

Detección del máximo verdor en maíz (*Zea mays*) mediante series temporales de datos MODIS en la parroquia Colonche de la provincia de Santa Elena

Detection of maximum greenness in maize (*Zea mays*) using MODIS time series data in the Colonche parish of the Santa Elena province



César Augusto Sáenz Flores¹

Julio César Villacrés¹

<https://orcid.org/0000-0001-6687-7452>
 <https://orcid.org/0000-0003-0848-8293>

¹Universidad Agraria del Ecuador (UAE), Guayaquil-Ecuador CP 090104

csaenz@uagraria.edu.ec

<https://doi.org/10.26423/2qzfg896>

Páginas: 70- 79

Resumen

El objetivo de la investigación fue detectar el momento del máximo verdor del maíz en la parroquia Colonche, Ecuador, mediante series temporales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada derivadas del sensor MODIS. Se analizó 1 043 imágenes del producto MOD09A1.V061 correspondientes a 2001–2023, se generó series temporales a partir de centroides de 200 parcelas clasificadas como maíz. Para mejorar la calidad a los datos se aplicó un suavizado y filtro de Savitzky–Golay, el análisis estadístico incluyó la función de autocorrelación, prueba Q de Ljung–Box, periodograma y cálculo del año medio mediante tablas de Buys–Ballot. El NDVI presentó un patrón unimodal, con un máximo de 0,64 (IC95 % ± 0,037) y una variabilidad interanual entre 0,50 y 0,82. El máximo verdor ocurrió el 22 de marzo, coincidiendo con la fase de mayor vigor vegetativo y el valor más bajo (0,20) reportado el 24 de octubre. Los resultados aportan información útil para optimizar calendarios de fertilización, manejo sanitario y estimación de cosecha. Este estudio constituye la primera caracterización basada en más de dos décadas de datos MODIS para el cultivo de maíz en la parroquia Colonche.

Palabras clave: año medio, dinámica de la vegetación, NDVI, teledetección.

Abstract

The aim of the research was to detect the moment of maximum greenness of maize in the parish of Colonche, Ecuador, using time series of the Normalized Difference Vegetation Index derived from the MODIS sensor. A total of 1 043 images from the MOD09A1.V061 product corresponding to 2001–2023 were analyzed, and time series were generated from the centroids of 200 plots classified as maize. To improve data quality, smoothing and a Savitzky–Golay filter were applied. Statistical analysis included autocorrelation, Ljung–Box Q test, periodogram, and calculation of the mean year using Buys–Ballot tables. The NDVI showed a unimodal pattern, with a maximum of 0.64 (95% CI ± 0.037) and interannual variability between 0.50 and 0.82. Maximum greenness occurred on March 22, coinciding with the phase of greatest vegetative vigor, and the lowest value (0.20) was reported on October 24. The results provide useful information for optimizing fertilization schedules, health management, and crop estimation. This study is the first characterization based on more than two decades of MODIS data for maize farming in the parish of Colonche..

Keywords: mean year, NDVI, remote sensing, vegetation dynamics.

1. Introducción

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial debido a su papel fundamental en la dieta humana y animal. Este cereal es una fuente esencial de carbohidratos y energía, siendo fundamental en la nutrición de aves, cerdos y rumiantes. Además, aporta almidón altamente digestible que favorece el crecimiento eficiente, la producción de carne y leche, y la conversión alimenticia en dietas balanceadas, siempre que se complementa con proteínas, minerales y fibra para asegurar una nutrición integral [[1], [2], [3], [4]]. Por su alta disponibilidad y aceptación, el maíz es ampliamente utilizado en la elaboración de ensilajes, forrajes y balanceados, contribuyendo de manera significativa al rendimiento productivo del sector pecuario. En Ecuador, este cultivo es importante para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico del sector agrícola.

La identificación de etapas críticas, como el máximo veredor, es fundamental para optimizar la eficiencia de las prácticas agrícolas, prever la cosecha y ajustar el uso de recursos. Sin embargo, en regiones tropicales como Ecuador la presencia de nubes limita el monitoreo con la utilización de imágenes satelitales. Esto genera un desafío para el seguimiento eficiente de los cultivos, especialmente cuando se usan datos con más de 20 años de observaciones como son las series de tiempo.

En este contexto, la teledetección es una herramienta eficaz para realizar el monitoreo en campo y superar las limitaciones como la presencia de nubes. Existen diferentes índices de vegetación, pero el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), propuesto por Tucker [5], es el más utilizado para estimar el vigor y la cobertura vegetal. Este índice se calcula a partir de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (Nir) y la banda roja (Rojo), dividido entre su suma, y varía en un rango de -1 a 1. Valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores bajos o negativos reflejan vegetación senescente, suelo desnudo o superficies acuáticas y nubladas. El uso del NDVI en el monitoreo agrícola permite evaluar la dinámica de la vegetación de los cultivos, detectar cambios en el vigor y analizar patrones estacionales de manera continua.

El sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), a bordo del satélite TERRA, proporciona datos ópticos y térmicos de amplia cobertura espacial y temporal, adecuados para estudios de gran escala y monitoreo prolongado de cultivos. Entre sus productos, el MOD09A1.V061 ofrece información de siete bandas espectrales con resolución temporal de 8 días y espacial de 500 metros, esto permite la construcción de series temporales de NDVI robustas. Estas series permiten estudiar la dinámica intraanual de los cultivos, identificar fechas de siembra, picos de crecimiento vegetativo y momentos de máximo veredor, incluso en zonas donde la nubosidad dificulta la observación directa. La combinación de datos MODIS con técnicas de análisis estadístico y fenométrico amplía las posibilidades de monitoreo agrícola eficiente y económico.

El análisis de series temporales de NDVI requiere la aplicación de métodos de suavizado y filtrado para reducir el ruido generado por nubes, variabilidad atmosférica o errores del sensor. Entre los métodos de filtrado de series de tiempo el más utilizado es el filtro de Savitzky–Golay [6], basado en

mínimos cuadrados, que permite suavizar la serie temporal y conservar la estructura original. Los procedimientos estadísticos como la función de autocorrelación (FAC) [7] y la prueba Q de Ljung–Box [8] que ayudan a evaluar la dependencia temporal, identificar componentes periódicos y verificar la presencia de ruido blanco. Estos análisis son necesarios para la confiabilidad de la información obtenida de las series de tiempo.

En regiones tropicales es el cálculo del “año medio” del NDVI una técnica útil que ayuda a observar la variabilidad interanual y permite identificar patrones repetitivos, destacando fechas promedio de siembra, picos de crecimiento vegetativo y el momento de máximo veredor. La metodología de tablas de Buys–Ballot [9] aplicada a las series filtradas de NDVI permite obtener una curva promedio representativa del ciclo anual del cultivo, proporcionando métricas claves para la gestión agrícola. La presente investigación se centró en la parroquia Colonche, en el cantón Santa Elena (Ecuador), que abarca aproximadamente 1 137,2 km², siendo la más extensa de la provincia. Su territorio combina áreas agrícolas, zonas de conservación y zonas urbanas.

En otros países en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África y América Latina se han desarrollado estudios que emplean series temporales de NDVI derivadas de sensores MODIS para caracterizar la fenología de cultivos, incluyendo maíz, arroz, soya y trigo [10]. Estas investigaciones han permitido identificar fechas de siembra y cosecha, estimar picos de vigor vegetativo y analizar la variabilidad interanual de los ciclos agrícolas. Sin embargo, en Ecuador y particularmente en la parroquia Colonche, provincia de Santa Elena no existen estudios que integren más de dos décadas de datos MODIS para describir la dinámica fenológica del maíz mediante técnicas de filtrado y análisis estadístico avanzado. Esta ausencia de información limita la capacidad para comprender la respuesta del cultivo frente a la variabilidad climática local y dificulta la planificación agrícola. El presente estudio es necesario, ya que proporciona por primera vez una caracterización fenológica detallada y robusta del maíz en Colonche, ofreciendo información útil para la gestión productiva, la toma de decisiones agronómicas y el monitoreo sostenible del cultivo en zonas tropicales donde la nubosidad restringe la observación directa. El objetivo general del estudio fue detectar el momento de máximo veredor del cultivo de maíz en la parroquia Colonche mediante el análisis estadístico de series temporales NDVI de más de veinte años de datos MODIS. Los objetivos específicos incluyeron la construcción y filtrado de las series temporales, el análisis de su estructura estadística y la determinación fenológica del máximo veredor mediante el cálculo del año medio.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

La parroquia Colonche (Centroide de la parroquia: 2° 1' 52,42" S y 80° 33' 55,87" O), situada en el cantón Santa Elena, Ecuador, tiene una superficie de 1.137,2 km², siendo la más grande de la provincia como se observa en la Figura 1. En la provincia de Santa Elena se identificó aproximadamente en el 2024 se identificaron 3.385 ha de maíz según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). Su territorio

combina áreas agrícolas, zonas naturales de conservación y zona urbana. Esta extensión le proporciona una diversidad ecológica y cultural, convirtiéndola en un área de gran relevancia para la organización territorial y el desarrollo local de la provincia. Colonche presenta distintos microclimas derivados de su relieve y de la influencia de la Cordillera Chongón-Colonche. Se distinguen principalmente tres tipos: el clima tropical seco, con precipitaciones entre 500 y 1

000 mm al año; el clima semiárido, con lluvias inferiores a 500 mm y temperaturas medias de 20 a 26°C; y el clima semi-húmedo, con lluvias superiores a 2 000 mm anuales [11]. Esta variabilidad climática impacta directamente en la agricultura, la fauna y la vida cotidiana de sus habitantes. En esta parroquia la mayor parte de las áreas destinadas a la agricultura se utilizan sistemas de secano y se siembra antes del inicio de la época lluviosa que es en el mes de diciembre.

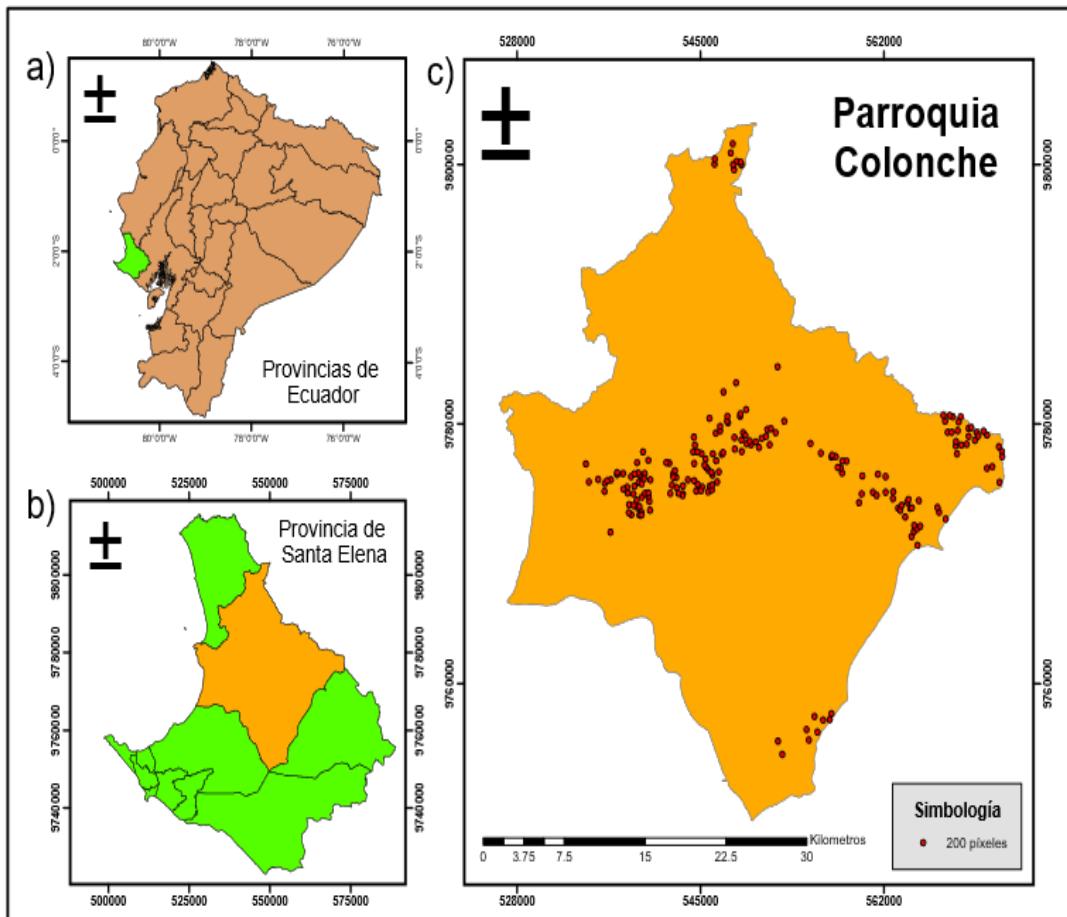


Figura 1: Parroquia Colonche ubicada en la provincia de Santa Elena. a) Provincias de Ecuador b) Provincia de Santa Elena c) Parroquia Colonche.

La delimitación geográfica oficial de las parcelas ubicadas en la parroquia Colonche se obtuvo del catálogo de datos abiertos del Ministerio de Agricultura y Ganadería [12], en formato vectorial. Estas parcelas se encuentran en el área de estudio se encuentra entre las coordenadas aproximadas: 1°46' S – 2°16' S y 80°45' o – 80°20' O. Para evitar la sobrecarga visual en la cartografía, las parcelas originales no se representaron, en su lugar se mostraron únicamente sus centroides, permitiendo identificar la distribución espacial del muestreo.

Datos de referencia del cultivo de maíz

Los datos de referencia utilizados en esta investigación fueron descargados del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en formato vectorial (shapefile) [12], correspondientes a la delimitación oficial de parcelas agrícolas con cultivo de maíz. La identificación del cultivo se realizó empleando la cartografía del MAG disponible a partir

de 2018, que constituye la fuente oficial de clasificación del uso del suelo. Aunque no existen registros homogéneos previos a ese año, se asumió la continuidad del uso agrícola debido a la estabilidad espacial del cultivo en la zona y a la coherencia fenológica observada en las series de NDVI entre 2001 y 2023. Las parcelas cuya serie temporal presentó interrupciones prolongadas o patrones incompatibles con el comportamiento fenológico del maíz fueron descartadas.

Para la conformación de la muestra se incluyeron únicamente las unidades con clasificación oficial como maíz y con un tamaño mínimo de 0,5 ha. Si bien esta superficie es inferior al tamaño aproximado de un píxel MODIS (25 ha), el umbral permitió excluir polígonos extremadamente pequeños y mantener mayor consistencia espacial, reduciendo parcialmente el efecto de mezcla espectral. A partir de este conjunto, se seleccionaron 200 parcelas, las cuales representan las unidades agrícolas más homogéneas según la cartografía oficial. El muestreo empleado fue no

probabilístico por criterio, priorizando la consistencia espacial y la estabilidad fenológica del cultivo.

Las capas vectoriales fueron intersectadas con la serie histórica de imágenes satelitales y se extrajo el centroide de cada parcela como punto de muestreo para obtener las series temporales de NDVI. Todas las operaciones se realizaron en el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 17S, asegurando consistencia espacial y comparabilidad entre datos.

Datos de teledetección

El sensor MODIS se encuentra a bordo del satélite TERRA lanzado al espacio en el año 1999 por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). MODIS obtiene información de la superficie de la tierra en 36 bandas espectrales entre 0,405 y 14 385 μm , que están en los rangos óptico y térmico. Además, tiene diferentes productos con distintas resoluciones temporales (diaria, 8 días y 16 días) y espaciales (250 m, 500 m y 1 km). Para poder estudiar la dinámica del cultivo de maíz, en esta investigación se utilizó el producto MOD09A1.V061 [13]. Este producto contiene siete bandas espectrales, 450 nm (Azul), 555 nm (Verde), 645 nm (Rojo), 860 nm (Nir), 1 240 nm (SWIR1), 1 640 nm (SWIR2) y 2.130 nm (SWIR3), con una resolución temporal de 8 días y una resolución espacial de 500 metros, obteniendo un total de 46 imágenes por año. No se usó la máscara de calidad debido a que son compuestos de 8 días, donde se escoge el mejor valor de reflectancia de ese periodo de tiempo y se mejora los datos con el suavizado y filtrado posterior de las series de tiempo. La descarga de las imágenes es gratuita a través de la página web de la NASA [13]. Las imágenes descargadas para todo el período de estudio fueron desde enero de 2001 a agosto de 2023 son 1.043 en total, estas imágenes se reproyectaron al sistema WGS 84 / UTM zona 17S y solo se utilizaron imágenes del tile h09v09.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), propuesto por Tucker en 1979, permite evaluar el vigor y estado de salud de la vegetación. Se calculó utilizando las bandas del infrarrojo cercano (Nir) y el rojo visible (Rojo), como se muestra en la Ecuación 1:

$$NDVI = \frac{Nir - Rojo}{Nir + Rojo}$$

Donde:

Nir: reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Rojo: reflectancia en la banda del rojo

El NDVI varía en un rango de -1 a 1. Los valores próximos a 1 indican que la vegetación es densa y vigorosa, con una alta reflectancia en la banda del Nir debido a la estructura celular de sus hojas y una baja reflectancia en la banda del rojo debido a la absorción de la energía necesaria para la fotosíntesis. Los valores bajos son típicos de la vegetación senescente o suelo y los valores negativos son característicos de superficies con agua, nieve o nubes. Por lo que el valor de NDVI proporciona una información clara del vigor de la vegetación [14], [15].

Construcción de series de tiempo, suavizado y filtrado

Para la construcción de las series temporales las imágenes de NDVI se ordenaron cronológicamente y se compilaron.

Posteriormente se procedió a suavizar y filtrar. Estos procedimientos se usan para reducir el ruido (nubes, condiciones atmosféricas, fallos del sensor).

Las series de tiempo de NDVI se suavizaron para evitar valores anómalos. Las observaciones que quedaban fuera del umbral de la media ± 2 veces la desviación estándar dentro de una ventana de cinco fechas se consideraban valores atípicos y se sustituían por la media de las dos observaciones anteriores y dos posteriores del valor atípico de la serie temporal. Posteriormente se aplicó un filtro de Savitzky-Golay (SG) [6] con un ancho de ventana de suavizado de 7 (3 compuestos MODIS a la izquierda y 3 a la derecha) y un grado del polinomio de suavizado de 2 [16]. El filtro SG que se presenta en la Ecuación 2, basado en el método de los mínimos cuadrados, es uno de los métodos más utilizados para reducir el ruido y suavizar las series temporales de teledetección [17], [18].

$$Y_j^* = \sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i} / N$$

Donde:

Y es el valor NDVI original,

Y^* es el valor NDVI resultante,

C_i es el coeficiente del punto i -ésimo de la ventana de suavizado y

N es el número de enteros convolutivos e igual al tamaño de la ventana de suavizado ($2m + 1$),

donde m es la mitad de la anchura de la ventana de suavizado.

A medida que aumenta el valor de m , el filtro elimina más picos agudos de la serie temporal. El grado del polinomio de suavizado debe ser un número entero y suele oscilar entre 2 y 4. Los valores de grado bajos dan lugar a un mayor suavizado, pero pueden añadir un mayor sesgo. Por otro lado, un grado alto reducirá el sesgo, pero puede sobreajustar los valores de la serie temporal, obteniendo un resultado más ruidoso.

El filtro SG se seleccionó porque preserva la forma fenológica real mejor que alternativas como Whittaker o spline, especialmente en regiones tropicales con alta nubosidad.

Análisis estadístico de las series de tiempo

El análisis estadístico de series de tiempo es esencial para caracterizar la variabilidad temporal de los datos de teledetección, permitiendo identificar patrones, tendencias y componentes estacionales en variables derivadas de sensores remotos. En este estudio se emplearon tres herramientas: la función de autocorrelación (FAC), el test Q de Ljung-Box y el periodograma.

La FAC es una herramienta matemática que describe la relación existente entre los valores de una serie temporal y sus retardos, proporcionando una medida cuantitativa del grado de dependencia entre observaciones separadas por distintos intervalos. Los valores oscilan entre -1 y 1, permiten identificar la presencia de componentes periódicas, estructuras de persistencia temporal y posibles patrones estacionales, y se calcula mediante la Ecuación 3.

En este estudio, la FAC se empleó para examinar la dinámica del cultivo, identificando dependencias temporales y ciclos característicos en las series analizadas. Se utilizó hasta el

retardo 230, que equivale a 5 años de la serie temporal, con un nivel de confianza de 0,95 ($\alpha = 0,05$).

$$\hat{r}_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (y_t - \bar{y})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2}$$

Donde: \hat{r} es el coeficiente de autocorrelación para el retardo k ;

y es la variable estudiada;

\bar{y} es el valor medio de y ;

N es el número de observaciones.

El estadístico Q de Ljung–Box [8] es una prueba estadística de diagnóstico que se muestra en la Ecuación 4 y se utiliza para contrastar la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación conjunta hasta un determinado número de retardos. Con este test se verifica si una serie puede considerarse ruido blanco. Esta prueba evalúa la independencia temporal de los datos, comprobando que las autocorrelaciones no difieren significativamente de cero. Un resultado no significativo indica que la serie se comporta como ruido blanco.

$$Q_{LB}(k) = T(T+2) \sum_{j=1}^k (T-j)r_j^2 \sim \chi^2(k-p-q; \text{d.f.})$$

Donde:

T : es el número de observaciones en la muestra;

r_j : es la j -ésima autocorrelación;

k : es el orden hasta el que se acumula la autocorrelación y se utilizó 46 equivalente al año MODIS.

El periodograma [19] es una herramienta fundamental del análisis espectral, que permite representar la distribución de la varianza de la serie en función de la frecuencia. Con esta herramienta es posible identificar la existencia de componentes cíclicas o estacionales, así como la periodicidad dominante en los datos. Los picos observados en el periodograma indican frecuencias con alta contribución a la variabilidad total de la serie, lo que aporta información clave para comprender su estructura temporal. El rango de frecuencias va desde 0 hasta la frecuencia de Nyquist (0,5 ciclos por muestra), y cada observación corresponde a un compuesto MODI

Análisis estadístico de las series de tiempo

El análisis del año medio del NDVI se empleó para identificar el momento de máximo verdor del cultivo de maíz y se calculó mediante la metodología de tablas de Buys–Ballot [9], esto ayudo para estudiar la dinámica intraanual de las series temporales filtradas. A partir de esta curva media se identificaron la fecha del máximo verdor (valor de NDVI), correspondientes al momento de mayor actividad fotosintética y al mínimo valor que representa el inicio o fin del ciclo vegetativo. El año medio se calculó agrupando las observaciones de MODIS en intervalos de 46 compuestos, que representan aproximadamente un año completo, donde la imagen 1 corresponde al 1 de enero, la imagen 23 a mediados de año aproximadamente 26 de junio y la imagen 46 a finales del año 27 de diciembre. Cada posición dentro del ciclo de 46 se promedió con las imágenes del mismo orden en los ciclos siguientes; por ejemplo, la imagen 1 se promedió con las imágenes 47, 93, 139, etc., mientras que la imagen 2 se

promedió con las imágenes 48, 94, 140, y así sucesivamente hasta completar todas las posiciones del conjunto de 46.

Procesamiento de imágenes y estadístico

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en RStudio (paquetes: abind, sf, stars, raster, gdalUtils, rgdal y sp) versión 4.1.3 y para el procesamiento estadístico se utilizó Python 3.

3. Resultados y Discusión

Construcción y filtrado de las series temporales de NDVI del producto MOD09A1.V061

La construcción de las series temporales de NDVI del producto MOD09A1.V061 permitió generar una base de datos continua y homogénea que describe la dinámica de la vegetación del cultivo de maíz en la parroquia Colonche durante el periodo 2001–2023. En total se procesaron 1.043 observaciones, correspondientes a más de dos décadas de información, lo que garantiza una cobertura temporal suficiente para caracterizar los patrones estacionales y reducir la influencia del ruido atmosférico. A partir de los centroides de 200 parcelas de maíz registradas por el MAG, se extrajeron las series individuales de NDVI, las cuales fueron organizadas cronológicamente y compiladas para su posterior análisis estadístico. Estos resultados coinciden con otros estudios [20], [21] donde identificaron una dinámica unimodal del NDVI en cultivos tropicales, caracterizada por un ascenso marcado al inicio de la temporada húmeda y un pico definido en la fase de mayor vigor. Aunque estos estudios abarcan varios cultivos y emplean técnicas basadas en la Transformada Rápida de Fourier, ambos trabajos mantienen la misma dinámica fenológica observada en series MODIS.

Durante la fase inicial del procesamiento, se identificaron y eliminaron valores atípicos asociados principalmente a la presencia de nubes, aerosoles y fallos radiométricos del sensor. Para todas las series se aplicó un procedimiento de detección basado en la media ± 2 desviaciones estándar dentro de una ventana móvil de cinco fechas, reemplazando las observaciones anómalas por la media de valores adyacentes. Este procedimiento permitió conservar la estructura fenológica de la señal sin introducir distorsiones artificiales. Posteriormente, se empleó el filtro de Savitzky–Golay (SG) con una ventana de siete observaciones y un polinomio de grado dos, logrando una reducción significativa del ruido de alta frecuencia y preservando los picos y transiciones fenológicas del cultivo. La eficacia de este filtro para mejorar la calidad de las series MODIS ha sido ampliamente documentada [18].

El filtrado resultó en curvas suaves y continuas que describen la variación intraanual del NDVI, tal como se observa en la Figura 2. La señal presenta un patrón unimodal característico, con incrementos graduales al inicio del ciclo agrícola, un pico bien definido durante la etapa de mayor vigor vegetativo y un descenso progresivo hacia la madurez fisiológica. Para complementar esta caracterización, se calcularon valores medios de NDVI para cada una de las fases fenológicas del cultivo: 0,40 en la fase de establecimiento y crecimiento inicial (enero–febrero), 0,61 durante la fase de máximo verdor (marzo–abril) y 0,43 en la fase de senescencia (mayo–junio). Estos valores reflejan cuantitativamente la evolución espectral del cultivo a lo largo del año.

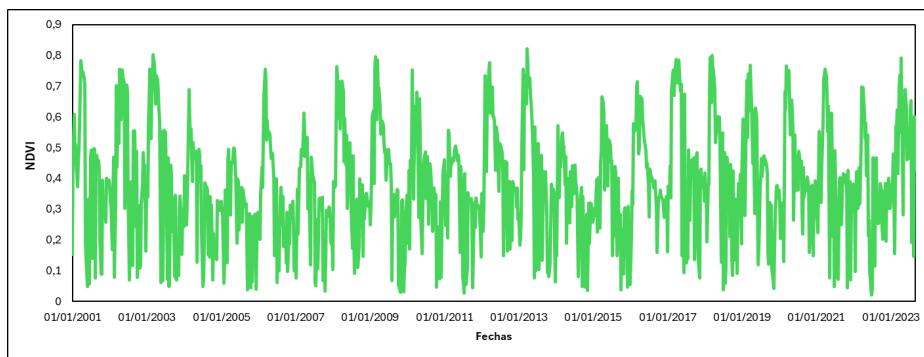


Figura 2: Serie de tiempo media de NDVI de los 200 píxeles.

Adicionalmente, se evaluó la variabilidad interanual del NDVI máximo mediante la revisión de los valores registrados anualmente durante el periodo de estudio. Como se presenta en la Tabla 1, los valores máximos oscilaron entre 0,50 en 2005 y 0,82 en 2013, evidenciando fluctuaciones. Este

rango de variabilidad resalta la importancia de emplear series temporales extensas para caracterizar adecuadamente la fenología del cultivo y comprender su respuesta ante condiciones ambientales cambiantes.

Tabla 1: Valores de NDVI máximos de los años del periodo de estudio.

Año	NDVI máximo	Año	NDVI máximo	Año	NDVI máximo
2001	0,78	2009	0,80	2017	0,79
2002	0,76	2010	0,75	2018	0,80
2003	0,80	2011	0,56	2019	0,77
2004	0,69	2012	0,78	2020	0,77
2005	0,50	2013	0,82	2021	0,75
2006	0,75	2014	0,57	2022	0,70
2007	0,61	2015	0,67	2023	0,79
2008	0,76	2016	0,71		

Las medias anuales de NDVI evidencian una variación interanual moderada a lo largo del periodo evaluado como se observa en la Figura 3, con valores que se sitúan entre aproximadamente 0,29 y 0,50. Si bien la serie muestra una estabilidad general en la respuesta de la vegetación, la prueba

de comparaciones múltiples de Tukey revela diferencias significativas entre ciertos años. Estos resultados demuestran que la dinámica de la vegetación se mantuvo relativamente estable, algunos años presentaron condiciones notablemente más favorables o desfavorables para el desarrollo vegetal.

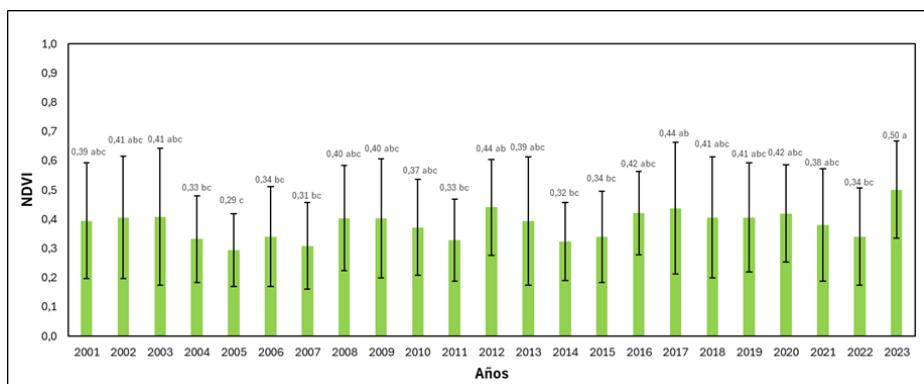


Figura 3: Valores medios de NDVI del cada año del periodo de estudio. Medias con letras no comunes difieren $p \leq 0,05$ Tukey.

Estos resultados confirman que el procesamiento aplicado no solo mitigó las perturbaciones atmosféricas a los datos MODIS, sino que también permitió resaltar de manera precisa la dinámica real de crecimiento del maíz en la zona de estudio, proporcionando una base robusta para los análisis posteriores.

Análisis estadístico de las series de tiempo de NDVI con datos MODIS

El análisis estadístico de las series filtradas permitió evaluar la estructura temporal y la dependencia interna de las observaciones, aspectos esenciales para validar la coherencia fenológica de los datos. La FAC reveló coeficientes positivos y significativos para los primeros retardos, lo que indica

una fuerte persistencia temporal y una clara periodicidad anual. Este comportamiento confirma que los valores de NDVI presentan una evolución sistemática a lo largo del año agrícola, mostrando la sucesión de fases de emergencia, desarrollo vegetativo, floración y madurez. El decaimiento progresivo de la FAC con el aumento del retardo sugiere que la serie presenta una memoria finita como se muestra

en la Figura 4, típica de procesos estacionales dominados por la actividad biológica de los cultivos. La prueba Q de Ljung–Box aplicada sobre las autocorrelaciones de las series mostró valores significativos, lo cual evidencia la ausencia de ruido blanco y valida la calidad del proceso de suavizado y filtrado implementado.

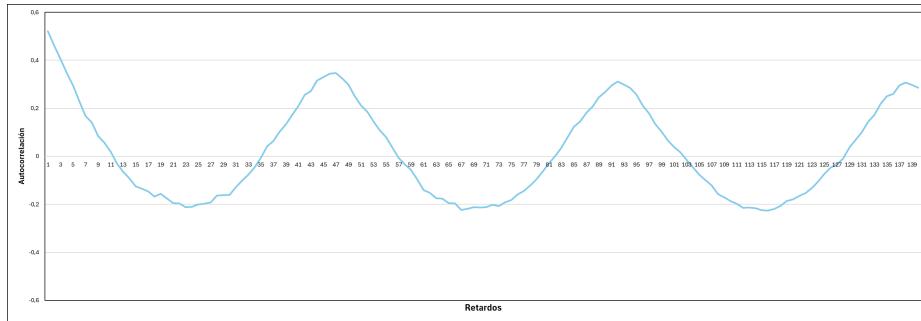


Figura 4: Función de autocorrelación media de los 200 píxeles.

El análisis espectral mediante el periodograma permitió identificar las frecuencias dominantes de las series temporales. La máxima ordenada se presentó en el periodo 23, correspondiente a un ciclo semianual, el cual explica el 33,51 % de la varianza total, evidenciando una marcada periodicidad asociada a la dinámica agrícola del maíz en Colonche. Además, se observó un segundo pico en el periodo 46, representativo del ciclo anual completo (365 días), cuya contribución a la varianza fue del 6,69 %, como se muestra en la Figura 5, lo que indica la presencia de una componente estacional secundaria de menor intensidad, posiblemente vinculada al calendario agrícola principal o a variaciones climáticas de carácter anual. Este segundo pico podría estar asociado a diversos procesos fenológicos, incluyendo la posible ocurrencia de rebrotos, siembras tardías o el crecimiento de malas hierbas. Tampoco se descarta que este comportamiento responda a la existencia de dobles ciclos de cultivo en determinados sectores o a la contribución de otros cultivos y coberturas dentro de los píxeles analizados. La presencia de picos anuales y semianuales ha sido reportada

también en estudios de crecimiento vegetal basados en índices MODIS, reflejando la influencia conjunta de la estacionalidad climática y la actividad agrícola [22].

La presencia de ambos picos uno anual y semianual sugiere que la dinámica del NDVI en la región no responde a un único patrón, sino que incorpora una variabilidad intraanual compleja que puede estar influenciada por factores agroclimáticos y manejo del cultivo. Este comportamiento coincide con los resultados observados en la curva del año medio, donde también se evidenció un segundo incremento de NDVI hacia septiembre. La similitud entre ambos análisis (periodograma y año medio) confirma la validez de la interpretación y que el cultivo de maíz en Colonche presenta una estructura fenológica bimodal, dominada por un ciclo principal y un evento secundario de menor intensidad. Este tipo de respuesta bimodal del cultivo podría estar asociada a prácticas de re-siembra o eventos climáticos intermedios, fenómeno documentado en ecosistemas agrícolas semiáridos [23].

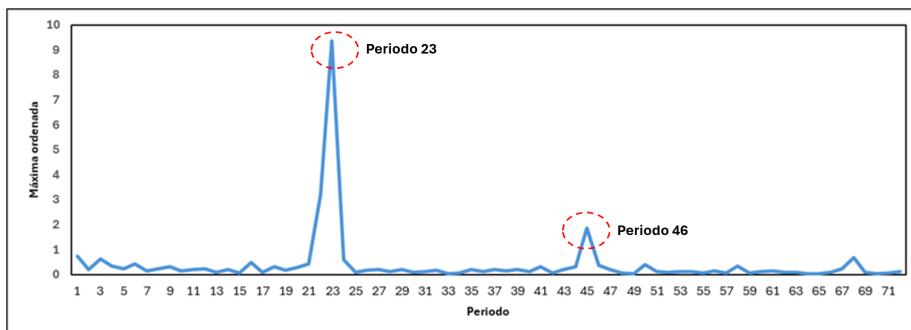


Figura 5: Periodograma medio de los 200 píxeles.

Determinación de la fecha de máximo verdor del cultivo mediante el año medio de NDVI

La metodología del año medio aplicada a las series temporales filtradas permitió resumir la variabilidad

interanual del NDVI y determinar con precisión las fechas características del ciclo fenológico del maíz. El cálculo se realizó mediante las tablas de Buys–Ballot, promediando los valores de NDVI correspondientes a la misma fecha

MODIS a lo largo de todos los años del periodo de estudio. Este resultado proporciona una curva representativa del comportamiento vegetativo promedio del cultivo en la parroquia Colonche.

De acuerdo con el calendario agrícola local la siembra del maíz se realiza principalmente entre el 1 y el 17 de enero, lo cual coincide con el inicio de la fase de establecimiento observada en la curva del año medio. La curva presenta un patrón fenológico claramente definido, como se observa en la Figura 6, con tres fases principales: a) Fase de establecimiento y crecimiento inicial (enero–febrero), con valores de NDVI inferiores a 0,35, correspondientes a la germinación y primeras etapas de acumulación de biomasa foliar; b) Fase de máximo verdor o vigor vegetativo (marzo–abril), en la cual se alcanza el valor máximo promedio de NDVI de 0,64, registrado el 22 de marzo (fecha MODIS 11). Este máximo verdor ocurre aproximadamente 70 a 80 días después de la siembra, coincidiendo con la fase fenológica de mayor acumulación de biomasa foliar; c) Fase de senescencia (mayo–junio), donde el NDVI disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo de 0,20 alrededor del 24 de octubre (fecha MODIS 38), reflejando la pérdida de vigor foliar y la finalización del ciclo productivo.

Adicionalmente, se observa un segundo incremento parcial del NDVI hacia septiembre (fecha MODIS 33), con un valor de 0,36. Este pico secundario podría explicarse por humedad residual posterior a eventos lluviosos aislados, prácticas de

re-siembra, rotaciones cortas o la coexistencia de coberturas vegetales mixtas dentro del área analizada.

Para evaluar la estabilidad interanual del ciclo fenológico, se incorporaron indicadores de variabilidad alrededor del año medio. El análisis mostró una desviación estándar del NDVI de 0,127 y un intervalo de confianza del 95 % de $\pm 0,037$, lo que indica que, a pesar de la variabilidad climática propia de la zona, la fecha del máximo verdor es relativamente estable entre años.

El patrón obtenido demuestra que el ciclo del maíz en Colonche está estrechamente sincronizado con la estacionalidad climática regional, donde las lluvias inician a principios de año y favorecen el rápido incremento del vigor vegetativo. La identificación precisa de las fechas de siembra y del máximo verdor permite estimar de forma indirecta los períodos óptimos de manejo agronómico, facilitando la planificación de fertilización, control de plagas y determinación de la fecha de cosecha. Asimismo, la metodología del año medio constituye una herramienta eficiente para el monitoreo continuo del cultivo en zonas tropicales, especialmente en aquellas afectadas por alta nubosidad que limita la observación de las imágenes satelitales. El análisis del año medio, reforzado con medidas de variabilidad, constituye un enfoque robusto para estudiar la dinámica interanual del verdor y reducir la influencia de factores climáticos extremos[24].

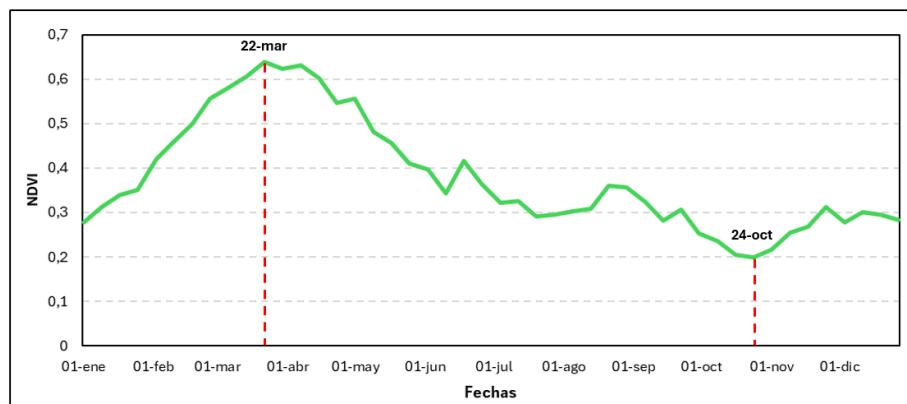


Figura 6: Año medio de NDVI de los 200 píxeles.

Entre las principales limitaciones del estudio se destacan la resolución espacial de 500 m, que produce mezcla espectral, las diferencias de manejo agrícola entre parcelas y la imposibilidad de validar datos en campo para todos los años del periodo. A diferencia de Sáenz *et al.* [25], quienes emplearon píxeles puros a 10 m de Sentinel-2 pero con una serie temporal corta, este estudio aprovecha más de dos décadas de NDVI con MODIS, lo que permite una caracterización fenológica más robusta y estable en el tiempo.

4. Conclusiones

La combinación de teledetección y análisis estadístico de series de temporales de NDVI representa un enfoque de bajo costo y alta eficiencia para el monitoreo continuo de cultivos. Esta metodología es especialmente relevante en

regiones tropicales como es la parroquia Colonche, donde la nubosidad frecuente dificulta el seguimiento mediante observaciones de imágenes satelitales. Además, se confirma la utilidad del NDVI como indicador del vigor vegetal y demuestra el potencial del producto MOD09A1.V061 para la detección del máximo verdor del maíz. Se recomienda ampliar el análisis a otras zonas agrícolas y ciclos de cultivo para fortalecer la capacidad de contribuir al desarrollo de sistemas de alerta y planificación agrícola basados en observaciones satelitales.

Financiamiento:

Los autores expresan que han sido financiados por la Universidad Agraria del Ecuador esta obra de investigación.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de autor/es:

Bajo los lineamientos CRediT (Taxonomía de Roles de Contribuyente), los autores dan fe de las contribuciones realizadas al trabajo de investigación, que se detallan: Autor 1: visualización, revisión, redacción, validación, supervisión, administración, recursos, software, análisis, conducción, curación de datos, metodología, conceptualización, adquisición de financiamiento. Coautor: visualización, revisión, redacción, supervisión, adquisición de financiamiento.

5. Referencias

1. ESPINOZA, I. F.; BARRERA, A. E.; SÁNCHEZ, A. R.; MEDINA, M. L. y GARCÍA, A. R. Elaboración de ensilaje de maíz forrajero (*Zea mays*) y residuos de banano verde (*Musa paradisiaca*) para ovinos tropicales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*, 7(5), 2817–2828. 2023, vol. 7, n.º 5, págs. 2817-2828. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.7921.
2. PAREDES, M. y DÍAZ, M. Sustitución del pienso de finalización por maíz amarillo en pollos criollos. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*. 2023, vol. 34, n.º 1, e24612. Disponible en: <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i1.24612>.
3. ARIZALA, J.; NEMOCÓN-COBOS, A. M.; POSADA-OCHOA, S. L. y MAHECHA-LEDESMA, L. Producción, calidad de leche y análisis económico de vacas Holstein suplementadas con ensilaje de botón de oro (*Tithonia diversifolia*) o ensilaje de maíz. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 2022, vol. 20, n.º 1, págs. 27-40. Disponible en: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n1.2022.1535>.
4. GARCÍA, D. C.; SOTO, J. C.; LOZANO, N. A.; YUCAILLA, V. A.; TOBAR, A. C. y OROZCO, R. L. Evaluación productiva de cabritos criollos (*Capra hircus*) con suplementación de alimento balanceado y forraje verde hidropónico de maíz y el efecto sobre los parámetros orgonométricos. *Archivos de Zootecnia*. 2025, vol. 74, n.º 286, págs. 107-114. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10222961>.
5. TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979, vol. 8, n.º 2, págs. 127-150. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
6. SAVITZKY, A. y GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 1964, vol. 36, n.º 8, págs. 1627-1639. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
7. WANG, C.; CUI, A.; JI, R.; HUANG, S.; LI, P.; CHEN, N. y SHAO, Z. Spatiotemporal responses of global vegetation growth to terrestrial water storage. *Remote Sensing*. 2025, vol. 17, n.º 10, pág. 1701. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs17101701>.
8. LJUNG, G. M. y BOX, G. E. P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*. 1978, vol. 65, n.º 2, págs. 297-303. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>.
9. BUYS BALLOT, C. H. D. Les changements périodiques de température, dépendants de la nature du soleil et de la lune, mis en rapport avec le pronostic du temps, déduits d'observations néerlandaises de 1729 à 1846. 1847. Disponible en: https://play.google.com/store/books/details?id=DIa_AAAcAAJ.
10. SANTANA, C. T. C.; SANCHES, I. D.; CALDAS, M. M. y ADAMI, M. A Method for Estimating Soybean Sowing, Beginning Seed, and Harvesting Dates in Brazil Using NDVI-MODIS Data. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, n.º 14, pág. 2520. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs16142520>.
11. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA. INAMHI. *Anuario meteorológico*. 2017. Disponible en: <https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-meteorologicos/>.
12. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA. *Catálogo de datos abiertos*. MAG. 2025. Disponible en: <https://www.datosabiertos.gob.ec/dataset/?q=MAIZ>.
13. VERMOTE, E. MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V061 [Base de datos]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.061>.
14. BOUSKOUR, S.; ZAGGAF, M. H.; BAHATTI, L. y ZAYRIT, S. MODIS-NDVI and wheat yield patterns and predictions in Taounate, Morocco. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2024, vol. 37, n.º 1, págs. 648-659. Disponible en: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v37.i1.pp648-659>.
15. PATIL, P. P.; JAGTAP, M. P.; KHATRI, N.; MADAN, H.; VADDURI, A. A. y PATODIA, T. Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote-sensing-based study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024, vol. 9, pág. 100573.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100573>.

16. ZHANG, T. T.; QI, J. G.; GAO, Y.; OUYANG, Z. T.; ZENG, S. L. y ZHAO, B. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. *Ecological Indicators*. 2015, vol. 52, págs. 480-489. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.004>.

17. CAI, Y.; LIN, H. y ZHANG, M. Mapping paddy rice by the object-based random forest method using time series Sentinel-1/Sentinel-2 data. *Advances in Space Research*. 2019, vol. 64, n.º 11, págs. 2233-2244. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.042>.

18. CAO, R.; CHEN, Y.; SHEN, M.; CHEN, J.; ZHOU, J.; WANG, C. y YANG, W. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*. 2018, vol. 217, págs. 244-257. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.022>.

19. HAMILTON, J. D. *Time Series Analysis*. Princeton University Press. 1994. Disponible en: https://api.pageplace.de/preview/DT0400_9780691218632_A40156688/preview-9780691218632_A40156688.pdf.

20. JEBA, R. P.; KIRTHIGA, S. M.; ISSAC, A. M.; BINDHU, V. M.; SRINIVASAN, R. y NARASIMHAN, B. An improved framework for mapping and assessment of dynamics in cropping pattern and crop calendar from NDVI time series across a heterogeneous agro-climatic region. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024, vol. 196, n.º 11, pág. 1141. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-13270-1>.

21. DASTIGERDI, M.; NADI, M.; SARJAZ, M. R. y KIAPASHA, K. Trend analysis of MODIS NDVI time series and its relationship to temperature and precipitation in Northeastern of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024, vol. 196, n.º 4, pág. 346. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-12463-y>.

22. JABAL, Z. K.; KHAYYUM, T. S. y ALWAN, I. A. Impact of climate change on crop productivity using MODIS-NDVI time series. *Civil Engineering Journal*. 2022, vol. 8, n.º 6, págs. 1136-1156. Disponible en: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-04>.

23. SÁENZ, C.; CICUÉNDEZ, V.; RECUERO, L.; WIESE, K.; PALACIOS-ORUETA, A. y LITAGO, J. Analysis and Modeling of Rainfed Crops Dynamics Based on NDVI Time Series in Central Spain. *IntechOpen*. 2023. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/1155570>.

24. YUAN, Z.; BAO, G.; DORJSUREN, A.; OYONT, A.; CHEN, J.; LI, F.; DONG, G.; GUO, E.; SHAO, C. y DU, L. Climatic constraints of spring phenology on the Mongolian Plateau (1982–2021). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024, vol. 129, n.º 2, e2023JG007689. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2023JG007689>.

25. SÁENZ, C.; CICUÉNDEZ, V.; GARCÍA, G.; MADRUGA, D.; RECUERO, L.; BERMEJO-SAIZ, A.; LITAGO, J.; CALLE, I. de la y PALACIOS-ORUETA, A. New Insights on the Information Content of the Normalized Difference Vegetation Index Sentinel-2 Time Series for Assessing Vegetation Dynamics. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, n.º 16, pág. 2980. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs16162980>.



Artículo de libre acceso bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.