inteligencia-artificial-para-la-deteccion-de-cultivos-de-cacao-teobroma-cacao-l-banano-musa-paradisiaca-l-y-palma-africana-elaeis-guineensis-j>
15. Berrio V, Álzate D, Mosquera J. Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *Rev Ambient Agua Aire Suelo*. 2016;7(2):1-9. <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/767>
16. López E, Placeres A, Rodríguez O, González O, Herrera M. Relación entre variables biofísicas e índices vegetativos espectrales en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*). *Rev Cienc Téc Agropecu*. septiembre de 2023;32(3):1-5. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542023000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
17. Navarro A, Pezo A, Riveros C, Frisancho N. Fragmentación Antropogénica de los ecosistemas de Puna en el extremo sur del Perú. *Estud Geográficos*. 2021;82(290):e058-e058. <https://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/view/1037>
18. Villaláz J, Villarreal E, Pineda R, Gutiérrez A, Merino A. Efecto del índice de estrés hídrico sobre el estado vegetativo de la planta de cacao. *Cienc Agropecu*. 2024;(38):84-104. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9464004>
19. Colmet-Daage F, Gautheyrou J, Gautheyrou M, Cucalon F, Moreau B. Características de algunos suelos del Ecuador : 1965. ORSTOM-Antilles 33-E; https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-12/29912.pdf
20. Revelo A, Mejía J, Montoya P, Hoyos J. Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ing Desarro Rev Div Ing Univ Norte*. 2020;38(2):298-312. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7889761>
21. Olivares B, López-Beltrán M. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuad Investig UNED*. 2019;11(2):112-21. <https://www.redalyc.org/journal/5156/515661486014/html/>

- 22.** Girimonte P, García J. El índice NDVI y la clasificación de áreas sembradas aprendizaje automático no supervisado "k-means". Rev Investig En Model Matemáticos Apl Gest Econ. 2020;7(1):39-52. <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2016/04/Girimonte-Garcia-Fronti.pdf>
- 23.** Carbajal H, Onofre F. Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja. Rev Científico - Prof. 2020;5(Extra 1):228-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7659358>
- 24.** Núñez J, Carvajal J, Mendoza O, Carrero D. Indicadores del impacto del cambio climático en la agricultura familiar andina colombiana. Rev Iberoam Bioeconomía Cambio Climático. 2018;4(7):824-831. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.347442>
- 25.** Contreras A, Sánchez P, Romero O, Rivera A, Ocampo I, Parraguirre F. Prácticas agroecológicas y su influencia en la fertilidad del suelo en la región cafetalera de Xolotla, Puebla. Acta Univ. 2019;29. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-62662019000100119&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- 26.** Estacio M, Tinoco O, Díaz J, Moore K. Sistemas de Información Geográfica y Localización de un Relleno Sanitario en Cerro de Pasco. Rev Inst Investig Fac Minas Metal Cienc Geográficas. 2021;24(48):217-227. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8243047>

ACERCA DE LOS AUTORES

Oscar Xavier Bermeo Almeida. Máster en gerencia de tecnologías de la información, Universidad estatal de Milagro. Docente en la Universidad Agraria del Ecuador y en la Universidad Estatal de Milagro. Participante en el Congreso de tecnologías e Innovación en la Universidad Agraria del Ecuador, proyecto de investigación en la Universidad Estatal de Milagro, Ecuador.

William Jair Dávila Vargas. Ingeniero en Sistemas, Ecuador.

Verónica Isabel Guevara Arias. Ingeniera en Computación e informática, Universidad Agraria del Ecuador. Magíster en Dirección Estratégica en Tecnologías de la información. Encargada de administración y gestión de laboratorios de computación, optimización de recursos de hardware y software de la Universidad Agraria del Ecuador Milagro. Docente del Colegio Técnico Industrial La Alborada Milagro, Capacitadores en el SECPA. Cursos de computación, redes de computadores y mantenimientos de computadoras, Ecuador.