

Capítulo 3

Evaluación multitemporal de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Sandalias mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Darwin Javier Sucoshañay Villalba, Héctor Fernando Reyes Morán, Víctor Hugo Del Corral-Villarroel, Ligia Angélica Mejía Pazmiño, Christopher Oswaldo Paredes Ulloa

Resumen

Este trabajo evalúa los cambios en la cobertura vegetal en la microcuenca del río Sandalias, en Pastaza, Ecuador, utilizando imágenes satelitales Landsat y el NDVI, abarcando el periodo de 2013 a 2023. La microcuenca, con 3674,1 hectáreas, se caracteriza por su actividad antrópica variada, incluyendo urbanismo, turismo y agricultura. Esta región del bosque pluvial pre-montano presenta alta pluviosidad y temperaturas moderadas, factores que influyen en su vegetación. El NDVI, índice usado para evaluar la vegetación comparando la reflectancia del rojo y el infrarrojo cercano, permitió interpretar parámetros biofísicos de la vegetación y su distribución espacial y temporal. Los resultados mostraron un cambio significativo en la cobertura vegetal: la vegetación alta disminuyó de 1963,7 hectáreas en 2013 a 1130,4 hectáreas en 2023, debido a la deforestación y el desarrollo urbano y agrícola. En contraste, la vegetación mediana y ligera aumentó, indicando una posible regeneración parcial de áreas degradadas y la expansión de vegetación menos densa. La dinámica temporal de la vegetación refleja las presiones antrópicas, especialmente por la expansión de Puyo. Estos cambios están vinculados al aumento poblacional y la necesidad de espacio para actividades productivas, destacando la importancia de implementar acciones de gestión ambiental para mantener el equilibrio del ecosistema.

Palabras clave:

Índice de vegetación; cobertura; uso de la tierra; ecosistemas; cuenca hidrográfica.

Sucoshañay Villalba, D. J., Reyes Morán, H. F., Del Corral-Villarroel, V. H., Mejía Pazmiño, L. A., y Paredes Ulloa, C. O. (2024). Evaluación multitemporal de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Sandalias mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. En A. B. Benalcázar (Ed). *Ciencias Sociales Aplicadas y Humanidades sobre América Latina. Volumen III*. (pp. 51-67). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.238.c383>



Introducción

Cuencas hidrográficas amazónicas

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades geográficas fundamentales que, por su naturaleza integradora, representan divisiones naturales del paisaje. Estas unidades territoriales no solo delimitan el flujo del agua, sino que también establecen el marco ideal para la planificación y gestión holística de los recursos naturales, incluyendo agua, suelo, flora y fauna (Cotler et al., 2010). Su importancia radica en que funcionan como sistemas complejos donde interactúan múltiples componentes ambientales y sociales.

La observación de Abril et al. (2017), sobre la agudización de problemas ambientales en cuencas urbanizadas debido a actividades antropogénicas refleja una realidad global. En el caso específico de las cuencas amazónicas, aunque la densidad poblacional general es relativamente baja, existen factores críticos a considerar:

- **Concentración urbana focalizada:** Si bien la densidad poblacional total es baja, la concentración en núcleos urbanos específicos genera presiones localizadas intensas sobre los recursos hídricos y ecosistemas.
- **Dinámica de crecimiento:** Los índices de crecimiento poblacional en estas áreas urbanas amazónicas sugieren una tendencia al aumento de la presión sobre los recursos naturales, aun cuando el territorio circundante mantenga una baja densidad poblacional.
- **Impactos acumulativos:** La combinación de crecimiento poblacional y concentración urbana puede ocasionar una mayor demanda de recursos hídricos, incremento en la generación de residuos, modificación de los patrones de escorrentía y la alteración de la calidad del agua.

Los cambios en la cobertura del suelo son procesos dinámicos inherentes a las cuencas hidrográficas, que se intensifican significativamente en territorios con marcada presencia humana. Estas transformaciones, que pueden manifestarse en forma de deforestación, urbanización o cambios en los patrones agrícolas, no ocurren de manera aislada, sino que desencadenan una serie de efectos en cascada que alteran profundamente los procesos biológicos (como los ciclos de nutrientes y la biodiversidad), físicos (como la erosión y el régimen hidrológico) y químicos (como la calidad del agua y los ciclos biogeoquímicos) de los sistemas naturales (Pérez et al., 2018; Guzmán et al., 2023). La comprensión de estas dinámicas resulta crucial para desarrollar estrategias efectivas de gestión y conservación que permitan mantener la integridad ecológica de las cuencas mientras se satisfacen las necesidades humanas.

Cobertura vegetal de cuencas hidrográficas

De acuerdo con García y Guaitarilla (2024), la cobertura vegetal es un componente esencial del ecosistema, ya que desempeña un papel crucial en la regulación de los ciclos hidrológicos, la conservación de la biodiversidad y la mitigación de los efectos del cambio climático. Bajo lo expuesto, el monitoreo y análisis de la dinámica de la cobertura vegetal se ha convertido en una prioridad en los procesos de investigación para el manejo y gestión de los ecosistemas.

Esta importancia se ve reflejada en múltiples aspectos funcionales del ecosistema. En primer lugar, la cobertura vegetal actúa como barrera natural contra la erosión del suelo, reduciendo el impacto directo de la lluvia y estabilizando los terrenos mediante sus sistemas radiculares (Schaaf, 2020). Además, contribuye significativamente al ciclo del carbono, actuando como sumidero natural del dióxido de carbono CO₂ atmosférico a través del proceso de fotosíntesis.

En concordancia con Vera et al. (2023), el gran porcentaje de las pérdidas de la vegetación está dado por procesos de expansión de las actividades antrópicas, como la agricultura, ganadería o simplemente por crecimiento de los centros poblados. Este fenómeno se manifiesta de manera particularmente aguda en regiones en desarrollo, donde la presión por convertir ecosistemas naturales en tierras productivas se intensifica año tras año. La transformación del paisaje no solo implica una pérdida directa de biodiversidad, sino que también fragmenta hábitats críticos y altera procesos ecosistémicos fundamentales.

La disminución de la vegetación en las cuencas amazónicas representa una de las problemáticas ambientales más significativas a nivel global, considerando el rol crucial que desempeña este ecosistema en la regulación climática mundial y el mantenimiento de la biodiversidad. En concordancia con Silva et al. (2021), la deforestación en la cuenca amazónica presenta patrones distintivos según las diferentes subcuencas y países que comparten este vasto territorio. En la cuenca alta, correspondiente a los Andes Amazónicos, la expansión de la agricultura de pequeña escala y la minería informal han provocado una significativa degradación de los bosques montanos, situación agravada por los cambios en los patrones de precipitación influenciados por el cambio climático.

La cuenca media se caracteriza por la construcción de infraestructura vial que ha actuado como catalizador para la deforestación, creando el denominado “efecto espina de pescado”, junto con la expansión de la frontera agrícola, principalmente para el cultivo de soya y la ganadería extensiva. En la cuenca baja, los proyectos hidroeléctricos han generado impactos significativos en la vegetación ribereña y los bosques inundables, mientras que la urbanización acelerada y el desarrollo de actividades extractivas han fragmentado importantes corredores ecológicos (Marín et al., 2022).

Las consecuencias de esta disminución de vegetación son múltiples y sistémicas, abarcando impactos hidrológicos como la alteración de los ciclos hidrológicos locales y regionales, la reducción en la capacidad de retención de agua en los suelos y el incremento en la sedimentación

de los ríos (Meza & Armenteras, 2018). Los efectos climáticos incluyen la disminución en la evapotranspiración regional, la alteración de los patrones de precipitación y la contribución al efecto de borde y la fragmentación del dosel. En términos de biodiversidad, se observa la pérdida de hábitats críticos para especies endémicas, la ruptura de corredores biológicos y la alteración de las dinámicas de polinización y dispersión de semillas.

La magnitud de estas pérdidas varía significativamente entre países, de acuerdo con Kirby (2006), ha sido en Brasil donde se concentra el mayor porcentaje de deforestación histórica, con patrones de pérdida asociados principalmente a la expansión agropecuaria industrial. Perú y Colombia muestran patrones de deforestación más fragmentados, donde la minería ilegal y los cultivos ilícitos son factores significativos, mientras que en Ecuador y Bolivia, la expansión de la frontera agrícola y la ganadería son los principales motores de la deforestación, presentando tasas crecientes en años recientes (Rodríguez et al., 2021).

Ante esta situación, las estrategias de conservación y restauración deben considerar un enfoque de cuenca integral, que incluya la implementación de planes de manejo que consideren la conectividad entre subcuencas y el establecimiento de corredores ribereños protegidos. En concordancia con Meregildo & López (2024), es fundamental fortalecer los sistemas de monitoreo mediante la utilización de sistemas de alerta temprana basados en teledetección y la implementación de redes de monitoreo participativo comunitario, así como mejorar la gobernanza a través del fortalecimiento de la coordinación transfronteriza y el desarrollo de políticas de conservación armonizadas entre países.

Teledetección aplicada al análisis de los ecosistemas

De acuerdo con Altamirano et al. (2012), en las últimas décadas los datos de sensores remotos han provocado gran interés en el análisis de la estructura y composición, además de la dinámica del paisaje. Este creciente interés se debe principalmente a la capacidad de estos sensores para capturar información espectral, temporal y espacial de manera sistemática y a diferentes escalas.

Logroño et al. (2020), plantean que la teledetección satelital se ha convertido en una herramienta fundamental en la búsqueda de información acerca de los paisajes terrestres a escala global y local. Esta tecnología permite monitorear cambios en la cobertura terrestre, evaluar el estado de los ecosistemas, realizar seguimiento de fenómenos naturales y antropogénicos, y generar cartografía temática con alto nivel de precisión. Con estas técnicas de teledetección y uso de los sistemas de información geográfica (SIG), los estudios se han convertido más confiables, gracias a la captura y transmisión de la información requerida de manera confiable y adecuada (Sierra, 2023). La integración de estas tecnologías ha revolucionado el campo de las ciencias de la Tierra, permitiendo el análisis multitemporal de cambios en el paisaje, la evaluación de recursos naturales, el monitoreo de desastres naturales, la planificación territorial y la gestión ambiental integral.

Rodríguez & Alonso (2022), mencionan que el monitoreo de los cambios en la vegetación utilizando datos de teledetección a largo plazo puede ayudar a comprender y simular de manera más precisa los cambios dinámicos en los ecosistemas terrestres, y además revelar tendencias y patrones dinámicos globales de la vegetación. Este enfoque metodológico ha revolucionado nuestra capacidad para realizar seguimiento a gran escala de las transformaciones paisajísticas. Las tecnologías de teledetección, que incluyen imágenes satelitales multiespectrales y radar, permiten cuantificar cambios en la cobertura vegetal con una precisión sin precedentes, facilitando la identificación temprana de zonas críticas de deforestación y degradación ambiental.

Además, el desarrollo continuo de nuevos sensores satelitales y algoritmos de procesamiento ha mejorado significativamente la calidad y cantidad de información disponible para investigadores y tomadores de decisiones. Esta evolución tecnológica, junto con el aumento en la capacidad de procesamiento computacional, ha permitido análisis más sofisticados y precisos de los fenómenos terrestres. La combinación de teledetección y SIG también ha facilitado la creación de bases de datos geoespaciales más robustas y actualizadas, fundamentales para la toma de decisiones en diversos campos como la gestión ambiental, la agricultura de precisión, el ordenamiento territorial y la conservación de la biodiversidad.

Tenreiro et al. (2021), menciona que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada -NDVI- permite analizar a distintas escalas espacio – temporales los territorios, y se ha convertido de gran utilidad para la evaluación de estos. Se añade que existen diversos índices para representar la actividad fotosintética en las especies vegetativas, pero el índice de vegetación NDVI es utilizado en todo el mundo para el análisis de varias variables naturales (Remache et al., 2023).

La reflectancia es una medida sin unidades del cociente de la radiación reflejada por un objeto respecto a la radiación incidente sobre el objeto. Los valores del NDVI van desde -1 hasta 1 (Huang et al., 2021). En base a lo expuesto el NDVI facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación, y permite identificar la presencia de vegetación en la superficie y caracterizar su distribución espacial y temporal (López et al., 2015). Girimonte y García (2020), plantean que existe una fuerte relación entre el NDVI y ciertas características funcionales y estructurales de la vegetación, como la biomasa, el índice de área foliar, la cobertura y la productividad primaria neta, lo que lo convierte en uno de los índices más utilizados como indicador de la productividad.

Adicionalmente, estas herramientas tecnológicas posibilitan el desarrollo de modelos predictivos que anticipan futuras transformaciones del paisaje basándose en patrones históricos y variables socioeconómicas. La integración de estos datos con sistemas de información geográfica (SIG) permite a los gestores ambientales y tomadores de decisiones implementar estrategias más efectivas de conservación y manejo sostenible de recursos naturales. Este monitoreo continuo resulta fundamental para evaluar la efectividad de las políticas de protección ambiental y ajustar las estrategias de conservación según sea necesario.

En el contexto actual de cambio climático global, los estudios sobre la dinámica temporal y espacial de la cobertura vegetal han cobrado especial relevancia. Las investigaciones recientes

demuestran que los cambios en los patrones de vegetación pueden servir como indicadores tempranos de alteraciones climáticas y antropogénicas en los ecosistemas (Rodríguez et al., 2021). Por ello, el desarrollo de metodologías eficientes para su monitoreo, incluyendo técnicas de teledetección y análisis de imágenes satelitales, se ha convertido en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la gestión ambiental.

El estudio de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Sandalias tiene múltiples implicaciones. Por un lado, permite comprender mejor los procesos ecológicos y las dinámicas ambientales en una región abundante en flora y fauna; por otro lado, proporciona información crucial para la planificación y gestión sostenible del territorio, contribuyendo a la conservación de los ecosistemas y la promoción de prácticas agrícolas y forestales sostenibles.

Materiales y métodos

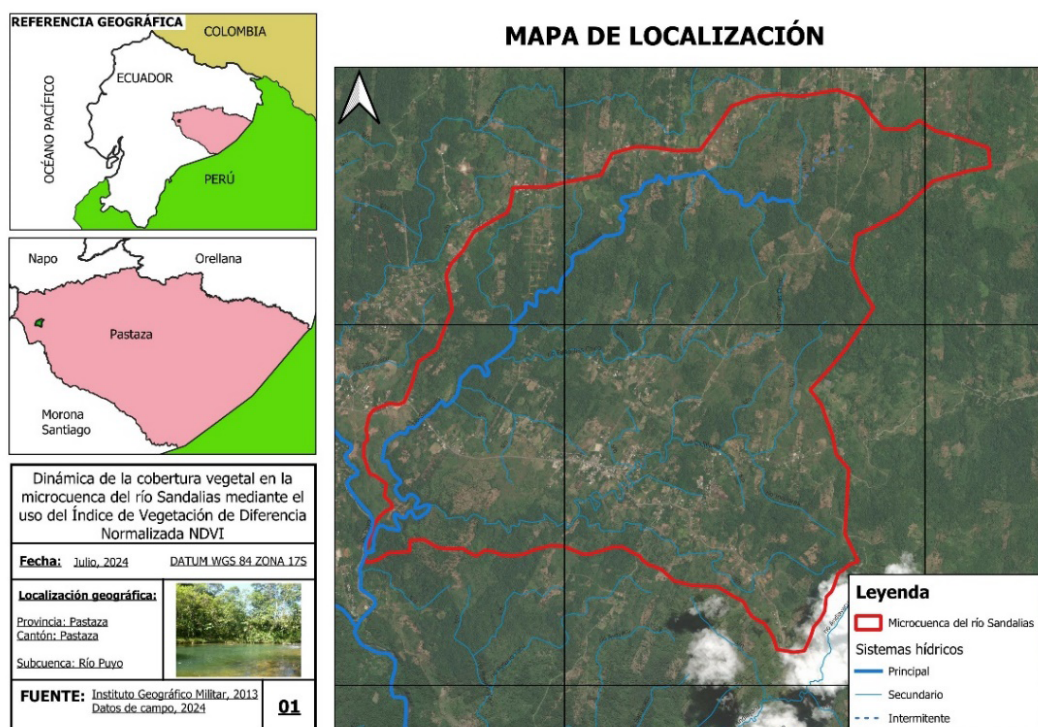
Área de estudio:

El estudio se realizó en la microcuenca del río Sandalias localizado en el cantón y provincia de Pastaza. Esta microcuenca aporta a la subcuenca del río Puyo, una de las más representativas en la provincia por su grado de interacción antrópico natural. Tiene una superficie de 3674,1 ha, en la cual destaca la presencia del río Sandalias, como un sistema hídrico principal; dentro de las actividades que se desarrollan en la microcuenca destacan las urbanísticas, turismo, agropecuarias, entre otras en menor escala.

De acuerdo con Gutiérrez et al. (2022), la microcuenca del río Sandalias le corresponde la formación ecológica “bosque pluvial pre-montano” (b.p.PM); entre las características climáticas se identifica que esta zona de vida se encuentra en las estribaciones de la cordillera Oriental desde los 600 m hasta la cota de los 1 800 m. La temperatura media anual varía entre 18 °C y 24 °C, y recibe lluvias que oscilan entre los 4000 y 5300 milímetros anuales. Además, constituye una de las formaciones vegetales asociadas a las áreas más lluviosas que se encuentran en Ecuador.

En lo que respecta a la vegetación Sucoshañay et al. (2021), mencionan que toda el área de estudio corresponde al “Bosque siempre verde Piedemonte”, el cual se caracteriza por un dosel superior que llega a 30 m de altura, con un subdosel y sotobosques muy densos, característicos de las zonas amazónicas.

Figura 1. Mapa de localización de la microcuenca del río Sandalias



Fuente: elaboración propia

Para el presente trabajo se aplicó el tipo de investigación aplicada con el uso de herramientas tecnológicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual se enfocó en la aplicación práctica de estas tecnologías para abordar y establecer compartivamente los cambios multitemporales, y con ello identificar los principales cambios espaciales en la microcuenca. A través de los SIG se permiten la recopilación, análisis y visualización de datos geoespaciales, facilitando la toma de decisiones informadas en campos como la planificación urbana, manejo de cuencas, la gestión de recursos naturales y la respuesta a emergencias.

Datos de imágenes satelitales:

En la presente investigación se usó para el cálculo del NDVI en los años estudiados dos imágenes del satélite Landsat (7 y 9), de 2013 y 2023, con una resolución espacial 30 metros. A partir de la disponibilidad de las imágenes satelitales se estableció el periodo de estudio; además, se consideró la nubosidad como otro factor de importancia. En las imágenes se realizaron correcciones atmosféricas para eliminar las interferencias debido a las condiciones atmosféricas y nubosidad.

Procesamiento de las imágenes satelitales:

Para establecer las coberturas de la vegetación en la microcuenca del río Sandalias, se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), en base a la siguiente ecuación (Vela et al, 2024):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

(1)

Donde:

NIR (B5): reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R (B4): reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

Clasificación de las coberturas de vegetación:

El NDVI es derivado de la combinación de las reflectancias captadas en el rango espectral del rojo e infrarrojo cercano. Tarpley et al. (citado por De la Casa y Ovando, 2007); así también, Hernández y Hornero (2021), definen al NDVI como:

Un índice que se obtiene del cociente entre la reflectancia del rojo y el infrarrojo cercano varía entre -1 y 1. Los valores negativos están asociados con cuerpos de agua y áreas degradadas por el fuego, mientras que los valores positivos más bajos (cercaos a 0) corresponden a vegetación senescente o con baja cobertura. Los valores positivos altos (cercaos a +1) indican un alto contenido de biomasa fotosintética.

Tabla 1. Clasificación de los valores de NDVI.

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	-1–0.0
Suelo sin vegetación (SV)	0.01–0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1–0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2–0.4
Vegetación alta (VA)	0.4–1

Fuente: López et al. (2015).

Procesamiento y presentación de datos:

Para el proceso de geoinformación se utilizó un software libre (QGis), que de acuerdo con García et al. (2023), este programa permite presentar los resultados de manera efectiva. Además, provee las herramientas para la generación de mapas temáticos que muestren la distribución espacial del NDVI en el área de estudio, generar gráficos de distribución de datos, entre otras opciones.

Resultados

A partir del procesamiento de las imágenes de satélite correspondientes a los años 2013 y 2023 y la respectiva aplicación del NDVI, en base a la categorización propuesta, se obtuvo cinco (5) coberturas de la tierra; de estas se determinaron aquellas que se consideran como Áreas de cambio y Factores de cambio.

Identificación de Áreas de cambio de vegetación

El análisis espacial del área de estudio permite identificar “puntos críticos” donde la vegetación ha sufrido cambios significantes. Estas áreas muestran una disminución persistente de los valores de NDVI y son susceptibles a la degradación ambiental. La identificación de estos puntos es esencial para priorizar las acciones de conservación y restauración en la microcuenca.

Áreas de Alta Vegetación: Las zonas montañosas y menos intervenidas muestran consistentemente altos valores de NDVI, lo que sugiere una vegetación densa y saludable. Estas áreas son cruciales para la conservación, ya que actúan como reservorios de biodiversidad y regulan el ciclo hidrológico en la microcuenca.

Áreas de Baja Vegetación: En contraste, las áreas cercanas a centros urbanos y agrícolas presentan valores más bajos de NDVI. Esto indica una menor densidad de vegetación, posiblemente debido a la deforestación, la conversión de tierras para la agricultura y el desarrollo urbano. Estas áreas son más vulnerables al estrés ambiental y requieren medidas de gestión para mejorar la cobertura vegetal y la resiliencia del ecosistema.

Factores contribuyentes al cambio de vegetación

Los datos procesados sugieren que la actividad humana es un factor clave en el cambio de la vegetación. Las áreas con alta actividad agrícola y urbanización muestran una disminución significativa en los valores de NDVI, lo que refleja la pérdida de cobertura vegetal.

Deforestación y conversión de tierras: La deforestación para el desarrollo agrícola y urbano ha reducido la cobertura vegetal, lo que se refleja en la disminución de los valores de NDVI. Este cambio en el uso del suelo no solo afecta la vegetación, sino que también altera el ciclo del agua y reduce la biodiversidad.

Expansión Urbana: Las áreas cercanas a los centros urbanos muestran una disminución en los valores de NDVI debido a la construcción y la expansión urbana. La impermeabilización del suelo y la pérdida de áreas verdes contribuyen al aumento a la disminución de la calidad del aire y el agua.

Tabla 2. Resultados de superficie del Índice de vegetación en los años 2013 y 2023.

Clasificación	Valor	NDVI 2013 Superficie (ha)	NDVI 2023 Superficie (ha)
Nubes y agua (NA)	-1-0.0	—	12,32
Suelo sin vegetación (SV)	0.01-0.1	2,38	61,33
Vegetación ligera (VL)	0.1-0.2	25,89	202,98
Vegetación mediana (VM)	0.2-0.4	1682,14	2279,46
Vegetación alta (VA)	0,4-1	1963,73	1130,37

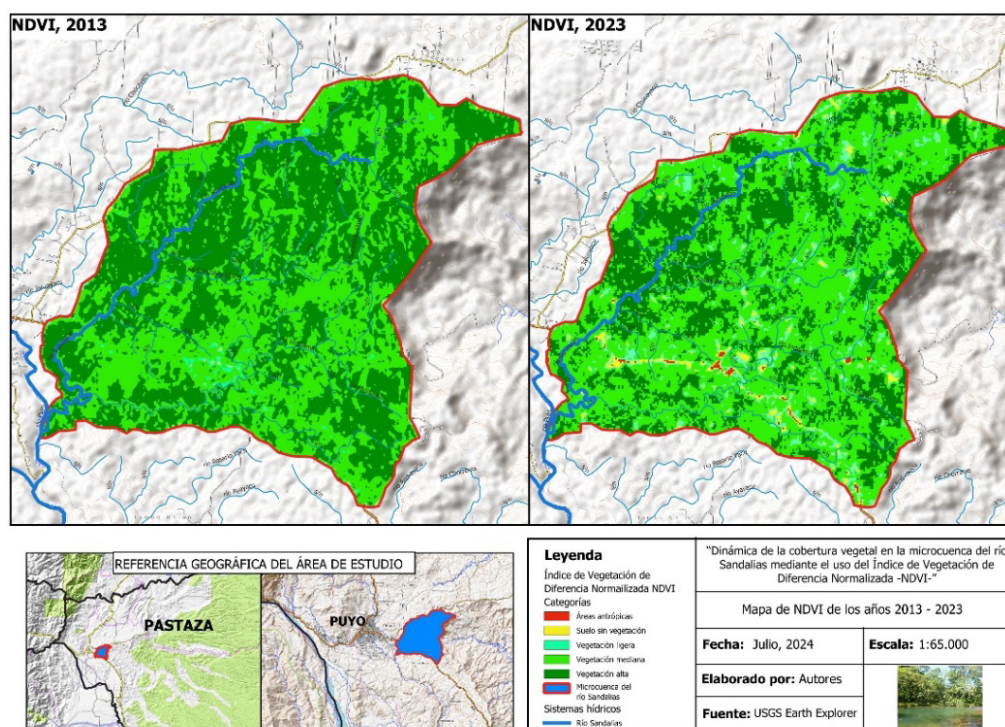
Fuente: elaboración propia

Las áreas que corresponden a zona de nubes, agua y construidas en 2023 presentan una cobertura de 12,3 ha, sugiriendo un cambio en la cobertura del suelo que se induce al aumento de la población y sus necesidades de construcción, y con ello el cambio en el uso del suelo. Así también, hay un aumento significativo en la superficie sin vegetación de 2,4 ha a 61,3 ha, lo que podría indicar deforestación, degradación del suelo o expansión urbana.

La superficie con vegetación ligera ha aumentado considerablemente en 177,1 ha en el periodo de estudio, lo que puede implicar una regeneración parcial de áreas previamente degradadas o una expansión de vegetación más ligera. El área con vegetación mediana ha crecido de 1.682,1 ha en el año 2013 a 2.279,46 ha al año 2023, sugiriendo una posible mejora en la densidad de vegetación o en la salud del ecosistema en ciertas áreas. Hay una disminución considerable en la superficie con vegetación alta de 1.963,7 ha a 1.130,4 ha, lo cual podría ser resultado de la deforestación, aumento de la población (construcciones), cambio de uso del suelo, o degradación de áreas previamente densas en vegetación.

Espacialmente, se observa una fuerte reducción de la cobertura vegetal (bosques) a lo largo de la microcuenca y con ello el aumento de las áreas de vegetación ligera y mediana. En relación con las áreas incididas por las necesidades antrópicas, tanto suelo desnudo y áreas de construcción han aumentado y distribuidas a lo largo de las vías de comunicación principales. Los principales cambios se distribuyen geográficamente en la vía Puyo – Macas.

Figura 2. Índice de Vegetación NDVI del 2013 y 2023



Fuente: elaboración propia

Discusión

Dado que la microcuenca del río Sandalias se localiza en el área de expansión de la ciudad de Puyo, principal centro poblado y capital de la provincia de Pastaza, presenta una dinámica temporal especial por las actividades de incremento de las áreas de asentamiento de la población y la frontera agrícola; por lo cual, se requiere de acciones de gestión que permita mantener el equilibrio del ecosistema y su funcionalidad.

Generalmente este tipo de cuencas, por su localización, presentan cambios a lo largo del tiempo en la cobertura forestal. La reducción de la vegetación es considerable, como lo expresa Saputra et al. (2020), y mucho más cuando se evalúa periodos amplios. En la microcuenca del río Sandalias durante el periodo de 2013 a 2023 disminuyó en un 22,7 % la cobertura de bosque; particularmente la deforestación se ha manifestado para el desarrollo urbano y agrícola, como un factor determinante en la disminución de los valores de NDVI (Santibáñez, 2023).

La vegetación mediana cubre la mayor área de la microcuenca y ha tenido un incremento considerable del 45,8 % al 62 % en el periodo de estudio, este incremento se asocia a los procesos de deforestación para la comercialización de la madera y el incremento de las actividades agropecuarias, esto como producto del aumento de la población y las necesidades de generar actividades productivas en la provincia y por ende en la microcuenca. Como mencionan Toaquizza et al. (2024), durante el año 2023 las actividades agropecuarias en Ecuador tuvieron un aumento

con los anteriores periodos, este aumento puede deberse a distintos factores como la mejora en la calidad de productos ecuatorianos, el renombre internacional, entre otros.

En algunas áreas de la microcuenca, se observó una recuperación de la vegetación con valores de NDVI en aumento, posiblemente debido a la implementación de prácticas de conservación y reforestación; esa vegetación que al año 2013 cubría el 0,1 % del territorio para el año 2023 muestra un incremento de 1,6 %.

Tabla 2. Resultados en porcentaje del NDVI en los años 2013 y 2023.

Clasificación	NDVI 2013		NDVI 2023		Diferencia (%)
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	
Nubes y agua (NA)	—	—	12,32	0,3	0,3
Suelo sin vegetación (SV)	2,38	0,1	61,33	1,7	1,6
Vegetación ligera (VL)	25,89	0,7	202,98	5,5	4,8
Vegetación mediana (VM)	1682,14	45,8	2279,46	62,0	16,3
Vegetación alta (VA)	1963,73	53,4	1130,37	30,8	-22,7
Área de la microcuenca	3674,1	100	3674,1	100	

Fuente: elaboración propia

En investigaciones realizadas por Arias et al. (2024), las cuencas hidrográficas presentan una tendencia clara enfocada al aumento de cobertura de las áreas pobladas en detrimento de las áreas de cobertura vegetal. La expansión agrícola, la deforestación y el desarrollo urbano han contribuido a la disminución de la cobertura vegetal en ciertas áreas de la microcuenca. Los valores negativos y bajos de NDVI en estas zonas reflejan la disminución y pérdida de vegetación.

Por último, los resultados de este trabajo permiten disponer de más información de base sobre el comportamiento de los cambios de uso de la tierra en microcuencas con una directa intervención antrópica; así como, el conocimiento de la dinámica del territorio para mejorar la gestión de los ecosistemas.

Conclusiones

La utilización de imágenes satelitales ofrece varias ventajas significativas para el análisis del NDVI. En primer lugar, estas imágenes proporcionan una cobertura espacial extensa y continua, lo que permite un monitoreo integral de grandes áreas geográficas; además, la alta resolución

temporal de los datos satelitales posibilita la observación de cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, capturando tanto variaciones estacionales como tendencias a largo plazo.

El análisis reveló que las áreas con mayor altimetría y las zonas altas del sistema hídrico de la microcuenca del río Sandalias albergan los principales remanentes de bosque. Estas áreas, debido a su difícil acceso y menor presión de actividades humanas como la agricultura y la urbanización, han conservado una mayor proporción de su cobertura vegetal original.

Los resultados del estudio muestran que la vegetación mediana y ligera ha experimentado un mayor cambio en comparación con la vegetación alta. Estos cambios pueden estar relacionados con varios factores, incluyendo actividades humanas como la agricultura, la deforestación y la urbanización.

Referencias

- Abril Saltos, R. V., Rodríguez Badillo, L. M., Sucoshañay Villalba, D. J., & Bucaram Visuma, E. M. (2017). Caracterización preliminar de calidad de aguas en subcuenca media del río Puyo. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 38(2), 59-72.
- Altamirano, A., Miranda, A., y Jiménez, C. (2012). Incertidumbre de los índices de paisaje en el análisis de la estructura espacial. *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 171-181. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000200007>
- Arias, P., Saz, M., y Escolano, S. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas (España)*, (81), 155-179. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25248>
- Chen, P., Liu, H., Wang, Z., Mao, D., Liang, C., Wen, L., Li, Z., Zhang, J., Liu, D., Zhou, Y., y Wang, L. (2021). Vegetation dynamic assessment by NDVI and field observations for sustainability of China's Wulagai river basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2528.
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., y Cuevas, M. L. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones*. Instituto Nacional de Ecología. https://vortice.conagua.gob.mx/storage/files.conagua/upload/05022021_1612548612.pdf
- De la Casa, A., y Ovando, G. (2007). Integración del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica*, 67(4), 362-371. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072007000400004>.
- García, D., y Guaitarilla, F. (2024). Composición y estructura de la cobertura vegetal del ecosistema del páramo de Bordoncillo en Santiago, Putumayo. *Revista Criterios*, 31(1), 146-159. <https://doi.org/10.31948/rc.v31i1.3485>.
- García, Y., Valdez, D., y Mancero, D. (2023). Dinámica de la frontera agrícola del sistema de cuencas hidrográficas del zapotal mediante herramientas de teledetección. *Ciencia y Tecnología*, 16(1).
- Girimonte, P., y García, J. (2020). El Índice NDVI Y La Clasificación De Áreas Sembradas Aprendizaje Automático No Supervisado "K-MEANS.". *Revista de investigación en modelos matemáticos aplicados a la gestión y la economía*, 7, 39-52.

- Gutiérrez, J. E., Sucoshañay, D., y García, E. (2022) *Ordenación Ambiental de Cuencas de Montaña. Caso de la Cuenca del río Puyo*. Editorial Académica Española.
- Guzmán, A., Córdova, J., Morales, V., y Peña, R. (2023). Caracterización de la cobertura vegetal y su provisión de servicios ecosistémicos mediante teledetección en una cuenca hidrográfica. *Dominio De Las Ciencias*, 9(2), 1657–1674.
- Hernández, R. y Hornero, A. (2021). Monitoreo y evaluación de la desertificación con teledetección. *Ecosistemas*, 30(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2240>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., y Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Kirby, K. R., Laurance, W. F., Albernaz, A. K., Schroth, G., Fearnside, P. M., Bergen, S., Venticinque, E. & Da Costa, C. (2006). The future of deforestation in the Brazilian Amazon. *Futures*, 38(4), 432-453.
- Logroño-Naranjo, S. I., López-Paredes, C. R., Moyano-Jácome, M. G., y Oyague-Bajaña, E. S. (2020). El alcance de la teledetección satelital utilizando modelos estadísticos y físicos y sus beneficios en áreas contables. *Dominio de las Ciencias*, 6(2), 25-40.
- López, A., Martínez, M., y Fernández, D. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121-137. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n1/v6n1a7.pdf>
- Marin, F. R., Zanon, A. J., Monzon, J. P., Andrade, J. F., Silva, E. H., Richter, G. L., Antonlin, L., Ribeiro, B., Ribas, G., Battisti, R., Heinemann, A. & Grassini, P. (2022). Protecting the Amazon forest and reducing global warming via agricultural intensification. *Nature Sustainability*, 5(12), 1018-1026.
- Meregildo, W. B., & López, G. V. (2024). La Tecnología y su Contribución en las Comunidades Indígenas de la Amazonía, los Andes y el Atlántico. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(4), 297–319. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE4/495>
- Meza Elizalde, M. C., & Armenteras Pascual, D. (2018). Uso del suelo y estructura de la vegetación en paisajes fragmentados en la amazonia, Colombia. *Colombia forestal*, 21(2), 205-223.
- Pérez, D., Segovia, J., Cabrera, P., Delgado, I., y Martins, M. (2018). Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.22490/21456453.2089>
- Remache, F., Horna, S., Cushquicullma, D., y Lara, N. (2023). Niveles de vigorosidad de una plantación forestal mediante el índice NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) utilizando aeronave no tripulada RPAS, en la parroquia Palmira, cantón Guamote, provincia de Chimborazo. *Polo del Conocimiento*, 8(12), 1186-1204. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/437/1/012036>
- Rodríguez, J. C., del Cairo, C., Ortiz-Gallego, D., Velez-Triana, J. S., Vergara-Gutiérrez, T., & Hein, J. (2021). Post-conflict transition and REDD+ in Colombia: Challenges to reducing deforestation in the Amazon. *Forest Policy and Economics*, 127.
- Rodríguez Valero, M. I., & Alonso Sarria, F. (2022). Obtención de cartografías de usos y coberturas del suelo de la demarcación hidrográfica del seguro para el periodo 1986-2019, empleando teledetección y clasificación digital de imágenes. *Papeles de Geografía*, (67), 45–65. <https://doi.org/10.6018/geografia.472241>

- Santibáñez, G., Valdez, J., y Guerra, F. (2023). Análisis multitemporal de la degradación de los bosques de encino y oyamel en la Cuenca de México (1993-2014). *Madera y bosques*, 29(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912323>
- Saputra, A., Zakaria, N., y Weng, C. (2020). Changes in land use in the Lombok River Basin and their impacts on river basin management sustainability. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 437(1), 12-36. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/437/1/012036>
- Schaaf, A. (2020). Efecto de la cobertura vegetal sobre la orientación de los nidos de cotorra (*Myiopsitta monachus*, Psittacidae) en el centro de Argentina. *Ornitología Neotropical*, 31(1), 9-12.
- Sierra, L. (2023). Integrando sistemas de teledetección y georreferenciación en la gestión de los residuos. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 12(1-1), 38-40. <http://dx.doi.org/10.5377/innovare.v12i1-1.16013>
- Silva Junior, C. H., Pessôa, A. C., Carvalho, N. S., Reis, J. B., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. (2021). The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nature ecology & evolution*, 5(2), 144-145.
- Sucoshañay, D., Gutiérrez, J. E. y García, E. (2021). Diagnóstico ambiental integrado de la cuenca del río Puyo, Ecuador. *Revista geográfica venezolana*, 62(2), 348-366.
- Tarpley, J. D., Schneider, S. R., y Money, R. L. (1984). Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(3), 491-494. <http://www.jstor.org/stable/26181382>
- Tenreiro, T., García, M., Gómez, J., Jiménez, J., y Fereres, E. (2021). Using NDVI for the assessment of canopy cover in agricultural crops within modelling research. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106038>
- Toaquiza, A., Gordon, M., Huera, G., Pesantez, C. y Aldana, C. (2024). Estrategias de sostenibles ambiental en los emprendimientos agropecuarios en Ecuador 2023. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 7288-7304. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11925
- Vela, A., Navarro, M., Mendoza, M., Sánchez, J., y Esparza, L. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 15(81), 160-186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>
- Vera, J., Tavares, S., y Beserra, L. (2023). Dinámica espacial y temporal de los cambios de coberturas de la tierra en la cuenca hidrográfica del río Cauamé (1988-2023), Estado de Roraima, Brasil. *Mercator (Fortaleza)*, 22.

Multi-temporal evaluation of vegetation cover in the Sandalias River basin using the Normalized Difference Vegetation Index

Avaliação multitemporal da cobertura vegetal na microbacia hidrográfica do rio Sandalias usando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Darwin Javier Sucoshañay Villalba

Universidad Estatal Amazónica | Puyo | Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-7724-1190>

javier.dsv6263@gmail.com

Héctor Fernando Reyes Morán

Universidad Estatal Amazónica | Puyo | Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-9391-6701>

hreyes@uea.edu.ec

Víctor Hugo Del Corral-Villaruel

Universidad Estatal Amazónica | Puyo | Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-2680-5336>

vdelcorral@uea.edu.ec

Ligia Angélica Mejía Pazmiño

Universidad Estatal Amazónica | Puyo | Ecuador

<https://orcid.org/0009-0008-2711-483X>

la.mejiap@uea.edu.ec

Christopher Oswaldo Paredes Ulloa

Universidad Estatal Amazónica | Puyo | Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-2087-5694>

co.paredesu@uea.edu.ec

Abstract

This work evaluates changes in vegetation cover in the Sandalias River basin in Pastaza, Ecuador, using Landsat satellite images and NDVI, covering the period from 2013 to 2023. The basin, with 3674,1 hectares, is characterized by varied anthropogenic activities, including urban development, tourism, and agriculture. This region of the pre-montane rainforest features high rainfall and moderate temperatures, factors that influence its vegetation. The NDVI, an index used to evaluate vegetation by comparing red and near-infrared reflectance, allowed for the interpretation of biophysical parameters of the vegetation and its spatial and temporal distribution. The results showed a significant change in vegetation cover: high vegetation decreased from 1963,7 hectares in 2013 to 1130,4 hectares in 2023, due to deforestation and urban and agricultural development. In contrast, medium and light vegetation increased, indicating possible partial regeneration of degraded areas and the expansion of less dense vegetation. The temporal dynamics of the vegetation reflect anthropogenic pressures, especially due to the expansion of Puyo. These changes are linked to population growth and the need for space for productive activities, highlighting the importance of implementing environmental management actions to maintain the ecosystem balance.

Keywords: Vegetation index; cover; land use; ecosystems; basin.

Resumo

Este artigo avalia as mudanças na cobertura vegetal na microbacia hidrográfica do rio Sandalias em Pastaza, Equador, usando imagens de satélite Landsat e NDVI, cobrindo o período de 2013 a 2023. A microbacia hidrográfica de 3674,1 hectares é caracterizada por atividades

antropogênicas variadas, incluindo urbanização, turismo e agricultura. Essa região da floresta tropical pré-montana tem alta pluviosidade e temperaturas moderadas, fatores que influenciam sua vegetação. O NDVI, um índice usado para avaliar a vegetação por meio da comparação da refletância do vermelho e do infravermelho próximo, permitiu a interpretação dos parâmetros biofísicos da vegetação e sua distribuição espacial e temporal. Os resultados mostraram uma mudança significativa na cobertura vegetal: a vegetação alta diminuiu de 1963,7 hectares em 2013 para 1130,4 hectares em 2023, devido ao desmatamento e ao desenvolvimento urbano e agrícola. Em contrapartida, a vegetação média e leve aumentou, indicando possível regeneração parcial de áreas degradadas e expansão de vegetação menos densa. A dinâmica temporal da vegetação reflete as pressões antropogênicas, especialmente da expansão de Puyo. Essas mudanças estão ligadas ao crescimento populacional e à necessidade de espaço para atividades produtivas, destacando a importância da implementação de ações de gestão ambiental para manter o equilíbrio do ecossistema.

Palavras-chave: índice de vegetação; cobertura; uso da terra; ecossistemas; bacia hidrográfica.