

Aplicación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para el monitoreo de las fases fenológicas en vid (*Vitis vinifera* var. Torrontés Riojano)

Recalde, Darío Jesús^{1,2} [0009-0009-2394-4585], Dávila Cruz, Gustavo Carlos^{1,2} [0009-0004-7412-8960], González Ribot, Joaquín Víctor^{1,2} [0009-0008-2968-0325]

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Estación Experimental Agropecuaria Chilecito. recalde.dario@inta.gob.ar. Ruta de La Producción Km 7, CP 5360, Chilecito, La Rioja.

² Universidad Nacional de Chilecito, 9 de Julio Nro. 22, Chilecito, La Rioja, Argentina

Resumen. El seguimiento de las fases fenológicas en los cultivos es esencial para un manejo agrícola eficiente, ya que permite adaptar las decisiones productivas al estado de desarrollo de las plantas. En el caso de la vid (*Vitis vinifera* L.), estas fases reflejan transformaciones fisiológicas y morfológicas influenciadas por factores climáticos, hídricos y de manejo. En este contexto, los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales ofrecen herramientas precisas y no invasivas para monitorear el crecimiento vegetal a lo largo del ciclo fenológico. Este estudio analizó la relación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y las fases fenológicas del cultivo de vid, variedad Torrontés Riojano, en tres fincas del Valle de Antinaco - Los Colorados, en La Rioja, Argentina.

Se utilizaron imágenes satelitales PlanetScope de alta resolución tomadas durante una campaña agrícola completa. A partir de estas imágenes se calcularon los valores de NDVI por finca y fecha. Paralelamente, se realizaron observaciones de campo para registrar la fase fenológica correspondiente a cada imagen.

Los resultados mostraron una relación positiva entre el NDVI y el avance del ciclo fenológico, con diferentes intensidades entre fincas. En las tres unidades de estudio se observó un patrón común: crecimiento lento del NDVI en las etapas iniciales, incremento acelerado en las fases medias, y estabilización en las fases finales, lo que sugiere una evolución sigmoide. También se identificaron diferencias en los niveles de NDVI entre las fincas, destacándose Finca 3 con valores más altos a lo largo del ciclo.

Este enfoque evidencia el valor del uso combinado de imágenes satelitales y observaciones de campo para el seguimiento de la fenología en vid. El NDVI se comportó como un indicador sensible del estado de desarrollo del cultivo, permitiendo visualizar diferencias entre unidades productivas y ofreciendo una base sólida para futuras aplicaciones en el manejo agrícola.

Palabras claves: Antinaco Los Colorados, Fenología, NDVI, Vid, Torrontés Riojano.

Application of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for Monitoring Phenological Stages in Grapevine (*Vitis vinifera* var. Torrontés Riojano)

Abstract. The monitoring of phenological phases in crops is essential for efficient agricultural management, as it allows production decisions to be adapted to the state of development of the plants. In the case of grapevine (*Vitis vinifera* L.), these phases reflect physiological and morphological transformations influenced by climatic, water and management factors. In this context, vegetation indices derived from satellite images offer accurate and non-invasive tools to monitor plant growth throughout the phenological cycle. This study analysed the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the phenological phases of the grapevine variety Torrontés Riojano in three farms in the Antinaco - Los Colorados Valley, La Rioja, Argentina.

High-resolution PlanetScope satellite images taken during a complete agricultural season were used. NDVI values per farm and date were calculated from these images. At the same time, field observations were made to record the phenological phase corresponding to each image.

The results showed a positive relationship between NDVI and the advance of the phenological cycle, with different intensities between farms. A common pattern was observed in the three study units: slow growth of NDVI in the initial stages, accelerated increase in the middle stages, and stabilisation in the final stages, suggesting a sigmoidal evolution. Differences in NDVI levels were also identified between farms, with Farm 3 standing out with higher values throughout the cycle. This approach demonstrates the value of the combined use of satellite images and field observations for monitoring phenology in grapevine. The NDVI behaved as a sensitive indicator of the state of development of the crop, making it possible to visualise differences between production units and providing a solid basis for future applications in agricultural management.

Keywords: Antinaco Los Colorados, Phenology, NDVI, Grapevine, Torrontés Riojano

1 Introducción y Marco Teórico

La fenología agrícola, entendida como el estudio de los estados de desarrollo de las plantas en relación con variables ambientales, se constituye como una herramienta esencial en el manejo agronómico, ya que permite anticipar con precisión momentos clave del ciclo biológico de los cultivos [19]. En especies perennes como la vid (*Vitis vinifera* L.), fases fenológicas como brotación, floración, cuaje, envero y maduración, son momentos de importancia para definir el momento de prácticas como la poda, fertilización, riego y cosecha [2][26].

En concordancia con lo mencionado, particularmente en regiones áridas y semiáridas como el Valle Antinaco – Los Colorados en la provincia de La Rioja, Argentina, el seguimiento fenológico adquiere una relevancia especial. Estas zonas, caracterizadas por una alta radiación solar, escasa precipitación y una marcada amplitud térmica, como las distinguidas para la provincia geográfica del Monte, presentan una dinámica ecológica compleja [1] [3] [20] [22]. En este ámbito, el cultivo de la variedad Torrontés Riojano enfrenta desafíos derivados de la disponibilidad hídrica y los extremos térmicos, factores que inciden directamente sobre el ritmo fenológico y la calidad del fruto.

Es así como la expresión fenológica del viñedo se encuentra determinada por variables ambientales como temperatura, radiación, latitud y régimen hídrico, además de condicionantes genéticos propios de cada cultivar. Entre estas, la temperatura se destaca como el principal motor del desarrollo vegetal, y su medición a través de la acumulación térmica o grados-día permite modelar y predecir la ocurrencia de eventos fenológicos clave [14]. La fenología, además de servir al manejo productivo, ofrece un marco conceptual para evaluar la adaptabilidad varietal a distintos terroirs, y anticipar riesgos como heladas tardías o déficit hídrico prolongado [25].

En este contexto, las observaciones de campo proporcionan información precisa, su implementación en sistemas productivos extensivos resulta limitada por el tiempo, la necesidad de personal especializado y la falta de escalabilidad. Este escenario ha motivado la creciente incorporación de herramientas de teledetección, capaces de observar la vegetación en intervalos temporales frecuentes y a distintas escalas espaciales, desde parcelas hasta paisajes regionales [4] [6].

Ante este escenario, han adquirido relevancia herramientas como los índices espectrales derivados de imágenes satelitales. El más ampliamente utilizado es el NDVI, calculado a partir de la reflectancia en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. El NDVI permite estimar la densidad y la salud de la vegetación y se correlaciona con variables como la biomasa, el área foliar, la actividad fotosintética y el vigor del cultivo [10] [13] [18].

En este ámbito, [7] [30] [31], han documentado la relación entre NDVI y el desarrollo fenológico en diversos cultivos frutales y forestales. En el caso de la vid, se ha comprobado que el NDVI varía de forma significativa entre fases como la brotación, el envero y la maduración, permitiendo un seguimiento fenológico indirecto pero confiable [5] [11] [12]. La capacidad del NDVI para reflejar los cambios fenológicos está especialmente potenciada por el uso de sensores satelitales de alta resolución espacial y temporal.

En este sentido, la constelación PlanetScope, que proporciona imágenes diarias a 3 metros de resolución, se presenta como una herramienta de relevancia en estudios de vitivinicultura de precisión [8], debido a que estas imágenes permiten detectar variaciones en el dosel vegetal y evaluar la heterogeneidad fenológica intra e interespecífica, lo cual es fundamental en viñedos sometidos a diferentes manejos agronómicos o condiciones microclimáticas [7].

En este escenario particular, [18] [32] [33] demostraron que el análisis de series temporales de NDVI permite identificar puntos de inflexión en la curva estacional del índice, los cuales se corresponden con fases fenológicas específicas. Este enfoque ha sido replicado en cultivos como arroz, trigo, maíz y más recientemente, en vides. La posibilidad de identificar fenómenos como la brotación anticipada o el retraso en la maduración a través de las fases fenológicas, abre nuevas oportunidades para la toma de decisiones en tiempo real.

En términos agronómicos, la fenología también cumple una función estratégica. La sincronización de prácticas como la fertilización o el control sanitario con etapas fenológicas específicas puede optimizar recursos y aumentar la sostenibilidad del sistema. Más aún, en un escenario de cambio climático, donde las estaciones tienden a desfazarse y los eventos extremos son más frecuentes, un sistema de alerta temprana basado en datos espectrales puede mejorar la resiliencia del agroecosistema vitícola [7] [19].

Asimismo, la flexibilidad fenológica, entendida como la capacidad de las plantas para ajustar su desarrollo a condiciones variables, puede detectarse a partir de variaciones en las curvas de NDVI. Estas fluctuaciones, detectadas a lo largo del ciclo del cultivo o entre ciclos sucesivos, permiten evaluar respuestas adaptativas al ambiente y constituyen un insumo clave para la selección varietal y el diseño de estrategias de manejo diferenciado [7].

El presente estudio se orienta a analizar la relación entre el NDVI, obtenido a partir de imágenes satelitales PlanetScope, y las fases fenológicas del cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.) variedad Torrontés Riojano, en tres fincas ubicada en el Valle Antinaco – Los Colorados. Se busca verificar la capacidad del índice para identificar de forma remota los eventos del ciclo fenológico.

2 Área de estudio

El presente estudio se centra en el Valle Antinaco-Los Colorados, ubicado en la provincia de La Rioja, Argentina. Este valle abarca aproximadamente 7.500 km² y se encuentra al oeste de la provincia. Su extensión es de 150 km de norte a sur y unos 65 km de este a oeste (Figura 1). Está delimitado por dos cadenas montañosas paralelas con orientación predominante norte-sur: la Sierra del Velasco, al este, con una altitud de 4.100 msnm, y la Sierra del Famatina, al oeste, alcanzando los 6.100 msnm.

Desde el punto de vista fitogeográfico, el valle forma parte de la región del Monte, una unidad ecológica que abarca aproximadamente 460.000 km² [3] [22]. Esta región se encuentra dentro de la zona árida templada de Argentina, extendiéndose entre los 24° 35' y 44° 2' S de latitud, y los 62° 54' y 69° 5' O de longitud [27]. Su distribución abarca desde la provincia de Salta, en el norte, hasta el extremo sur de Buenos Aires,

incluyendo áreas de Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro, Chubut y el sudoeste de San Luis.

El clima de la región del Monte se caracteriza por su aridez y una escasa variabilidad térmica de norte a sur. La vegetación predominante es una estepa arbustiva xerófila y halófila, con presencia de bosques de algarrobos en zonas donde la napa freática es más superficial. Las especies vegetales más representativas incluyen jarillas y retamos.

Según [1] y [20], el oeste de la provincia de La Rioja es considerado una zona árida, donde el desarrollo agrícola y otras actividades sociales dependen del aporte nivoglacial de los ríos provenientes de las montañas circundantes, así como del agua subterránea acumulada progresivamente a partir de esta misma fuente.

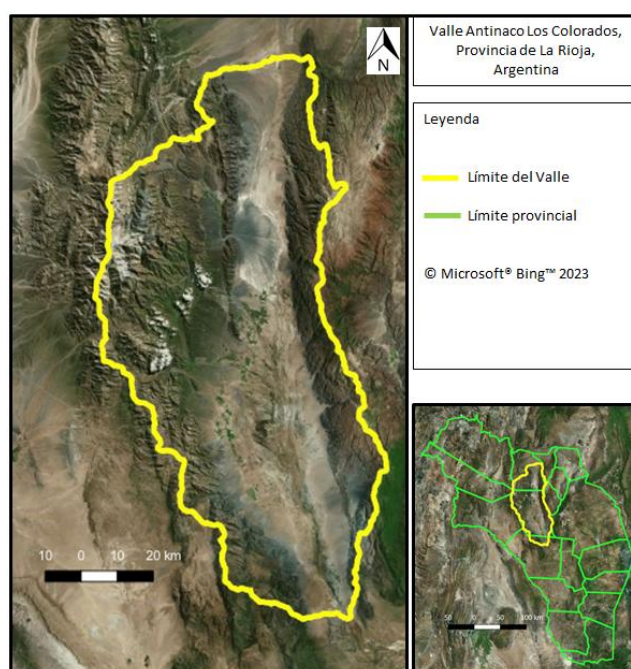


Figura 1. Ubicación del Valle Antinaco Los Colorados en la Provincia de La Rioja
Fuente: [24]

En este ámbito, el valle que integra los departamentos de Chilecito y Famatina, constituye uno de los principales polos agroindustriales del Noroeste Argentino (NOA). Esta región presenta un clima semiárido cálido, caracterizado por precipitaciones anuales inferiores a los 200 mm, más de 300 días de alta radiación solar al año y una amplitud térmica diaria superior a los 15 °C durante el verano. Estas condiciones climáticas favorecen significativamente la síntesis de azúcares y compuestos fenólicos en frutos, influyendo positivamente en su calidad organoléptica y potencial agroindustrial.

En el ámbito de la vitivinicultura, el valle concentra más del 80 % de las 7.210 hectáreas de vid implantadas en la provincia de La Rioja, siendo las variedades Torrontés Riojano, Bonarda, Malbec y apirenas como Fiesta y Flame Seedless las de mayor presencia. Estas últimas están destinadas principalmente a la elaboración de pasas. La

localidad de Chilecito lidera la producción de vinos con indicación geográfica “Valle de Famatina”, lo que refuerza la identidad vitivinícola de la zona [16].

En cuanto a la olivicultura, la región alberga aproximadamente el 70% de las 29.000 hectáreas de olivo implantadas en la provincia. Se destacan los cultivares Arauco, Arbequina, Picual y Coratina, cultivados tanto en sistemas tradicionales como en superintensivos en seto, lo cual refleja la modernización tecnológica del sector [15] [21].

El complejo agroindustrial regional comprende más de 900 viñedos y plantas elaboradoras, con participación activa de cooperativas, pequeñas y medianas empresas exportadoras, así como compañías de capital mixto [9] [16]. A ello se suma la expansión reciente del cultivo de nogal (*Juglans regia*), que supera las 1.000 hectáreas implantadas y posiciona a la provincia como el tercer productor nacional [16].

Estas condiciones agroecológicas, junto con la implementación de tecnologías de riego presurizado y una estructura productiva consolidada, posicionan al valle como un territorio estratégico para el desarrollo de cadenas de valor agroalimentarias con alto grado de diferenciación y proyección nacional e internacional.

3 Metodología

Relevamiento fenológico a campo:

El estudio se llevó a cabo durante la campaña 2024/2025 en fincas con sistema de conducción en parral, riego por goteo y manejo orgánico. Para ello, se seleccionaron tres cuadros de entre 2 y 3 hectáreas en tres fincas ubicadas en los principales distritos productivos del Valle Antinaco Los Colorados: Malligasta, Nonogasta y Vichigasta. Estas zonas representan condiciones agroecológicas diversas dentro del valle, tal que permiten una evaluación integral del comportamiento fenológico de la vid.

En cada cuadro se seleccionaron tres plantas representativas en términos de vigor y desarrollo, asegurando que estuvieran equidistantes entre sí para capturar la variabilidad existente dentro de la fila. En cada planta se marcaron cuatro brazos orientados hacia los puntos cardinales: norte, sur, este y oeste. Antes del inicio del ciclo vegetativo, se registró el número de yemas remanentes tras la poda, obteniendo un promedio de 15 yemas por brazo, lo que representa un total aproximado de 180 yemas por finca.

El seguimiento fenológico comenzó con el inicio del ciclo vegetativo, realizándose registros semanales de la evolución de cada una de las yemas seleccionadas. Para la identificación de las distintas fases de desarrollo, se empleó la escala fenológica propuesta por [2] (Tabla 1), ampliamente utilizada en estudios vitícolas para la descripción del crecimiento y desarrollo de la vid. Este sistema permitió caracterizar de manera precisa el avance del ciclo fenológico y su relación con las condiciones climáticas de cada localidad estudiada.

Fase fenológica	Codificación	Fase fenológica	Codificación
Yema de invierno	1	Floración	9
Yema de algodón	2	Cuajado	10
Punta verde	3	Grano arveja	11
Hojas incipientes	4	Racimo cernido	12

Hojas extendidas	5	Envero	13
Racimos visibles	6	Maduración	14
Racimos separados	7	Agostamiento	15
Botones florales separados	8	Caída de hojas	16

Tabla 1. Fases fenológicas adaptado de [2].

Análisis de imágenes:

Para este estudio se utilizaron imágenes PlanetScope que son producto de una constelación de satélites que consta de más de 180 CubeSats lanzados por Planet Labs Inc. Estos satélites proporcionan imágenes de alta resolución espacial (3 m) con un período de revisita de un día en el nadir. Las imágenes contienen cuatro bandas espectrales, a saber, azul (455–515 nm), verde (500–590 nm), rojo (590–670 nm) e infrarrojo cercano (NIR, 780–860 nm) [23].

Se obtuvo un total de 57 imágenes de reflectancia superficial de 4 bandas de PlanetScope de Nivel 3B en 2024/2025 con menos del 1 % de cobertura de nubes ya recordadas por parcela de interés, corregidas atmosférica y radiométricamente, descargadas desde la plataforma Planet Explore (<https://www.planet.com/explorer/>). Cada imagen coincidía con el día de muestreo fenológico a campo en cada parcela.

La variable considerada fue el índice de vegetación normalizado (NDVI) promedio por parcela y por finca en cada una de las fechas de muestreo fenológico. Para el análisis de las imágenes y obtención del NDVI se usó el software QGIS 3.32.0 Lima, los índices de vegetación son transformaciones espectrales de al menos dos bandas espectrales, seleccionadas específicamente para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación a la reflectancia superficial. Se ha reportado ampliamente la trayectoria fenológica o los cambios estacionales e interanuales en el crecimiento y la actividad de la vegetación [17].

El NDVI se calculó con la siguiente ecuación:

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

Donde:

NIR (Infrarrojo Cercano): Banda de 780–860 nm

Rojo: Banda de 590–670 nm

Una vez obtenidas las capas de NDVI para cada parcela se procedió a la elaboración de las estadísticas para cada fecha a través de la herramienta estadística de zona del software QGIS.

Los análisis estadísticos fueron efectuados mediante el software RStudio.

4 Resultados

Para el análisis de la relación entre el NDVI y las fases fenológicas del cultivo de vid, se realizaron procedimientos estadísticos que permitieron evaluar tanto la distri-

bución de los datos como la naturaleza de su asociación. Inicialmente, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para verificar el supuesto de normalidad en la distribución de los valores de NDVI dentro de cada finca. Los resultados indicaron que los datos no seguían una distribución normal en ninguna de las tres fincas ($p < 0.05$), lo que justificó la adopción de métodos no paramétricos para los análisis posteriores.

Con el objetivo de explorar la relación entre el índice NDVI y la fase fenológica, se calculó la correlación de Spearman de forma independiente para cada finca (Tabla 2)

Finca	Coefficiente ρ	Valor-p	Interpretación
Finca 1	0.65	0.0028	Correlación positiva significativa
Finca 2	0.65	0.0024	Correlación positiva significativa
Finca 3	0.84	<0.00001	Correlación positiva fuerte y altamente significativa

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Spearman entre NDVI y fases fenológicas en tres fincas de vid (elaboración propia)

En los tres casos, se observaron asociaciones positivas y estadísticamente significativas. La correlación positiva entre NDVI y fases fenológicas en todas las fincas indica que, en todas las fincas, el NDVI tiende a aumentar conforme avanza el ciclo fenológico, aunque con intensidades diferentes, la Finca 3 destaca por presentar una relación más fuerte, posiblemente debido a mejores condiciones agronómicas o climáticas.

Para modelar esta relación de manera adecuada, se ajustó un Modelo Aditivo Generalizado (GAM) que incluyó un término suavizado para la fase fenológica ($s(\text{Fase})$) y efectos fijos por finca (Tabla 3).

Elemento del modelo	Resultado
Término suavizado $s(\text{Fase})$	$p < 2e-16$
R^2 ajustado	0.922
Comparación entre Fincas	Finca 3 > Finca 1 ($p = 0.0025$)
Finca 2 vs otras fincas	No diferencias significativas

Tabla 3. Resultados del ajuste del Modelo Aditivo Generalizado (GAM) para NDVI en función de fase fenológica y finca.

Fuente: Elaboración propia.

El ajuste del GAM muestra un modelo altamente significativo ($p < 2e-16$ para el término suavizado) y detectó una relación real y sólida entre NDVI y fases de crecimiento. Las tendencias suaves reflejan la evolución fenológica gradual del cultivo de vid, con un incremento en la cobertura verde que se estabiliza en fases avanzadas y explicó el 92.2% de la variación observada en los valores de NDVI, lo que evidencia su capacidad de ajuste y robustez.

El modelo también permitió comparar niveles de NDVI entre fincas en las cuales la Finca 3 mostró valores significativamente más altos de NDVI en comparación con Finca 1 ($p = 0.0025$), mientras que no se registraron diferencias significativas entre Finca 2 y las demás. Estas diferencias sugieren que, si bien el patrón de evolución fenológica fue similar en todas las unidades, existen variaciones en el nivel de respuesta

del cultivo que podrían atribuirse a condiciones edáficas, prácticas de manejo o microclimas particulares de cada finca.

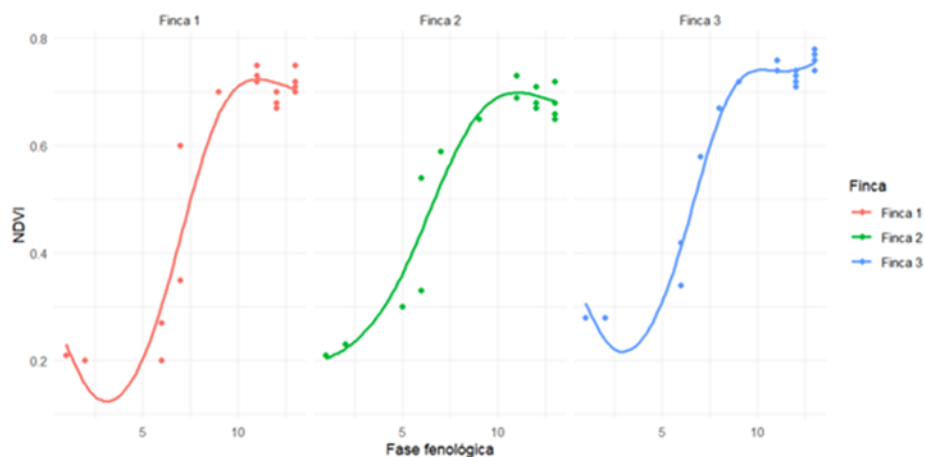


Figura 2. Ajuste del GAM para NDVI vs fase fenológica por finca.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se puede observar que cada curva representa el comportamiento del NDVI a lo largo de las fases para una finca específica, mostrando un patrón de aumento progresivo, aunque con diferencias en el nivel máximo alcanzado.

Asimismo, se utilizó el test de Kruskal-Wallis para comparar el NDVI entre fincas, con el cual se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($\chi^2 = 7.35$, $p = 0.025$), lo que sugiere variabilidad en la respuesta vegetativa entre unidades de manejo (Tabla 4). Posteriormente, se aplicó el mismo test para evaluar la evolución del NDVI a lo largo de las fases fenológicas, arrojando un resultado altamente significativo, lo cual expresa que el desarrollo fenológico influye marcadamente en la variación del NDVI.

Prueba / Comparación	Resultado
Kruskal-Wallis (NDVI entre fincas)	$\chi^2 = 7.35$, $p = 0.025$
Kruskal-Wallis (NDVI entre fases)	$\chi^2 = 39.82$, $p = 8.2e-06$
Fase 1 vs Fase 11	$p_{adj} = 0.0187$
Fase 1 vs Fase 13	$p_{adj} = 0.0481$
Fase 2 vs Fase 11	$p_{adj} = 0.0176$
Fase 2 vs Fase 13	$p_{adj} = 0.0455$
Otras comparaciones	No significativas tras corrección

Tabla 4. Comparaciones estadísticas no paramétricas de NDVI entre fincas y entre fases fenológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar entre qué fases ocurren estas diferencias, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Dunn con corrección de Bonferroni. Se hallaron diferencias significativas entre la fase 1 y las fases 11 y 13, así como entre la fase 2 y las fases 11

y 13. Estos resultados reflejan un incremento significativo del NDVI en fases más avanzadas del cultivo, lo cual es consistente con el aumento de biomasa verde durante el desarrollo fenológico. Las comparaciones restantes no mostraron diferencias estadísticamente significativas tras la corrección, lo que sugiere una estabilización del índice en fases intermedias.

El boxplot (Figura 3) muestra la distribución del índice de vegetación NDVI para distintas fases fenológicas del cultivo, permitiendo observar cambios en la vegetación a lo largo del ciclo de desarrollo. A medida que se avanza en las fases, se nota un incremento general en los valores de NDVI, lo cual es consistente con el crecimiento y desarrollo del dosel vegetal. En las fases tempranas (1, 2 y 5), el NDVI es bajo, indicando poca cobertura vegetal, probablemente correspondiente a la siembra o emergencia del cultivo. A partir de la fase 6 en adelante, se observa un aumento progresivo del NDVI, alcanzando valores medios y altos en fases como la 9, 11, 12 y 13, donde se puede inferir que el cultivo se encuentra en su máximo desarrollo vegetativo o en fases reproductivas. Este patrón es típico en cultivos saludables, ya que el NDVI se relaciona positivamente con la biomasa verde.

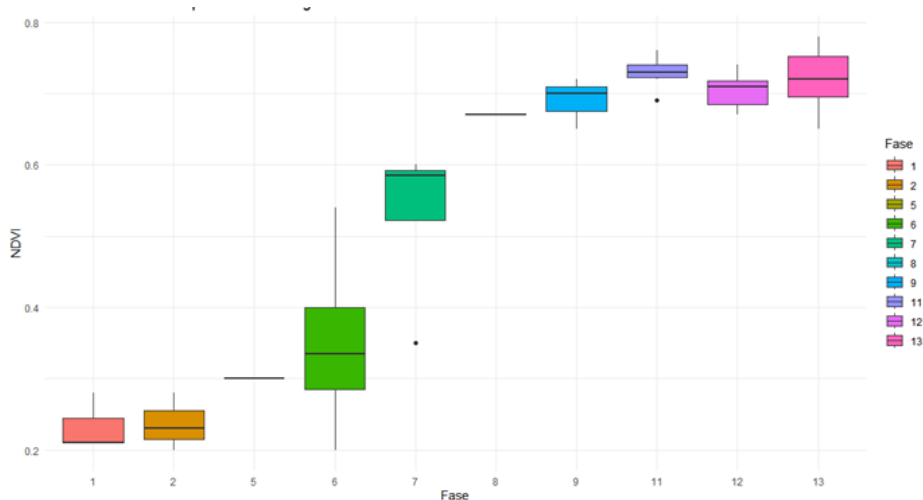


Figura 3. Distribución de NDVI en distintas fases fenológicas.

Fuente: Elaboración propia.

La dispersión de los datos, indicada por la altura de las cajas y la presencia de valores atípicos, sugiere variabilidad entre parcelas o condiciones ambientales dentro de una misma fase. En particular, la fase 6 presenta mayor variabilidad, posiblemente reflejando una transición crítica en el desarrollo del cultivo. En contraste, fases como la 8 y 11 muestran una distribución más compacta, lo cual puede indicar uniformidad en el estado fenológico en esas etapas. Este gráfico, junto con las pruebas estadísticas no paramétricas previas (Kruskal-Wallis y test de Dunn), respalda que existen diferencias significativas en el NDVI entre fases fenológicas, especialmente entre las fases iniciales y las avanzadas del cultivo.

5 Discusión

Los resultados obtenidos confirman que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), derivado de imágenes satelitales PlanetScope, es una herramienta útil para el monitoreo de las fases fenológicas del cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.), particularmente de la variedad Torrontés Riojano en ambientes áridos como el Valle Antinaco – Los Colorados. La asociación positiva y significativa entre el NDVI y las fases fenológicas en las tres fincas analizadas valida empíricamente lo planteado en el marco teórico, donde se señala que este índice espectral es un indicador representativo del vigor vegetativo, el área foliar y la biomasa verde [10] [13].

El hecho de que los datos no hayan seguido una distribución normal en ninguna finca, según el test de Shapiro-Wilk, sugiere la necesidad de enfoques estadísticos robustos frente a distribuciones asimétricas o con valores extremos, comunes en estudios agroclimáticos y de teledetección. La elección de pruebas no paramétricas, como Spearman y Kruskal-Wallis, junto con el uso de Modelos Aditivos Generalizados (GAM), permitió abordar estas características de forma adecuada y ofrecer modelos interpretables, ajustados al comportamiento fenológico no lineal del cultivo [28] [33].

La correlación positiva observada en todas las fincas, especialmente en Finca 3 ($\rho = 0.84$, $p < 0.00001$), indica que el NDVI tiende a incrementarse conforme el cultivo avanza en su ciclo fenológico. Esto es coherente con estudios previos que documentan el aumento progresivo del índice en fases reproductivas, debido al incremento en la biomasa fotosintéticamente activa [7] [31]. Sin embargo, el diferente grado de asociación entre fincas sugiere que factores como manejo agronómico, composición edáfica y microclimas locales influyen en la respuesta espectral del cultivo [11] [25].

La trayectoria sigmoidal del NDVI a lo largo del ciclo fenológico, observada en el modelo GAM, ratifica que el desarrollo del dosel vegetal no es lineal. En las primeras fases (1 a 5), los valores bajos del índice se corresponden con una limitada cobertura verde, mientras que a partir de la fase 6 se registra un aumento progresivo que se estabiliza en las fases avanzadas (11–13). Este patrón es consistente con el comportamiento fisiológico del cultivo de vid, donde el crecimiento vegetativo inicial es lento, seguido por una expansión foliar acelerada que culmina en la madurez del fruto [4] [19].

El análisis comparativo entre fincas mediante Kruskal-Wallis y el modelo GAM permitió evidenciar diferencias significativas en los valores de NDVI, particularmente entre Finca 3 y Finca 1 ($p = 0.0025$). Este resultado refuerza la idea de que, si bien el patrón de evolución fenológica puede ser común entre fincas, el nivel de respuesta espectral está influido por condiciones locales. En este sentido, la teledetección no solo es útil para el seguimiento fenológico, sino también para identificar unidades de manejo diferenciadas dentro de un mismo territorio [30].

Las diferencias detectadas entre fases fenológicas, según el test de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 39.82$, $p = 8.2e-06$) y la prueba de Dunn, aportan evidencia robusta sobre el impacto del desarrollo fenológico en la respuesta espectral. Las diferencias más marcadas se registraron entre fases tempranas (1 y 2) y fases avanzadas (11 y 13), lo cual refuerza el uso del NDVI como indicador de crecimiento y madurez. Las fases intermedias, en cambio, mostraron menor variabilidad estadística [12].

Por otra parte, los resultados del boxplot aportan una visualización complementaria clave: las fases avanzadas (9 a 13) no solo presentan valores elevados de NDVI, sino también menor dispersión, indicando mayor uniformidad en el estado fenológico del cultivo. Fases como la 6, con mayor variabilidad, podrían señalar transiciones críticas donde coexisten plantas en distintos estadios. Esto apoya estudios previos sobre heterogeneidad fenológica y plasticidad adaptativa, especialmente en entornos semiáridos [7].

El alto coeficiente de determinación del modelo GAM (R^2 ajustado = 0.922) evidencia su capacidad para explicar la variación del NDVI en función de las fases fenológicas, lo cual valida su utilidad como herramienta predictiva en el marco de una viticultura de precisión. Además, confirma la viabilidad técnica de utilizar imágenes de satélites de alta resolución como PlanetScope para el monitoreo operativo del viñedo, lo cual se alinea con las tendencias actuales en agricultura digital [8].

6 Conclusiones

Se puede concluir que El NDVI, calculado a partir de imágenes satelitales PlanetScope, mostró una correlación significativa y positiva con las fases fenológicas del cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.), variedad Torrontés Riojano. Esto apoya su uso como indicador indirecto del desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo.

La evolución del NDVI a lo largo del ciclo fenológico siguió una trayectoria de tipo sigmoidal, con valores bajos en las fases iniciales, crecimiento acelerado en las fases medias y estabilización en las fases avanzadas. Este comportamiento es coherente con la fisiología del cultivo y ha sido adecuadamente modelado mediante un GAM con alta capacidad explicativa (R^2 ajustado = 0.922).

Las diferencias significativas de NDVI entre fincas y entre fases fenológicas, detectadas mediante análisis no paramétricos, evidencian tanto la sensibilidad del índice a las etapas del desarrollo como su capacidad para reflejar condiciones locales de manejo y ambiente.

El uso del NDVI en vitivinicultura ofrece ventajas estratégicas, al permitir el monitoreo continuo, no destructivo y a escala parcelaria del estado fenológico, facilitando así la toma de decisiones agronómicas.

La herramienta satelital evaluada (PlanetScope) demostró alta resolución espacial y temporal, lo que la hace adecuada para el seguimiento fenológico en sistemas productivos como la vid, donde las variaciones microclimáticas y estructurales del dosel vegetal requieren observaciones de detalle.

7 Referencias

1. Abraham, E.; Del Valle, H.; Roig, F.; Torres, L.; Ares, J.; Coronat, F.; Godagnone, R. (2009). Overview of the geography of the Monte Desert biome (Argentina). *Journal of Arid Environments*, 73(2), 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.10.005>

2. Baggiolini, M. (1952). Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue Romande d'Agriculture et d'Arboriculture*, 8, 4-6.
3. Cabrera, A. L. (1976). *Regiones fitogeográficas argentinas*. Buenos Aires: Editorial Acme.
4. Chuvieco, E. (2015). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (3.^a ed.). Barcelona: Ariel Ciencia.
5. Cunha, M.; Marçal, A.; Ferreira, A. (2010). Retrieval of vine canopy biophysical parameters using high spatial resolution satellite images. *European Journal of Agronomy*, 33(1), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.03.004>
6. Delbart, N.; Picard, G.; 2007. Modeling the date of leaf appearance in low-arctic tundra. *Glob. Chang. Biol.* 13, 2551–2562. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01466.x>.
7. Fawcett, D.; Bennie, J.; Anderson, K. (2021). Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 227–244. <https://doi.org/10.1002/rse2.184>
8. Fitts, Y.; Tucker, C.; Hiernaux, P.; Auda, Y.; Kergoat, L. 2025. Using PlanetScope NDVI time series to detect the phenology of individual trees in the Sahel, *Remote Sensing of Environment*, Volume 321, 114650, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114650>.
9. Gobierno de La Rioja. (2024). Ficha provincial agroindustrial: La Rioja. Ministerio de Economía y Producción. [Documentos PDF: la_rioja_2024.pdf, fichas_provinciales_larioja.pdf]
10. Gomes, M.; Roman, R.; Rua, A.; Alves, E.; McKee, M. (2021). Comparação do NDVI obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. *Irriga*, 26(3), 605–619. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619>
11. González, L.; Pérez, J. (2020). Influencia del manejo agronómico en la fenología de la vid. *Revista de Viticultura y Enología*, 35(2), 45–60.
12. Gouveia, C.; Trigo, R. M.; DaCamara, C. (2011). Drought and vegetation stress monitoring in Portugal using satellite data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 333–341. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-333-2011>
13. Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.; Gao, X.; Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
14. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2020). Elementos del clima y su influencia en la producción vitivinícola (Boletín INIA N° 433). Ministerio de Agricultura de Chile.
15. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2010). *Producción olivícola en Argentina: Situación y perspectivas*. INTA EEA Catamarca.
16. Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2024). *Anuario estadístico de la vitivinicultura argentina*. <https://www.inv.gov.ar>
17. Jensen, J. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
18. Johnson, L. F.; Roczen, D. E.; Youkhana, S.; Nemani, R.; Bosch, D. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and*

- Electronics in Agriculture, 38(1), 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00109-3)
19. Keller, M. (2015). The science of grapevines: Anatomy and physiology (2.^a ed.). Academic Press.
 20. Le Houérou, H. N. (1999). Estudios e investigaciones de las zonas áridas y semi-áridas de Argentina. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA).
 21. Matías, A.; Rodríguez, J.; Escobar, G. (2010). Evaluación de sistemas de cultivo superintensivo en olivo: Experiencias en La Rioja y Catamarca. INTA Publicaciones Técnicas.
 22. Morello, J. (1958). La Provincia Fitogeográfica del Monte. Buenos Aires: Opera Lilloana.
 23. Planet Labs Inc. (2023). Planet Imagery Product Specifications.
 24. Recalde, D.; Zerda, H.; Maldonado, F.; Winschel, C. (2023). Dinámica del uso del suelo en el Valle Antinaco Los Colorados en el período 1976 2018. Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa. ISSN: 2451-7496 Vol. 9 Núm. 4. 8 a 19.
 25. Reyes, M.; Arribillaga, D. (2019). Grados día y fenología en vides. En Boletín INIA N° 415. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
 26. Rodríguez, J.; De la Iglesia, F.; Ocvirk, M. (2000). Fenología de cultivares de vid (*Vitis vinifera* L.) en Luján de Cuyo. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 32(2), 15–20.
 27. Roig, F.; Roig, S.; Corbalán, V. Biogeography of the Monte Desert. Journal of Arid Environments. 73. 164-172. [10.1016/j.jaridenv.2008.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.016). (2009).
 28. Sakamoto, T.; Yokozawa, M.; Toritani, H.; Shibayama, M.; Ishitsuka, N.; Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. Remote Sensing of Environment, 96(3–4), 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>
 29. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2023). Datos climáticos regionales 1991–2020: Región Noroeste. Ministerio de Defensa, Argentina. <https://www.smn.gob.ar>
 30. Von Bennewitz Alvarez, E.; Cazanga-Solar, R.; Carrasco-Benavides, M. (2018). Studying phenological stages of cherry (*Prunus avium* L.) using field observations and satellite-derived vegetation indexes. Idesia (Arica), 36(1), 65–71. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018000100065>
 31. Zarco-Tejada, P.; Ustin, S.; Whiting, M. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. Agronomy Journal, 97(3), 641–653. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0304>
 32. Zhang, X.; Friedl, M.; Schaaf, C. (2009). Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. Remote Sensing of Environment, 113(5), 1098–1107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.005>
 33. Zhang, X.; Friedl, M.; Schaaf, C.; Strahler, A. (2003). Monitoring the timing of vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)