

# Análisis espacio temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) en el ecosistema bosque semideciduo piemontano del Catamayo Alamor

## *Spatial-temporal analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the semi-deciduous piedmont forest ecosystem of the Catamayo Alamor*

Raúl García<sup>1</sup>, Aníbal González<sup>2</sup> y César Benavidez -Silva<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Maestría en Biodiversidad y Cambio Climático, Loja, Ecuador

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones Territoriales, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

\* Autor para correspondencia: cesar.benavidez@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 20/10/2023

Fecha de aceptación del manuscrito: 07/12/2023

Fecha de publicación: 30/12/2023

**Resumen**—En las últimas dos décadas, el ecosistema bosque semideciduo piemontano del Catamayo Alamor de la provincia de Loja, ha experimentado diversas amenazas antropogénicas. Simultáneamente, las alteraciones en la intensidad y duración de fenómenos meteorológicos como fenómenos asociados al cambio climático han generado variaciones en la dinámica de la vegetación a escala espacial y temporal. Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la variación espacial del NDVI con respecto a la temperatura, precipitación, elevación y pendiente, y su evolución temporal en función de la temperatura y precipitación en el período 2001 al 2018 en los bosques semideciduos. Se determinó la dependencia espacial empleando un semivariograma, y se cuantificó su rango y semivarianza a través del modelo esférico; para el análisis temporal se empleó ciclos estacionales y tendencias graficados en el software Timesat, dicho análisis fue complementado usando métodos estadísticos como correlación de Spearman. Los resultados revelaron que, el NDVI presentó dependencias espaciales mayores relacionadas con la temperatura y pendiente del terreno, que superaron ampliamente a las variables precipitación y elevación. Temporalmente, los inicios de los ciclos estacionales y tendencias se presentaron en sucesión cronológica. La correlación entre NDVI y temperatura es baja (0,22), y moderada en la precipitación (0,53). Entre las principales conclusiones del estudio se puede mencionar: i) que existe una mayor dependencia espacial entre el NDVI con la precipitación y elevación en comparación con la temperatura y pendiente; ii) la baja correlación entre el NDVI y temperatura que debe ser analizada a mayor profundidad debido a que existen otras variables y anomalías climáticas que posiblemente influyen en la variación del NDVI, y iii) el hallazgo en la sucesión en el inicio de cada ciclo estacional de las variables de estudio revela la importancia de nuevas líneas de investigación relacionadas al estudio del ecosistemas por los beneficios que estos generan.

**Palabras clave**—Correlación, Bosque semideciduo, NDVI, Precipitación, Temperatura.

**Abstract**—Over the past two decades, the semi-deciduous piedmont forest ecosystem of the Catamayo Alamor in the province of Loja has faced various anthropogenic threats. Simultaneously, alterations in the intensity and duration of meteorological phenomena, such as those associated with climate change, have induced variations in vegetation dynamics at both spatial and temporal scales. Within this context, the following objective has been formulated: to analyze the spatial variation of NDVI concerning temperature, precipitation, elevation, and slope, and its temporal evolution based on temperature and precipitation from 2001 to 2018. To achieve the objective of this research, spatial dependence was determined using a semivariogram, and its range and semivariance were quantified through the spherical model. For temporal analysis, seasonal cycles and trends were examined using the Timesat software, and this analysis was complemented with statistical methods such as Spearman correlation. The results revealed that NDVI exhibited stronger spatial dependencies related to temperature and slope than precipitation and elevation. Temporally, the onsets of seasonal cycles and trends occurred in chronological succession. The correlation between NDVI and temperature is low (0.22), while it is moderate with precipitation (0.53). This study concludes that i) there is a greater spatial dependence between NDVI and precipitation and elevation compared to temperature and slope; ii) the low correlation between NDVI and temperature should be further analyzed due to the potential influence of other variables and climatic anomalies on NDVI variation, and iii) the finding of the succession in the onset of each seasonal cycle in the studied variables underscores the importance of new research avenues related to ecosystem studies for the benefits and well-being they provide for humanity.

**Keywords**—Correlation, Ecosystem, NDVI, Precipitation, Temperature.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques son el pilar fundamental de los ecosistemas terrestres (BGCI, 2021), al cubrir el 31 % de la superficie del planeta (FAO y PNUMA, 2020), intervienen en la

regulación regional y mundial de los ciclos del agua, temperatura y captación y almacenamiento de carbono, que son vitales en la supervivencia de la biodiversidad y humanidad (Hurteau, 2021, Ometto et al., 2022). Por su importancia, los

bosques tropicales, a pesar de proveer servicios ecosistémicos, sociales y culturales soportan diferentes grados de impacto debido a la deforestación disminuyendo su resiliencia (Ometto *et al.*, 2022), alterando la cantidad y calidad de los hábitats, y su conectividad (Haddad *et al.*, 2015).

Los bosques como parte de los ecosistemas constituyen un indicador sensible a las perturbaciones naturales por factores abióticos (Jeong *et al.*, 2017). El aumento gradual la temperatura media anual mundial desde la era preindustrial hasta la actualidad en distintas regiones del planeta ha causado efectos negativos en la estructura y composición de los ecosistemas naturales (Ometto *et al.*, 2022). En las últimas tres décadas el cambio climático ha aumentado la frecuencia, duración e intensidad de los fenómenos meteorológicos (WMO, 2022) disminuyendo la capacidad de adaptación de los ecosistemas (Gao, *et al.*, 2016) y alterando el comportamiento, fenología y rango de distribución de las poblaciones y especies locales (Weiskopf *et al.*, 2020).

El cambio climático, ha provocado efectos negativos en la dinámica de la vegetación (Gao, *et al.*, 2016), alterando la estructura y composición de las comunidades que conforman los distintos ecosistemas forestales (Ometto *et al.*, 2022). Los bosques, son un indicador sensible a las perturbaciones naturales y antrópicas, constituyendo un elemento fundamental en las observaciones espaciales y temporales de la dinámica de la vegetación (Jeon *et al.*, 2017) y de los cambios de la radiación fotosintéticamente activa en investigaciones a escala regional y global (Wang *et al.*, 2003).

En Ecuador, los bosques nativos no son ajenos a esta realidad, han experimentado altos niveles de fragmentación, causados principalmente por la ampliación de actividades agrícolas y pecuarias (Kleemann *et al.*, 2022; Noh *et al.*, 2022). Ante esta amenaza, se han establecido estrategias de conservación, destacando las Áreas Protegidas y el Programa Socio Bosque (MAE, 2008), sin embargo, en la provincia de Loja, estos espacios de protección de diversidad representan escasamente el 3,94% de su territorio político administrativo (MAE, 2018). Según el Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental, la provincia de Loja alberga un total de 22 ecosistemas naturales (MAE, 2013), entre estos, sobresale el ecosistema “bosque semidecuido piemontano del Catamayo Alamor”, abarcando una extensión 1618,17 km<sup>2</sup>. Este ecosistema se encuentra distribuido en las cuencas hidrográficas Catamayo y Puyango, donde la vegetación nativa que la compone forma parte del Hot Spot biodiversidad de los Andes Tropicales, caracterizado por altos niveles de endemismo (Aguirre *et al.*, 2017).

Escasas investigaciones han utilizado como herramienta de monitoreo de ecosistemas naturales al NDVI en relación a la variabilidad del clima, su uso con fines de conservación fue empleado en el monitoreo de posibles cambios de uso del suelo en las Reservas Ecológicas Cotacachi Cayapas y Producción de Fauna Chimborazo (Aldas, 2019; Paula *et al.*, 2018). A diferencia de los estudios anteriores, el análisis de los cambios espacio temporales del NDVI en base a los patrones climáticos globales en los páramos del centro y norte del Ecuador (Udivia, 2020), así como, el empleo del índice mejorado - EVI para detectar el comportamiento de los ecosistemas naturales del sur del Ecuador ante la temperatura y precipitación (Maita, 2015), revelan la importancia de avanzar en esta línea investigativa relacionada a la dinámica de

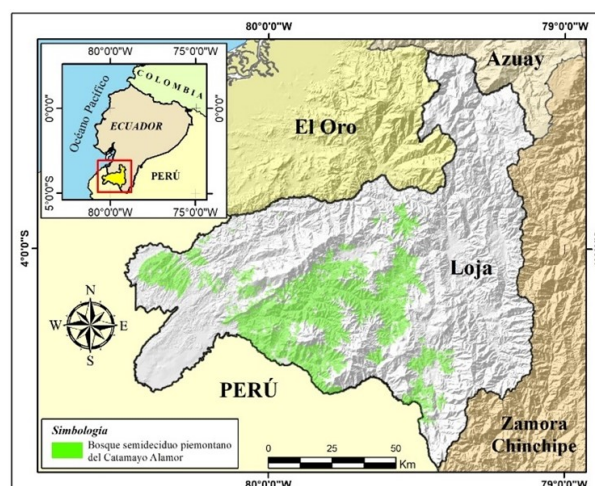
vegetación frente a variables climáticas y orográficas en la provincia de Loja.

Considerando que existe un escaso aporte científico en el estudio del efecto de las variables de estudio en el ecosistema “bosque semidecuido piemontano del Catamayo Alamor”, se ha planteado realizar esta investigación que propone el análisis del NDVI en el ecosistema bosque semidecuido piemontano del Catamayo Alamor y las variaciones en sus valores medios, mínimos y máximos en relación con la dependencia espacial con las variables climáticas y topográficas en la zona de estudio en el período 2001 al 2018.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del área de estudio

La presente investigación, se desarrolló en la provincia de Loja, específicamente, en el ecosistema “bosque semidecuido piemontano del Catamayo Alamor”. El ecosistema de estudio, se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas 03°50'31" y 04°36'45" de Latitud Sur; y, 79°21'41" y 80°26'50" Longitud Oeste, distribuido en la mayoría de la superficie de las cuencas de los ríos Catamayo-Chira y Puyango-Tumbes de la provincia de Loja, a excepción de los cantones Loja y Saraguro (Figura 1).



**Fig. 1:** Mapa de ubicación del bosque semidecuido piemontano del Catamayo Alamor en la provincia de Loja.

### Adquisición de información de variables de estudio

Las imágenes mensuales del índice de vegetación de diferencia normalizado - NDVI, del área representativa del ecosistema de estudio, del período 01 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2018, fueron obtenidas del Programa de Sistemas de Datos de Ciencias de la Tierra de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), con una resolución espacial de 1km<sup>2</sup>, y una resolución temporal de 30 días, obtenidas del sensor espectrorradiómetro de formación de imágenes de resolución moderada - MODIS del satélite Terra, de proyección sinusoidal de la colección MOD13A3 versión 061 (Didan, 2021). Los valores mensuales extraídos del NDVI provienen de píxeles cubiertos al 100% en del área representativa del ecosistema, para lograr este propósito se utilizó el sistema de información geográfica - QGIS 3.32

(2023).

En lo referente a las variables climáticas como temperatura media mensual y precipitación media mensual, la información fue obtenida del sitio web Climatologías de alta resolución para las superficies terrestres de la Tierra (<https://chelsa-climate.org/>) con una resolución espacial de 1km<sup>2</sup> (Brun et al., 2022; Karger et al., 2021; Karger et al., 2020). Las variables orográficas, elevación y pendiente, fueron obtenidas del modelo digital de elevación con una resolución espacial de 1km<sup>2</sup> (Fick y Hijmans, 2017) de la base de datos climatológicos WorldClim (<https://WorldClim.org/>). La extracción de los valores mensuales se realizó con el programa QGIS 3.32 (2023).

### Evaluación de calidad de píxeles NDVI

Para evaluar la calidad de los valores del NDVI del área representativa del ecosistema, se empleó la imagen de fiabilidad de píxeles del archivo de formato de datos jerárquicos HDF. Con la ayuda del programa R versión 2023.06.1, se eliminaron los píxeles de categoría -1 “valor no procesado” y categoría 3 “valor cubierto de nubosidad” de cada imagen mensual de NDVI del período de estudio. Los valores de los píxeles de categoría 0 “valor de confianza”, y categoría 1 “valor útil” (Didan, 2021) fueron utilizados en esta investigación.

### Análisis espacial del NDVI en relación a las variables de estudio

El análisis estructural del NDVI con las variables: temperatura, precipitación, elevación y pendiente se desarrolló, primero, graficando un semivariograma, y segundo, cuantificando los elementos del semivariograma, meseta y rango a través de un modelo esférico que cuantifica una meseta verdadera (Maestre y Gallardo, 2008).

### Análisis de series temporales del NDVI, temperatura y precipitación

Mediante el programa de análisis de series temporales Timesat (Eklundh y Jönsson, 2015), versión 3.3 (<https://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>) se generaron series temporales del promedio de los valores mensuales del NDVI, temperatura y precipitación, del período 01 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2018. Obtenidas las series temporales se utilizó el método de ajuste de Savitzky – Golay para el NDVI y temperatura, mientras que el método de ajuste de asymmetric Gaussian fue utilizado en la precipitación. Para graficar la tendencia se empleó la descomposición de tendencias estacionales LOESS – STL Trend de Timesat.

### Extracción de métricas de las series temporales

En las series temporales del NDVI, temperatura y precipitación se obtuvieron las métricas: inicio de estación, mitad de estación y fin de estación, duración, valor base, valor máximo y amplitud (diferencia entre el valor máximo y valor mínimo), mientras que, en la tendencia de las variables descritas, se obtuvo las métricas: duración en años y rango con el programa Timesat (Eklundh y Jönsson, 2015).

**Tabla 1:** Calidad de píxeles del ecosistema bosque semideciduo piemontano del Catamayo Alamor (BmPn01).

Ecosistema	Área (km <sup>2</sup> )	n	C-1 (%)	C0 (%)	C1 (%)	C3 (%)	C0 + C1 (%)
BmPn01	1 102,65	579	0,18	82,59	16,72	0,51	99,31

Número total de píxeles (n); Píxel no procesado sin dato (C -1); Píxel con dato confiable (C0); Píxel con dato útil (C1); Píxel condato de nubosidad (C3); Porcentaje (%).

### Correlación del NDVI con temperatura y precipitación

Para determinar la correlación entre el NDVI con las variables temperatura y precipitación, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman, con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ , con una escala de: 1 que denota una relación positiva entre las variables, 0 que indica ausencia de correlación, y -1 que indica una relación inversa. El coeficiente de Spearman fue calculado con el programa R versión 2023.06.1.

## RESULTADOS

En el área representativa del ecosistema de estudio de 1102,65km<sup>2</sup>, se obtuvo 579 píxeles cubiertos al 100%, que revelaron en la categoría C0, dato confiable, un 82,59%, seguidos de los píxeles de categoría 1, datos útiles, con el 16,72%, presentando una diferencia superior con respecto a los píxeles procedentes de nubosidad C3 y píxeles no procesados C-1, con porcentajes de 0,51 y 0,18% respectivamente (Tabla 1).

### Análisis espacial del NDVI con las variables de estudio

Al comparar los resultados del análisis estructural entre el NDVI con las variables temperatura, precipitación, elevación y pendiente, el modelo esférico, cuantificó los elementos del semivariograma, donde la meseta del modelo esférico, exhibió que la semivarianza es mayor entre el NDVI y la temperatura 0,0046, valor que presentó cierta semejanza entre el NDVI y la pendiente 0,0045, mientras que, los resultados entre NDVI con la elevación y precipitación difieren de los anteriores por presentar semivarianzas más cercanas a cero con valores de 0,0031 y 0,0024 respectivamente (Tabla 2 y Figura 2).

En lo referente a la distancia máxima en la cual el NDVI está correlacionado espacialmente con las variables de estudio, presentó diferentes valores, siendo mayor entre el NDVI y la temperatura con un rango de 29 625,81 metros, seguido del NDVI con la pendiente con 27 978,28 metros, sin embargo, a diferencia de los rangos anteriores la dependencia espacial entre el NDVI con la precipitación y elevación alcanzó los 12 075,17 y 11 092,73 metros respectivamente, presentando un contraste de 16000 metros aproximadamente (Tabla 2 y Figura 2).

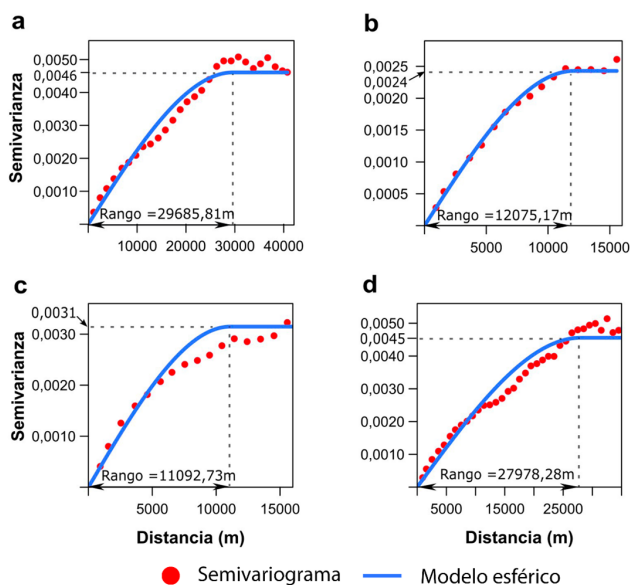
### Análisis de series temporales de NDVI y temperatura

Durante el período de estudio de 18 años, el ecosistema, presentó un ciclo estacional de NDVI de una duración de 165 días, comenzando la primera semana de enero y finalizando en la segunda semana de junio. El NDVI alcanzó su valor

**Tabla 2:** Elementos del semivariograma del NDVI con las variables de estudio del ecosistema bosque semidecíduo piemontano del Catamayo Alamor.

Semivariograma	Modelo	Meseta	Rango (m)
NDVI-temperatura	Esférico	0,0046	29 625,81
NDVI - precipitación	Esférico	0,0024	12 075,17
NDVI - elevación	Esférico	0,0031	11 092,73
NDVI - pendiente	Esférico	0,0045	27 978,28

máximo 0,81 el primer día del mes de abril. Adicionalmente, la amplitud del NDVI entre el valor pico de 0,81 y el valor base 0,42, presentó una diferencia de 0,39 (Fig. 4). Referente a la temperatura, presentó un ciclo estacional de una duración de 165 días, iniciando la cuarta semana de noviembre y culminando en la segunda semana de mayo. El valor más alto de la temperatura en la mitad del ciclo fue el día 21 febrero, mientras que, la amplitud de 0,6 °C resulto de la diferencia del valor más alto 22,1 °C y el valor base 21,5 °C (Figura 3). En el NDVI, se observaron 3 tendencias, la primera en-

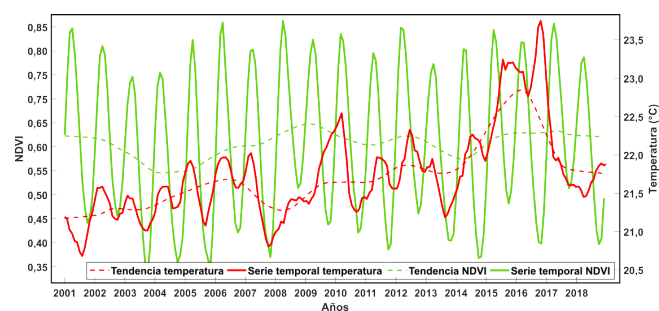


**Fig. 2:** Modelo esférico y distribución de pares de puntos del semivariograma del NDVI con las variables: a) temperatura, b) precipitación, c) elevación, d) pendiente.

tre los años 2004 hasta el año 2007, presentado variaciones de NDVI entre 0,56 a 0,62. La segunda tendencia, aconteció entre los años 2008 al 2 010, con variaciones en un rango de 0,62 a 0,66, y la última entre los años 2011 al 2014, con valores de NDVI entre 0,59 a 0,63. La temperatura presentó dos tendencias, la primera, durante los años 2002 al 2007, con temperaturas desde los 16,9 °C hasta los 17,3 °C, la segunda tendencia de mayor duración aconteció entre en los años 2008 al 2017, con temperaturas desde los 16,9 °C hasta los 18,1 °C (Figura 3).

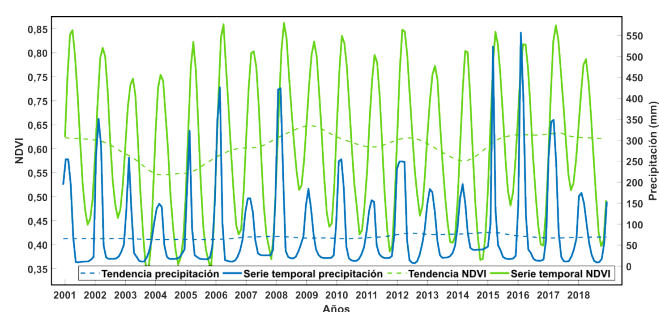
### Análisis series temporales de NDVI y precipitación

Durante el período de estudio de 18 años, el ecosistema evaluado presentó un ciclo estacional de NDVI de una duración de 165 días, comenzando la primera semana de enero y finalizando en la segunda semana de junio. El NDVI alcanzó su valor máximo 0,81 el primer día del mes de abril. Adicio-



**Fig. 3:** Serie temporal y tendencia a) NDVI y b) temperatura con ajuste de Savitzky Golay del ecosistema bosque semidecíduo piemontano del Catamayo Alamor, período 2001-01-01 al 2018-12-31.

nalmente, la amplitud del NDVI entre el valor pico de 0,81 y el valor base 0,42, presentó una diferencia de 0,39. En la precipitación, el ciclo estacional presentó una duración de 127 días, que se inició en la primera semana de enero y culminó en la primera semana de mayo. El valor más alto de la precipitación, en la mitad del ciclo estacional, fue el primer día de marzo. Adicionalmente, la amplitud de 272,7 mm se obtuvo de la diferencia del valor pico 288,4 mm y el valor base de 15,7 mm (Fig. 5). En el NDVI, se observaron 3 tendencias, la primera entre los años 2004 hasta el año 2007, presentado variaciones de NDVI entre 0,56 a 0,62. La segunda tendencia, aconteció entre los años 2008 al 2010, con variaciones en un rango de 0,62 a 0,66, y la última entre los años 2011 al 2014, con valores de NDVI entre 0,59 a 0,63, mientras que, la precipitación presentó una tendencia ligeramente ascendente, casi en línea recta, con valores de precipitaciones en un rango de 62,7 mm hasta 79,3 mm (Figura 4).



**Fig. 4:** Serie temporal y tendencia a) NDVI con ajuste de Savitzky Golay, b) precipitación con ajuste Gaussiano del ecosistema bosque semidecíduo piemontano del Catamayo Alamor, período 2001-01-01 al 2018-12-31.

### Análisis temporal de la correlación de Spearman

Al desarrollar la prueba de correlación de Spearman con un nivel de confianza del 95 %, se obtuvo, una correlación entre las variables NDVI y temperatura de 0,22, lo cual indica una correlación positiva baja, mientras que, la correlación entre las variables NDVI y precipitación, el valor de Spearman fue de 0,53 indicando una correlación positiva moderada, es decir mientras aumenta la precipitación aumenta el NDVI.

## DISCUSIÓN

En el ámbito geoestadístico, los parámetros cuantificados en el modelo esférico entre el NDVI con las variables climáticas y orográficas usando una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> presentaron diferencias de rango y semivarianza, destacando que, el rango del NDVI con la temperatura y pendiente presentaron una dependencia espacial que duplica la dependencia espacial al rango del NDVI con la precipitación y elevación. En el análisis espacial, las semivarianzas del 0,0046 y 0,0045 del NDVI con temperatura y pendiente, mostraron que los pares de datos están mayormente alejados con respecto a su media en comparación con las semivarianzas de 0,0031 NDVI con pendiente y 0,0024 NDVI con precipitación. Estos resultados indican la existencia de heterogeneidad espacial entre la relación existente del NDVI y las variables climáticas evaluadas, lo cual es ratificado por estudios realizados a distintas escalas a nivel Global (Sawut et al., 2023). Al destacar la heterogeneidad espacial de los efectos ambientales sobre la vegetación, los resultados pueden orientar las decisiones en cuanto a la conservación de los ecosistemas, la planificación del uso del suelo y el fomento del desarrollo sostenible (Sawut et al., 2023; MAATE, 2023; Secretaría Nacional de Planificación, 2023). La heterogeneidad espacial en este contexto incide en las respuestas distintas de varios tipos de vegetación ante las interacciones entre diversos factores bioclimáticos, generando mecanismos variados y complejos que fundamentan las relaciones entre los índices bioclimáticos y la dinámica de la vegetación. Es imperativo tener en cuenta estas variaciones tanto espaciales como altitudinales al evaluar el efecto de los índices bioclimáticos sobre la vegetación (Gong et al., 2023).

Conocer la relación entre la vegetación y los factores climáticos ayuda a comprender la dinámica de los ecosistemas, incluyendo la respuesta de la vegetación a los cambios de temperatura, precipitación y otras variables climáticas (Kumar et al., 2023) o topográficas. El análisis temporal, reveló que los ciclos estacionales del NDVI y de la temperatura mostraron una duración de 165 días, con diferencias de cada ciclo estacional. Cronológicamente, se observa que el ciclo de la temperatura comenzó el último día del mes de noviembre, un mes antes del inicio de la actividad fotosintética en el dosel de los bosques semidecíduos del 01 de enero. Este comienzo de ciclo del NDVI es similar al encontrado por Haro-Carrión (2020) en los bosques de los Andes Occidentales del sur de Ecuador en el período 1982-2010, sin embargo, la mitad del ciclo de NDVI del uno de abril, contrasta con el de los bosques occidentales correspondiente al mes de junio. La diferencia en el fin del ciclo del NDVI y temperatura, 15 de mayo y 15 de junio, posiblemente esté relacionado a el cambio climático y la variabilidad climática que influyen en la dinámica de la vegetación a nivel espacial de manera distinta en todo el planeta (Liu et al., 2022).

El ciclo estacional de la precipitación, exhibió una duración de 127 días, es decir, 38 días menos que los ciclos de las variables NDVI y temperatura, sin embargo, el inicio del ciclo estacional del NDVI y precipitación es de similar fecha, 01 de enero. La diferencia de dichos ciclos establece que las precipitaciones de mayor intensidad se presentaron el primer día de marzo, específicamente, 31 días antes a la mitad del ciclo del NDVI, acontecido el 01 de abril, y 9 días después a la

mitad del ciclo de temperatura – 21 de febrero, esta diferencia es similar a lo descrita por Udivia (2020) donde el NDVI en el ecosistema Páramo del centro y norte del Ecuador en el período 2001 – 2018 aumentó un mes después de las precipitaciones de octubre y mayo, mientras que, en el bosque seco de la provincia de Loja el NDVI y el incremento diamétrico están regulados por las precipitaciones durante los meses de enero a junio (Pucha, 2019).

Al determinar el grado de correlación de Spearman, se observa la existencia de una baja correlación entre NDVI y temperatura 0,22, y moderada entre NDVI y precipitación 0,53. Estas correlaciones, contrastan con las obtenidas por Maita (2015) en el mismo ecosistema de estudio, donde la correlación de Pearson entre el índice mejorado EVI y temperatura de -0,22 indica una relación inversa, mientras que en la correlación entre el EVI y precipitación es 0,29. Estas diferencias, deben ser interpretados con precaución, por tratarse de índices de vegetación cuyo propósito es complementario al momento de profundizar en el análisis de información obtenida del dosel de un ecosistema (Huete et al., 2010). A esto se suma, que los bosques con altas y moderadas densidades influyen en la saturación del NDVI (Jiang et al., 2006; Huete et al., 2002), esta limitación es potenciada en la banda azul en combinación con las bandas rojo e infrarrojo cercano que le permite captar mejor las variaciones de la actividad fotosintética de la biomasa del dosel (Gao et al., 2000).

Otras características relevantes que posiblemente influyeron en el contraste de correlaciones, se enmarcan en la diferencia de resoluciones espaciales y temporales del NDVI, en el estudio la resolución espacial es de 1 km<sup>2</sup>, la misma es captada y procesada por el satélite MODIS Terra mensualmente (Didan, 2021), la cual difiere de las resoluciones utilizadas por Maita (2015) con un tamaño de pixel de 250 metros y una resolución temporal cada 8 días combinadas de los satélites MODIS Terra y Aqua, (Didan, 2015), sin embargo, otros aspectos como referentes a calibración del sensor, presencia de nubosidad y características topográficas deben ser analizadas para prevenir interpretaciones erróneas (Zeng et al., 2022).

Los resultados de esta investigación podrían contribuir a orientar acciones de conservación dirigidas a mitigar los impactos adversos de las condiciones bioclimáticas cambiantes en los ecosistemas frágiles (Gong et al., 2023). Es necesario destacar que factores naturales y antropogénicos que influyen sobre los ecosistemas tienen un impacto significativo en los cambios en el NDVI de la vegetación, ya que contribuyen a la heterogeneidad espacial de los cambios del NDVI, lo que significa que los cambios en el NDVI varían entre diferentes ubicaciones dentro del área de estudio (Li et al., 2022). La perspectiva de la heterogeneidad espacial mejora significativamente nuestra comprensión de la dinámica de la vegetación al capturar las variaciones matizadas de los factores en las diferentes subregiones. Este enfoque proporciona información sobre cómo la variabilidad espacial influye en los cambios de la vegetación y permite una comprensión integral de las interacciones entre los factores y el medio ambiente local. (Kumar et al., 2023; Li et al., 2022).

## CONCLUSIONES

La presente investigación analizó la relación espacial entre el NDVI con las variables climáticas y orográficas, a través de herramientas geoestadísticas como lo son el semivariograma y el modelo de ajuste teórico. El análisis estructural demostró una dependencia espacial más fuerte entre NDVI con la precipitación y elevación en comparación con la dependencia espacial entre el NDVI con la temperatura y pendiente.

Se determinó que el comportamiento del NDVI con respecto a las variables bioclimáticas temperatura y precipitación, influye favorablemente en los procesos ecofisiológicos en las distintas zonas biogeográficas del ecosistema de estudio; sin embargo, la baja correlación entre NDVI y temperatura debe ser analizada con mayor profundidad, debido a que existen otros aspectos como nuevas variables, patrones y anomalías climáticas regionales y mundiales que influyen en cierto grado en los ciclos estacionales de cada variable de estudio.

El hallazgo de la sucesión del inicio de cada ciclo estacional demuestra la importancia de avanzar en nuevas líneas de investigación en el estudio de los ecosistemas y de su respuesta ante variables de amplia relevancia como lo son la temperatura y precipitación, dichas investigaciones deben enmarcarse como eje fundamental de la academia, estado, y sociedad en general por los diversos beneficios y bienestar en favor de la humanidad.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación – SENESCYT por la beca recibida correspondiente al Programa de Becas Nacionales de Posgrado Fortalécete 2022. Al proyecto Biogeografía del cambio climático en el Sur del Ecuador: Dinámicas de cambio de uso de suelo y su influencia en la distribución espacial y temporal de especies vegetales (20 – DI – FARNR - 2021), a la Dirección de Investigación y a la Maestría en Biodiversidad y Cambio Climático de la Universidad Nacional de Loja.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización, RGM y CBS; metodología, RGM, CBS; análisis formal, RGM, CBS, AGG; investigación, RGM; curación de datos, RGM; redacción — preparación del borrador original, RGM y CBS; redacción — revisión y edición, RGM, CBS y AGG; supervisión, CBS y AGG. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja y la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación – SENESCYT.

## REFERENCIAS

Aguirre Mendoza, Z. (2017). Biodiversidad de la provincia de Loja, Ecuador. *Arnaldoa*, 24(2), 523–542.

- <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24206>
- Aldás Andrade, A. P. (2019). *Análisis de la dinámica temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los años 1986, 2001 y 2017 en la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, Imbabura, mediante el uso de google Earth Engine* [Tesis de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Digital PUCE. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21638>
- BGCI. (2021). State of the World's Trees. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, United Kingdom.
- Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). Global climate-related predictors at kilometer resolution for the past and future. *Earth System Science Data*, 14(12), 5573–5603. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5573-2022>
- Climatologies at high resolution for the earth's land surface - CHELSA (<https://chelsa-climate.org/>).
- Database of high spatial resolution global weather and climate data – WorldClim (<https://www.worldclim.org/data/index.html>).
- Didan, K. (2015). *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2023-10-04 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>
- Didan, K. (2015). *MYD13Q1 MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2023-10-04 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD13Q1.006>
- Didan, K. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2023-03-20 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.061>
- Eklundh, L., Jönsson, P. (2015). TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. In: Kuenzer, C., Dech, S., Wagner, W. (eds) *Remote Sensing Time Series. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 22. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_7)
- FAO y PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Gao X, Huete AR, Ni W, Miura T (2000) Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing Environment* 74:609–620
- Gao, Q., Guo, Y., Xu, H., Ganjurjav, H., Li, Y., Wan, Y., Qin, X., Ma, X., & Liu, S. (2016). Climate change and its impacts on vegetation distribution and net primary productivity of the alpine ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau. *The Science of the Total Environment*, 554–555, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.131>
- Gong, H., Cheng, Q., Jin, H., & Ren, Y. (2023). Effects of temporal, spatial, and elevational variation in biocli-

- matic indices on the NDVI of different vegetation types in Southwest China. *Ecological Indicators*, 154, 110499. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110499>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., ... Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Haro-Carrión, X., Waylen, P. R., & Southworth, J. (2020). Spatiotemporal changes in vegetation Greenness across Continental Ecuador: A Pacific-Andean-Amazonian Gradient, 1982–2010. *Journal of Land Use Science*, 16(1), 18–33. <https://doi.org/10.1080/1747423x.2020.1866705>
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. *Remote Sens Environ* 83: 195-213
- Huete, A., Didan, K., van Leeuwen, W., Miura, T., Glenn, E. (2010). MODIS Vegetation Indices. In: Ramachandran, B., Justice, C., Abrams, M. (eds) *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 11. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_26)
- Hurteau, M. D. (2021). The role of forests in the carbon cycle and in climate change. En *Climate Change* (pp. 561–579). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00027-X>
- Jeong, S.-J., Schimel, D., Frankenberg, C., Drewry, D. T., Fisher, J. B., Verma, M., Berry, J. A., Lee, J.-E., & Joiner, J. (2017). Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. *Remote Sensing of Environment*, 190, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.021>
- Jiang Z, Huete AR, Chen J, Chen Y, Li J, Yan G, Zhang X (2006) Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sens Environ* 101:366–378
- Karger, D. N., Schmatz, D. R., Dettling, G., & Zimmermann, N. E. (2020). High-resolution monthly precipitation and temperature time series from 2006 to 2100. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00587-y>
- Karger, D. N., Wilson, A. M., Mahony, C., Zimmermann, N. E., & Jetz, W. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01084-6>
- Kleemann, J., Zamora, C., Villacis-Chiluisa, A. B., Cuenca, P., Koo, H., Noh, J. K., Fürst, C., & Thiel, M. (2022). Deforestation in continental Ecuador with a focus on protected areas. *Land*, 11(2), 268. <https://doi.org/10.3390/land11020268>
- Kumar, V., Bharti, B., Prasad, H., & Raj, A. (2023). Assessing the interrelation between NDVI and climate dependent variables by using granger causality test and vector auto-regressive neural network model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 131(May), 103428. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103428>
- Li, S., Li, X., Gong, J., Dang, D., Dou, H., & Lyu, X. (2022). Quantitative Analysis of Natural and Anthropogenic Factors Influencing Vegetation NDVI Changes in Temperate Drylands from a Spatial Stratified Heterogeneity Perspective: A Case. *Remote Sensing*, 14(3320), 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14143320>
- Liu, C., Liu, J., Zhang, Q., Hui, C., Gu, X., & Gulakhmadov, A. (2022). Attribution of NDVI dynamics over the globe from 1982 to 2015. *Remote Sensing*, 14(11), 2706. <https://doi.org/10.3390/rs14112706>
- MAATE. (2023). Plan Regulatorio Institucional 2024, Propuesto. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). Quito, Ecuador.
- Maestre F., Gallardo A. (2008). *Introducción de Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones*. Editorial DYKINSON, S.L.
- Maita, J. (2015). *Dinámica espacio temporal del Índice de vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del Sur del Ecuador* [Tesis de Maestría, Universidad del Azuay]. Dspace de la Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4933>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2008). PROYECTO SOCIO BOSQUE. Acuerdo Ministerial 169. Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural, Quito.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). ESTADÍSTICAS DEL PATRIMONIO NATURAL DEL ECUADOR CONTINENTAL. Subsecretaría de Patrimonio Natural, Quito.
- National Aeronautics and Space Administration's Earth Science Data Systems (ESDS) Program (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).
- Noh, J. K., Echeverria, C., Gaona, G., Kleemann, J., Koo, H., Fürst, C., & Cuenca, P. (2022). Forest ecosystem fragmentation in Ecuador: Challenges for sustainable land use in the tropical Andean. *Land*, 11(2), 287. <https://doi.org/10.3390/land11020287>
- Ometto, J.P., K. Kalaba, G.Z. Anshari, N. Chacón, A. Farrell, S.A. Halim, H. Neufeldt, and R. Sukumar, 2022: Cross-Chapter Paper 7: Tropical Forests. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2369-2410, doi:10.1017/9781009325844.024.
- Paula, P. A., Zambrano, L., y Paula, P. (2018). Análisis multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque*, 9(2), 125-137. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.252>

- Pucha, F. (2019). *Correlación entre el NDVI y el crecimiento anual de especies forestales al Sur de Ecuador* [Tesis de Maestría, Universidad de Salzburgo]. Research Gate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34662.57922>
- QGIS Development Team. (2023). QGIS Geographic Information System (Version 3.32) [Software de geoinformación]. Open-Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>
- R Foundation for Statistical Computing. (2023). R: A language and environment for statistical computing (Version 2023.06.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Sawut, R., Li, Y., Kasimu, A., & Ablat, X. (2023). Examining the spatially varying effects of climatic and environmental pollution factors on the NDVI based on their spatially heterogeneous relationships in Bohai Rim, China. *Journal of Hydrology*, 617(PA), 128815.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2023). Guía para la formulación/adaptación de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial – PDOT. Gobierno del Ecuador.
- TIMESAT. (2017). A software package to analyse time series of satellite sensor data (Version 3.3) [Software]. Lund University. <https://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>
- Udivia Zambrano, K.Y. (2020). *Análisis de la dinámica espacio temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi) y su relación con patrones climáticos globales en el páramo ecuatorial entre el año 2001 y 2018* [Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital – EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21251>
- Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (11), 2345–2364. DOI:10.1080/01431160210154812
- Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2345-2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R. B., Halofsky, J. E., Hyde, K., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L. M., Vose, J. M., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- World Meteorological Organization (2022). El estado del Clima en América Latina y El Caribe 2021. <https://library.wmo.int/idurl/4/66322>
- Zeng, Y., Hao, D., Huete, A., Dechant, B., Berry, J., Chen, J. M., Joiner, J., Frankenberg, C., Bond-Lamberty, B., Ryu, Y., Xiao, J., Asrar, G. R., & Chen, M. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews. Earth & Environment*, 3(7), 477–493.