Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Comportamiento del índice normalizado de vegetación (ndvi), frente a la variabilidad climática (2017-2024), bosque de Cañoncillo, La Libertad, Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales

AUTOR

Augusto Guillermo BRAVO MALCA

ASESOR

Dr. Jorge Leonardo JAVE NAKAYO

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Bravo, A. (2026). *Comportamiento del índice normalizado de vegetación (ndvi), frente a la variabilidad climática (2017-2024), bosque de Cañoncillo, La Libertad, Perú*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Augusto Guillermo Bravo Malca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06016801
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6314-9919
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	01066653
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3536-881X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	17402784
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Oscar Rafael Tinoco Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08606920
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Freddy Atuncar Yrribari
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25527597
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.16.0.40 Geomática aplicada en la gestión del territorio.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Bosque de Cañoncillo País: Perú Departamento: La Libertad Provincia: Pacasmayo Distrito: San José Latitud: 7°23'33.27"S Longitud: 79°26'8.28"O
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022-2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental, Geociencias: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los catorce días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen Nº 000339-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 07 de julio del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN (NDVI), FRENTE A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA (2017-2024), BOSQUE DE CAÑONCILLO, LA LIBERTAD, PERÚ»

Presentado por el Mg. **AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES.**

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente Nº UNMSM-20250073722, de fecha 27 de junio del 2025, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral Nº 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (18)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA.**

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Presidente

DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
secretario

DR. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI
Miembro

DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000267-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM **de la tesis**, cuyo título es **«COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN (NDVI), FRENTE A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA (2017-2024), BOSQUE DE CAÑONCILLO, LA LIBERTAD, PERÚ»,** presentado por el **magíster** AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA, para optar el grado académico de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **08%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES.

Lima, 12 de Junio de 2026

UNMSM
Firmado digitalmente por JAVE NAKAYO Jorge Leonardo FAU 20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.06.2026 18:00:00 -05:00

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Jorge Leonardo Jave Nakayo

DNI:01066653

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, mis hermanos, a mi hijo, a mi familia, a mis amigos y alumnos, que han acompañado en este camino de la búsqueda del conocimiento, del aprendizaje para comprender más nuestra existencia.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN **13**
1.1 Situación problemática 13
1.2 Formulación del problema 14
1.2.1 Problema General 14
1.2.2. Problemas específicos: 14
1.3 Justificación teórica y práctica 14
1.3.1 Justificación teórica 14
1.3.2 Justificación Práctica 15
1.4 Objetivos 16
1.4.1 Objetivo general 16
1.4.2 Objetivos específicos 16
II. MARCO TEÓRICO **17**
2.1 Antecedentes de investigación 17
2.1.1 Antecedentes internacionales 17
2.1.2 Antecedentes nacionales 19
2.2 Bases teóricas 21
2.2.1 Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) 21
2.2.2. Sensores Remotos y Teledetección 22
2.2.3. Variabilidad Climática y su Impacto en la Vegetación 23
2.2.4. Fenómeno de El Niño y La Niña 26
2.2.5. Impacto de la Variabilidad Climática en la Vegetación del Bosque de Cañoncillo 31
2.2.6. Análisis Multitemporal de la Vegetación en el Bosque de Cañoncillo 32
III. METODOLOGÍA. **34**
3.1 Área de estudio 34
3.1.1 Historia del Área de Estudio 35
3.1.2 Condiciones Físicas 36
3.1.3 Condiciones Climáticas 37
3.1.4 Vegetación 37
3.2 Tipo de investigación. 38
3.3 Diseño de Investigación 40
3.3.1. Diseño Descriptivo-Correlacional 40
3.3.2. Diseño Espacial-Temporal 40
3.4 Unidad de análisis. 41
3.4.1 Unidad espacial 41
3.4.2 Unidades de Análisis Complementarias 41
3.5 Población y muestra. 41

3.5.1 Población. 41
3.5.2 Tamaño de muestra. 42
3.5.3 Selección de la muestra 42
3.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos. 42
3.6.1 Técnicas de investigación 42
3.6.2 Instrumentos de investigación. 43
3.7 Análisis e interpretación de la información 43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 45
4.1 Análisis, interpretación y discusión de resultados 45
4.1.1 Comportamiento espacio- temporal del NDVI (2017-2024) 45
4.1.2 Distribución de Áreas por clases de NDVI 56
4.2 Variabilidad Climática del Bosque de Cañoncillo 92
4.2.1 Variabilidad térmica 92
4.2.2 Variabilidad de precipitación 97
4.3 Relación del NDVI y variabilidad climática 100
4.3.1 Relación NDVI – Temperatura 100
4.3.2 Relación NDVI – Precipitación 104
4.3.3 Matriz de correlación general 116
4.4 Contrastes de hipótesis 117
4.4.1 Hipótesis general 117
4.4.2 Hipótesis específica 1 117
4.4.3 Hipótesis específica 2 126
4.4.4 Hipótesis específica 3 129
4.5 Discusión 133
V. CONCLUSIONES 136
VI. RECOMENDACIONES 137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 138
ANEXOS 145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio: Bosque Natural El Cañoncillo, La Libertad 33
Figura 2. Vista panorámica satelital en 3D, del Bosque Natural El Cañoncillo, La Libertad (Octubre, 2025) 34
Figura 3. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2017 44
Figura 4. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2018 45
Figura 5. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2019 47
Figura 6. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2020 48
Figura 7. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2021 50
Figura 8. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2022 51
Figura 9. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2023 53
Figura 10. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2024 54
Figura 11. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2017 55
Figura 12. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2018 60
Figura 13. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2019 64
Figura 14. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2020 69
Figura 15. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2021 73
Figura 16. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2022 77
Figura 17. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2023 81
Figura 18. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2024 85
Figura 19. Variabilidad de la temperatura media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1981-2024) 91
Figura 20. Variabilidad de la temperatura media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1971-2014) 92
Figura 21. Patrón térmico mensual representado en mapa de calor (2017-2024) 93
Figura 22. Serie temporal de temperaturas (1941-2024) del Bosque Natural El Cañoncillo94
Figura 23. Evolución mensual de la temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo (2017-2024) 94
Figura 24. Variabilidad de la precipitación media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1971-2014) 95
Figura 25. Patrón mensual de precipitación representado en mapa de calor (2017–2024) 96
Figura 26. Evolución mensual de la precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo (2017-2024) 97
Figura 27. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2017 98
Figura 28. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2018 99
Figura 29. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual

(LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2019 99
Figura 30. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2020 100
Figura 31. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2021 100
Figura 32. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2022 101
Figura 33. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2023 101
Figura 34. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2024 102
Figura 35. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2017 102
Figura 36. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2018 103
Figura 37. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2019 103
Figura 38. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2020 104
Figura 39. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2021 104
Figura 40. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2022 105
Figura 41. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2023 105
Figura 42. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2024 106
Figura 43. Variación estacional promedio (2017–2024) 107
Figura 44. Matriz de correlación de Spearman entre variables de estudio en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024 114
Figura 45. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2017 116
Figura 46. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2018 117
Figura 47. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2019 118
Figura 48. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2021 119
Figura 49. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2017 120
Figura 50. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2023 121

Figura 51. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2024 122
Figura 52. Análisis de la distribución y tendencia temporal de la temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024 124
Figura 53. Análisis de la distribución y tendencia temporal de la precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024 125
Figura 54. Correlación de Spearman entre NDVI y temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024 127
Figura 55. Correlación de Spearman entre NDVI y precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024 128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del Tipo y Diseño de Investigación 46
Tabla 2. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2017 62
Tabla 3. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2018 68
Tabla 4. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2019 71
Tabla 5. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2020 76
Tabla 6. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2021 80
Tabla 7. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2022 84
Tabla 8. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2023 88
Tabla 9. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2024 92
Tabla 10. Clasificación por grupos de los tipos de cobertura vegetal según rangos de NDVI en el Bosque de Cañoncillo 96

RESUMEN

La variabilidad climática constituye uno de los principales factores que influyen en la dinámica de los ecosistemas secos, afectando la estructura, composición y productividad de la vegetación. En este contexto, el Bosque de Cañoncillo, ubicado en la región La Libertad, representa uno de los principales relictos de bosque seco costero del norte del Perú y constituye un ecosistema altamente vulnerable a las fluctuaciones de temperatura y precipitación. La presente investigación tuvo como objetivo determinar el comportamiento del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) frente a la variabilidad climática en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024.

La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño descriptivo-correlacional de carácter espacial y temporal. Se emplearon imágenes satelitales multitemporales para la obtención de los índices NDVI estacionales correspondientes a los años 2017–2024. Asimismo, se utilizaron registros climáticos de temperatura y precipitación procedentes de bases de datos oficiales y satelitales. El análisis incluyó la elaboración de mapas temáticos, evaluación de la distribución espacial de las clases de NDVI, análisis de la variabilidad climática y aplicación de pruebas estadísticas de correlación para determinar la relación entre las variables estudiadas.

Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacio temporal del NDVI, predominando las clases de bajo vigor vegetal (NDVI ≤ 0.1) durante gran parte del periodo evaluado, característica propia de los ecosistemas secos. Se identificaron diferencias significativas entre estaciones del año, reflejando la respuesta de la vegetación a los cambios ambientales estacionales. Respecto a la variabilidad climática, la temperatura presentó fluctuaciones moderadas, mientras que la precipitación mostró una alta irregularidad temporal. El análisis estadístico reveló una correlación positiva fuerte y significativa entre el NDVI y la temperatura ($\rho = 0.857$; $p < 0.05$), mientras que la relación entre NDVI y precipitación fue positiva pero débil. Estos resultados indican que la temperatura constituye el principal factor climático asociado a la dinámica de la vegetación en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo estudiado.

Se concluye que la variabilidad climática influye significativamente en el comportamiento del NDVI, siendo la temperatura la variable con mayor incidencia sobre el vigor y la cobertura vegetal. El NDVI demostró ser una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental de ecosistemas secos, proporcionando información relevante para la conservación, gestión sostenible y adaptación al cambio climático en el Bosque de Cañoncillo.

Palabras clave: NDVI, variabilidad climática, temperatura, precipitación, bosque seco, teledetección, Bosque de Cañoncillo.

ABSTRACT

Climate variability is one of the main factors influencing the dynamics of dry ecosystems, affecting vegetation structure, composition, and productivity. In this context, the Cañoncillo Forest, located in the La Libertad region of northern Peru, represents one of the most important remnants of coastal dry forest ecosystems and is highly vulnerable to fluctuations in temperature and precipitation. The aim of this study was to determine the behavior of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in response to climate variability in the Cañoncillo Forest during the period 2017–2024.

This research followed an applied, quantitative approach with a descriptive-correlational spatial-temporal design. Multitemporal satellite imagery was used to derive seasonal NDVI values for the years 2017–2024. In addition, temperature and precipitation records were obtained from official and satellite-based climate databases. The analysis included the generation of thematic maps, the assessment of the spatial distribution of NDVI classes, the characterization of climate variability, and the application of statistical correlation tests to evaluate the relationships among the study variables.

The results revealed marked spatial and temporal variability in NDVI, with low vegetation vigor classes (NDVI $\leq$ 0.1) predominating throughout much of the study period, a characteristic feature of dry forest ecosystems. Significant differences were identified among the seasons of the year, reflecting the response of vegetation to seasonal environmental changes. Regarding climate variability, temperature exhibited moderate fluctuations, whereas precipitation showed high temporal irregularity. Statistical analysis revealed a strong and significant positive correlation between NDVI and temperature ($\rho = 0.857$; $p < 0.05$), while the relationship between NDVI and precipitation was positive but weak. These findings indicate that temperature was the principal climatic factor associated with vegetation dynamics in the Cañoncillo Forest during the study period

It is concluded that climate variability significantly influences NDVI behavior, with temperature being the climatic variable exerting the greatest influence on vegetation vigor and cover. NDVI proved to be an effective tool for environmental monitoring in dry ecosystems, providing valuable information for conservation, sustainable management, and climate change adaptation strategies in the Cañoncillo Forest.

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), climate variability, temperature, precipitation, dry forest, remote sensing, Cañoncillo Forest.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática

El Bosque de Cañoncillo, ubicado en la región La Libertad, Perú, es un ecosistema seco de gran valor ecológico y ambiental, que enfrenta múltiples amenazas debido a la variabilidad climática y el impacto de eventos extremos como El Niño y La Niña. Estos fenómenos generan fluctuaciones significativas en la temperatura y la precipitación, factores determinantes en la disponibilidad de agua y la salud de la vegetación. Sin embargo, a pesar de su importancia como área de conservación privada, no se cuenta con estudios detallados sobre la respuesta de la vegetación a estas condiciones climáticas cambiantes.

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) es una herramienta ampliamente utilizada para monitorear la salud y la cobertura vegetal, permitiendo detectar cambios en la fotosíntesis y en la densidad de la vegetación a lo largo del tiempo. Estudios previos han demostrado que el NDVI es sensible a las variaciones climáticas y puede servir como un indicador clave para evaluar la resiliencia de los ecosistemas frente a variabilidades climáticas. Sin embargo, en el caso del Bosque de Cañoncillo, no se ha analizado de manera sistemática la relación entre el NDVI y la variabilidad climática interanual, especialmente en un período extenso que abarque años cálidos y fríos.

La falta de información científica detallada sobre la dinámica del NDVI en este ecosistema limita la capacidad de gestionar adecuadamente los recursos naturales y de implementar estrategias de conservación efectivas. Si la vegetación del bosque está experimentando un deterioro debido a condiciones climáticas adversas, sin un monitoreo adecuado, se corre el riesgo de perder biodiversidad y comprometer los servicios ecosistémicos que brinda esta área protegida. Además, la interacción entre la precipitación y la temperatura en la dinámica del NDVI sigue siendo un aspecto poco estudiado en ecosistemas áridos peruanos, lo que representa un vacío de conocimiento en la gestión del cambio climático y la conservación de los ecosistemas secos.

Ante este panorama, surge la necesidad de investigar la dinámica del NDVI en el Bosque de Cañoncillo durante el período 2017-2024, diferenciando los efectos de los años cálidos y frío,

así como periodos secos y húmedos. Este análisis permitirá comprender cómo la variabilidad climática afecta la cobertura vegetal y, a su vez, proporcionará información clave para diseñar estrategias de conservación adaptativas basadas en evidencia científica. Sin este conocimiento, el Bosque de Cañoncillo podría enfrentar una degradación progresiva sin medidas de mitigación adecuadas, poniendo en riesgo su biodiversidad y su funcionalidad ecológica a largo plazo.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cuál es la relación entre la variabilidad climática y el comportamiento del índice normalizado de vegetación NDVI en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024?

1.2.2. Problemas específicos:

- ¿Cuál fue la distribución espacio temporal del índice normalizado de vegetación NDVI estacional en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024?
- ¿Cuál fue el comportamiento de la temperatura y precipitación en el área de influencia del Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024?
- ¿Qué relación estadística existe entre el índice normalizado de vegetación NDVI estacional y las variables climáticas de temperatura y precipitación durante el periodo 2017–2024?

1.3 Justificación teórica y práctica

1.3.1 Justificación teórica

Este estudio es de suma importancia, ya que el bosque de algarrobo de Cañoncillo se encuentra en una zona árida altamente vulnerable a los impactos del cambio climático. Comprender cómo el ecosistema ha respondido a la variabilidad climática es fundamental para desarrollar estrategias de conservación y manejo sostenible, que permitan proteger y restaurar el bosque, garantizando su capacidad de proporcionar servicios ambientales en el futuro. Además, el uso de tecnología satelital y análisis de índices ambientales avanzados proporcionará una metodología replicable para el monitoreo de otros ecosistemas áridos afectados por el cambio climático.

Este planteamiento del problema estructura la investigación en torno al impacto del cambio climático sobre un ecosistema específico y subraya la relevancia de utilizar herramientas satelitales avanzadas para evaluar dichos efectos.

1.3.2 Justificación Práctica

El presente estudio sobre la dinámica del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en el Área de Conservación Privada "Bosque de Cañoncillo" durante años cálidos y fríos en el periodo 2017-2024 tiene una relevancia práctica significativa, ya que permitirá generar información clave para la toma de decisiones en la conservación y manejo sostenible de este ecosistema seco. La variabilidad climática, caracterizada por fluctuaciones en la temperatura y la precipitación, representa una amenaza para la cobertura vegetal del bosque, lo que hace imprescindible contar con herramientas de monitoreo efectivas que permitan detectar cambios en la vegetación y prever tendencias futuras.

Desde una perspectiva aplicada, el análisis del NDVI proporcionará datos cuantificables y espaciales sobre el estado de la vegetación, lo que facilitará la identificación de zonas con mayor vulnerabilidad ante el cambio climático. Esta información será útil para los gestores del Área de Conservación Privada, investigadores, organizaciones ambientales y tomadores de decisiones, quienes podrán diseñar estrategias de conservación basadas en evidencia científica. Además, el estudio permitirá evaluar la efectividad de las medidas de protección ya implementadas en el bosque y proponer acciones correctivas para mitigar los impactos negativos del clima en la vegetación.

Otro aspecto práctico de este proyecto es su contribución al desarrollo de modelos predictivos que ayuden a anticipar el comportamiento de la vegetación ante futuros eventos climáticos extremos. Con la integración de datos de NDVI y variables climáticas, se podrán establecer relaciones cuantitativas entre la salud de la vegetación y la variabilidad interanual de la temperatura y la precipitación, lo que permitirá generar alertas tempranas sobre el riesgo de degradación en ciertas áreas del bosque. Esto es fundamental para mejorar la capacidad de respuesta ante períodos de sequía prolongada o eventos de precipitación intensa, que podrían afectar la estabilidad ecológica del bosque.

Por último, este estudio tiene un impacto práctico en el fortalecimiento de la educación ambiental y la sensibilización de las comunidades locales. Los resultados obtenidos podrán ser difundidos a nivel local y regional, promoviendo una mayor conciencia sobre la importancia del Bosque de Cañoncillo y su conservación. Asimismo, esta investigación puede servir como modelo para la aplicación de estudios similares en otros ecosistemas secos del Perú, contribuyendo al desarrollo de políticas públicas y estrategias de manejo sostenible en áreas de conservación con características similares.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento del índice normalizado de vegetación (NDVI) en el Bosque de Cañoncillo frente a la variabilidad climática durante el periodo 2017-2024.

1.4.2 Objetivos específicos

- Obtener los índices normalizados de vegetación (NDVI) estacional de los años 2017 al 2024, en el Bosque de Cañoncillo. La Libertad.
- Precisar la variabilidad climática térmica y de precipitación de los años 2017 al 2024 del Bosque de Cañoncillo.
- Establecer la relación estadística entre el índice normalizado de vegetación NDVI y las variables climáticas temperatura y precipitación, durante el periodo 2017 al 2024

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

El análisis del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) como indicador de la salud de los ecosistemas ha cobrado relevancia en la última década, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la vegetación es altamente sensible a la variabilidad climática. Diversos estudios han utilizado el NDVI para monitorear cambios en la cobertura vegetal y evaluar cómo factores climáticos, como la temperatura y la precipitación, afectan la dinámica de los ecosistemas. Por ejemplo, Bao et al. (2014) demostraron que las variaciones climáticas en el Plateau Mongol influyen directamente en las fluctuaciones del NDVI, destacando el impacto de la temperatura y la disponibilidad de agua en la vegetación. De manera similar, Zewdie et al. (2017) encontraron patrones de variabilidad a largo plazo en la cobertura vegetal en Etiopía, donde el NDVI reflejó cambios significativos vinculados a la aridez creciente y la variabilidad climática interanual. Estos estudios establecen la importancia de analizar el NDVI como herramienta para comprender la resiliencia y vulnerabilidad de los ecosistemas frente a las fluctuaciones climáticas.

El Bosque de Cañoncillo, en La Libertad, Perú, es un ecosistema seco que enfrenta amenazas crecientes debido a la variabilidad climática asociada con fenómenos como El Niño y La Niña. Estas condiciones extremas generan años cálidos y fríos, que impactan de manera diferenciada en la vegetación. En este contexto, estudios previos en áreas áridas y semiáridas proporcionan información valiosa. Measho et al. (2019) mostraron que, en Eritrea, las sequías recurrentes resultaron en una disminución significativa del NDVI, mientras que, en China, Yin et al. (2016) documentaron cómo la cobertura vegetal de Asia Central mostró patrones de recuperación limitados tras eventos climáticos extremos. Estos hallazgos sugieren que la variabilidad climática puede tener un impacto duradero en la vegetación de áreas frágiles, lo que subraya la necesidad de realizar investigaciones específicas en el Bosque de Cañoncillo para diseñar estrategias de conservación adaptativas.

La relación entre el NDVI y las variables climáticas es ampliamente documentada en regiones con condiciones similares a las del Bosque de Cañoncillo. Fayech y Tarhouni (2021) analizaron cómo la precipitación y la temperatura influyen en la vegetación en áreas semiáridas, encontrando que los periodos de baja precipitación estaban correlacionados con una disminución significativa del NDVI. Por otro lado, estudios en el norte de China, como los de Sun et al. (2021), indicaron que los cambios en la cobertura vegetal, medidos por el NDVI, estaban asociados con tendencias de calentamiento y precipitaciones irregulares. Estos estudios resaltan la importancia de integrar datos climáticos y de NDVI para evaluar el impacto combinado de la temperatura y la precipitación, una tarea que este proyecto busca abordar en el Bosque de Cañoncillo.

El uso del NDVI también ha permitido identificar áreas críticas de vulnerabilidad en ecosistemas áridos y semiáridos, lo que tiene implicaciones significativas para la gestión y conservación. Baniya et al. (2018) destacaron cómo la evaluación de la variabilidad espaciotemporal del NDVI en Nepal ayudó a identificar las regiones más afectadas por el cambio climático, proporcionando una base para políticas de manejo sostenible. Asimismo, Gao et al. (2022) señalaron que en la región de Mu Us, en China, el NDVI reflejó la dinámica entre el cambio climático y las actividades humanas, sugiriendo medidas de restauración específicas. En el caso del Bosque de Cañoncillo, este tipo de análisis permitirá no solo comprender las áreas más vulnerables, sino también priorizar acciones de conservación que consideren las proyecciones climáticas futuras y los patrones históricos del NDVI.

Finalmente, los antecedentes globales y regionales resaltan la relevancia de este estudio para llenar vacíos de conocimiento específicos en el Bosque de Cañoncillo. Liu et al. (2016) en las montañas Tianshan y Chu et al. (2019) en la cuenca del río Amur-Heilongjiang, documentaron que los ecosistemas montañosos y áridos responden de manera única a la variabilidad climática. Estos trabajos proporcionan un marco teórico robusto para explorar cómo la dinámica del NDVI puede reflejar la respuesta del Bosque de Cañoncillo ante los desafíos climáticos. Este proyecto no solo contribuirá a entender mejor los patrones espaciotemporales del NDVI en el área, sino que también ofrecerá una herramienta de monitoreo crítica para implementar estrategias de conservación que aseguren la resiliencia del bosque frente a futuros eventos climáticos extremos.

2.1.2 Antecedentes nacionales

En el estudio “Análisis temporal del NDVI del humedal de Purrumpampa en Huamachuco y su relación con la expansión urbana”, de Rodriguez Diego, en el año 2023. Se tuvo como objetivo principal realizar un análisis temporal de la flora en el humedal de Purrumpampa en Huamachuco y examinar su relación con la expansión urbana. La metodología implicó el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y Google Earth para analizar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, específicamente desde 2012 hasta 2021. El área de estudio se definió con base en los planos del Gobierno Municipal de Sánchez Carrión. Los resultados indicaron una disminución significativa en la vegetación, con una pérdida de 74,792 m² en las regiones sur y sureste del humedal. Esta disminución se atribuyó a la ocupación informal de espacios naturales vulnerables debido a la expansión urbana. Además, el estudio destacó que las acciones ambivalentes del gobierno municipal han legitimado la ocupación de viviendas, mientras que sus medidas de control han demostrado ser ineficaces para proteger el ecosistema del humedal.

Rojas y colaboradores en 2008 realizaron el estudio “Modelo de la Sequía en la costa norte de Perú usando los Índices EnoS y las imágenes ndvi del Sensor avhrr a Bordo del Satélite noaa” para desarrollar un modelo predictivo para la aparición de sequías en la costa norte del Perú utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de imágenes satelitales AVHRR y los índices de El Niño Oscilación del Sur (ENSO). La metodología implica analizar series temporales de datos mensuales promedio de NDVI y ENSO desde 1981 hasta 2003, empleando técnicas de regresión lineal múltiple para establecer relaciones entre estas variables. Los resultados indican que las condiciones de sequía suelen comenzar en agosto y persisten hasta diciembre en todo el Perú. Los valores de NDVI varían desde 0.00 (indicando suelo desnudo) hasta 0.70 (indicando vegetación en el suelo), con desviaciones estándar más bajas observadas en la costa comparadas con las regiones montañosas y selváticas. Las predicciones del modelo se alinean estrechamente con los datos satelitales, demostrando su efectividad en la previsión de condiciones de sequía en la región de la costa norte. Esta investigación aporta valiosos conocimientos sobre los patrones de sequía y puede ayudar en una mejor gestión de recursos y planificación agrícola en las áreas afectadas.

Carbajal-Moran y colaboradores, en 2023, elaboró el estudio "Evaluation of Normalized Difference Vegetation Index by Remote Sensing with Landsat Satellites in the Tayacaja Valley in the Central Andes of Perú", cuyo objetivo tenía evaluar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Valle de Tayacaja, Andes Centrales del Perú, centrándose en los cambios de vegetación a lo largo de 30 años, desde 1993 hasta 2022. La metodología implicó la recopilación de imágenes satelitales de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 durante las temporadas de agua baja, específicamente en agosto, para minimizar la interferencia de la cobertura nubosa. El NDVI se calculó utilizando Quantum GIS, analizando la banda roja y de infrarrojo cercano de las imágenes satelitales. Los resultados revelaron un valor mínimo de NDVI de -0.18, indicando áreas acuáticas, mientras que el valor máximo de 0.79 sugería una cobertura vegetal significativa, principalmente eucaliptos. El NDVI promedio durante los 30 años fue de aproximadamente 0.21, indicando vegetación escasa y una tendencia decreciente atribuida al crecimiento de la población en la región. Este estudio destaca la importancia de la teledetección en el monitoreo de la dinámica de la vegetación y proporciona conocimientos sobre los cambios ambientales en el Valle de Tayacaja, enfatizando la necesidad de prácticas de gestión sostenible para abordar los desafíos planteados por las presiones demográficas sobre la cobertura vegetal.

Roque y Pacherres, en el 2019 realizaron el estudio titulado "Tendencia del NDVI en el Área de Conservación Regional Angostura Faical de Tumbes, Perú, 1999-2019", cuyo estudio tuvo como objetivo evaluar la tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Área de Conservación Regional Angostura Faical en Tumbes, Perú, desde 1999 hasta 2019, centrándose en los cambios de vegetación y sus implicaciones para los esfuerzos de conservación. La metodología implicó utilizar imágenes satelitales de Landsat 5, 7 y 8, procesadas a través de Google Earth Engine y analizadas utilizando el lenguaje de programación R con la prueba de Mann Kendall para determinar las tendencias en los valores de NDVI. Los resultados indicaron una tendencia predominantemente neutral en 7,304,568 hectáreas, con 1,489,457 hectáreas mostrando una tendencia positiva en la salud de la vegetación, mientras que solo 0.458 hectáreas exhibieron una tendencia negativa, principalmente cerca del arroyo La Angostura debido a la escorrentía durante las temporadas de lluvias. Este análisis subraya la importancia de monitorear los cambios ambientales en áreas protegidas para informar prácticas de gestión sostenible y la toma de decisiones

respecto a los esfuerzos de conservación. Los hallazgos destacan el potencial de aumento de la biomasa vegetal en la región, haciendo hincapié en la necesidad de un monitoreo continuo para abordar los impactos del cambio climático y asegurar la conservación de los recursos naturales.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) es una de las herramientas más utilizadas en el monitoreo de la vegetación a nivel global. Se basa en el análisis de imágenes satelitales para determinar la cantidad, calidad y salud de la cobertura vegetal en un área específica. Su cálculo se realiza a partir de la diferencia entre la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en el rojo (Red), dividida entre la suma de ambas bandas, siguiendo la ecuación matemática:

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

Donde:

- NIR (Infrarrojo Cercano): Es la radiación reflejada por la vegetación sana, ya que las plantas absorben luz roja para la fotosíntesis, pero reflejan el infrarrojo cercano.
- Red (Rojo): Es la banda absorbida por la clorofila de las plantas durante la fotosíntesis.

El NDVI varía en una escala de -1 a 1, donde los valores negativos y cercanos a 0 representan áreas sin vegetación (agua, suelo desnudo o estructuras urbanas), mientras que los valores positivos más altos indican una mayor densidad y vigor de la vegetación (Jensen, 2007).

Aplicaciones del NDVI en el monitoreo ambiental

El NDVI es una herramienta esencial en la teledetección y el monitoreo ambiental, ya que permite la evaluación de los cambios en la cobertura vegetal a nivel global, regional y local (Rouse et al., 1973). Su uso se ha extendido en diversos campos, tales como:

- Monitoreo de la salud de la vegetación: Permite identificar áreas afectadas por estrés hídrico, enfermedades o contaminación. Las plantas saludables reflejan más luz en el infrarrojo cercano, mientras que las que están en malas condiciones muestran valores bajos de NDVI (Tucker, 1979).

- Evaluación de la desertificación y degradación del suelo: En zonas áridas y semiáridas, el NDVI ha sido utilizado para analizar los efectos del cambio climático y la actividad humana en la pérdida de cobertura vegetal (Huete et al., 2002).

- Impacto del cambio climático en ecosistemas naturales: Estudios previos han utilizado el NDVI para evaluar la resiliencia de los ecosistemas ante fenómenos climáticos extremos como El Niño y La Niña (Pettorelli et al., 2005).

- Agricultura y manejo sostenible de cultivos: Permite la identificación de zonas de estrés en cultivos, optimizando el uso de fertilizantes y riego mediante imágenes satelitales como MODIS, Landsat y Sentinel-2 (Myneni et al., 1995).

- Gestión de áreas de conservación: Es una herramienta clave para la toma de decisiones en la protección de ecosistemas frágiles, permitiendo monitorear cambios en la vegetación a lo largo del tiempo (Malingreau, 1986).

2.2.2. Sensores Remotos y Teledetección

La teledetección es una disciplina que permite la observación, monitoreo y análisis de la superficie terrestre mediante la captura de información a través de sensores remotos. Esta tecnología se basa en la medición de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos en la Tierra, proporcionando datos espaciales y espectrales que permiten estudiar diversos fenómenos ambientales, incluyendo la dinámica de la vegetación (Jensen, 2007).

Los sensores remotos son dispositivos montados en plataformas espaciales (satélites), aéreas (drones, aviones) o terrestres que capturan imágenes en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Existen dos tipos principales de sensores:

- Sensores pasivos: Dependen de la radiación solar reflejada o emitida por la superficie terrestre. Ejemplo de estos sensores son los sistemas ópticos como los satélites

Landsat, MODIS y Sentinel-2, utilizados ampliamente para monitorear el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) (Huete et al., 2002).

- Sensores activos: Emiten su propia energía para iluminar el área de interés y medir la retrodispersión de la señal. Ejemplo de estos sensores son los radares de apertura sintética (SAR) y los sistemas LiDAR, que permiten obtener información detallada de la topografía y la estructura de la vegetación (Myneni et al., 1995).

Satélites y sensores utilizados en el análisis del NDVI

Diversos satélites han sido diseñados para el monitoreo de la vegetación y el medio ambiente. Algunos de los más utilizados en estudios de NDVI incluyen:

- Landsat (NASA/USGS): Con más de 40 años de operación, proporciona imágenes multiespectrales desde 1972, permitiendo estudios de cambio de uso de suelo y vegetación a largo plazo (Jensen, 2007).
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): A bordo de los satélites Terra y Aqua, ofrece imágenes diarias con resolución moderada, siendo útil para estudios de vegetación a gran escala (Huete et al., 2002).
- Sentinel-2 (ESA): Satélite de la Agencia Espacial Europea con alta resolución espacial y espectral, ideal para monitoreo detallado de la vegetación y aplicaciones agrícolas (Gao, 1996).

2.2.3. Variabilidad Climática y su Impacto en la Vegetación

La variabilidad climática es un fenómeno natural caracterizado por fluctuaciones en las condiciones atmosféricas, como la temperatura y la precipitación, en escalas de tiempo que pueden ir desde meses hasta décadas. Estas variaciones tienen un impacto significativo en los ecosistemas terrestres, afectando la disponibilidad de recursos hídricos, la productividad primaria y la estructura de la vegetación. La respuesta de los ecosistemas a la variabilidad climática varía según la región y el tipo de vegetación predominante, siendo los ecosistemas áridos y semiáridos los más vulnerables debido a su dependencia del régimen de lluvias estacionales (IPCC, 2021).

Efectos de la variabilidad climática en la vegetación

El impacto de la variabilidad climática en la vegetación puede manifestarse a través de cambios en la productividad, alteraciones en los ciclos fenológicos y modificaciones en la estructura de los ecosistemas. Diversos estudios han demostrado que eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas o lluvias excesivas, pueden desencadenar pérdidas significativas de cobertura vegetal y afectar la biodiversidad local (Pettorelli et al., 2005). A continuación, se presentan algunos de los principales efectos de la variabilidad climática en la vegetación:

- Cambio en la biomasa y productividad primaria:
    - La disponibilidad de agua y la temperatura son factores clave en la fotosíntesis y el crecimiento vegetal. Un aumento en la temperatura sin un incremento proporcional en la precipitación puede reducir la eficiencia del uso del agua y afectar la biomasa vegetal (Myneni et al., 1997).
- Alteraciones en la fenología vegetal:
    - La fenología de las plantas, como la floración y la caída de hojas, está regulada por factores climáticos. Cambios en la temperatura y la duración de las estaciones pueden provocar adelantos o retrasos en los ciclos fenológicos, afectando la reproducción y distribución de las especies vegetales (Cleland et al., 2007).
- Modificación en la distribución de especies:
    - Las especies vegetales tienen rangos climáticos específicos en los que pueden sobrevivir. Cambios en el clima pueden favorecer la expansión de algunas especies mientras que otras pueden enfrentar estrés y disminución de poblaciones (Walther et al., 2002).
- Incremento en la vulnerabilidad de los ecosistemas secos:
    - Los ecosistemas áridos y semiáridos dependen en gran medida de la precipitación irregular. En estos entornos, la reducción de lluvias o el incremento de la evapotranspiración pueden aumentar la desertificación y disminuir la capacidad de regeneración de la vegetación (Gao et al., 1996).

Eventos climáticos extremos y su impacto en la vegetación

Uno de los principales impulsores de la variabilidad climática en la región del Bosque de Cañoncillo es la ocurrencia de eventos extremos como El Niño y La Niña. Estos fenómenos tienen efectos directos sobre el régimen de precipitaciones y las temperaturas en la costa norte del Perú. Durante los años de El Niño, se presentan precipitaciones intensas y temperaturas más cálidas, lo que puede favorecer un incremento en la biomasa vegetal en el corto plazo, pero también puede provocar erosión y cambios en la estructura del ecosistema (Philander, 1990). En contraste, La Niña genera condiciones más secas y frías, afectando la disponibilidad de agua y limitando el crecimiento vegetal (Holmgren et al., 2006).

El uso de herramientas de teledetección, como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), ha permitido evaluar el impacto de la variabilidad climática en la vegetación en diferentes escalas espaciales y temporales. Estudios previos han demostrado que el NDVI responde significativamente a la variabilidad climática, mostrando reducciones en valores de índice durante períodos de sequía y aumentos en temporadas de mayor disponibilidad de agua (Huete et al., 2002).

Relación entre temperatura, precipitación y la vegetación

El efecto combinado de la temperatura y la precipitación sobre la vegetación ha sido ampliamente estudiado en distintas regiones del mundo. En general, se ha identificado que:

- Temperaturas altas sin precipitaciones adecuadas pueden generar estrés hídrico y reducir la fotosíntesis, afectando el crecimiento de la vegetación (Nemani et al., 2003).
- Lluvias excesivas pueden aumentar la productividad vegetal a corto plazo, pero también generar erosión y pérdida de suelo fértil (Piao et al., 2019).
- Periodos secos prolongados pueden desencadenar procesos de desertificación, reduciendo la biodiversidad y la capacidad del ecosistema para recuperar su vegetación original (Liu et al., 2018).

En el caso del Bosque de Cañoncillo, estos factores climáticos pueden tener un impacto directo en la dinámica de la vegetación, afectando la estructura del bosque seco y su capacidad de regeneración natural. La aplicación del NDVI como herramienta de monitoreo

permitirá evaluar cómo la vegetación responde a estos cambios climáticos y qué áreas del bosque son más vulnerables a eventos extremos.

Importancia del monitoreo de la variabilidad climática en ecosistemas secos

El monitoreo de la variabilidad climática en ecosistemas secos es fundamental para diseñar estrategias de conservación y manejo sostenible. El uso de datos satelitales y modelos climáticos permite realizar predicciones sobre el comportamiento futuro de la vegetación en respuesta a los cambios climáticos. Investigaciones previas han demostrado que el análisis multitemporal del NDVI puede proporcionar información valiosa para la gestión de ecosistemas frágiles (Gitelson et al., 2003).

Además, comprender la relación entre la variabilidad climática y la vegetación permite desarrollar políticas de adaptación al cambio climático, promoviendo prácticas de restauración ecológica y conservación de la biodiversidad (Chapin et al., 2000).

2.2.4. Fenómeno de El Niño y La Niña

El Fenómeno de El Niño y La Niña es una de las principales manifestaciones de la variabilidad climática interanual a nivel global. Este fenómeno ocurre en el océano Pacífico tropical y genera impactos significativos en los patrones climáticos, afectando la temperatura del océano, los vientos y las precipitaciones en distintas partes del mundo. Su influencia es particularmente importante en América del Sur, donde altera los regímenes de lluvia y temperatura, provocando cambios drásticos en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Philander, 1990).

En el contexto del Bosque de Cañoncillo, ubicado en la costa norte del Perú, la ocurrencia de eventos de El Niño y La Niña influye directamente en la dinámica de la vegetación, ya que estos fenómenos modifican la disponibilidad de agua y la temperatura, dos factores clave para el crecimiento y regeneración de la vegetación en ecosistemas áridos y semiáridos (Holmgren et al., 2006).

El Niño: Calentamiento anómalo del Pacífico y sus efectos

El Niño es la fase cálida de la oscilación del El Niño-Southern Oscillation (ENSO) y se caracteriza por un incremento anómalo de la temperatura superficial del océano Pacífico oriental, lo que altera los patrones atmosféricos y genera cambios climáticos significativos en diversas regiones del mundo (Trenberth, 1997).

En el Perú, El Niño está asociado con un aumento de la precipitación en la costa norte, lo que puede provocar inundaciones, deslizamientos de tierra y un crecimiento acelerado de la vegetación en zonas que normalmente presentan condiciones áridas (Poveda et al., 2001). En el caso del Bosque de Cañoncillo, estas lluvias pueden favorecer la regeneración temporal de la vegetación, incrementando los valores del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) debido a la mayor disponibilidad de agua y la respuesta positiva de la flora del ecosistema (Tucker, 1979).

Sin embargo, El Niño también puede tener efectos negativos en la vegetación a largo plazo. La erosión del suelo provocada por las lluvias intensas puede afectar la estabilidad del ecosistema, mientras que el incremento de temperatura puede generar estrés hídrico en especies que no están adaptadas a temperaturas más cálidas (Morales et al., 2021). Además, el rápido crecimiento de la vegetación durante El Niño puede generar una acumulación de biomasa seca, aumentando el riesgo de incendios forestales en años posteriores cuando las precipitaciones vuelven a niveles bajos (Holmgren et al., 2006).

La Niña: Enfriamiento del Pacífico y sequías

En contraste, La Niña es la fase fría del ENSO y se caracteriza por un enfriamiento de las aguas del Pacífico ecuatorial. Este fenómeno intensifica los vientos alisios, reduciendo la evaporación y generando condiciones climáticas opuestas a las de El Niño (McPhaden et al., 2006).

En el Perú, La Niña se asocia con una reducción significativa de las precipitaciones en la costa norte, lo que puede provocar sequías prolongadas y disminución de la humedad del suelo. En el Bosque de Cañoncillo, estas condiciones pueden afectar gravemente la vegetación, reduciendo los valores del NDVI debido a la falta de agua disponible para el crecimiento vegetal (Piao et al., 2019).

La disminución de la cobertura vegetal durante los años de La Niña puede generar pérdida de biodiversidad y aumentar la vulnerabilidad del ecosistema a la desertificación. Estudios previos han demostrado que en ecosistemas secos, la combinación de altas temperaturas y baja precipitación puede llevar a la muerte de especies arbóreas y a una reducción significativa en la regeneración de plantas nativas (Gao, 1996).

Impacto de El Niño y La Niña en la dinámica del NDVI

El uso de imágenes satelitales y el análisis del NDVI ha permitido evaluar el impacto de El Niño y La Niña en la vegetación de diversas regiones del mundo. Investigaciones realizadas en América del Sur han demostrado que los valores del NDVI aumentan significativamente durante eventos de El Niño, debido a la mayor disponibilidad de agua y el crecimiento acelerado de la vegetación. En contraste, durante La Niña, el NDVI tiende a disminuir, reflejando la reducción de la cobertura vegetal y el estrés hídrico en los ecosistemas (Huete et al., 2002).

En el caso del Bosque de Cañoncillo, el análisis de datos satelitales para el período 2015-2024 permitirá determinar cómo estos eventos han afectado la dinámica de la vegetación a lo largo del tiempo. Este estudio contribuirá a la identificación de patrones de respuesta de la vegetación a la variabilidad climática y proporcionará información clave para la gestión y conservación del ecosistema.

Características de los ecosistemas secos en el Perú

Los ecosistemas secos del Perú presentan características específicas que determinan su funcionamiento y resiliencia ante condiciones ambientales adversas:

- Baja disponibilidad de agua:
    - La escasez de precipitaciones es la principal limitación para el desarrollo de la vegetación. La mayoría de las lluvias ocurren en eventos esporádicos e irregulares, lo que dificulta la regeneración natural de los bosques secos (Mongabay Latam, 2021).
- Alta variabilidad climática:

    - Los ecosistemas secos son altamente sensibles a fluctuaciones de temperatura y humedad. Eventos extremos como El Niño y La Niña pueden alterar significativamente la disponibilidad de agua y afectar la cobertura vegetal (Holmgren et al., 2006).
- Especies adaptadas a la sequía:
    - La flora y fauna de los ecosistemas secos han desarrollado mecanismos de adaptación, como raíces profundas para acceder a reservas subterráneas de agua y hojas pequeñas o espinas para reducir la transpiración (Correa Seminario et al., 2023).
- Alta vulnerabilidad a la desertificación:
    - La degradación del suelo y la deforestación aumentan la susceptibilidad de estos ecosistemas a la desertificación, un proceso que reduce su capacidad de sostener la biodiversidad y prestar servicios ecosistémicos esenciales (MINAM, 2004).

Importancia ecológica de los ecosistemas secos

A pesar de las condiciones extremas en las que se desarrollan, los ecosistemas secos cumplen funciones ecológicas esenciales:

- Regulación del clima local: A través de la captura de carbono y la retención de humedad en el suelo, los bosques secos contribuyen a la estabilidad climática de la región.
- Mantenimiento de la biodiversidad: Albergan una gran diversidad de especies adaptadas a la aridez, muchas de las cuales son endémicas y cumplen roles clave en la dinámica del ecosistema (Conservamos por Naturaleza, s.f.).
- Provisión de servicios ecosistémicos: Estos ecosistemas proporcionan madera, forraje, frutos y otros productos esenciales para la subsistencia de comunidades locales.

Uso del NDVI para el monitoreo de los ecosistemas secos

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) ha sido ampliamente utilizado en estudios de monitoreo ambiental para evaluar cambios en la cobertura vegetal de ecosistemas secos. A través del análisis de imágenes satelitales, el NDVI permite detectar tendencias de degradación, evaluar la resiliencia de la vegetación y diseñar estrategias de conservación efectivas (Instituto Geofísico del Perú, s.f.).

En el caso del Bosque de Cañoncillo, el uso del NDVI permitirá:

- Monitorear la regeneración de la vegetación tras eventos climáticos extremos como El Niño.
- Identificar áreas de mayor vulnerabilidad ante la desertificación y la degradación del suelo.
- Evaluar la efectividad de programas de reforestación y conservación implementados en la zona.

Factores que Regulan la Fenología Vegetal

Los patrones fenológicos de la vegetación están determinados por una combinación de factores bióticos y abióticos. Entre los más relevantes se encuentran:

- Temperatura: Afecta el inicio y la duración de los ciclos fenológicos. Un aumento en la temperatura puede adelantar la floración o reducir el período de crecimiento (Piao et al., 2019).
- Precipitación y humedad del suelo: En los ecosistemas secos, la vegetación sincroniza su crecimiento y reproducción con la disponibilidad de agua. Los períodos de sequía pueden retrasar la germinación o interrumpir la producción de frutos (Rodríguez-Iturbe & Porporato, 2004).
- Fotoperiodo: La duración de la luz solar influye en la actividad fisiológica de las plantas, regulando procesos como la floración y la senescencia de las hojas (Walther et al., 2002).
- Interacción con polinizadores y dispersores de semillas: La disponibilidad de insectos polinizadores y dispersores de semillas (como aves y mamíferos) influye en el éxito reproductivo de muchas especies vegetales (Chapin et al., 2002).

2.2.5. Impacto de la Variabilidad Climática en la Vegetación del Bosque de Cañoncillo

La variabilidad climática es uno de los principales factores que influyen en la estructura y dinámica de los ecosistemas. En el caso del Bosque de Cañoncillo, ubicado en la región de La Libertad, Perú, la vegetación ha desarrollado mecanismos de adaptación a un clima árido y a fluctuaciones climáticas extremas. Sin embargo, la variabilidad en las precipitaciones y temperaturas a lo largo de los años representa un desafío para la estabilidad del ecosistema, afectando la cobertura vegetal y la biodiversidad local (IPCC, 2021).

El análisis de la relación entre la variabilidad climática y la vegetación en este bosque es crucial para comprender su resiliencia y su capacidad de regeneración. Para ello, herramientas como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) permiten evaluar los cambios en la cobertura vegetal y determinar cómo la vegetación responde a eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña (Huete et al., 2002).

Factores Climáticos que Afectan la Vegetación en el Bosque de Cañoncillo

Los principales elementos climáticos que influyen en la vegetación del Bosque de Cañoncillo incluyen:

1. Precipitación

- La disponibilidad de agua es el principal factor limitante en este ecosistema seco.
- Años con mayores precipitaciones pueden favorecer el crecimiento de la vegetación, aumentando la productividad y regeneración de especies nativas como el algarrobo (*Neltuma pallida*) y el faique (*Acacia macracantha*) (Pettorelli et al., 2005).
- En años de sequía, la vegetación reduce su actividad fotosintética, disminuyendo los valores de NDVI y aumentando el riesgo de desertificación (Piao et al., 2019).

2. Temperatura

- El aumento de la temperatura acelera la evapotranspiración, reduciendo la humedad del suelo y aumentando el estrés hídrico en las plantas (Myneni et al., 1997).

- Durante El Niño, se observan temperaturas más cálidas que pueden alterar los ciclos fenológicos de la vegetación, provocando floraciones tempranas o interrupciones en la reproducción de especies clave (Holmgren et al., 2006).

3. Fenómeno de El Niño y La Niña

- El Niño: Genera precipitaciones intensas que pueden beneficiar temporalmente la vegetación, pero también provocan erosión del suelo y acumulación de material seco propenso a incendios forestales (Philander, 1990).
- La Niña: Trae períodos de sequía prolongados que reducen la biomasa vegetal y afectan la regeneración del bosque (Rodríguez-Iturbe & Porporato, 2004).

2.2.6. Análisis Multitemporal de la Vegetación en el Bosque de Cañoncillo

El análisis multitemporal de la vegetación es una técnica clave en la teledetección que permite evaluar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo. A través del uso de imágenes satelitales y el cálculo de índices espectrales, como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), es posible identificar tendencias en la dinámica de los ecosistemas y determinar los efectos de factores climáticos y antropogénicos sobre la vegetación (Huete et al., 2002).

En el caso del Bosque de Cañoncillo, el análisis multitemporal es fundamental para comprender cómo la vegetación ha respondido a la variabilidad climática entre 2015 y 2024. Esta información es clave para el diseño de estrategias de conservación y manejo sostenible del ecosistema, permitiendo identificar patrones de degradación, regeneración y cambios en la cobertura vegetal debido a eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña (Pettorelli et al., 2005).

Importancia del Análisis Multitemporal de la Vegetación

El análisis multitemporal de la vegetación permite:

1. Monitorear la respuesta de la vegetación a la variabilidad climática:
    - Evaluar los cambios en la cobertura vegetal en respuesta a períodos de sequía o lluvias extremas.

    - Analizar cómo la vegetación se ha recuperado tras eventos de El Niño y La Niña.
2. Identificar tendencias de degradación y regeneración:
    - Detectar áreas en proceso de desertificación o pérdida de biodiversidad.
    - Evaluar la efectividad de programas de reforestación y restauración ecológica.
3. Evaluar el impacto de actividades humanas en la vegetación:
    - Determinar cómo la expansión agrícola, la deforestación o la urbanización han afectado la cobertura vegetal.
    - Establecer áreas prioritarias para la conservación del bosque.
4. Generar predicciones sobre el futuro de la vegetación:
    - Utilizar modelos de cambio de uso del suelo para proyectar escenarios de conservación y degradación.

III. METODOLOGÍA.

3.1 Área de estudio

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio: Bosque Natural El Cañoncillo, La Libertad

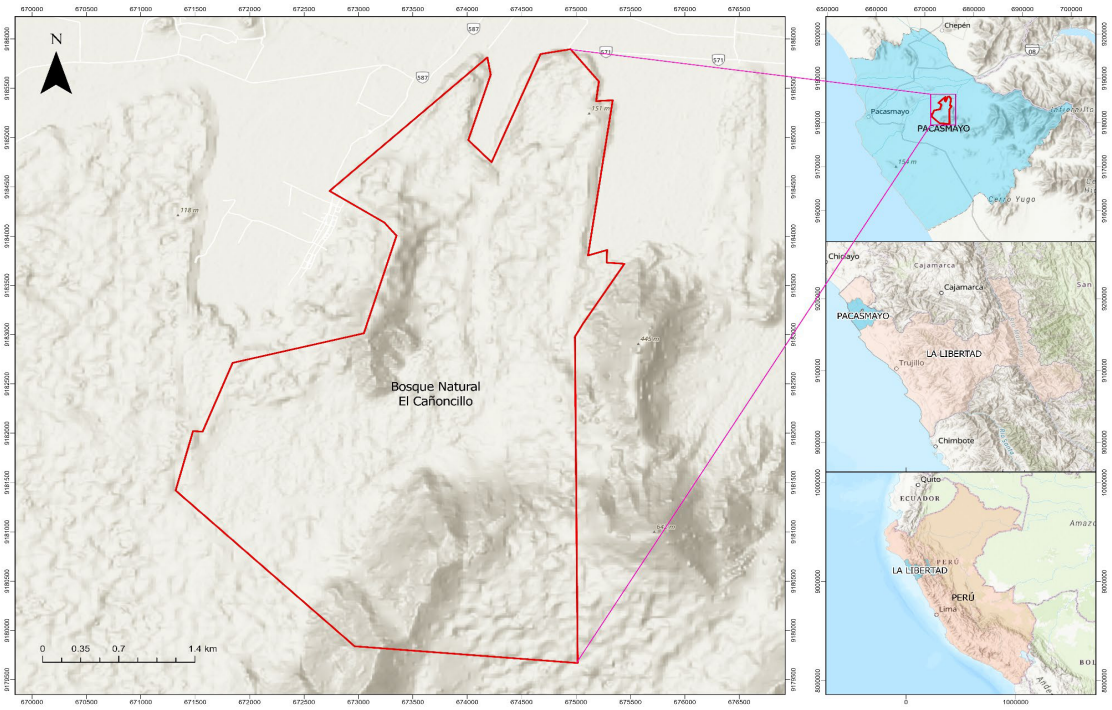
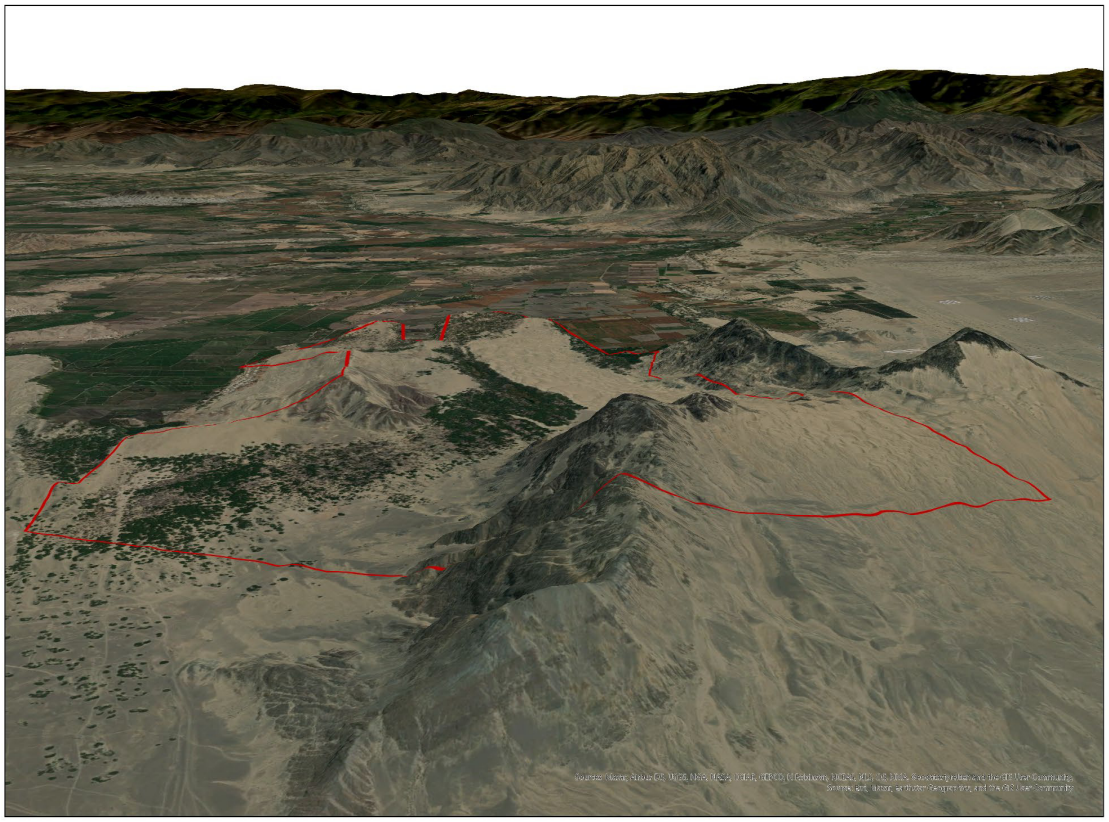


Figura 2. Vista panorámica satelital en 3D, del Bosque Natural El Cañoncillo, La Libertad (Octubre, 2025)



3.1.1 Historia del Área de Estudio

El Bosque Natural El Cañoncillo, ubicado en el distrito de San José (provincia de Pacasmayo, La Libertad), es uno de los últimos relictos de bosque seco costero del norte del Perú. Durante la época prehispánica, sus recursos fueron aprovechados por culturas como la Cupisnique, Mochica y Chimú. Posteriormente, formó parte de la Hacienda Tecapa y, tras la Reforma Agraria en la década de 1970, pasó a ser administrado por la Cooperativa Agraria de Usuarios Tecapa Ltda., que asumió su custodia comunitaria. Desde entonces, los pobladores locales implementaron medidas de vigilancia y conservación para evitar la tala y el sobrepastoreo, reconociendo el valor ecológico y cultural del bosque.

En el año 2004, el Estado peruano reconoció oficialmente al Bosque El Cañoncillo como Área de Conservación Privada (ACP) mediante la Resolución Ministerial N.º 0804-2004-

AG, a solicitud de la cooperativa propietaria. Con una extensión de 1,310.9 hectáreas, su creación tuvo como objetivo garantizar la conservación del algarrobo (*Neltuma pallida*), especie emblemática del bosque seco, y promover el uso sostenible de sus recursos. Desde entonces, se han consolidado esfuerzos de conservación comunitaria, educación ambiental y ecoturismo, a pesar de conflictos legales y presiones por uso de suelo. Hoy, El Cañoncillo representa un modelo de gestión local del patrimonio natural, integrando conservación, identidad cultural y desarrollo sostenible en un entorno árido costero.

3.1.2 Condiciones Físicas

El Área de Conservación Privada Bosque El Cañoncillo se ubica en el distrito de San José, provincia de Pacasmayo, región La Libertad, entre las coordenadas aproximadas 673,709.52 m S y 9,182,399.98 m E, con una altitud media de 100 msnm. Forma parte del valle bajo del río Jequetepeque, dentro de la región natural Chala. Su relieve es variado, combinando planicies costeras, dunas arenosas, lomas bajas y depresiones inter dunares, donde se encuentran tres lagunas estacionales —Gallinazo, Larga y Cañoncillo— que actúan como reservorios naturales de agua dulce. Estos cuerpos de agua y las pequeñas elevaciones circundantes generan un mosaico de microambientes que sustentan una alta diversidad de flora y fauna.

Los suelos del área son principalmente arenosos y poco desarrollados, con baja fertilidad y escasa retención hídrica, típicos de ambientes áridos costeros. En zonas bajas, los suelos presentan mayor contenido de limo y arcilla, con acumulación de sales debido a la alta evaporación. La hidrografía depende indirectamente de las aguas subterráneas del valle del Jequetepeque, que mantienen un nivel freático capaz de sostener el bosque en periodos secos. Este conjunto físico, relieve dunar, suelos pobres y presencia de humedales intermitentes, constituye la base ecológica que permite la persistencia de un bosque seco relicto en medio del desierto costero del norte peruano.

3.1.3 Condiciones Climáticas

El clima de El Cañoncillo es tropical árido y marcadamente estacional. Prevalece un régimen cálido y seco durante todo el año, con temperatura media anual en torno a 23–24 °C. Los

veranos (diciembre-marzo) son calurosos y ligeramente más húmedos, mientras que los inviernos presentan condiciones templadas a cálidas con alta aridez y frecuentes cielos nublados matutinos por incursión de humedad oceánica. Las precipitaciones promedio en la zona son exiguas, típicamente del orden de 20–30 mm anuales, lo que clasifica al clima como desértico cálido (BWh) según Köppen. En años normales prácticamente no llueve –salvo ligeras lloviznas invernales o eventuales chubascos estivales de muy baja magnitud–. Sin embargo, el área es sensible al evento El Niño, durante el cual pueden ocurrir lluvias extraordinarias: por ejemplo, episodios El Niño fuertes han generado precipitaciones acumuladas de hasta varios cientos de milímetros en pocos meses, ocasionando la temporal inundación del bosque y la recarga de las lagunas interiores. Estos pulsos esporádicos de lluvia son vitales para la regeneración del ecosistema, ya que llenan las pozas y humedales estacionales, favoreciendo la germinación de plántulas y el florecimiento masivo de herbáceas anuales. Los vientos en la zona son en general escasos o moderados, predominando las brisas costeras del SO, aunque las dunas evidencian que históricamente ha habido transporte eólico de arena. La evapotranspiración potencial es muy alta, superando ampliamente a la precipitación, lo que explica la aridez extrema y la dependencia del bosque de aportes hídricos subterráneos (niveles freáticos asociados al río) para sostenerse. En síntesis, El Cañoncillo posee un clima hiper árido y cálido, típico del desierto costero del Pacífico, encuadrado dentro de la Ecorregión del Bosque Seco Ecuatorial, donde la marcada estacionalidad de las lluvias (con años multianuales secos y raros años húmedos) define la fenología de la vegetación.

3.1.4 Vegetación

Según el MINAM (2018) el Bosque El Cañoncillo pertenece al ecosistema de Bosque estacionalmente seco ribereño (Algarrobal), caracterizada por la estacionalidad de sus lluvias y la presencia de especies adaptadas a la aridez. Su fisonomía está dominada por un estrato arbóreo discontinuo, de mediana altura, donde sobresale el algarrobo (*Neltuma pallida*), especie clave que forma la estructura y funcionalidad del ecosistema. Bajo su sombra prosperan arbustos, herbáceas estacionales y especies trepadoras que aprovechan los pulsos de humedad. Esta vegetación crea microambientes que permiten la coexistencia de una fauna diversa y especializada.

La diversidad florística del área incluye alrededor de 40 a 50 especies de plantas vasculares pertenecientes a más de 25 familias, siendo Fabaceae la más representativa. Entre las especies más comunes se encuentran el palo santo (*Bursera graveolens*), el overo (*Cordia lutea*), el sapote (*Capparis scabrida*), el faique (*Vachellia macracantha*) y el cuncuno (*Vallesia glabra*), todas adaptadas a condiciones extremas de sequía mediante estrategias como hojas pequeñas o caducas y raíces profundas. En las zonas húmedas próximas a las lagunas aparecen comunidades de juncos, totoras (Typha spp.) y berros (*Bacopa monnieri*), que aportan diversidad al ecosistema y sostienen especies acuáticas y migratorias.

La vegetación del Cañoncillo muestra un alto grado de endemismo y resiliencia ecológica, siendo un refugio natural frente a la pérdida generalizada de bosques secos costeros en Perú. El algarrobo cumple un rol ecológico esencial al fijar nitrógeno y mejorar la fertilidad del suelo, además de proveer sombra, alimento y materia orgánica. Sin embargo, este ecosistema enfrenta amenazas por la tala, el sobrepastoreo y la expansión agrícola. Gracias a su estatus de Área de Conservación Privada, se promueven acciones de reforestación, educación ambiental y ecoturismo, orientadas a mantener la integridad del bosque y su valor como uno de los últimos relictos del bosque seco costero liberteño.

3.2 Tipo de investigación.

El estudio es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, alcance correlacional y diseño no experimental, longitudinal retrospectivo.

- **Según la Profundidad del Estudio: Investigación aplicada**

  Busca generar conocimiento para la conservación del ACP del Bosque de Cañoncillo. se pretende comprender cómo y por qué los cambios en la temperatura, la precipitación y otros factores afectan la dinámica del NDVI y la cobertura vegetal en el ecosistema. Además, el análisis se enfoca en explicar la relación entre las fluctuaciones climáticas y la regeneración o degradación del bosque a lo largo del período 2017-2024.

- **Según el Enfoque: Investigación Cuantitativa**

Este estudio se enmarca en el enfoque cuantitativo, ya que se basó en la recolección, análisis y comparación de datos numéricos obtenidos mediante herramientas de teledetección, como imágenes satelitales y el cálculo de índices espectrales (NDVI, NDWI). El uso de datos meteorológicos (temperatura, precipitación) y de imágenes satelitales implica el procesamiento de grandes volúmenes de información que se analizan mediante métodos estadísticos y geoespaciales para establecer relaciones entre las variables.

- **Según la Fuente de Datos: Investigación No Experimental**

  Se trató de una investigación no experimental, ya que los datos se obtienen mediante la observación y el análisis de imágenes satelitales, sin manipulación directa de las variables. No se aplican tratamientos experimentales sobre la vegetación ni sobre los factores climáticos, sino que se analizan fenómenos naturales en su contexto real.

- **Según la Temporalidad: Investigación Longitudinal retrospectiva.**

  El estudio tuvo un diseño longitudinal retrospectivo, ya que analiza los cambios en la vegetación durante un período de ocho años (2017-2024). Se evaluaron los patrones temporales del NDVI y otros índices relacionados con la vegetación a través del análisis de series temporales de imágenes satelitales. Este enfoque permitió detectar tendencias a largo plazo y evaluar la resiliencia del ecosistema frente a la variabilidad climática.

3.3 Diseño de Investigación

El diseño es descriptivo-correlacional de corte longitudinal y enfoque espacial-temporal.

3.3.1. Diseño Descriptivo-Correlacional

El diseño de la investigación es descriptivo-correlacional, ya que:

- Descriptivo: Se analizó la evolución del NDVI en el Bosque de Cañoncillo, describiendo los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

- Correlacional: porque se cuantifica la relación entre NDVI y clima mediante coeficientes de Spearman, Kendall y Pearson.

3.3.2. Diseño Espacial-Temporal

Además, el estudio tiene un diseño espacial-temporal, ya que:

- Temporal: Analiza datos en una secuencia cronológica (2017-2024) para detectar patrones de cambio en la vegetación.
- Espacial: Se evalúa la distribución geográfica de los cambios en la cobertura vegetal en diferentes áreas dentro del Bosque de Cañoncillo, utilizando técnicas de teledetección y SIG.

Tabla 1. Resumen del Tipo y Diseño de Investigación

Criterio	Clasificación
Enfoque	Cuantitativo
Profundidad	Explicativa
Temporalidad	Longitudinal
Manipulación de Variables	No experimental
Diseño Principal	Descriptivo-Correlacional
Diseño Complementario	Espacial-Temporal

3.4 Unidad de análisis.

3.4.1 Unidad espacial

- Unidad espacial principal: cada píxel de 10 m × 10 m dentro del polígono del ACP Bosque de Cañoncillo (1494.17 ha).

3.4.2 Unidades de Análisis Complementarias

- Unidad temporal principal: cada estación del año (verano, otoño, invierno, primavera) para el período 2017–2024.

- Unidad de análisis estadístico: registro estacional de NDVI promedio y variables climáticas mensuales (temperatura media, precipitación acumulada).

3.5 Población y muestra.

3.5.1 Población.

La población está constituida por la totalidad de la cobertura del Área de Conservación Privada "Bosque de Cañoncillo", abarcando 1494.17 ha.

El ecosistema evaluado corresponde al bosque seco del Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo, situado en la región La Libertad, Perú. Esta área de conservación privada abarca 1494.17 hectáreas (polígono SERNANP). El período de estudio comprendido entre 2017 y 2024 ha permitido observar y analizar los cambios en la vegetación a lo largo del tiempo, en respuesta a la variabilidad climática que afecta la región

3.5.2 Tamaño de muestra.

- Número total de píxeles Sentinel-2 por escena: ≈ 1'494,170 píxeles (10 m)

- Número total de imágenes procesadas: 32 (4 estaciones × 8 años)

- Unidades muestrales para análisis estadístico: 32 registros estacionales de NDVI promedio.

El tamaño de la muestra en este estudio depende de la cantidad de unidades de análisis seleccionadas dentro del Bosque de Cañoncillo para evaluar la dinámica del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en el período 2017-2024.

3.5.3 Selección de la muestra

Se tomo en cuenta los siguientes criterios:

- Imágenes con nubosidad ≤ 30% (excepto casos justificados)
- Fechas representativas de cada estación (±15 días del cambio estacional).
- Validación cruzada con datos SENAMHI y LARC NASA.

3.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.

3.6.1 Técnicas de investigación

TÉCNICA	APLICACIÓN
Teledetección satelital	Obtención de imágenes Sentinel-2, Landsat 8/9
Análisis de series temporales	Tendencia del NDVI y clima 2017–2024
SIG	Mapeo estacional de NDVI
Análisis Estadístico	Correlación de Spearman, Kendall, Pearson; ANOVA; Chi-cuadrado

Consiste en la adquisición de información sobre la superficie terrestre sin contacto directo, utilizando sensores remotos a bordo de satélites. Se recopilarán datos espectrales relacionados con la vegetación (NDVI) durante el período de estudio.

- **Análisis de Series Temporales:** Permite identificar tendencias, anomalías y patrones en los valores de NDVI, correlacionándolos con eventos climáticos como El Niño, La Niña y variabilidad interanual de temperatura y precipitación.
- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Se utilizarán para integrar, procesar y representar espacialmente los datos de vegetación y clima. Los SIG permitirán crear mapas de variación del NDVI, zonas de recuperación o degradación, y superponer variables ambientales.

- **Análisis Estadístico y Correlacional:** Para establecer relaciones entre variables (por ejemplo, NDVI vs. precipitación), se utilizarán técnicas de análisis de correlación y estadística descriptiva.

3.6.2 Instrumentos de investigación.

INSTRUMENTO	ESPECIFICACIÓN
Imágenes de satélite	Sentinel-2 MSI (10 m), Landsat 8/9 (30 m)
Plataforma	Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub
Datos climáticos	NASA POWER LARC (temperatura, precipitación), SENAMHI (estación Guadalupe)
Software	QGIS 3.28, R 4.3, Python 3.10
Índices	NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)

3.7 Análisis e interpretación de la información

El análisis se estructuró en cinco fases:

- Preprocesamiento: corrección atmosférica, enmascaramiento de nubes, cálculo de NDVI por píxel.
- Análisis descriptivo: estadísticos mensuales y estacionales (media, desviación, máximos, mínimos).
- Análisis espacial: generación de mapas de NDVI clasificado en 7 rangos (-0.1 a 0.6+).
- Análisis estadístico inferencial:
  - Chi-cuadrado para diferencias estacionales de NDVI ($\alpha = 0.05$)
  - ANOVA para diferencias interanuales de temperatura y precipitación
  - Correlaciones de Spearman, Kendall y Pearson entre NDVI vs temperatura y precipitación
- Interpretación ecológica: discusión de resultados en el marco de la resiliencia del bosque seco.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.1.1 Comportamiento espacio- temporal del NDVI (2017-2024)

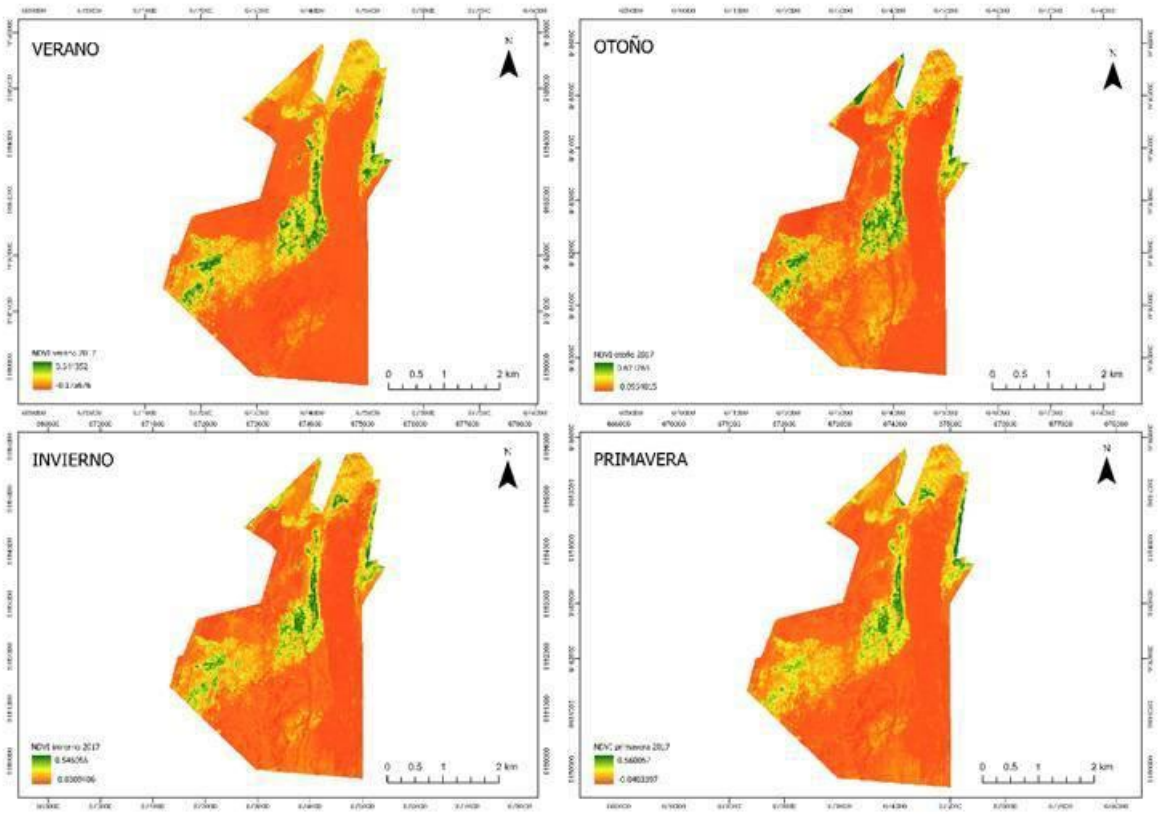
Imágenes NDVI (2017-2024)

Año 2017

En el análisis multitemporal correspondiente al año 2017, se generaron mapas del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para las cuatro estaciones del año —verano, otoño, invierno y primavera— sobre la superficie del Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo. Los mapas evidencian variaciones espaciales y estacionales en la cobertura vegetal, representadas por un gradiente cromático desde valores bajos (rojos y naranjas) hasta altos (verdes). El mayor verdor (valores altos de NDVI) se observa consistentemente en la zona central y norte del área de estudio, mientras que las zonas sur y suroeste presentan menor densidad de vegetación.

Los valores de NDVI fueron extraídos a partir de imágenes satelitales correspondientes a las siguientes fechas: verano (08/12/2016), otoño (07/04/2017), invierno (31/03/2017) y primavera (19/10/2017). La calidad de estas imágenes estuvo condicionada por el porcentaje de nubosidad, que fue baja en verano (12.75%) y otoño (2.46%), pero considerablemente alta en invierno (65.71%) y primavera (68.35%), lo cual puede haber afectado parcialmente la precisión de los valores NDVI en esas estaciones. A pesar de ello, el análisis permite observar patrones estacionales en la dinámica de la vegetación del bosque seco, lo cual es fundamental para evaluar su respuesta fenológica frente a la variabilidad climática interanual

Figura 3. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2017



Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

Año 2018

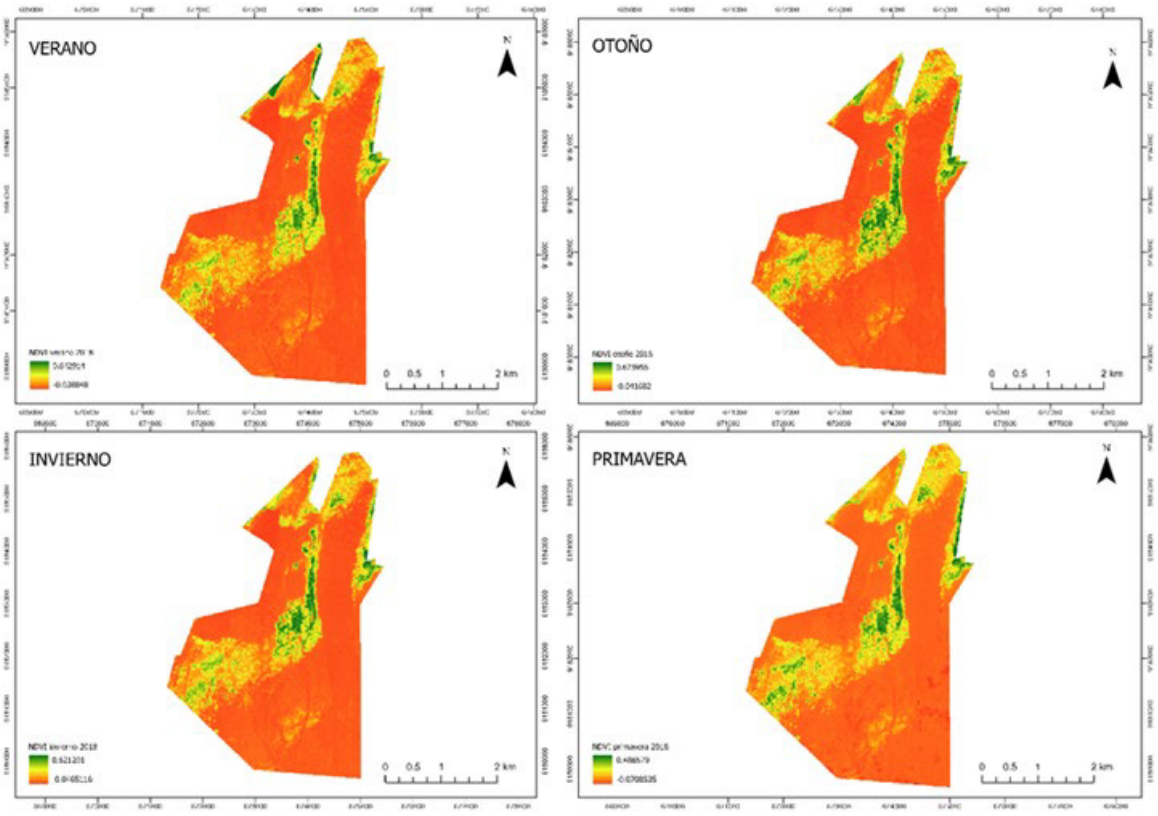
En el análisis estacional del año 2018, se generaron mapas del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para las cuatro estaciones del año en el Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo, permitiendo observar la dinámica espacial y temporal de la cobertura vegetal del bosque seco. Las imágenes correspondientes a verano (11/02/2018), otoño (22/05/2018), invierno (31/07/2018) y primavera (23/11/2018) revelan patrones diferenciados en la respuesta de la vegetación, que se evidencian a través de las variaciones en los valores de NDVI.

Durante el verano y el otoño, los mapas presentan zonas con mayor concentración de valores positivos de NDVI (colores verde y amarillo), lo cual se asocia a una mayor actividad

fotosintética y cobertura vegetal, particularmente en el sector centro-norte del área. Esta condición se vio favorecida por niveles de nubosidad muy bajos: 2.83% en verano y apenas 0.12% en otoño, lo que garantiza una alta calidad en la captura satelital. Por el contrario, en invierno y primavera, el NDVI muestra una leve disminución, acompañada de un incremento en la nubosidad (19.17% y 21.46%, respectivamente), lo que podría afectar tanto la reflectancia captada como la real actividad vegetal.

Estos resultados permiten identificar tendencias intra-anuales en el verdor del ecosistema, lo cual es esencial para establecer relaciones con las condiciones climáticas y planificar estrategias de conservación adaptativas.

Figura 4. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2018



Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

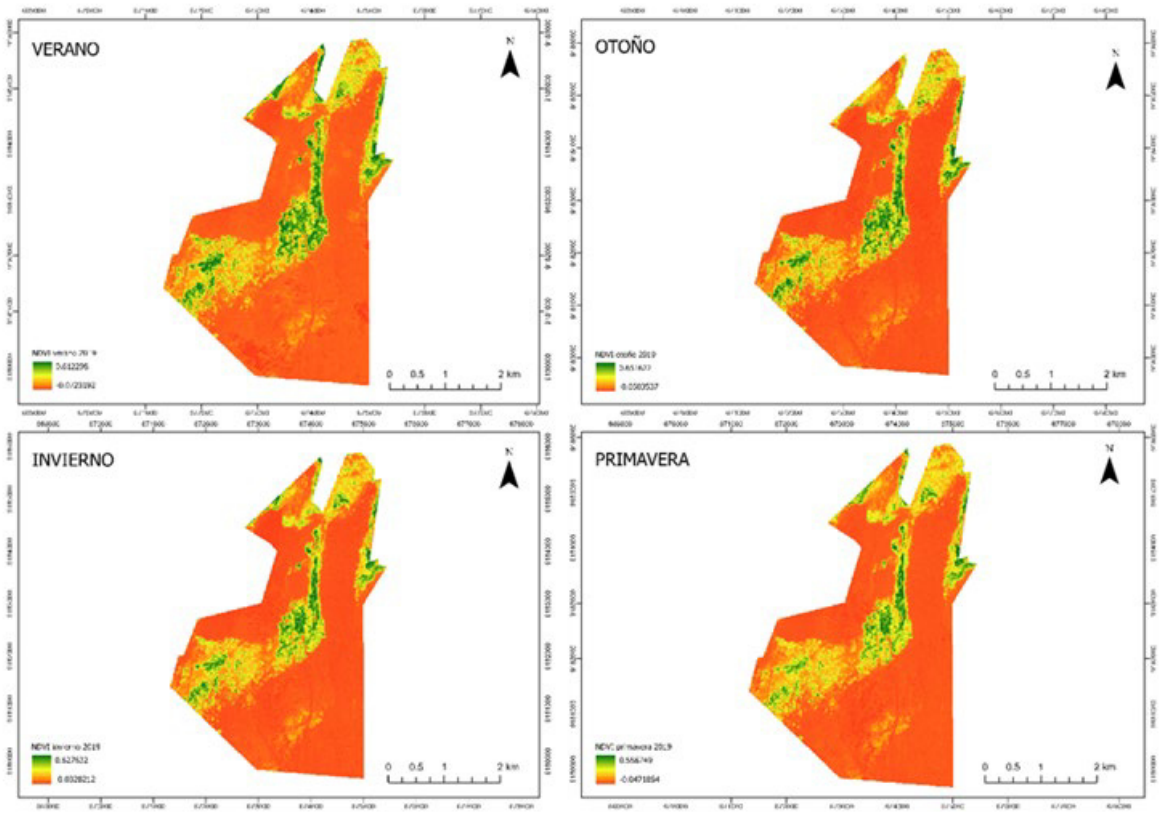
Año 2019

Durante el año 2019, se realizó un análisis estacional del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en el Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo, utilizando imágenes satelitales correspondientes a las cuatro estaciones: verano (07/01/2019), otoño (17/04/2019), invierno (31/07/2019) y primavera (29/09/2019). Los resultados muestran patrones consistentes en la distribución de la vegetación verde (valores altos de NDVI), especialmente concentrada en las zonas del norte y centro del área de estudio.

En verano, otoño e invierno, los niveles de nubosidad fueron relativamente bajos -- 5.15%, 6.60% y 9.63% respectivamente—, lo que favoreció la calidad y precisión de los datos NDVI obtenidos. Estas tres estaciones presentan una buena distribución de cobertura vegetal con predominancia de tonos amarillos y verdes en zonas clave del ecosistema. En contraste, la imagen correspondiente a la primavera, afectada por un alto porcentaje de nubosidad (63.13%), muestra una cobertura menos definida, con posible interferencia en la interpretación precisa del índice NDVI.

La evaluación comparativa de las cuatro estaciones evidencia una variabilidad moderada en la vegetación, probablemente influenciada por la disponibilidad de humedad y condiciones térmicas del año. Este análisis apoya el objetivo del proyecto de comprender las fluctuaciones estacionales del bosque seco, permitiendo identificar las etapas de mayor productividad vegetal y los momentos críticos de estrés ecológico.

Figura 5. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2019



Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

Año 2020

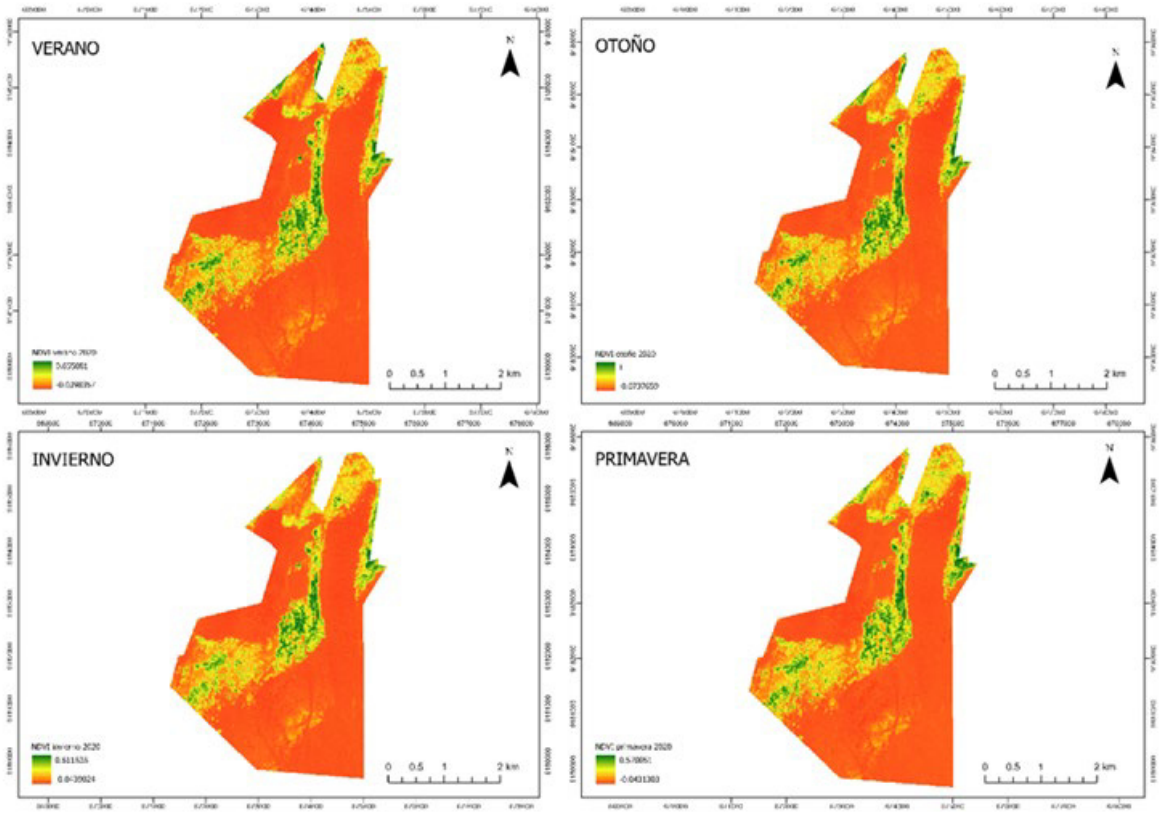
Durante el año 2020, el monitoreo estacional del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en el Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo permitió evaluar con alta precisión la dinámica intra-anual del verdor vegetal. Los datos fueron obtenidos de imágenes satelitales con fechas representativas para cada estación: verano (21/02/2020), otoño (11/05/2020), invierno (10/06/2020) y primavera (07/11/2020). Un factor clave en este análisis fue la baja presencia de nubosidad en todas las capturas, con valores inferiores al 4%, lo que favoreció la calidad de las imágenes y la fiabilidad del análisis.

Los resultados indican un patrón generalizado de buena cobertura vegetal durante todas las estaciones, con valores NDVI elevados especialmente en las zonas del norte y noreste del

área, donde la vegetación muestra mayor vigor fotosintético. La imagen de invierno presenta los valores NDVI más altos del año (0.513126), lo que podría estar asociado a una mayor disponibilidad de humedad acumulada y menor estrés térmico. En primavera también se observa una cobertura saludable, aunque con mayor dispersión de valores medios.

Este comportamiento sugiere que el año 2020 fue favorable en términos de condiciones ambientales para la vegetación del bosque seco, lo cual puede deberse a una combinación de lluvias previas, temperaturas moderadas y baja nubosidad. Estos resultados fortalecen el análisis multianual del proyecto, permitiendo establecer comparaciones precisas sobre la resiliencia ecológica del ecosistema frente a la variabilidad climática.

Figura 6. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2020



Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

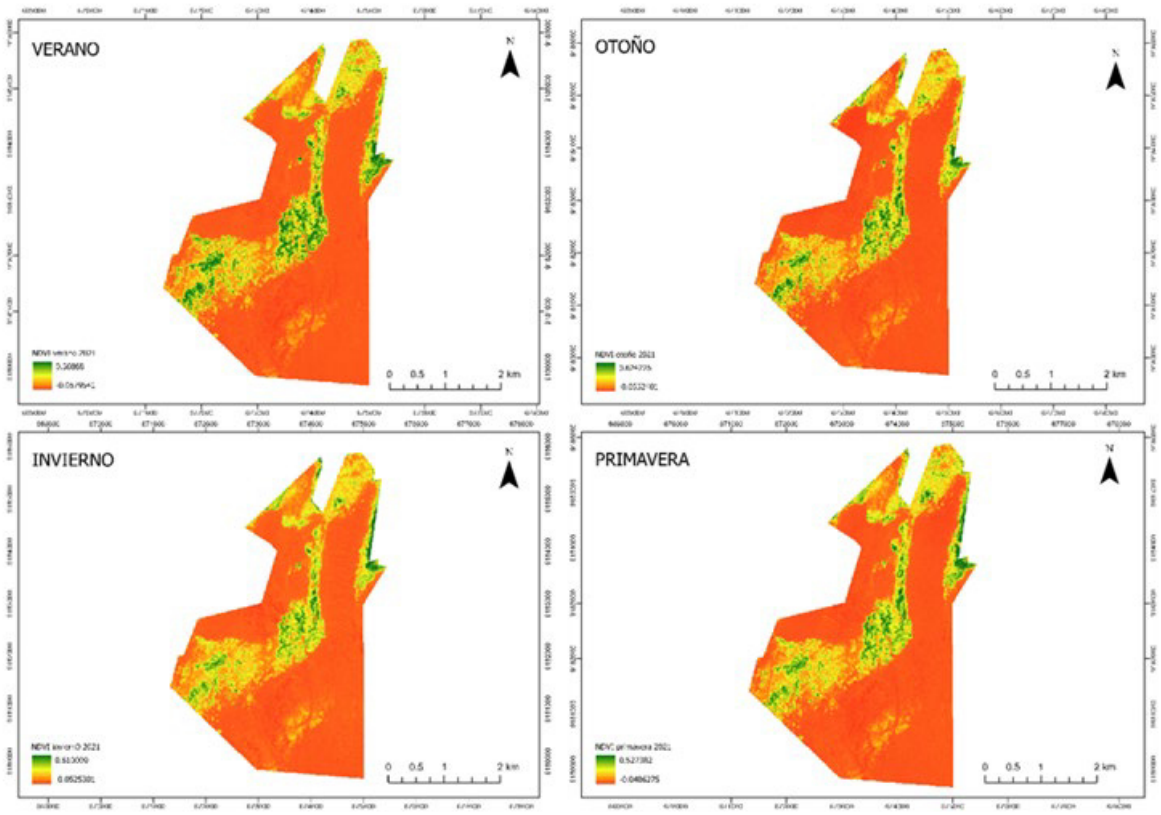
Año 2021

Durante el año 2021, el monitoreo del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para las cuatro estaciones en el Bosque de Cañoncillo evidenció patrones contrastantes en la cobertura vegetal del ecosistema seco. Las fechas de adquisición de las imágenes satelitales fueron: verano (31/01/2021), otoño (12/03/2021), invierno (20/07/2021) y primavera (03/10/2021), con un rango de nubosidad que osciló entre valores mínimos en verano (0.07%) y otoño (0.38%), hasta niveles más altos en invierno (27.56%) y primavera (10.53%).

Los mapas NDVI muestran una relativa homogeneidad espacial en el comportamiento de la vegetación durante verano y otoño, con cobertura moderada (tonos anaranjados y amarillos), probablemente asociada a condiciones de mayor radiación y escasa precipitación. Sin embargo, se observa un incremento notable de la densidad vegetal durante la primavera, donde se registran los valores NDVI más altos del año (hasta 0.537292), localizados especialmente en la franja nororiental del área. Esta tendencia sugiere un repunte en la actividad fotosintética, posiblemente favorecido por acumulación de humedad previa o condiciones micro climáticas.

La calidad de las imágenes, especialmente en verano y otoño debido a la casi nula nubosidad, permitió una detección precisa de las variaciones del verdor. En conjunto, los resultados de 2021 confirman una dinámica estacional activa, marcada por la respuesta diferenciada de la vegetación a los factores climáticos, y constituyen una pieza clave para el análisis multianual del comportamiento del NDVI en este ecosistema de bosque seco.

Figura 7. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2021



Fuente.Imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

Año 2022

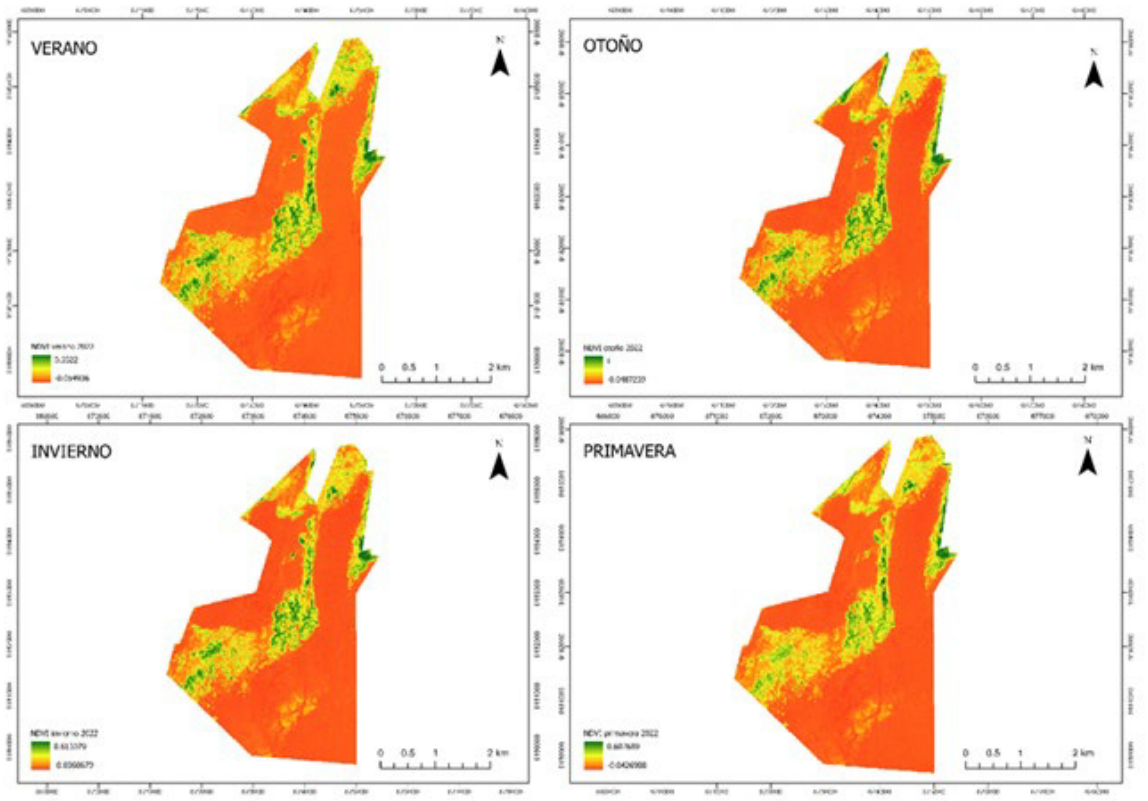
En el año 2022, el análisis estacional del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) en el Bosque de Cañoncillo reveló una variación significativa en la cobertura vegetal a lo largo del año. Las imágenes satelitales procesadas corresponden a fechas representativas de cada estación: verano (11/02/2022), otoño (11/05/2022), invierno (15/06/2022) y primavera (18/10/2022). Las condiciones atmosféricas durante la toma de imágenes fueron óptimas, especialmente en verano y otoño, donde la nubosidad fue casi inexistente (0.01% y 0.03%, respectivamente), permitiendo una mayor precisión en la detección remota.

Los mapas de NDVI muestran una tendencia creciente en la actividad vegetal desde el verano hasta la primavera. En verano, la cobertura vegetal fue reducida, con valores NDVI bajos en

la mayor parte del área, indicativos de estrés hídrico típico de la estación seca. Sin embargo, hacia otoño se observa una leve mejora en la respuesta espectral de la vegetación, y en invierno esta tendencia continúa, alcanzando un NDVI máximo de 0.530929, lo cual refleja una fase de recuperación de la vegetación. En primavera, se alcanza el pico vegetativo del año (NDVI de hasta 0.567429), particularmente en las zonas del noreste del área de conservación.

Estos resultados confirman una respuesta ecológica positiva del ecosistema ante condiciones climáticas progresivamente más favorables, especialmente durante el segundo semestre del año. La baja nubosidad en las imágenes refuerza la confiabilidad de los análisis, permitiendo observar con claridad la dinámica estacional de la vegetación en este bosque seco tropical. Esta información es fundamental para comprender la resiliencia del bosque frente a la variabilidad climática y para proyectar estrategias de conservación basadas en evidencia multitemporal.

Figura 8. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2022



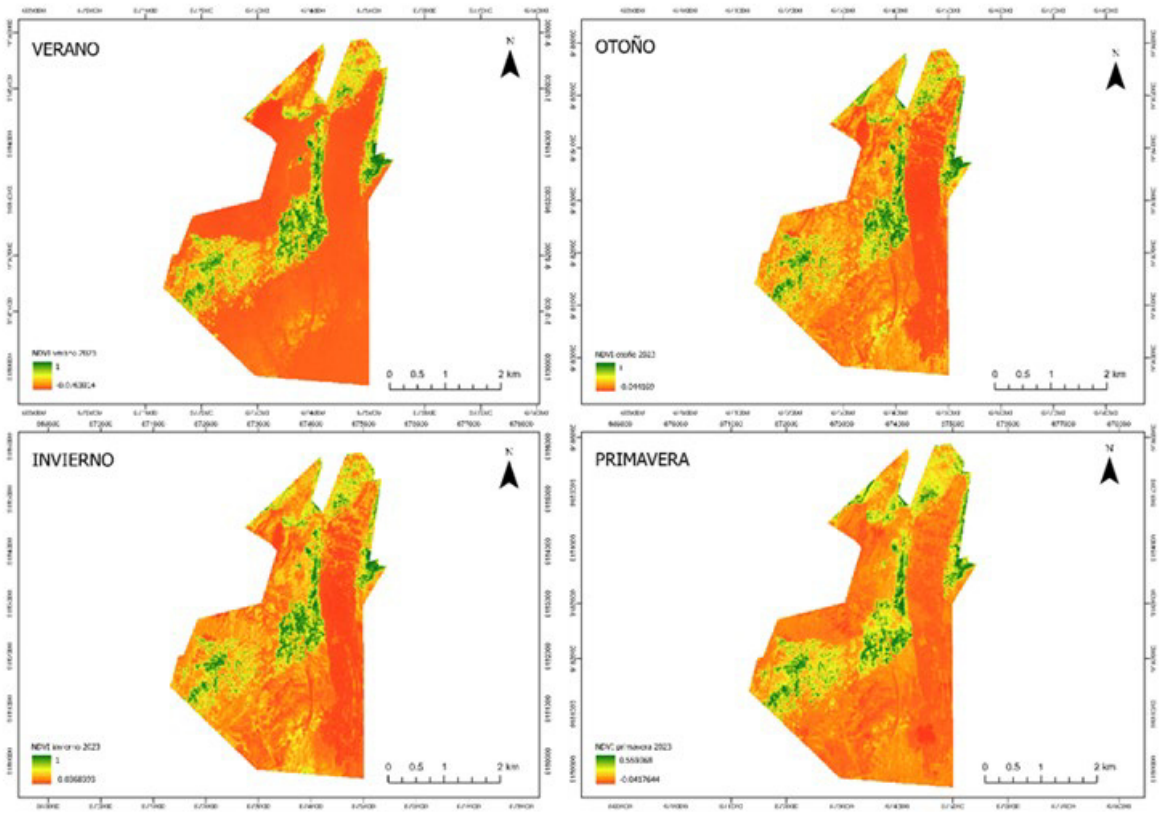
Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

Año 2023

En el año 2023, la evolución del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Área de Conservación Privada "Bosque de Cañoncillo" presentó variaciones notables a lo largo de las cuatro estaciones climáticas. Durante el verano (11 de enero), con un bajo porcentaje de nubosidad del 2.40%, se observó un NDVI de 0.526324, lo que indica una cobertura vegetal moderada, especialmente en las zonas centrales del bosque. En otoño (6 de mayo), el NDVI disminuyó a 0.491603, evidenciando una leve reducción de la vegetación, con una nubosidad de 4.30%, lo cual no afectó significativamente la captación de datos satelitales.

En invierno (15 de junio), con una nubosidad de 8.85%, el valor del NDVI se elevó a 0.566393, lo que sugiere un incremento en la densidad y vigor de la vegetación, posiblemente influenciado por condiciones climáticas más húmedas. Finalmente, en primavera (28 de septiembre), el NDVI se mantuvo alto con un valor de 0.553828 y una nubosidad del 8.47%, reflejando una continuidad en la productividad vegetal. Estos resultados demuestran una dinámica estacional coherente en la cobertura vegetal del bosque seco de algarrobo, donde los valores más altos de NDVI tienden a registrarse en invierno y primavera, y los más bajos en otoño.

Figura 9. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2023



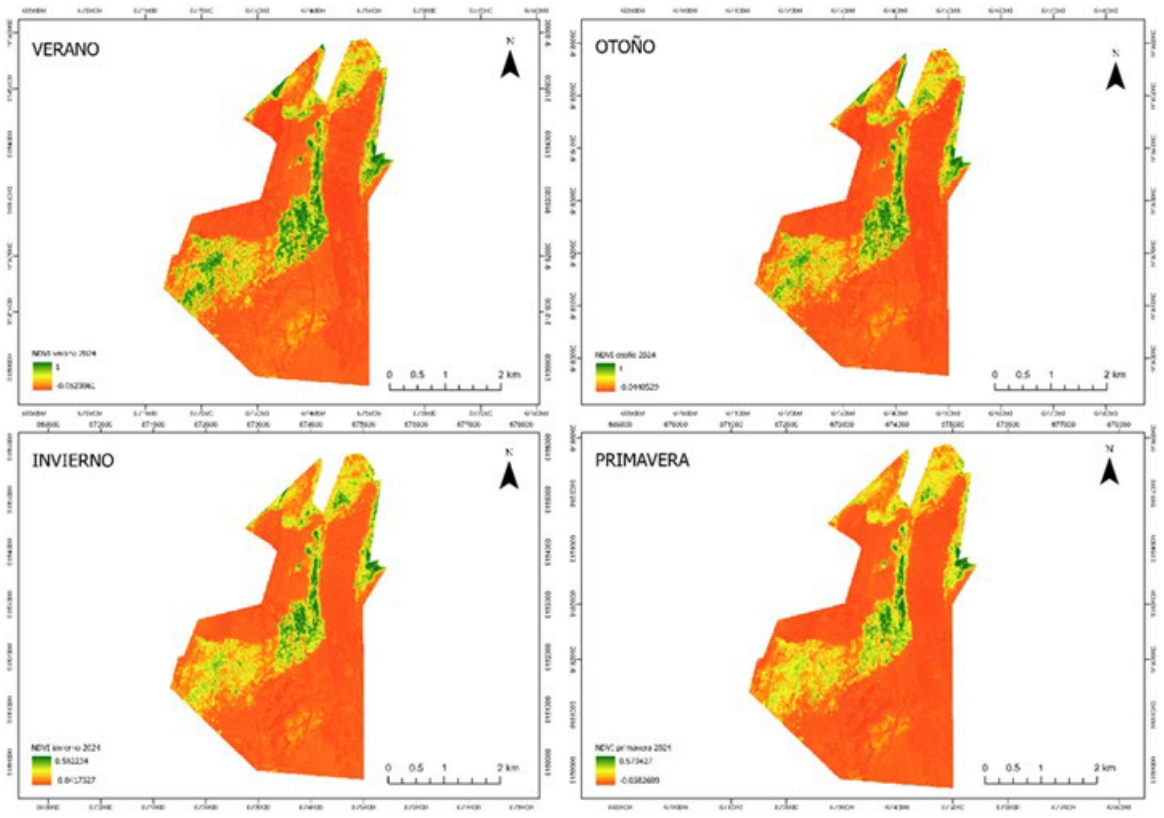
Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

Año 2024

Durante el año 2024, los mapas NDVI del Bosque de Cañoncillo reflejan una marcada variación estacional en la cobertura vegetal, evidenciando el comportamiento del ecosistema del bosque seco en relación con las fluctuaciones climáticas. En verano (21/01/2024), el índice NDVI presentó valores bajos en gran parte del territorio, destacando una predominancia de tonos rojizos que indican escasa vegetación fotosintéticamente activa, situación influida por una nubosidad baja del 0.20%. En otoño (16/03/2024), se observó una mejora leve en el verdor, especialmente en los corredores riparios del norte del bosque, con un NDVI ligeramente superior y una nubosidad de 6.54%. Durante el invierno (29/06/2024), la cobertura vegetal mostró su punto más alto de vigor, con extensas zonas en verde

reflejando una mayor actividad fotosintética, coincidiendo con el mayor porcentaje de nubosidad (28.72%) del año. Finalmente, en primavera (26/11/2024), el NDVI continuó mostrando zonas activas, aunque con una ligera reducción en comparación con el invierno, lo cual puede estar asociado al descenso en la humedad disponible, con nubosidad del 9.60%. Estos resultados confirman la fuerte influencia estacional sobre el comportamiento del bosque de algarrobo, siendo el invierno la estación más favorable para su desarrollo vegetativo.

Figura 10. Mapas estacionales de NDVI del Bosque Natural El Cañoncillo del año 2024



Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Sentinel-2MSI. Datos obtenidos de Copernicus Open Access Hub (2025).

4.1.2 Distribución de Áreas por clases de NDVI

Año 2017

El análisis estacional del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al año 2017, basado en imágenes satelitales, permite caracterizar con alta precisión la dinámica de la cobertura vegetal en el polígono de estudio del Bosque de Cañoncillo. La variabilidad del NDVI, cuyo valor depende directamente de la reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano y, por tanto, de la cantidad de clorofila activa en la vegetación— se traduce en patrones espaciales de cobertura que reflejan las condiciones fenológicas y climáticas propias de cada estación

Figura 11. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2017

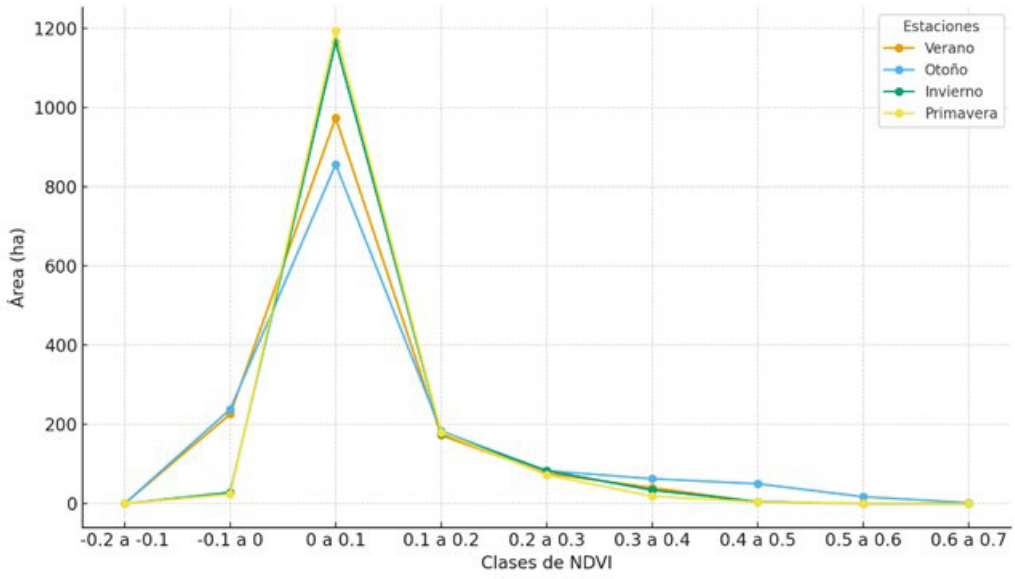


Tabla 2. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2017

VERANO

NDVI MIN	NDVI MAX	CLASES	ÁREA (HAS)
-0.18	0.54	-0.2 a -0.1	0.02
		-0.1 a 0	226.07

		0 a 0.1	974.41
		0.1 a 0.2	172.69
		0.2 a 0.3	76.08
		0.3 a 0.4	40.48
		0.4 a 0.5	4.08
		0.5 a 0.6	0.17
Total		8	1494

OTOÑO

NDVI MIN	NDVI MAX	CLASES	ÁREA (HAS)
-0.09	0.67	-0.1 a 0	238.24
		0 a 0.1	856.46
		0.1 a 0.2	183.41
		0.2 a 0.3	83
		0.3 a 0.4	62.87
		0.4 a 0.5	50.25
		0.5 a 0.6	17.49
		0.6 a 0.7	2.28

Total		8	1494

INVIERNO

NDVI MIN	NDVI MAX	CLASES	ÁREA (HAS)
-0.03	0.55	-0.1 a 0	28.22
		0 a 0.1	1165.37
		0.1 a 0.2	177.51
		0.2 a 0.3	83.29
		0.3 a 0.4	34.27
		0.4 a 0.5	5.08
		0.5 a 0.6	0.26
		7	1494

PRIMAVERA

NDVI MIN	NDVI MAX	CLASES	ÁREA (HAS)
-0.04	0.56	-0.1 a 0	24.14
		0 a 0.1	1193.7
		0.1 a 0.2	179.86
		0.2 a 0.3	72.49
		0.3 a 0.4	18.91

	0.4 a 0.5	4.19
	0.5 a 0.6	0.71
	7	1494

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En verano, el rango de NDVI se extiende entre -0.18 y 0.54. Predominan los valores bajos, con un 77% del área total concentrada en las clases entre -0.1 y 0.1 (1200.48 ha), lo que indica una vegetación poco activa o suelos desnudos. Las clases superiores, que representan vegetación saludable (NDVI > 0.2), ocupan solo el 12% del área, lo que es consistente con el estrés hídrico típico de esta estación en ecosistemas secos.

En otoño, con un NDVI máximo de 0.67, se observa un ligero aumento en las clases de vegetación activa: las áreas con NDVI > 0.2 alcanzan 218.14 ha, lo que podría indicar una recuperación temporal del verdor debido a precipitaciones iniciales. La superficie con valores entre 0 y 0.1 (856.46 ha) aún domina el paisaje, lo que sugiere un mosaico heterogéneo en el estado fenológico del bosque seco.

Durante el invierno, aunque el NDVI máximo baja a 0.55, se mantiene una proporción estable de vegetación activa: 122.9 ha en las clases superiores (NDVI > 0.2). Sorprendentemente, la clase 0 a 0.1 incrementa sustancialmente hasta 1165.37 ha, abarcando más del 80% del área total, lo que denota una cobertura generalizada de vegetación con baja actividad fotosintética, quizás debido a nubosidad o acumulación de biomasa seca.

En primavera, pese a una recuperación del NDVI máximo a 0.56, se mantiene la tendencia de baja respuesta vegetativa. Más del 82% del área (1193.7 ha) se concentra en la clase 0 a 0.1, y las clases de mayor verdor (≥ 0.2) suman menos de 100 ha, lo que evidencia una fenología aún limitada y probablemente regulada por la estacionalidad hídrica del ecosistema

En síntesis, a lo largo del ciclo anual 2017, se revela un patrón de marcada estacionalidad en la respuesta espectral de la vegetación. Las clases NDVI superiores, indicadoras de cobertura activa y saludable, son mínimas y restringidas a ciertos momentos del año, con mayor

presencia en otoño. Este comportamiento confirma la fragilidad ecológica del bosque seco estacional y resalta la utilidad del NDVI como herramienta diagnóstica para la planificación ambiental, la detección de zonas críticas y el seguimiento del cambio climático en estos ecosistemas.

AÑO 2018

Análisis Estacional del NDVI – Año 2018

Verano (NDVI: -0.04 a 0.64)

Durante el verano, predomina la clase de NDVI entre 0 y 0.1 con una superficie de 1101.16 ha, lo cual representa más del 70% del área total analizada. Esto indica una cobertura de vegetación escasa o en estado fenológicamente inactivo, típico de esta estación árida. Las clases con mayor actividad fotosintética (NDVI > 0.2) suman aproximadamente 174.78 ha (84.01 ha en 0.2–0.3, 55.33 ha en 0.3–0.4, etc.), lo que refleja la existencia de núcleos de vegetaciones con cierto vigor, aunque restringidos en extensión. Se alcanza un valor máximo de NDVI de 0.64, pero solo en áreas puntuales.

En otoño se mantiene la predominancia de áreas con NDVI entre 0 y 0.1 (1001.17 ha), aunque se observa un leve aumento en las clases superiores, alcanzando una distribución más balanceada: 86.5 ha en 0.2–0.3, 67.21 ha en 0.3–0.4, y hasta 11.22 ha en 0.5–0.6, con un máximo NDVI superior (0.67). Esto sugiere una mejora en la actividad vegetal asociada a condiciones climáticas más favorables (humedad residual o primeras lluvias).

Durante el invierno, el valor máximo de NDVI disminuye ligeramente a 0.62, mientras que la distribución sigue una tendencia similar al otoño. El área dominante sigue siendo la clase 0 a 0.1 (1012.22 ha), representando una cobertura vegetal baja. Sin embargo, se mantiene la presencia de vegetación activa: 88.87 ha en 0.2 - 0.3, 55.23 ha en 0.3 - 0.4, y 23.42 ha en 0.4 - 0.5. Estas cifras indican un estado intermedio de actividad fenológica en respuesta a condiciones de humedad y temperatura moderadas.

En primavera, se observa un descenso del valor máximo del NDVI a 0.49, y nuevamente la clase dominante es 0 a 0.1 con 1081.08 ha, lo cual refuerza la interpretación de que más del

70% del polígono mantiene escasa o nula vegetación activa. Sin embargo, destaca una superficie de 176.65 ha en 0.1 - 0.2 y 74.96 ha en 0.2 - 0.3, indicando ciertos brotes fenológicos típicos de esta estación, aunque en menor medida que en años con mayor humedad.

El patrón general del año 2018 evidencia una cobertura vegetal mayoritariamente inactiva (NDVI ≤ 0.1), con valores máximos relativamente estables entre 0.62 y 0.67. Las áreas con vegetación activa (NDVI ≥ 0.2) representan entre el 10–15% del área total en cada estación, reflejando la influencia de la estacionalidad y las limitaciones hídricas del ecosistema de bosque seco. La distribución de NDVI por clases muestra que la vegetación responde a pulsos de humedad de manera puntual, con escasa expansión espacial, lo cual es característico de sistemas con fuerte dependencia de eventos climáticos intra-anuales. Esta dinámica subraya la necesidad de monitoreo continuo para evaluar la resiliencia del sistema ante el cambio climático y otras presiones antropogénicas

Figura 12. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2018

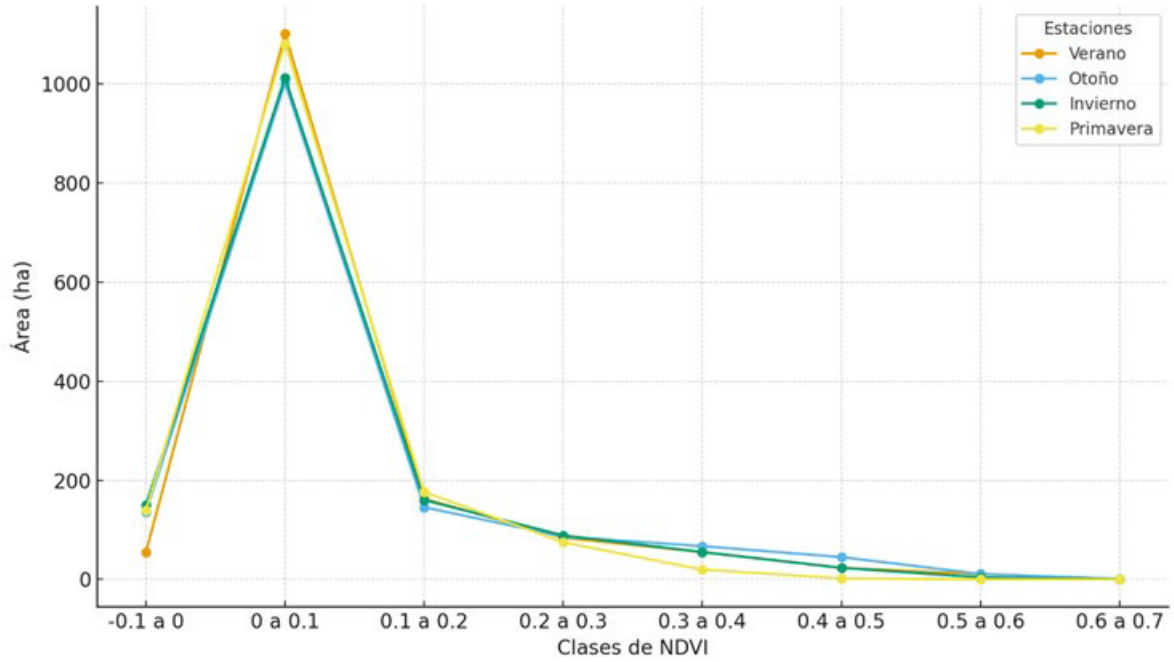


Tabla 3. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2018

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.64	55.16	-0.1 a 0
		1101.16	0 a 0.1
		162.9	0.1 a 0.2
		84.01	0.2 a 0.3
		55.33	0.3 a 0.4
		23.59	0.4 a 0.5
		10.89	0.5 a 0.6
		0.96	0.6 a 0.7
OTOÑO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.67	-0.1 a 0	136.14
		0 a 0.1	1001.17
		0.1 a 0.2	145.78
		0.2 a 0.3	86.5
		0.3 a 0.4	67.21

		0.4 a 0.5	45.1
		0.5 a 0.6	11.22
		0.6 a 0.7	0.88
INVIERNO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.62	-0.1 a 0	149.77
		0 a 0.1	1012.22
		0.1 a 0.2	160.14
		0.2 a 0.3	88.87
		0.3 a 0.4	55.23
		0.4 a 0.5	23.42
		0.5 a 0.6	4.21
		0.6 a 0.7	0.14

Año 2019

El índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es una métrica derivada de la reflectancia en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano (NIR), lo cual permite cuantificar el vigor de la vegetación mediante la estimación de la actividad fotosintética. Su escala va de -1 a 1, donde valores bajos (cercanos a 0 o negativos) indican ausencia de vegetación o superficies desnudas, y valores altos (superiores a 0.2) reflejan presencia de clorofila activa, vinculada a masas vegetales sanas y densas.

En este estudio, se ha empleado una clasificación por intervalos de NDVI cada 0.1 unidades, con rangos que permiten identificar umbrales críticos de cambio fenológico. Se analiza la distribución de áreas (en hectáreas) por clase NDVI para las cuatro estaciones del año 2019.

Durante el verano de 2019, se identificó un patrón marcado por el predominio de valores bajos de NDVI, con más del 75% del área total (∼1121 ha) distribuyendo entre las clases -0.1 a 0.1. Esta señal sugiere una marcada escasez de cobertura vegetal activa en el período estival, posiblemente asociada a condiciones de estrés hídrico o suelos expuestos. Sin embargo, se identificaron focos de actividad fotosintética moderada en las clases superiores a 0.2, acumulando un total de 229.66 ha, lo que representa cerca del 15% del área, indicando presencia puntual de vegetación activa en ciertas zonas del polígono

En otoño, se observó una leve mejora en la distribución de clases NDVI altas. Aunque la clase 0 a 0.1 sigue dominando (912.21 ha), el conjunto de clases superiores a 0.2 cubre 225.68 ha, similar a verano pero con mayor distribución en clases más altas (0.4 a 0.6). La clase 0.5 a 0.6, por ejemplo, crece de 2.97 ha (verano) a 13.47 ha en otoño, lo cual podría estar relacionado con la recuperación hídrica tras las lluvias de transición estacional. El valor máximo de NDVI también se amplía hasta 0.65, indicando la presencia de cobertura vegetal con mayor vigor.

Figura 13. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2019

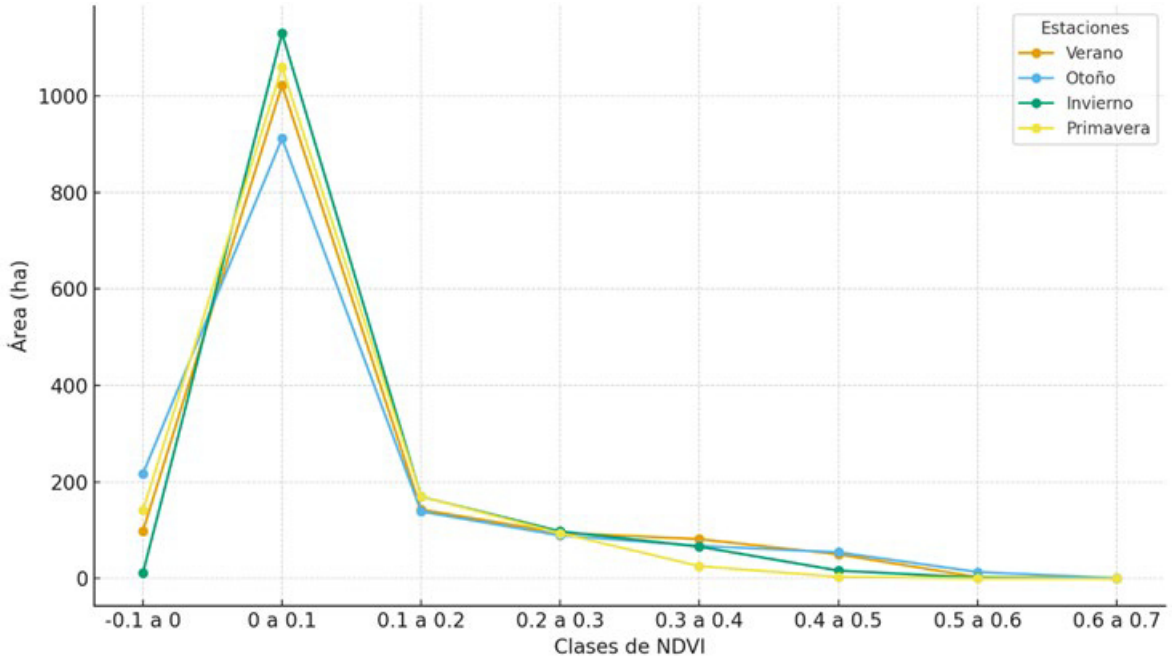


Tabla 4. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2019

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.07	0.62	-0.1 a 0	98.56
		0 a 0.1	1022.91
		0.1 a 0.2	142.87
		0.2 a 0.3	94.84
		0.3 a 0.4	81.64
		0.4 a 0.5	50.1
		0.5 a 0.6	2.97

		0.6 a 0.7	0.11
OTOÑO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	0.65	-0.1 a 0	217.31
		0 a 0.1	912.21
		0.1 a 0.2	138.8
		0.2 a 0.3	89.19
		0.3 a 0.4	67.75
		0.4 a 0.5	54.44
		0.5 a 0.6	13.47
		0.6 a 0.7	0.83
INVIERNO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.03	0.63	-0.1 a 0	11.88
		0 a 0.1	1130.3
		0.1 a 0.2	169.72
		0.2 a 0.3	97.73
		0.3 a 0.4	66.04
		0.4 a 0.5	16.51

		0.5 a 0.6	1.77
		0.6 a 0.7	0.05

PRIMAVERA

NDVI MIN	NDVI MAX	CLASES	ÁREA (HAS)
-0.04	0.56	-0.1 a 0	141.19
		0 a 0.1	1059.37
		0.1 a 0.2	170.2
		0.2 a 0.3	93.92
		0.3 a 0.4	25.79
		0.4 a 0.5	3.45
		0.5 a 0.6	0.08

El invierno mantiene la misma estructura general observada en verano: predominancia abrumadora de la clase 0 a 0.1, que alcanza su punto máximo anual (1130.3 ha). Esta clase representa aproximadamente 78% del polígono. No obstante, el área acumulada de clases superiores a 0.2 es ligeramente mayor que en otoño, con 182.1 ha en total. Esta estabilidad en valores NDVI sugiere que parte de la vegetación mantiene su metabolismo basal incluso durante los meses más fríos, aunque sin alcanzar niveles elevados de clorofila.

Durante la primavera se identifica una incipiente recuperación del verdor vegetal. Las clases 0.2 a 0.3 y 0.3 a 0.4 muestran un aumento respecto a invierno, sumando 119.71 ha, aunque aún por debajo de los valores esperados para una primavera activa. La clase 0 a 0.1 sigue siendo dominante, pero su superficie disminuye levemente respecto al invierno. El valor máximo de NDVI cae a 0.56, probablemente afectado por las condiciones atmosféricas

(luminosidad y humedad), lo cual sugiere que la cobertura vegetal inicia su actividad metabólica sin alcanzar aún su pico estacional.

El año 2019 presenta un patrón general dominado por áreas con valores NDVI bajos (0 a 0.1), lo cual indica una importante extensión de suelos desnudos, vegetación rala o en estado de latencia. En promedio, alrededor del 70% del área total del polígono permanece sin vegetación activa o con coberturas de muy baja reflectancia fotosintética.

Las clases con NDVI ≥ 0.2 representan una fracción menor, fluctuando entre 180 y 230 hectáreas a lo largo de las estaciones, siendo otoño el periodo con mejor distribución clorofílica. No obstante, no se observa una explosión vegetativa significativa en primavera, lo que podría estar condicionado por restricciones ambientales locales como estrés hídrico, calidad del suelo o interferencias atmosféricas en las imágenes satelitales

Desde una perspectiva ecofisiológica, estos resultados reflejan un ecosistema posiblemente en transición o sometido a presiones antrópicas, donde los pulsos estacionales no se traducen en incrementos robustos de biomasa verde.

2020

El análisis multitemporal del NDVI para el año 2020 revela patrones de distribución espacial del vigor de la vegetación a lo largo de las estaciones. Se utiliza el índice NDVI como indicador de biomasa verde y actividad fotosintética, con énfasis en las clases superiores a 0.2, que reflejan zonas con presencia significativa de clorofila. Los valores de NDVI fueron clasificados por intervalos de 0.1 unidades, y el área correspondiente a cada clase fue cuantificada en hectáreas (ha), proporcionando una lectura detallada de los procesos fenológicos del ecosistema evaluado.

Durante el verano, la mayor parte del área se distribuye en las clases bajas de NDVI (0 a 0.1 y -0.1 a 0), representando ∼1136 ha, lo que constituye más del 75% del total, reflejando una cobertura vegetal escasa o degradada. No obstante, se identifican zonas con vegetación activa ,valores NDVI > 0.2 , acumulando un total de 209.2 ha, es decir, un 13.8% del área total, indicando parches con vegetación vigorosa posiblemente localizada en áreas de mayor humedad o con menor estrés térmico

Otoño 2020 muestra un incremento en la clase -0.1 a 0 (411.07 ha), lo que sugiere presencia de zonas degradadas o no vegetadas. Sin embargo, la clase 0 a 0.1 disminuye levemente respecto al verano, y se observa una mayor redistribución hacia clases medias (0.2 a 0.4). El conjunto de clases superiores a 0.2 suma 215.29 ha, lo que confirma una estabilidad relativa en la vegetación activa, aunque con un ligero repunte en las áreas degradadas. Llama la atención el valor máximo de NDVI de 1.0, inusualmente alto, posiblemente debido a factores radiométricos o superficies muy específicas con cobertura extremadamente densa.

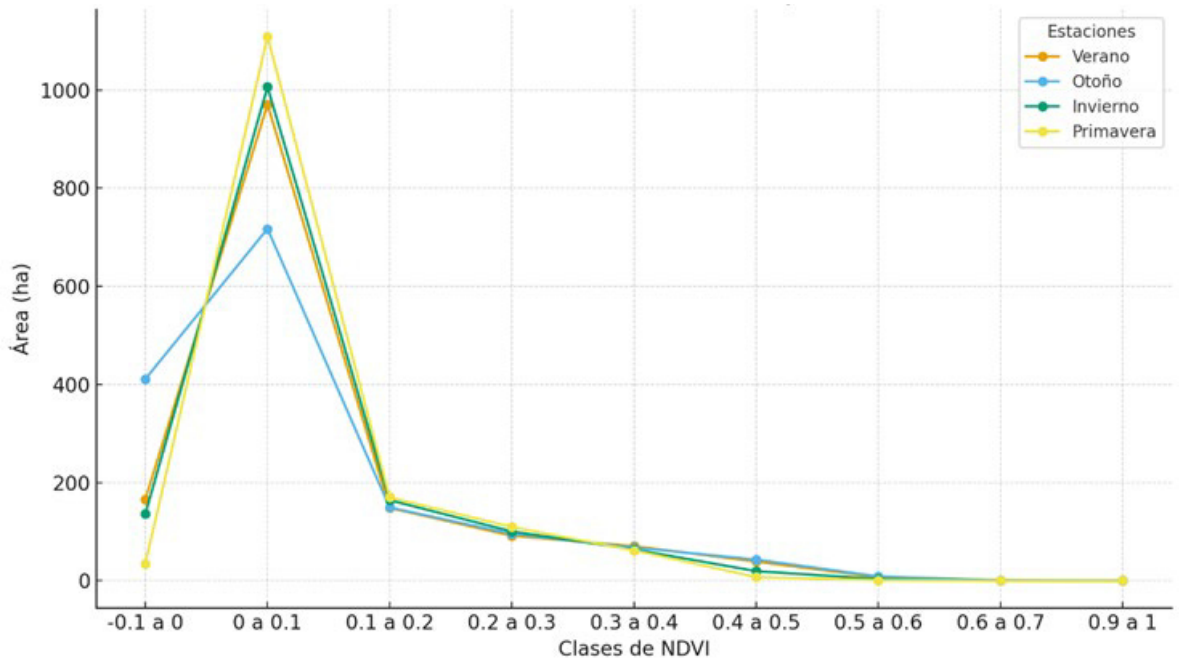
Durante el invierno se observa una persistencia del patrón de baja actividad vegetal, con ~1142 ha (clases -0.1 a 0 y 0 a 0.1). Sin embargo, las clases entre 0.2 a 0.4 logran un incremento respecto al otoño (~164 ha), indicando una ligera reactivación del metabolismo vegetal posiblemente vinculada a condiciones de mayor humedad edáfica acumulada durante la estación anterior. Las clases altas (≥0.4) se mantienen marginales

La primavera muestra una mejora significativa en las clases 0.1 a 0.4, alcanzando un total de 341.17 ha, lo cual representa un indicio claro del despertar vegetativo propio de la estación. Las clases más altas (0.4 a 0.6) aún son escasas (8.7 ha), pero superan a las observadas en invierno. Sorprende el valor mínimo de NDVI de -0.4, que podría deberse a sombras, cuerpos de agua o errores atmosféricos. A pesar de eso, la clase -0.1 a 0 se reduce drásticamente, siendo la más baja del año, lo que refuerza la hipótesis de expansión de cobertura vegetal activa.

El año 2020 presenta un patrón relativamente constante de distribución del NDVI, con una clara predominancia de áreas con baja actividad fotosintética (0 a 0.1), que en promedio supera el 70% de la superficie del polígono. Sin embargo, la progresión estacional permite evidenciar una ligera mejoría en primavera, donde se registra el mayor total de superficie con NDVI superiores a 0.2.

A nivel fenológico, este comportamiento sugiere un ecosistema resiliente pero limitado por factores abióticos que restringen el desarrollo pleno de la vegetación durante las estaciones cálidas. La relativa estabilidad entre estaciones indica también que el área estudiada presenta una vegetación poco sensible a las variaciones estacionales o altamente dependiente de fuentes hídricas puntuales.

Figura 14. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 5. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2020

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.66	-0.1 a 0	165.66
		0 a 0.1	970.74
		0.1 a 0.2	148.40
		0.2 a 0.3	91.62
		0.3 a 0.4	70.50
		0.4 a 0.5	38.96

		0.5 a 0.6	7.01
		0.6 a 0.7	1.11
		OTOÑO	
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.07	1	-0.1 a 0	411.07
		0 a 0.1	717.29
		0.1 a 0.2	149.35
		0.2 a 0.3	95.74
		0.3 a 0.4	67.67
		0.4 a 0.5	43.21
		0.5 a 0.6	8.84
		0.6 a 0.7	0.82
		0.9 a 1	0.01
		INVIERNO	
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.61	-0.1 a 0	136.25
		0 a 0.1	1006.25
		0.1 a 0.2	164.15
		0.2 a 0.3	100.47

		0.3 a 0.4	63.76
		0.4 a 0.5	19.55
		0.5 a 0.6	3.54
		0.6 a 0.7	0.03

PRIMAVERA			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.4	0.57	-0.1 a 0	35.14
		0 a 0.1	1108.99
		0.1 a 0.2	169.93
		0.2 a 0.3	109.39
		0.3 a 0.4	61.85
		0.4 a 0.5	7.53
		0.5 a 0.6	1.17

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2021

Durante el verano de 2021, el patrón dominante corresponde a la clase 0 a 0.1, con más de 1060 ha, lo que representa más del 75% del área. Esta distribución sugiere una baja cobertura vegetal o vegetación de bajo vigor. Las clases superiores a 0.2, consideradas como zonas con vegetación activa, suman 188.99 ha, lo cual indica que el 13% del área mantiene cierta actividad fotosintética a pesar del estrés térmico típico de esta estación. La clase 0.5 a 0.6 es prácticamente inexistente, revelando ausencia de vegetación densa o robusta.

El otoño exhibe una expansión en la clase -0.1 a 0, que alcanza 292.26 ha, posiblemente reflejando procesos de senescencia o pérdida foliar progresiva. No obstante, la vegetación activa (NDVI > 0.2) aún representa 173.28 ha, manteniéndose relativamente estable respecto al verano. El leve aumento de clases superiores (0.5 a 0.7) sugiere pequeños núcleos de recuperación vegetativa, probablemente influenciados por condiciones edáficas locales o remanentes de cultivos tardíos.

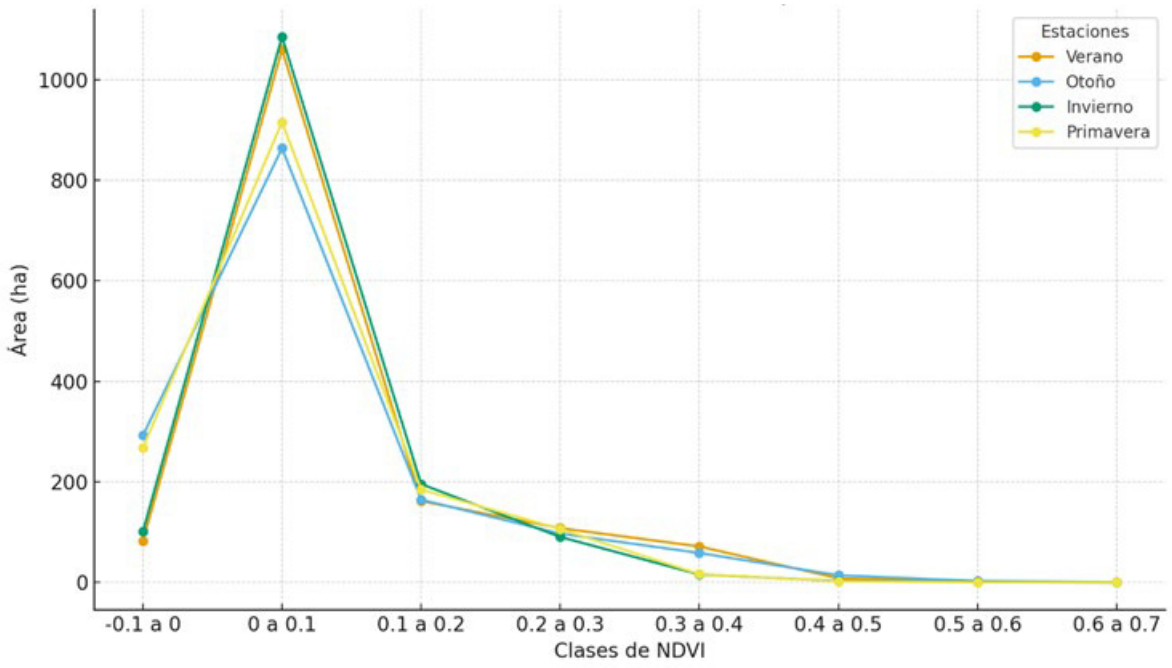
En invierno se observa la mayor proporción de área en la clase 0 a 0.1 (1085.42 ha), alcanzando un 79% de la superficie total. Este patrón refleja condiciones de mínima actividad vegetal debido a factores térmicos y luminosos limitantes. Las clases medias (0.1 a 0.3) presentan valores moderados, sumando aproximadamente 286 ha, lo cual indica la existencia de comunidades vegetales perennes o resistentes a las bajas temperaturas. Las clases altas (>0.4) se reducen a menos de 4.5 ha, confirmando el letargo fenológico generalizado.

A pesar de ser la estación que típicamente impulsa el reverdecimiento, la primavera de 2021 presenta una cobertura dominada nuevamente por la clase 0 a 0.1, con más de 915 ha. El área vegetada activamente (NDVI > 0.2) suma 125.47 ha, lo cual es inferior al promedio anual observado. Este fenómeno podría estar relacionado con un inicio tardío de la estación húmeda, condiciones de sequía estacional o interferencias atmosféricas durante la adquisición de la imagen. La baja proporción de NDVI superiores a 0.4 sugiere un escaso desarrollo de vegetación herbácea o arbustiva.

El análisis del año 2021 muestra un patrón persistente de dominancia de áreas con escasa vegetación o suelo desnudo, especialmente en las clases 0 a 0.1, que consistentemente superan el 70% del área evaluada. La vegetación activa con NDVI mayores a 0.2 se mantiene entre 150 y 200 ha por estación, lo que representa un máximo del 15% del polígono. Este patrón sugiere un ecosistema en condición de estrés crónico, posiblemente vinculado a factores edafoclimáticos limitantes o manejo antrópico del paisaje.

Las variaciones inter-estacionales son sutiles, sin un pico claro de recuperación vegetativa. Esto refuerza la hipótesis de que el ecosistema posee una dinámica vegetacional relativamente estable, pero con baja productividad primaria, fenómeno que amerita estudios complementarios en campo y con sensores de mayor resolución espectral.

Figura 15. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2021



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 6. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2021

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.06	0.56	-0.1 a 0	82.94
		0 a 0.1	1060.25
		0.1 a 0.2	161.82
		0.2 a 0.3	108.1
		0.3 a 0.4	71.64

		0.4 a 0.5	8.26
		0.5 a 0.6	0.99
		OTOÑO	
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.06	0.62	-0.1 a 0	292.26
		0 a 0.1	863.77
		0.1 a 0.2	164.73
		0.2 a 0.3	97.18
		0.3 a 0.4	58.7
		0.4 a 0.5	14.44
		0.5 a 0.6	2.76
		0.6 a 0.7	0.16
		INVIERNO	
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	0.61	-0.1 a 0	101.7
		0 a 0.1	1085.42
		0.1 a 0.2	195.73
		0.2 a 0.3	90.55

		0.3 a 0.4	16.09
		0.4 a 0.5	2.78
		0.5 a 0.6	1.59
		0.6 a 0.7	0.14
PRIMAVERA			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	0.53	-0.1 a 0	267.94
		0 a 0.1	915.72
		0.1 a 0.2	184.87
		0.2 a 0.3	106.36
		0.3 a 0.4	16.65
		0.4 a 0.5	2.18
		0.5 a 0.6	0.28

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2022

El verano de 2022 se caracteriza por una dominancia abrumadora de la clase 0 a 0.1 (1117.82 ha), equivalente al 81% del área total del polígono. Esta baja reflectancia en el rojo cercano evidencia vegetación muy escasa o senescente. Las áreas con vegetación activa (NDVI > 0.2) suman 156.58 ha, lo que representa tan sólo un 11.3%, reflejando condiciones posiblemente secas o térmicamente limitantes para el desarrollo vegetal.

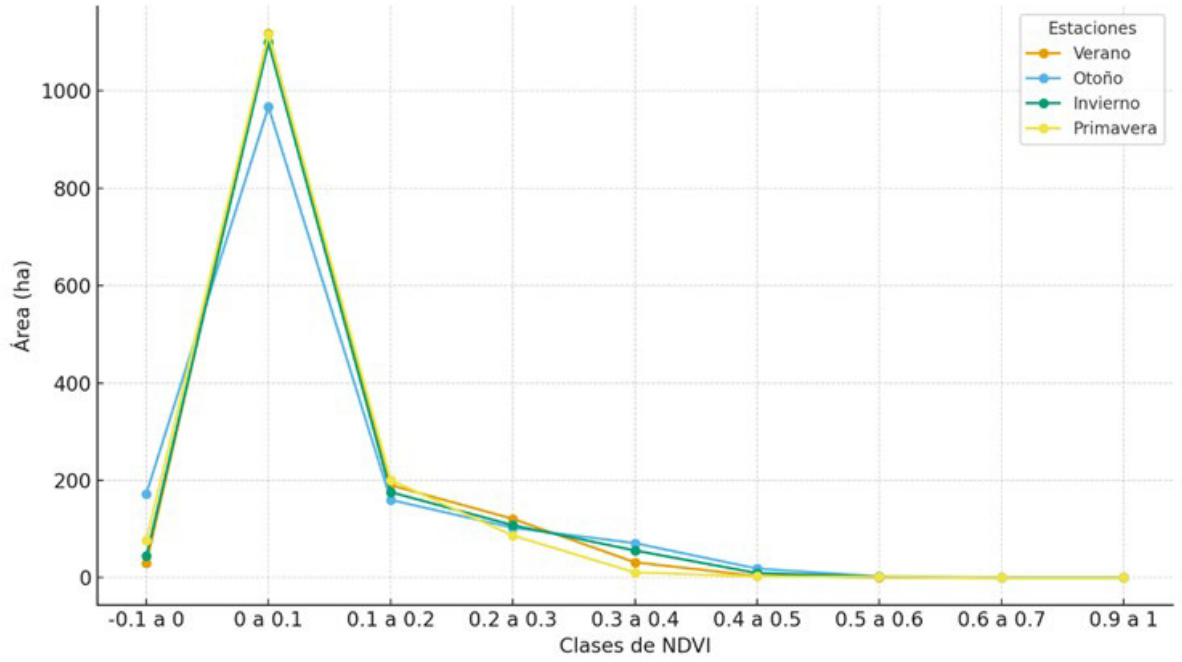
Durante el otoño, se amplía la heterogeneidad NDVI. La clase 0 a 0.1 continúa siendo la más extensa (966.86 ha), pero se evidencia una recuperación parcial de vegetación: las clases superiores a 0.2 agrupan 194.84 ha, un aumento de más del 24% respecto al verano. La aparición de valores tan altos como 0.9 a 1 sugiere la presencia puntual de vegetación densa o anomalías espectrales localizadas.

En invierno, el valor máximo de NDVI (0.61) revela una ausencia de zonas de vegetación exuberante. Sin embargo, se destaca la clase 0 a 0.1 (1098.9 ha) como dominante, lo cual es común para esta estación por reducción de actividad fotosintética debido a la baja insolación. Las clases >0.2 (vegetación activa) abarcan 175.3 ha, indicando la persistencia de especies perennes o coberturas agrícolas tolerantes al frío.

La primavera —tradicionalmente asociada a un brote fenológico— muestra un ligero aumento de vegetación activa. Las clases 0.2 a 0.6 representan un total de 101.69 ha, lo que aún resulta bajo para esta estación. Este patrón puede indicar estrés hídrico, retraso en las lluvias o cobertura con vegetación rala. La clase 0 a 0.1 continúa siendo predominante, lo que evidencia un ecosistema con bajo índice de recuperación estacional.

El NDVI máximo no supera el valor de 1, siendo 0.60 a 0.61 en primavera e invierno, lo cual confirma la ausencia de masas vegetales densas. La clase 0 a 0.1 domina en todas las estaciones (más del 75% del área total), indicando un paisaje con predominio de suelo desnudo o vegetación poco activa.La vegetación con actividad media-alta (NDVI > 0.2) no supera el 14% del polígono en ninguna estación, lo cual es consistente con un ecosistema degradado o con uso agropecuario extensivo.El valor puntual de NDVI 0.9 a 1 en otoño requiere inspección adicional para descartar error de imagen o identificar vegetación aislada de alto rendimiento.

Figura 16. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2022



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 7. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2022

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	0.55	-0.1 a 0	29.57
		0 a 0.1	1117.82
		0.1 a 0.2	190.03
		0.2 a 0.3	120.94
		0.3 a 0.4	31.58

		0.4 a 0.5	3.52
		0.5 a 0.6	0.54
OTOÑO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	1	-0.1 a 0	172.45
		0 a 0.1	966.86
		0.1 a 0.2	159.85
		0.2 a 0.3	102.53
		0.3 a 0.4	70.92
		0.4 a 0.5	18.61
		0.5 a 0.6	2.59
		0.6 a 0.7	0.18
		0.9 a 1	0.01
INVIERNO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.61	-0.1 a 0	44.09
		0 a 0.1	1098.9
		0.1 a 0.2	175.71

		0.2 a 0.3	107.87
		0.3 a 0.4	55.92
		0.4 a 0.5	9.47
		0.5 a 0.6	2.01
		0.6 a 0.7	0.03
PRIMAVERA			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.6	-0.1 a 0	76.71
		0 a 0.1	1115.17
		0.1 a 0.2	200.40
		0.2 a 0.3	86.68
		0.3 a 0.4	10.97
		0.4 a 0.5	2.50
		0.5 a 0.6	1.54
		0.6 a 0.7	0.03

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2023

El verano del 2023 presenta una estructura bimodal en la distribución del NDVI. Se observan dos picos principales: uno en las clases -0.1 a 0 y 0 a 0.1 (combinadas suman 1104.32 ha,

63.7% del área), y otro menor, pero significativo, en el rango 0.3 a 0.5 (132 ha). La vegetación activa (≥ 0.2) ocupa 264.61 ha, equivalente al 15.26%, una cifra relativamente alta en comparación con años anteriores para esta estación, sugiriendo condiciones favorables de humedad superficial o cultivos en desarrollo.

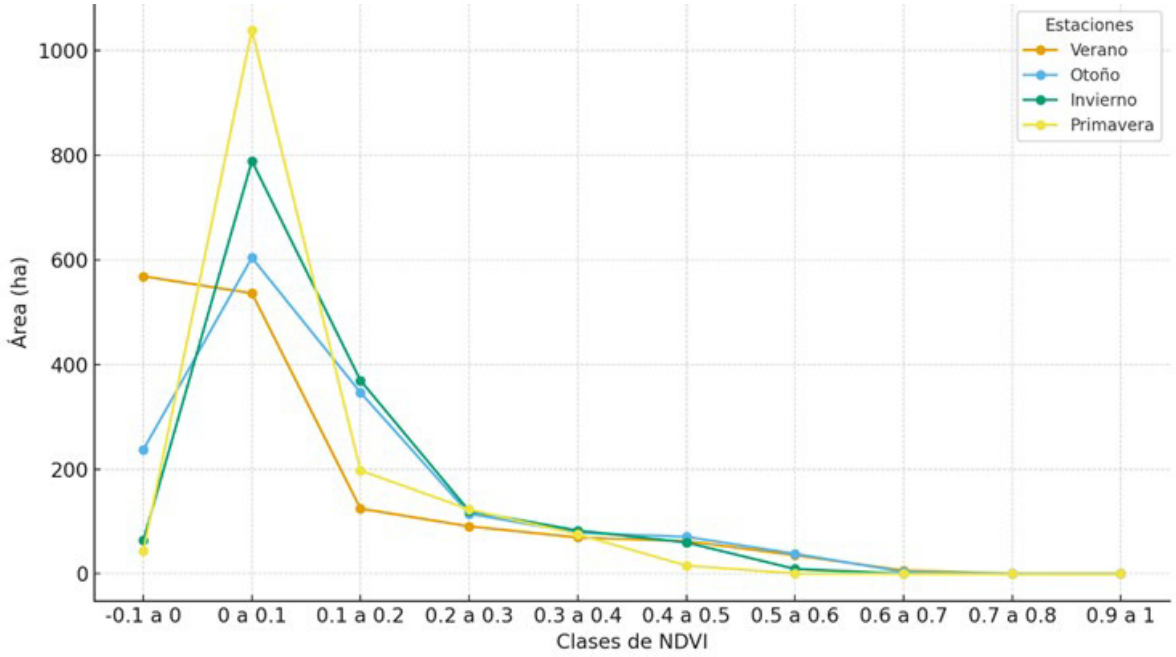
El otoño de 2023 mantiene una marcada presencia de vegetación moderada, con una cobertura activa total (NDVI ≥ 0.2) de 306.53 ha. La clase 0.1 a 0.2 se incrementa notablemente (346.29 ha), lo que puede deberse a rebrote post-estival o labores agrícolas. Se aprecia una disminución relativa del área sin vegetación activa en comparación al verano. La existencia de valores extremos como 0.9 a 1 y 0.7 a 0.8, aunque marginales, apunta a microambientes de alta productividad o cultivos de ciclo corto en condiciones óptimas

Durante el invierno, el polígono mantiene una sorprendente estabilidad de cobertura vegetal moderada. La clase 0.1 a 0.2 alcanza su valor máximo anual (369.24 ha), lo que puede deberse a cultivos invernales o especies nativas adaptadas. La vegetación activa (NDVI ≥ 0.2) se distribuye sobre 272.32 ha, mientras la clase 0 a 0.1 sigue siendo dominante (788.64 ha, ~45%). La baja incidencia de clases superiores a 0.5 refleja un letargo fenológico propio de esta estación

La primavera 2023 presenta un comportamiento discreto en cuanto a reverdecimiento. La clase 0 a 0.1 domina (1038.59 ha, 59.9%), y la vegetación activa (≥ 0.2) apenas alcanza 214.81 ha, una disminución notoria respecto a otoño e invierno. Esta condición puede explicarse por un déficit hídrico estacional, retraso en lluvias o degradación progresiva del suelo. A diferencia de años previos, no se observan valores NDVI superiores a 0.6.

La dinámica estacional muestra un patrón estable, con mayor vegetación activa en otoño e invierno, contrario a lo esperado, y un retroceso notorio en primavera. La clase dominante anual continúa siendo 0 a 0.1, reafirmando la escasa cobertura vegetal en el polígono. El valor NDVI máximo alcanza 1, aunque solo en áreas marginales (0.01 ha), posiblemente por artefactos espectrales o parches densos muy localizados. La vegetación activa (NDVI ≥ 0.2) se mantiene por debajo del 20% en todas las estaciones, reafirmando un estado general de degradación o baja productividad ecosistémica

Figura 17. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2023



.

Tabla 8. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2023

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.08	1	-0.1 a 0	568.35
		0 a 0.1	535.97
		0.1 a 0.2	124.57
		0.2 a 0.3	90.69
		0.3 a 0.4	69.46
		0.4 a 0.5	62.54

		0.5 a 0.6	35.43
		0.6 a 0.7	6.54
		0.7 a 0.8	0.36
		0.9 a 1	0.09
OTOÑO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	1	-0.1 a 0	237.16
		0 a 0.1	604.02
		0.1 a 0.2	346.29
		0.2 a 0.3	114.78
		0.3 a 0.4	78.44
		0.4 a 0.5	70.75
		0.5 a 0.6	38.46
		0.6 a 0.7	3.71
		0.7 a 0.8	0.36
		0.9 a 1	0.03
INVIERNO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	1	-0.1 a 0	63.8

		0 a 0.1	788.64
		0.1 a 0.2	369.24
		0.2 a 0.3	120.05
		0.3 a 0.4	82.78
		0.4 a 0.5	59.88
		0.5 a 0.6	9.29
		0.6 a 0.7	0.31
		0.9 a 1	0.01
PRIMAVERA			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.56	-0.1 a 0	43.22
		0 a 0.1	1038.59
		0.1 a 0.2	197.38
		0.2 a 0.3	123.03
		0.3 a 0.4	75.37
		0.4 a 0.5	15.66
		0.5 a 0.6	0.75

Año 2024

El verano 2024 evidencia una dualidad en la cobertura vegetal. El 55.7% del área se concentra en las clases subvegetativas (-0.1 a 0.1), mientras que la vegetación activa (NDVI ≥ 0.2)

cubre aproximadamente 288.23 ha (16.2%), destacando las clases 0.4 a 0.6. La presencia de valores extremos 0.9 a 1 (aunque marginal) indica sectores localizados con vegetación densa, posiblemente cultivos o parches arbustivos maduro

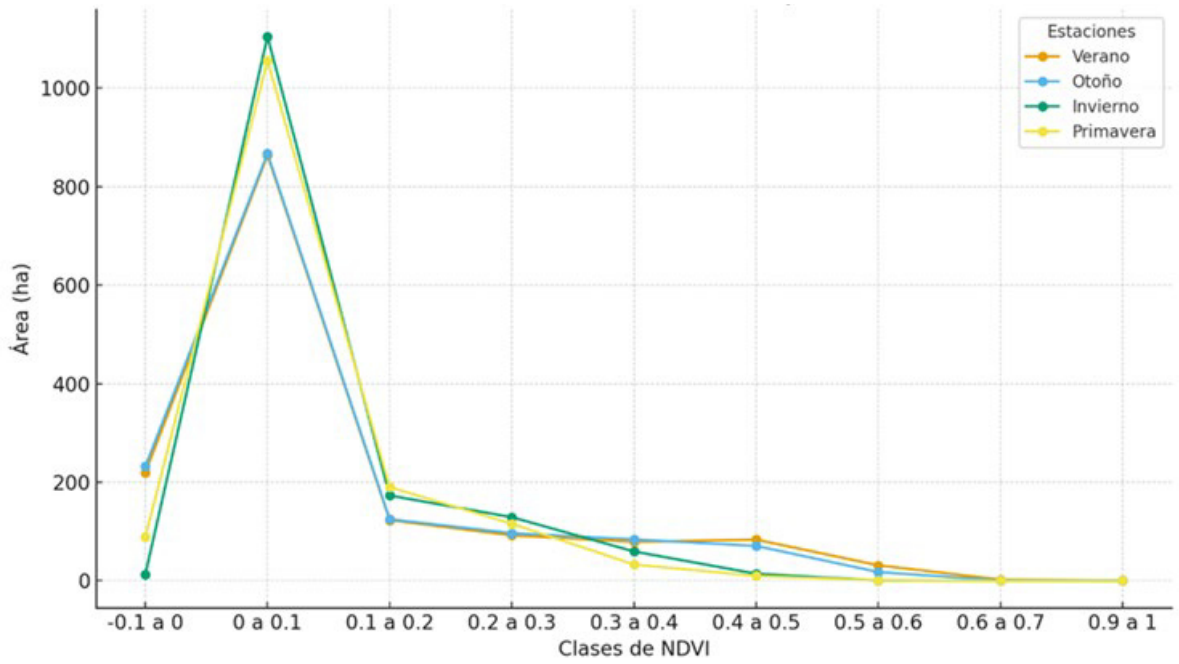
En otoño, se mantiene una alta proporción de área con NDVI bajo (0 a 0.1: 867.25 ha), pero se observa una elevación ligera en la cobertura media (0.2 a 0.4: 264.78 ha). Esta tendencia sugiere condiciones favorables posveraniegas, o bien manejo agrícola post-cosecha. Aun así, la clase dominante sigue siendo 0 a 0.1, lo que refuerza la idea de alta proporción de suelo desnudo o vegetación rala.

El invierno muestra una recuperación vegetativa parcial, con clases medias (0.2 a 0.4) sumando 188.47 ha. Sin embargo, el 63.2% del área (1104.67 ha) sigue dominada por valores cercanos a cero, reflejo de un letargo vegetativo típico de esta estación. La notable disminución en NDVI negativos refuerza la hipótesis de mínima presencia de cuerpos de agua y suelos extremadamente áridos en esta etapa.

La primavera de 2024 refleja una recuperación más modesta que en años previos. El área cubierta por vegetación activa (NDVI $\geq$ 0.2) suma 159.6 ha, distribuidas principalmente en 0.2 a 0.3. Las clases altas (0.4 a 0.6) se mantienen marginales. Este patrón sugiere limitaciones en la disponibilidad hídrica superficial o estrés térmico durante la etapa fenológica crítica del reverdecimiento

La cobertura vegetal durante 2024 muestra un patrón similar al de 2023, con una marcada concentración en clases 0 a 0.1 durante todas las estaciones. La vegetación activa oscila entre el 15% y el 18% del área total por estación, siendo otoño y verano las épocas de mayor expresión verde. La clase 0.4 a 0.5, que históricamente representa una franja de vegetación vigorosa, disminuye progresivamente, lo cual puede vincularse a presión antrópica, déficit hídrico, o ciclos agrícolas cambiantes.

Figura 18. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2024



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 9. Distribución del área por clases de NDVI en las estaciones del año 2024

VERANO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.05	1	-0.1 a 0	219.3
		0 a 0.1	863.46
		0.1 a 0.2	123.01
		0.2 a 0.3	92.05
		0.3 a 0.4	78.93
		0.4 a 0.5	83.54

		0.5 a 0.6	31.31
		0.6 a 0.7	2.38
		0.9 a 1	0.02
OTOÑO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	1	-0.1 a 0	232.14
		0 a 0.1	867.25
		0.1 a 0.2	124.9
		0.2 a 0.3	96.68
		0.3 a 0.4	84.05
		0.4 a 0.5	70.68
		0.5 a 0.6	17.65
		0.6 a 0.7	0.64
		0.9 a 1	0.01
INVIERNO			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.04	0.58	-0.1 a 0	12.95
		0 a 0.1	1104.67
		0.1 a 0.2	173.02

		0.2 a 0.3	129.04
		0.3 a 0.4	59.43
		0.4 a 0.5	14.19
		0.5 a 0.6	0.7
PRIMAVERA			
NDVI MIN	**NDVI MAX**	**CLASES**	**ÁREA (HAS)**
-0.06	0.57	-0.1 a 0	88.52
		0 a 0.1	1055.87
		0.1 a 0.2	190.01
		0.2 a 0.3	115.78
		0.3 a 0.4	33.03
		0.4 a 0.5	9.76
		0.5 a 0.6	1.03

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tendencia multianual (2017–2024)

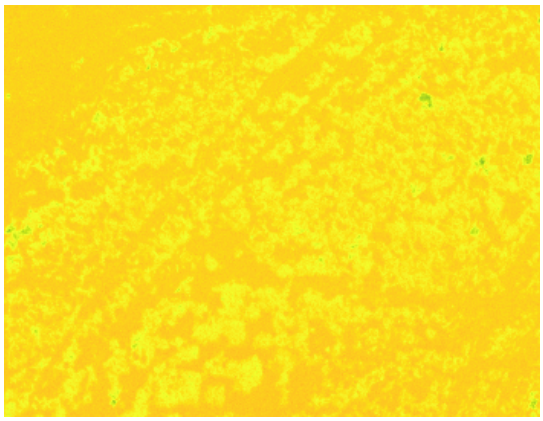
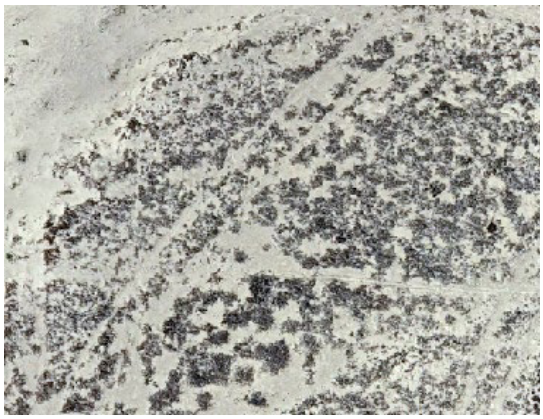
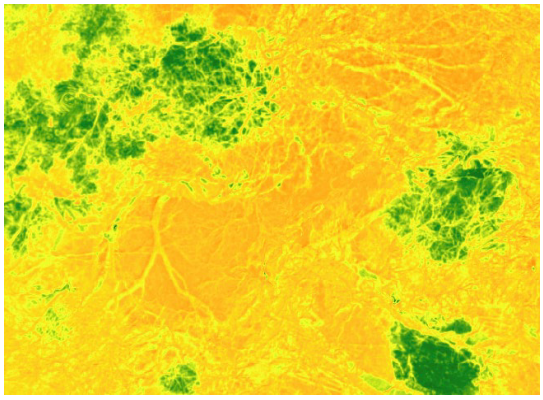
El análisis multitemporal del NDVI entre 2017 y 2024 revela una estabilidad relativa en la estructura general de la vegetación, con fluctuaciones interanuales vinculadas a la dinámica climática regional. En promedio, las áreas clasificadas como suelo desnudo o con vegetación escasa (NDVI -0.1 a 0.1) representan cerca del 50–55 % del territorio analizado, mostrando una ligera tendencia a la reducción hacia 2022, seguida de un repunte en 2023, posiblemente asociado a la recuperación hídrica post estacional. La vegetación rala (0.1–0.3) mantiene una participación estable del 25–30 %, reflejando la persistencia de matorrales y herbazales

adaptados a condiciones áridas. Por su parte, las coberturas de vegetación media (0.3–0.5) se mantienen entre 10–15 %, mientras que la vegetación densa (>0.5), aunque minoritaria (<5 %), muestra incrementos puntuales en años de mayor humedad, sugiriendo eventos favorables para el crecimiento de biomasa arbórea.

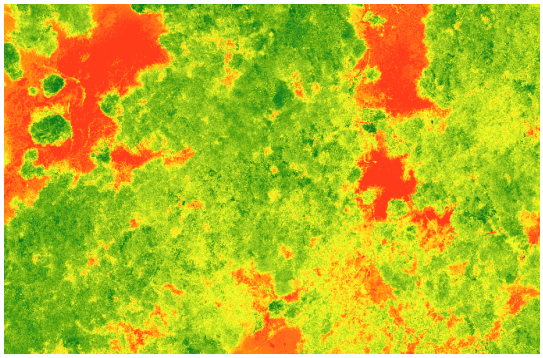
En conjunto, el comportamiento interanual muestra un sistema ecológicamente estable, pero vulnerable, donde la recuperación o pérdida de biomasa verde depende de la disponibilidad hídrica estacional y de la incidencia de factores antrópicos, como el sobrepastoreo o la extracción de leña. La constancia de los valores bajos de NDVI indica que el ecosistema mantiene su carácter de bosque seco costero, con predominancia de vegetación xerofítica y suelos expuestos.

La Tabla 10 presenta la clasificación agrupada de los tipos de cobertura vegetal del Bosque de Cañoncillo según los rangos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), obtenidos a partir de los promedios multitemporales del periodo 2017–2024. Con el fin de simplificar la interpretación espacial y ecológica, las clases originales del NDVI fueron reagrupadas en cuatro categorías significativas que reflejan el gradiente de vigor vegetativo del ecosistema. Estas clases comprenden: (i) zonas de baja áridas o suelo desnudo (NDVI < 0.1), (ii) Herbazal estacional seco disperso (0.1–0.3), (iii) Bosque seco en regeneración o cobertura intermedia (0.3–0.5), y (iv) Bosque denso (>0.5). Cada grupo fue representado visualmente mediante una paleta de colores RGB asociada a su intensidad de verdor, siguiendo un patrón progresivo desde tonos rojizos para las coberturas más degradadas hasta verdes intensos para las áreas con mayor actividad fotosintética. Este esquema cromático permitió distinguir con claridad las zonas con mayor productividad vegetal y las áreas bajo estrés o degradación, facilitando la comparación entre años y estaciones. La reagrupación sintetiza de manera efectiva la heterogeneidad del paisaje y constituye una base sólida para los análisis posteriores de dinámica espacio temporal y relación del NDVI con las variables climáticas.

Tabla 10. Clasificación por grupos de los tipos de cobertura vegetal según rangos de NDVI en el Bosque de Cañoncillo

	
Grupo 1: Áreas áridas o sin cobertura vegetal con rango de -0.1 a 0.1	
	
Grupo 2: Herbazal estacional seco disperso con rango de 0.1 a 0.3	
	

Grupo 3: Bosque seco en regeneración o cobertura intermedia con rango de 0.3 a 0.5





Grupo 4: Bosque denso con especies representativas como Algarrobos, espinales y piales con rango >0.5

4.2 Variabilidad Climática del Bosque de Cañoncillo

4.2.1 Variabilidad térmica

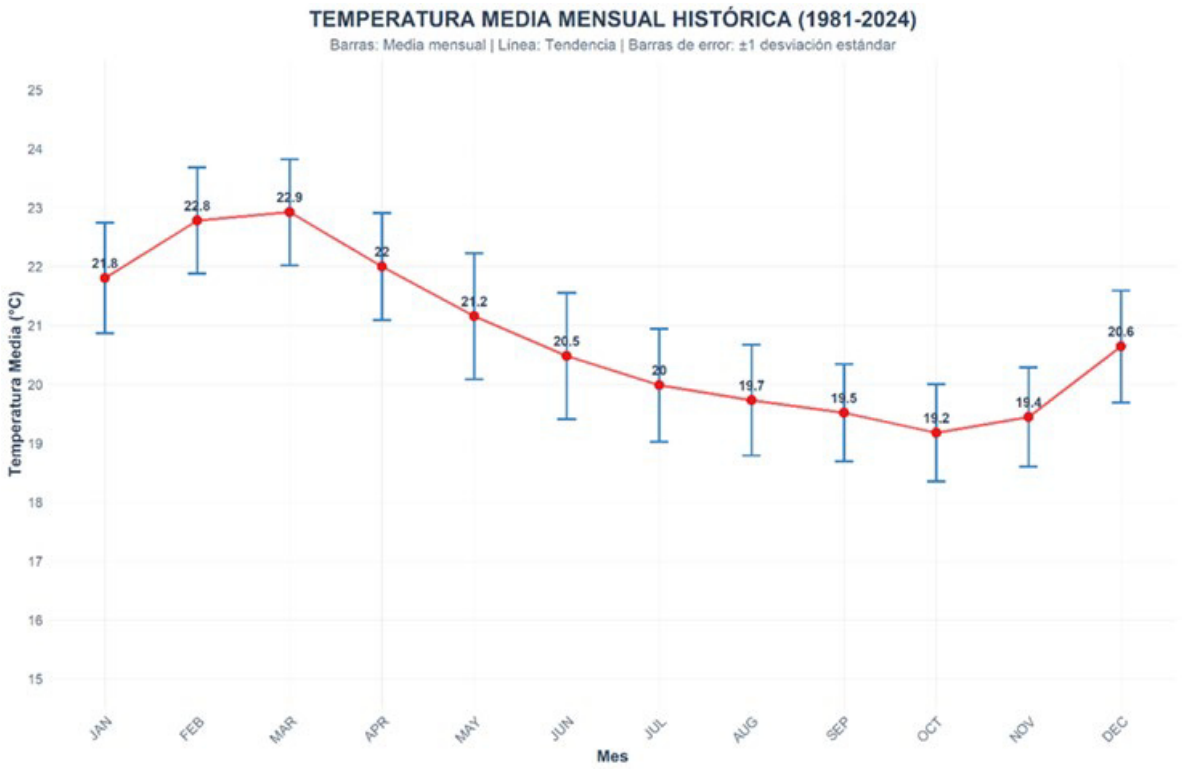
Temperatura

Los resultados obtenidos a partir de la plataforma LARCS de la NASA para el punto geográfico correspondiente al Bosque de Cañoncillo (La Libertad, Perú) muestran una marcada variación estacional de la temperatura media mensual en el periodo de referencia 1981–2024. En promedio, las temperaturas más elevadas se registran entre febrero y marzo, con valores cercanos a 23 °C, mientras que los meses más fríos corresponden a agosto, septiembre y octubre, con promedios próximos a 19 °C. Este patrón evidencia la influencia del régimen térmico costero del Pacífico, donde la amplitud térmica anual es moderada, pero suficiente para distinguir las estaciones cálidas y frías propias del bosque seco costero.

El análisis del comportamiento térmico revela una tendencia descendente progresiva desde marzo hasta octubre, con un descenso de aproximadamente 4 °C entre el periodo más cálido y el más frío del año. Esta variación está estrechamente vinculada al desplazamiento de la corriente de Humboldt y al incremento de nubosidad y humedad relativa durante el invierno austral, factores que reducen la radiación solar incidente y, por ende, la temperatura

superficial. La temperatura vuelve a incrementarse hacia fines de año, alcanzando un nuevo ascenso en diciembre, que marca el inicio del periodo seco-cálido característico del verano en la costa norte del Perú.

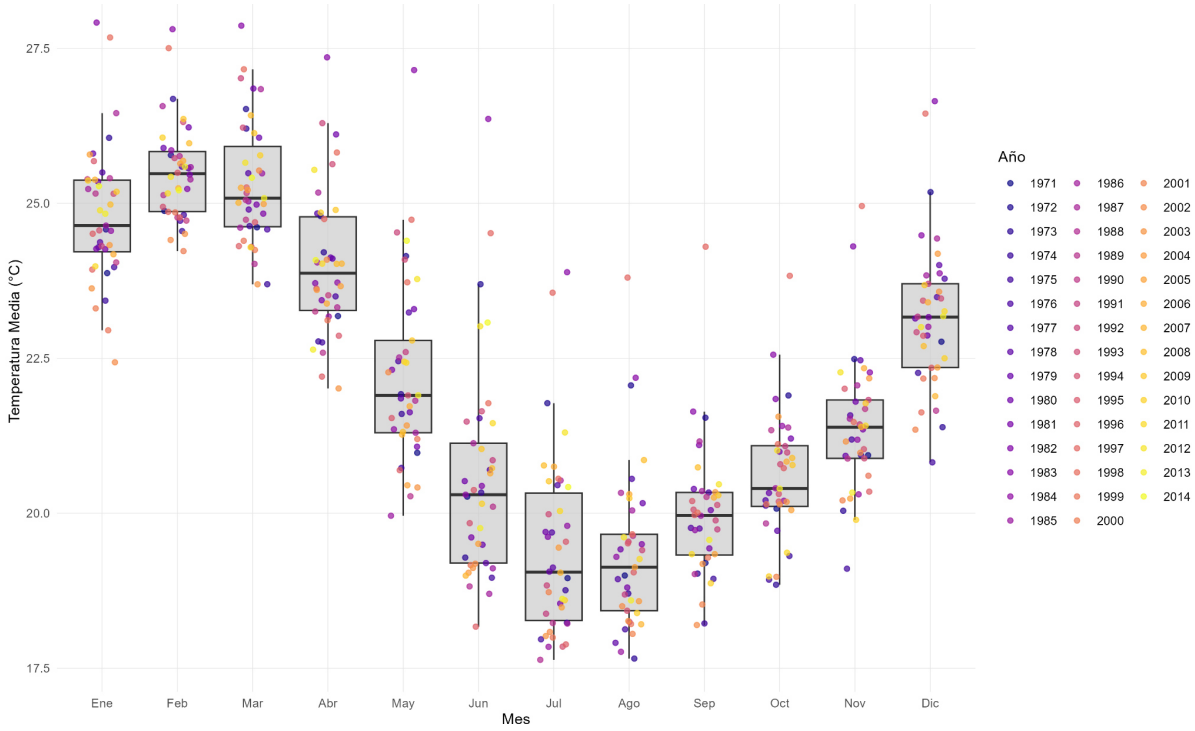
Figura 19. Variabilidad de la temperatura media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1981-2024)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

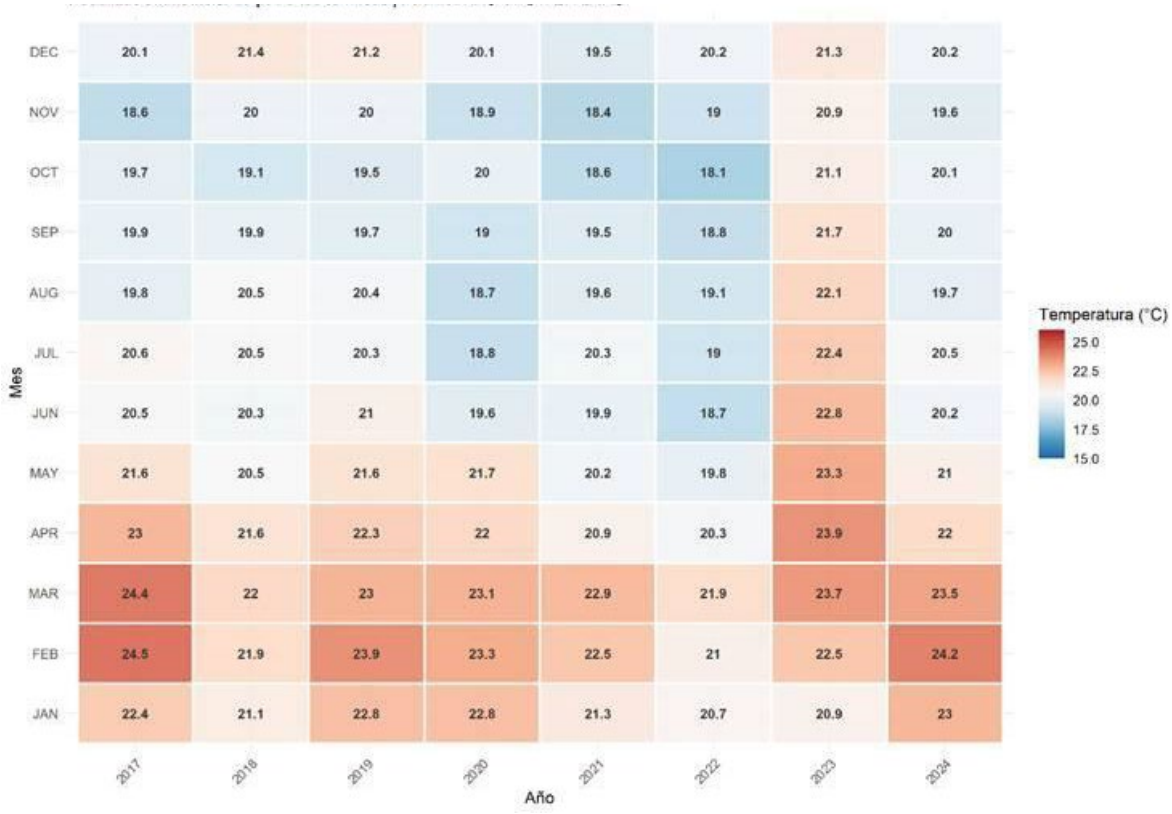
Finalmente, la presencia de barras de error asociadas a una desviación estándar promedio de ±1 °C indica una estabilidad térmica relativa en el ecosistema del Bosque de Cañoncillo, lo cual contribuye a mantener condiciones favorables para especies adaptadas a ambientes secos y cálidos. No obstante, la variabilidad interanual observada sugiere la posible influencia de eventos climáticos globales como El Niño y La Niña, que pueden alterar significativamente las temperaturas locales y los procesos ecológicos asociados. Esta información climática constituye una base esencial para comprender la dinámica estacional del ecosistema y planificar acciones de conservación y monitoreo ambiental a largo plazo

Figura 20. Variabilidad de la temperatura media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1971-2014)



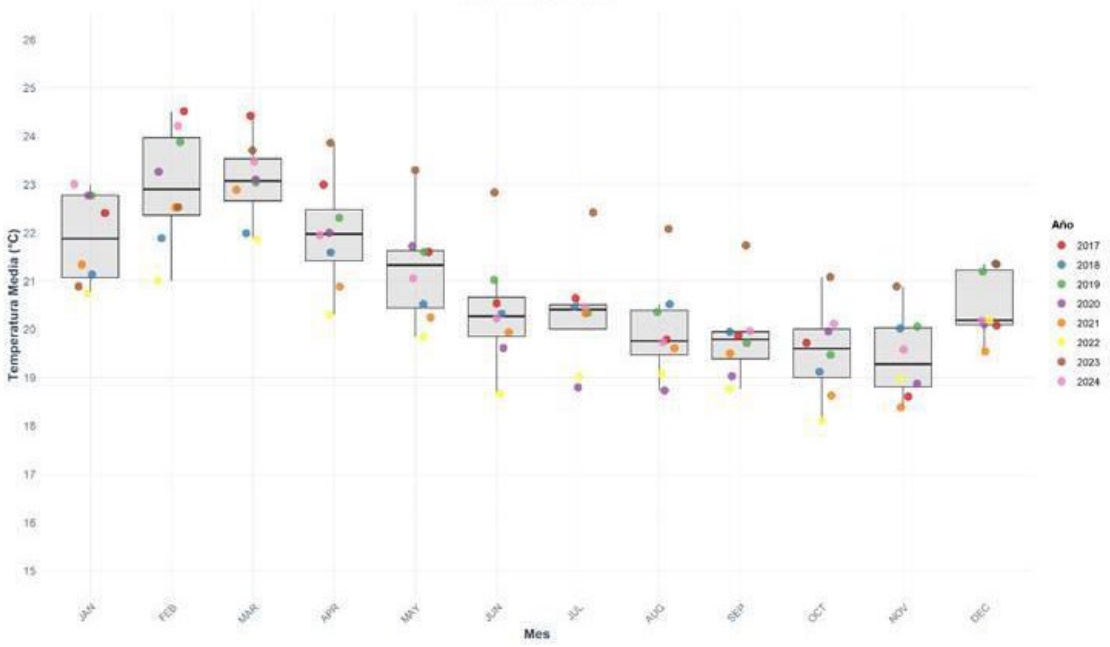
Fuente: Datos meteorológicos de la estación Guadalupe del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicada a 7°16'48.33" S, 79°25'8.61" W.

Figura 21. Patrón térmico mensual representado en mapa de calor (2017-2024)



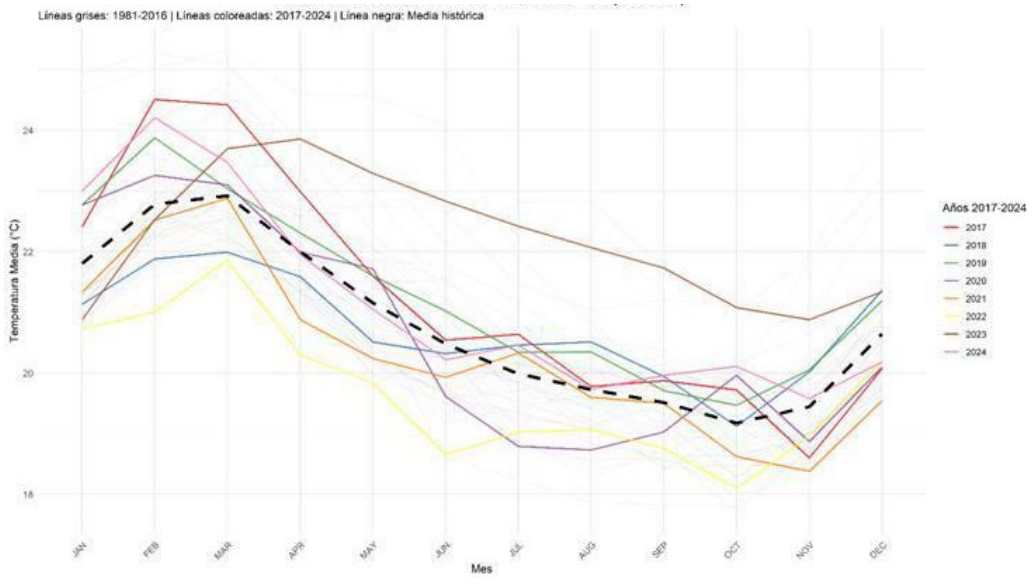
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

Figura 22. Serie temporal de temperaturas (1941-2024) del Bosque Natural El Cañoncillo



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

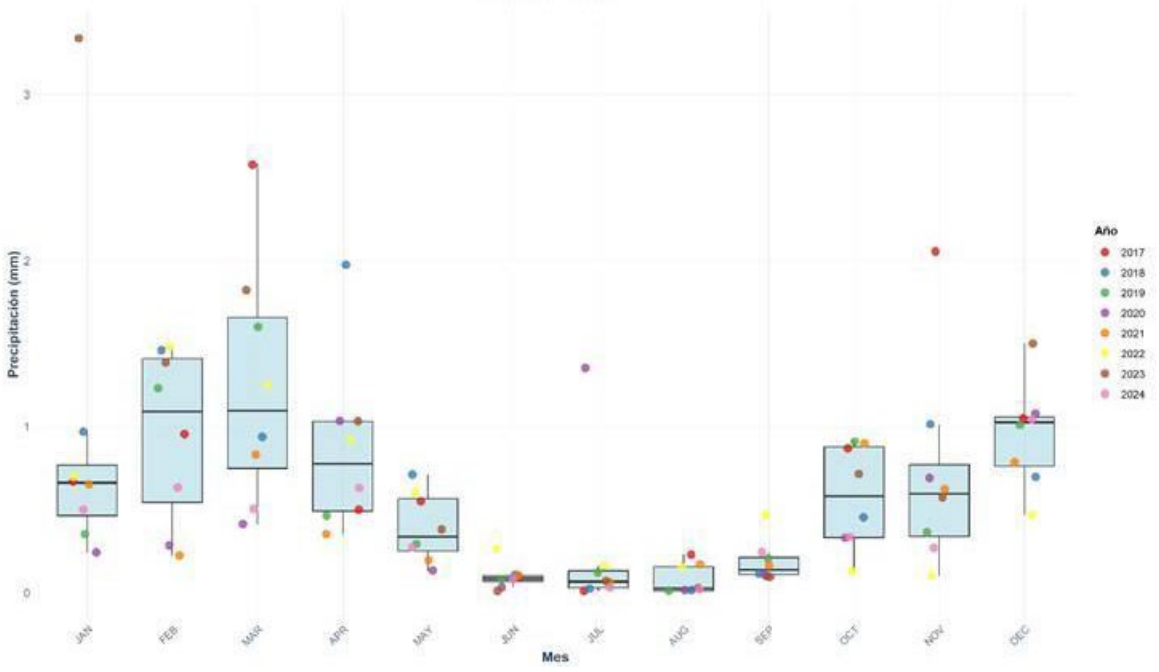
Figura 23. Evolución mensual de la temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo (2017-2024)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

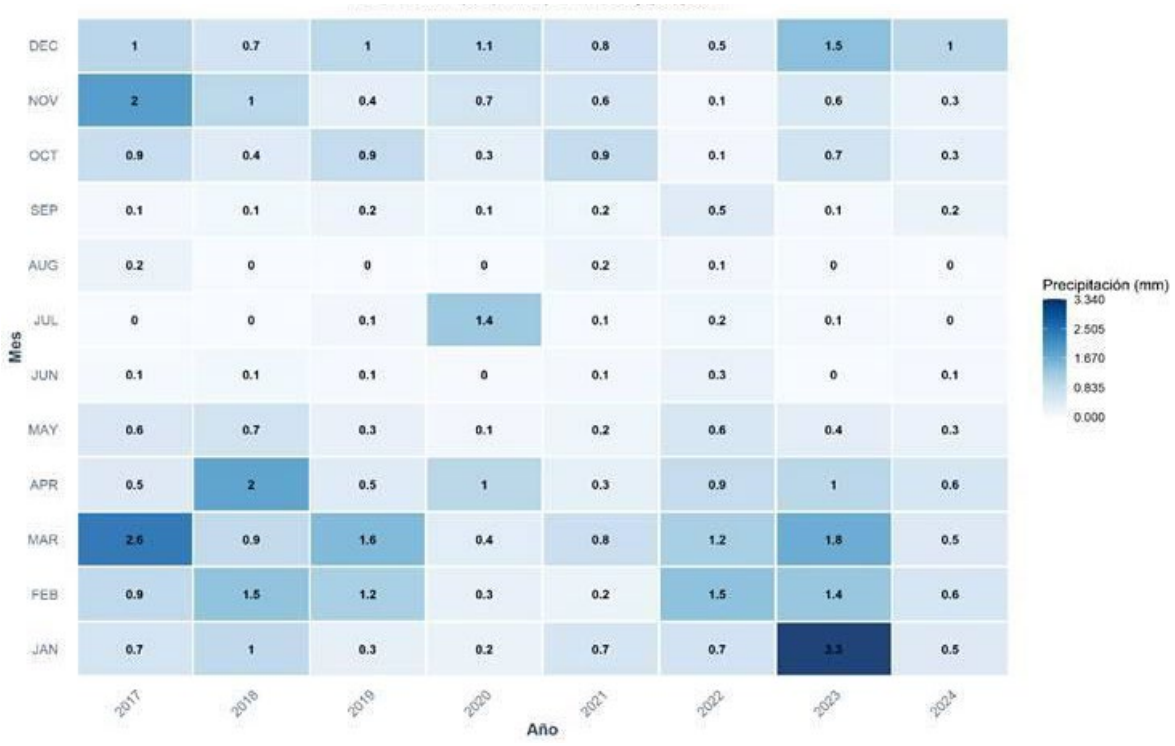
4.2.2 Variabilidad de precipitación

Figura 24. Variabilidad de la precipitación media mensual en el Bosque Natural El Cañoncillo (1971-2014)



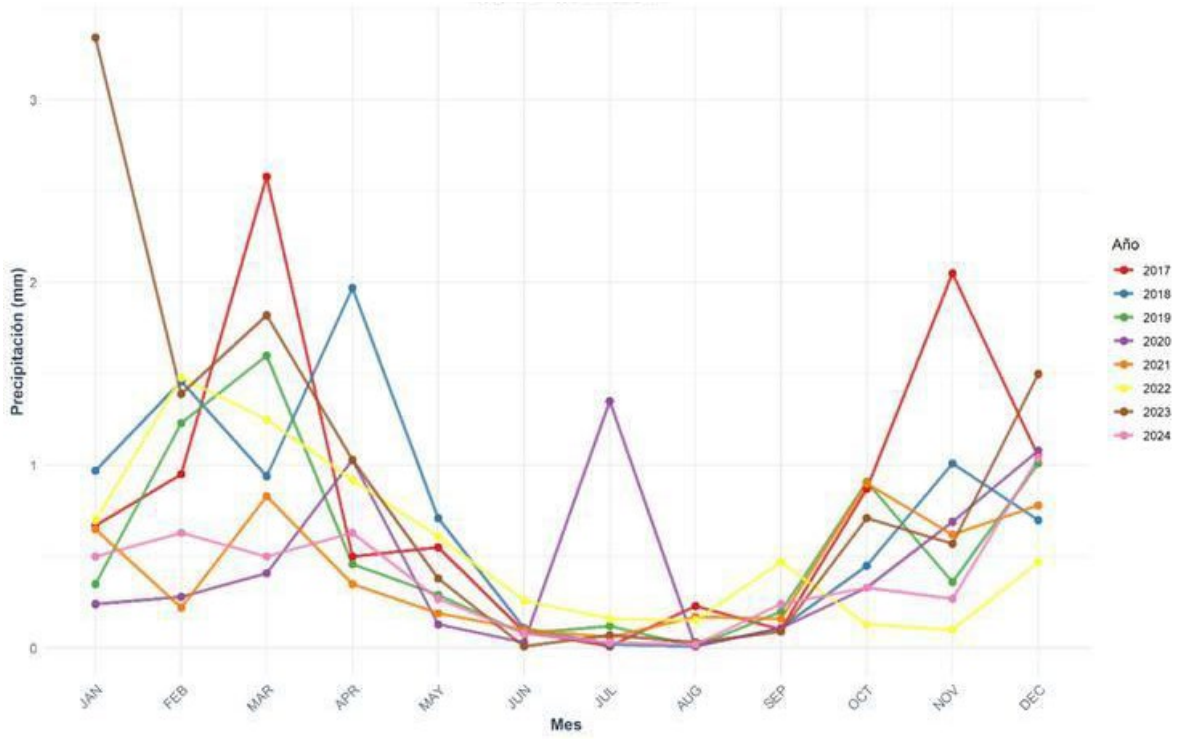
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

Figura 25. Patrón mensual de precipitación representado en mapa de calor (2017–2024)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

Figura 26. Evolución mensual de la precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo (2017-2024)

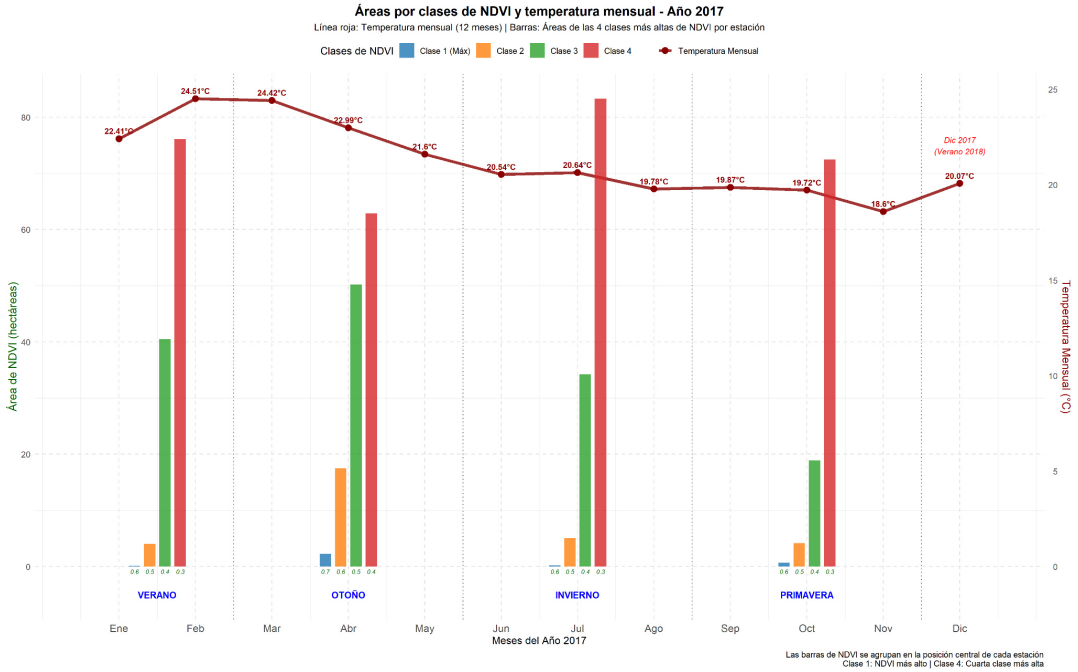


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de NASA POWER LARC, 2025.

4.3 Relación del NDVI y variabilidad climática

4.3.1 Relación NDVI – Temperatura

Figura 27. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2017



.

Figura 28. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2018

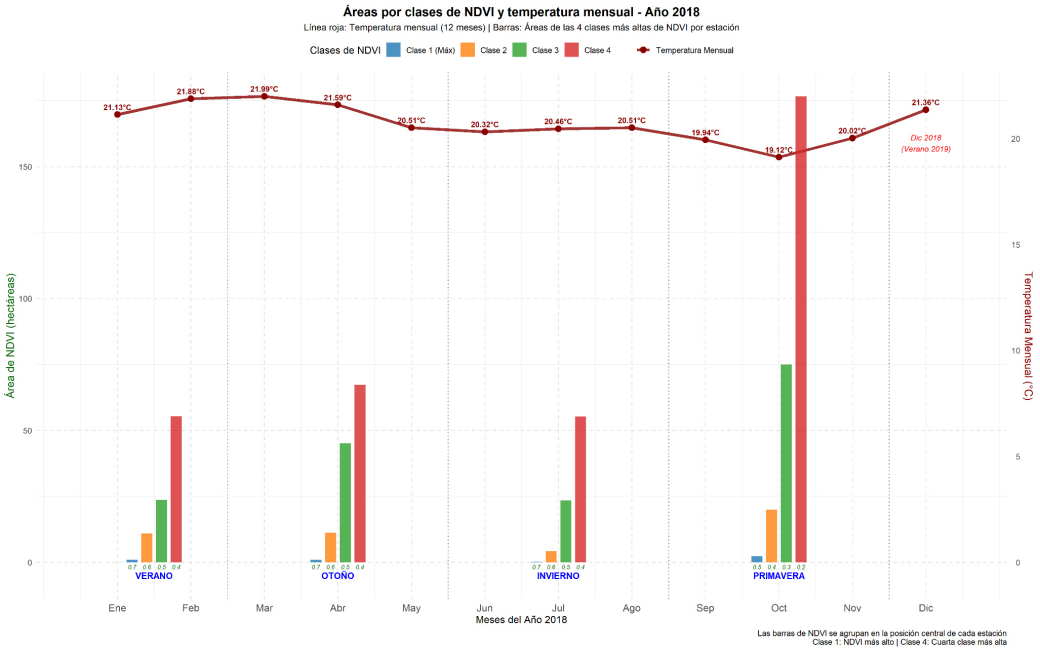


Figura 29. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2019

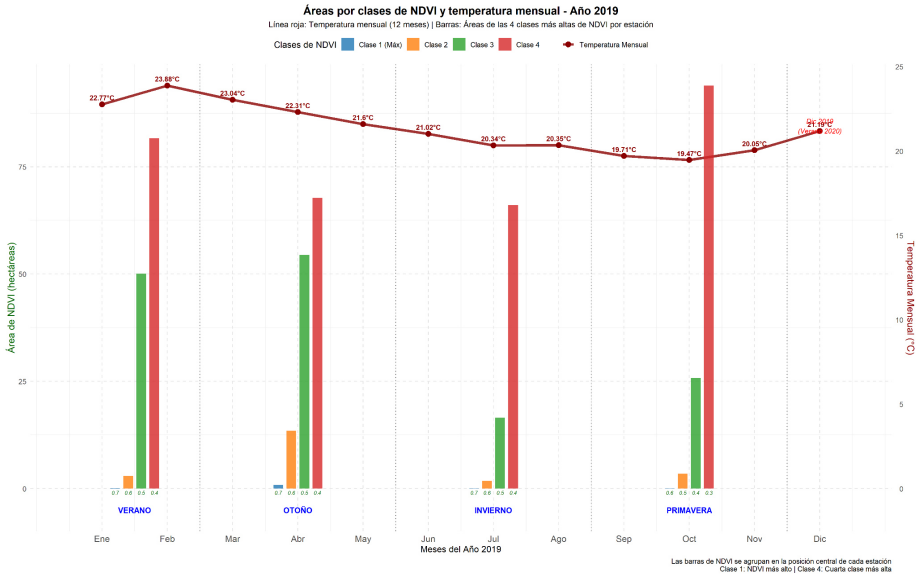


Figura 30. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la temperatura mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2020

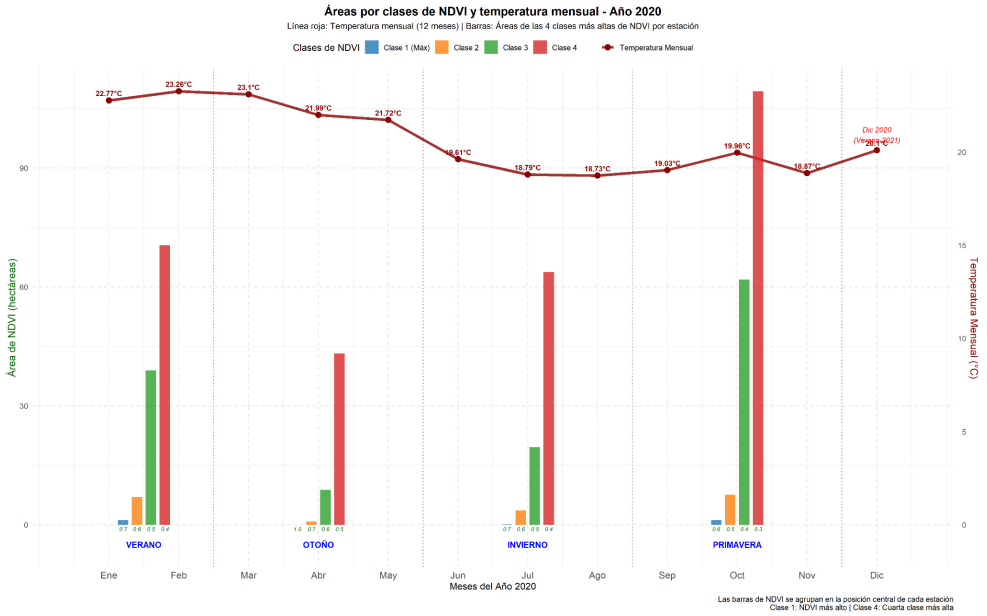


Figura 31. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2021

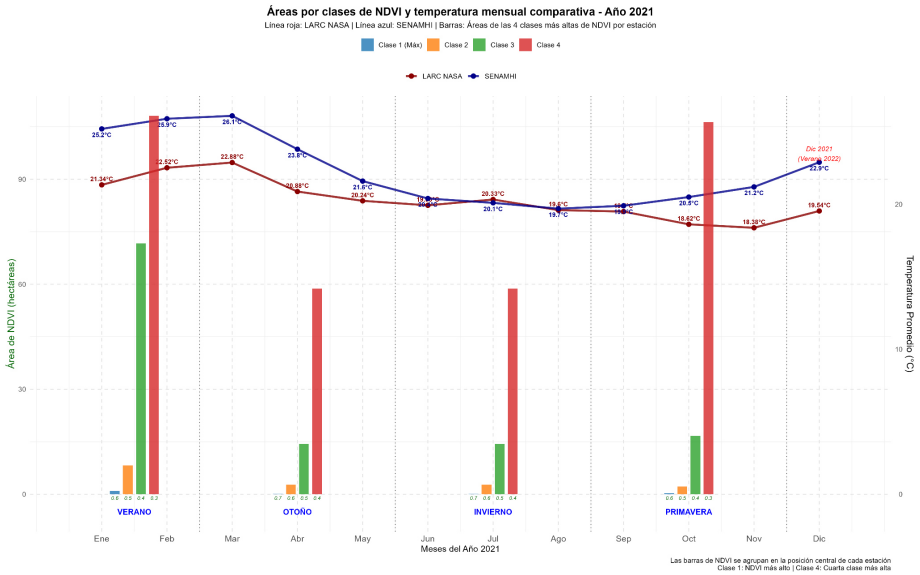


Figura 32. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2022

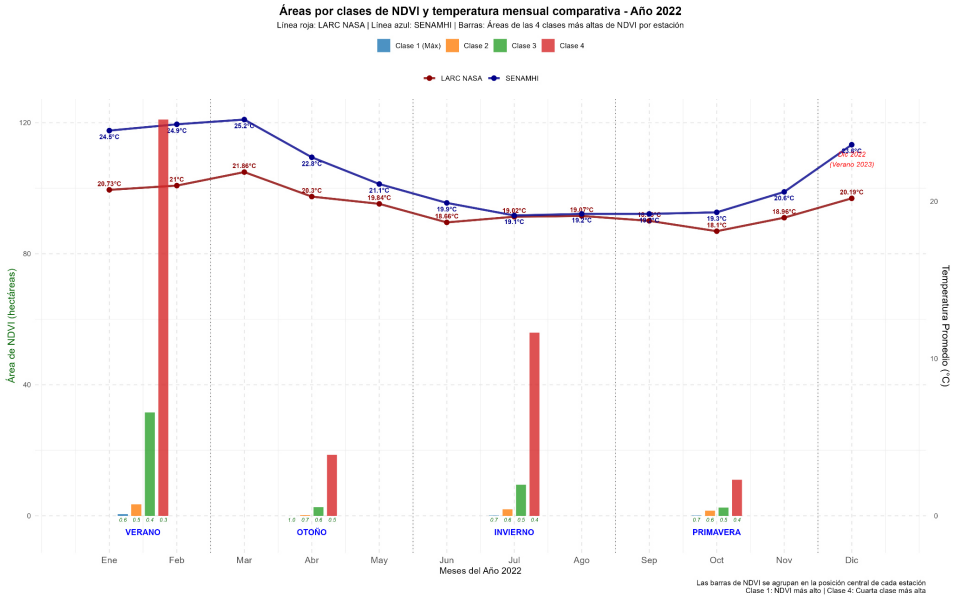


Figura 33. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2023

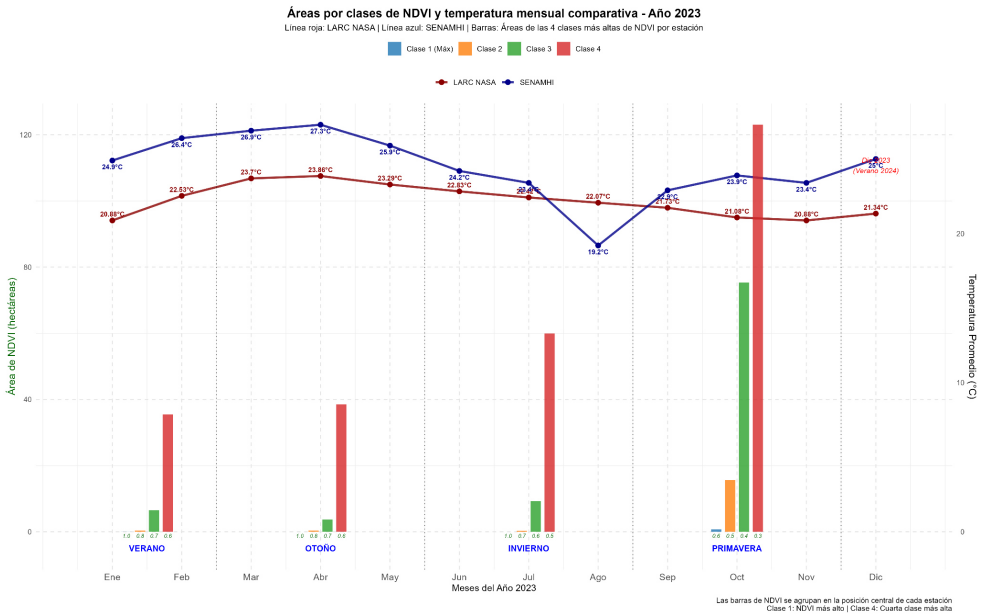
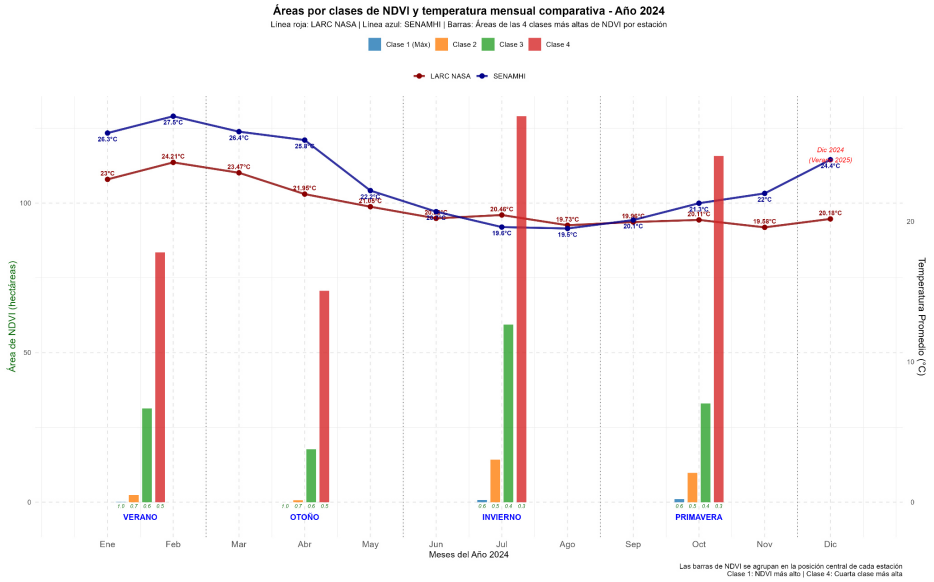


Figura 34. Relación de temperaturas mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2024



4.3.2 Relación NDVI – Precipitación

Relación precipitación- NDVI

Figura 35. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2017

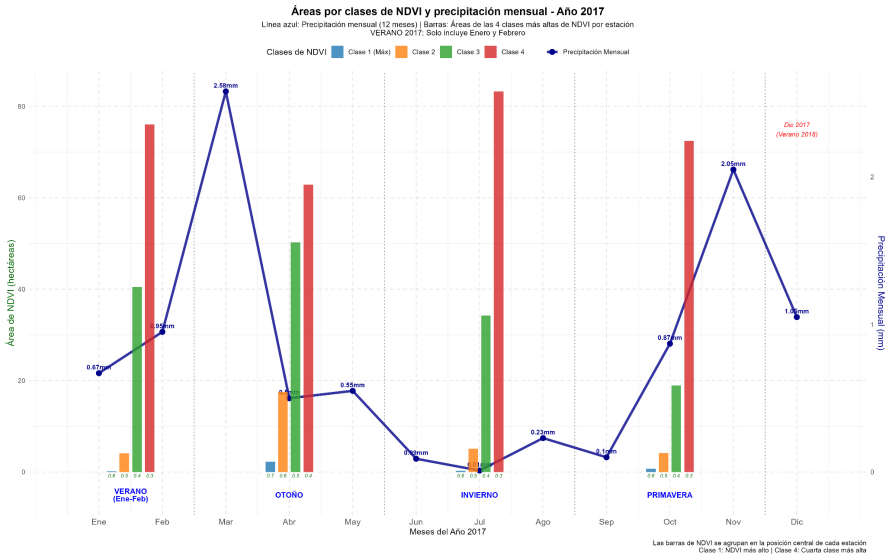


Figura 36. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2018

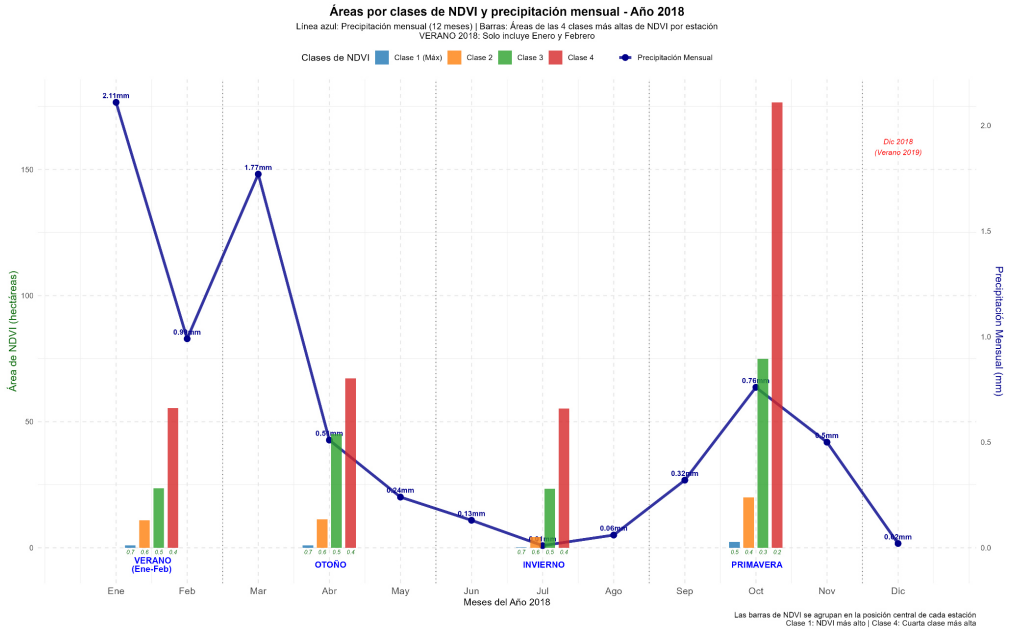


Figura 37. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2019

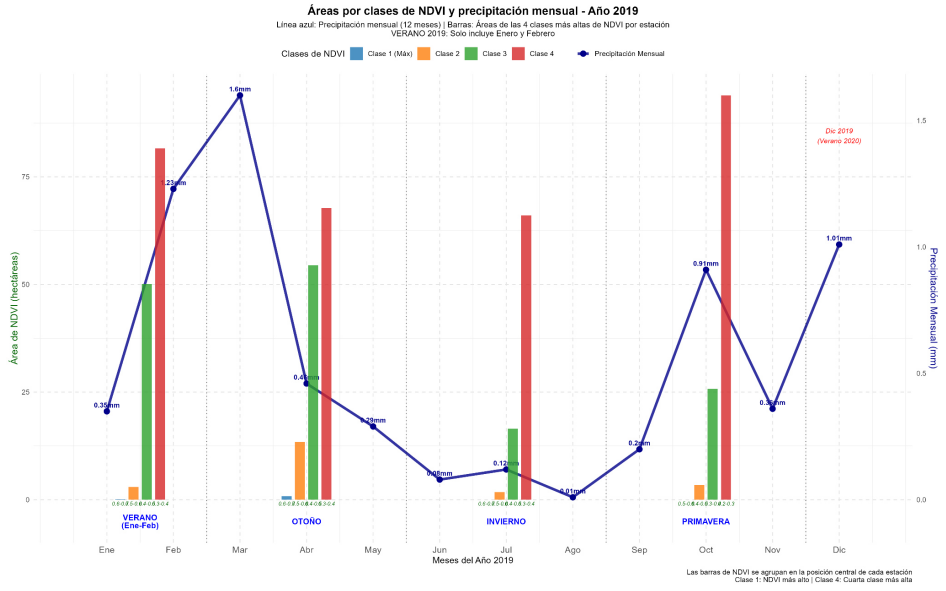


Figura 38. Relación entre la distribución de clases de NDVI y la precipitación mensual (LARC NASA) en el Bosque de Cañoncillo, 2020

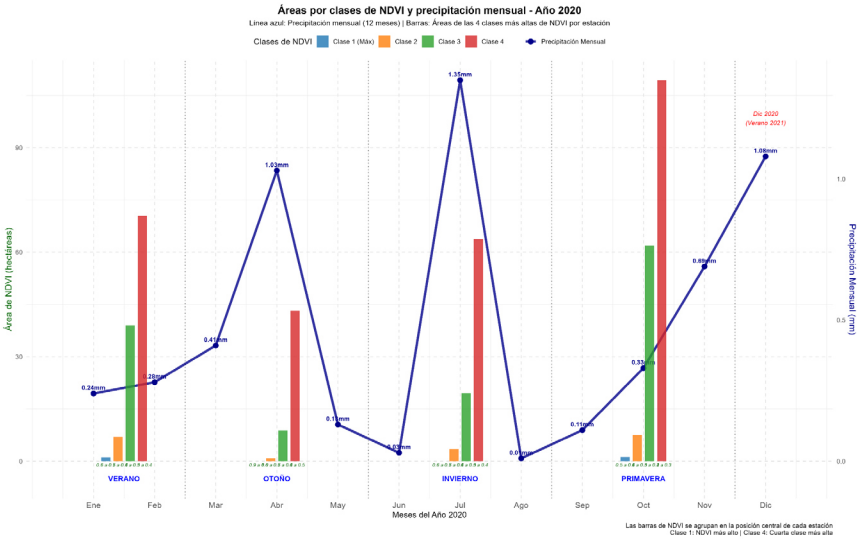


Figura 39. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2021

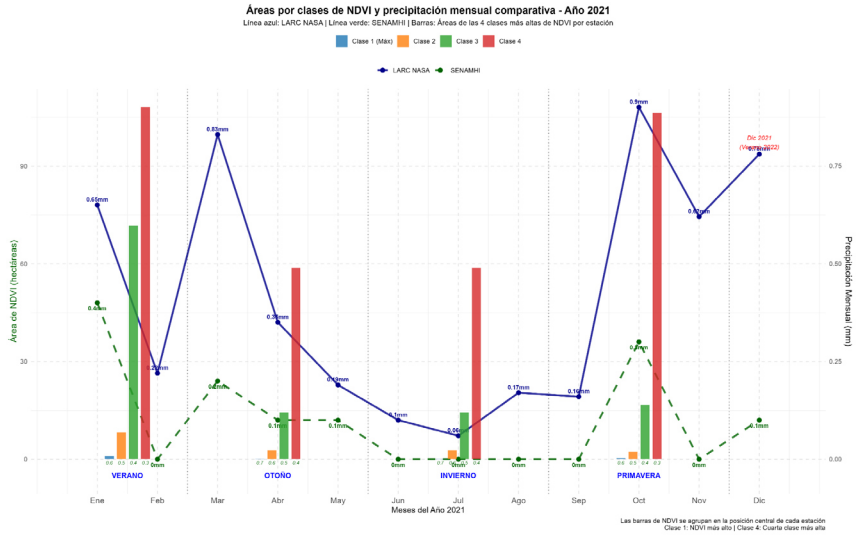


Figura 40. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2022

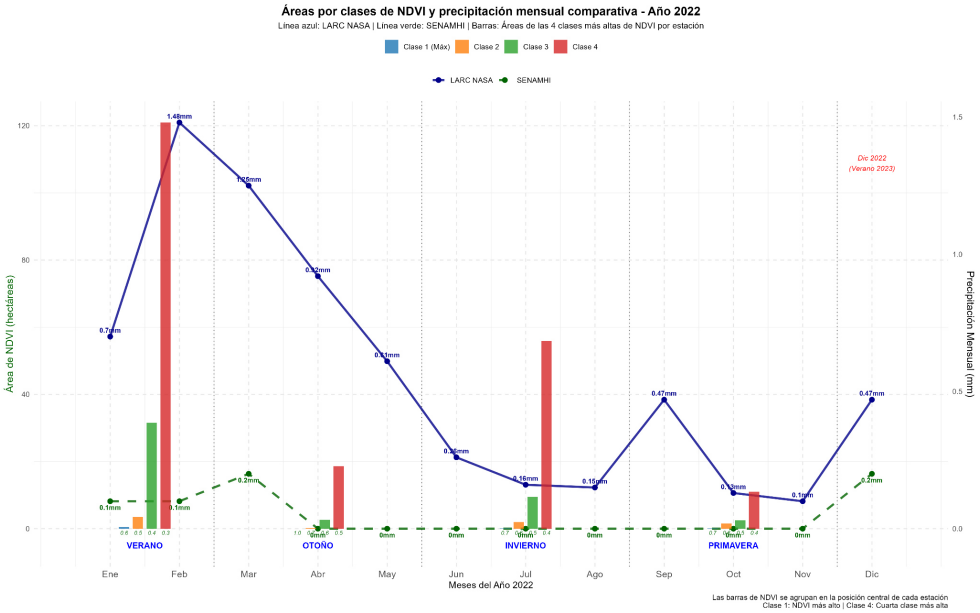


Figura 41. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2023

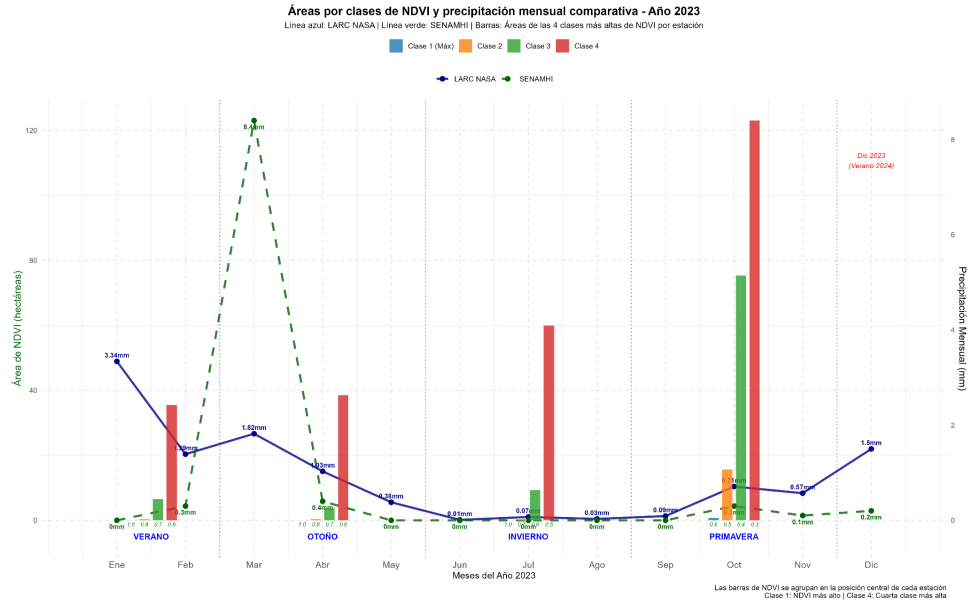
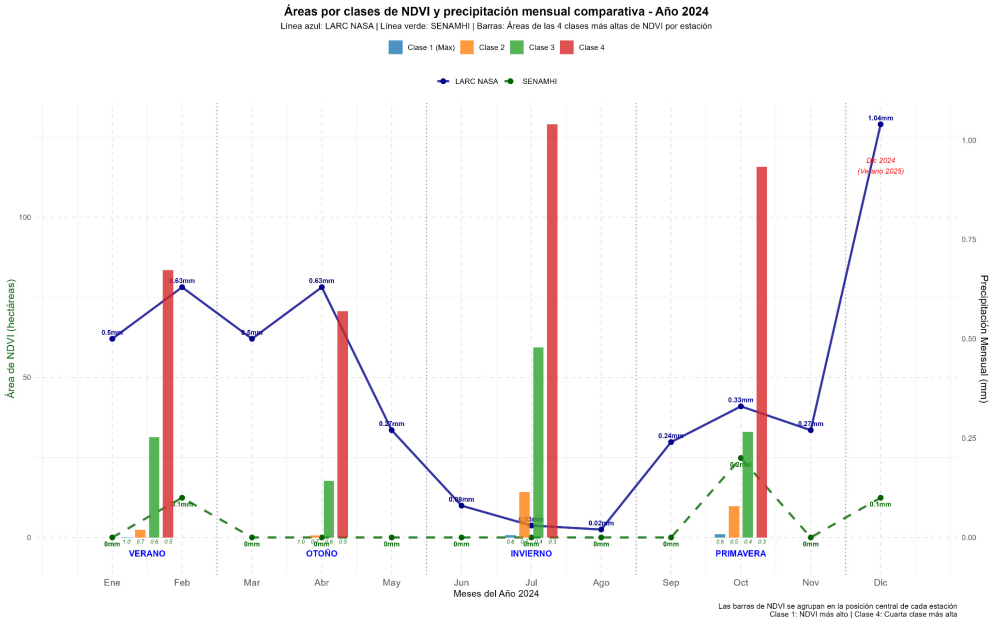
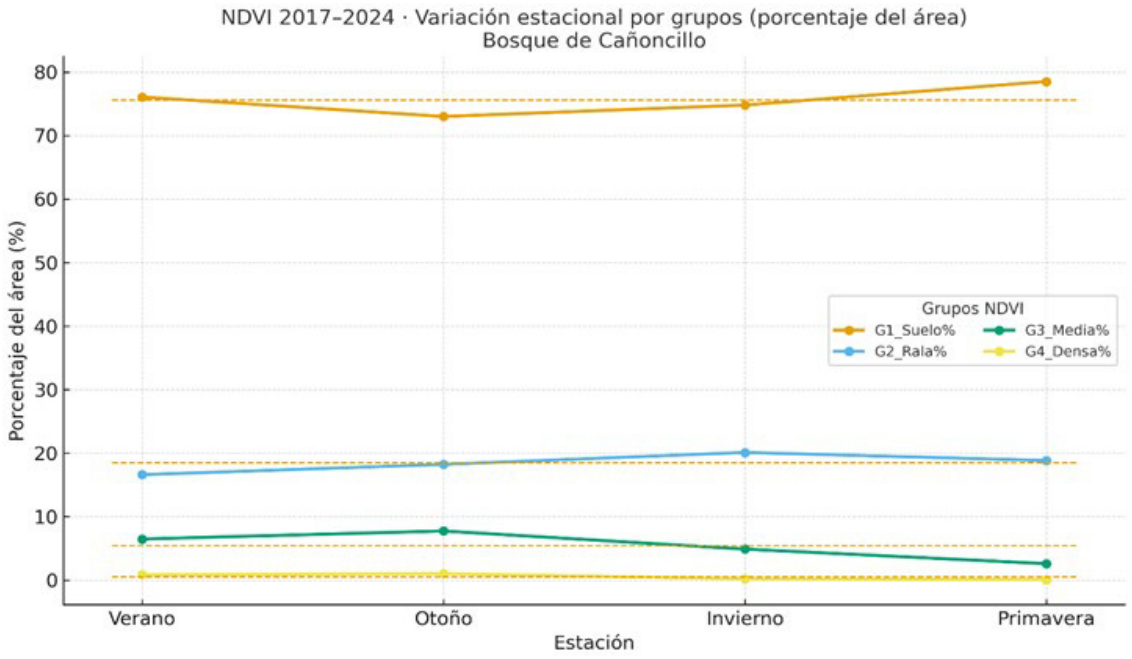


Figura 42. Relación de precipitaciones mensuales (LARC NASA vs. SENAMHI) y distribución de clases de NDVI en el Bosque de Cañoncillo, 2024



Análisis del comportamiento del NDVI y variabilidad climática (2017–2024)

Figura 43. Variación estacional promedio (2017–2024)



El comportamiento estacional promedio evidencia un patrón térmico-fenológico marcado: durante el invierno y la primavera se registran los valores más altos de NDVI, lo que se asocia con mayor humedad ambiental, nieblas costeras y brote temporal de vegetación herbácea. En contraste, en verano y otoño se observa un descenso generalizado de la cobertura verde, especialmente en las clases de vegetación media y densa, reflejando la fase de estrés hídrico estacional típica del ecosistema seco tropical costero.

La proporción de suelo desnudo se incrementa significativamente en verano (hasta 60 % en algunos años), mientras que la vegetación rala y media aumenta gradualmente hacia la primavera, evidenciando una recuperación fenológica postestacional. Este comportamiento estacional, coherente con las oscilaciones térmicas y de humedad detectadas por los registros de temperatura y radiación solar del LARCS-NASA, refuerza la importancia de la variabilidad climática intraanual como motor de la dinámica ecológica del bosque.

El análisis multitemporal del NDVI para el Bosque de Cañoncillo revela fluctuaciones significativas en la cobertura vegetal asociadas directamente con los patrones de variabilidad climática, principalmente temperatura y precipitación. Se observan valores más elevados de

NDVI durante los años con mayor precipitación (asociados a eventos El Niño moderados) y descensos notables en años secos, especialmente en eventos La Niña o sequías regionales.

La variación estacional también es marcada: los valores más altos de NDVI tienden a registrarse durante la primavera y el verano, coincidiendo con la mayor disponibilidad hídrica. En contraste, los meses de otoño e invierno presentan reducciones, reflejando el estrés hídrico característico del ecosistema seco del bosque.

Durante el período 2017–2024, el comportamiento del NDVI en el Bosque de Cañoncillo muestra una clara relación estacional, con máximos en los meses de verano y primavera, y mínimos en otoño e invierno. Esta estacionalidad refleja la dependencia del ecosistema respecto a la disponibilidad hídrica, que en ambientes áridos es altamente limitada y condicionada por las lluvias estivales. En los años con mayor precipitación estacional —principalmente en veranos influenciados por eventos El Niño— se registró un incremento notable en las clases de NDVI medio y alto, indicando un aumento de la biomasa vegetal activa.

El análisis multianual evidencia que las áreas clasificadas como de NDVI alto (valores > 0.5) tienden a concentrarse en el primer trimestre del año, disminuyendo progresivamente hacia los meses secos. Esta dinámica sugiere que el Bosque de Cañoncillo responde rápidamente a los pulsos de humedad, con regeneración y brotes de herbáceas y arbustos en respuesta a lluvias tempranas. Sin embargo, la cobertura de NDVI alto nunca es permanente: la estacionalidad impone una contracción drástica de estas áreas al finalizar la estación húmeda.

En los años de condiciones climáticas adversas, como La Niña o sequías prolongadas, se observa una expansión de las clases de NDVI bajo (< 0.2), que representan áreas sin cobertura vegetal o con vegetación estresada. La superficie cubierta por estas clases aumentó especialmente en invierno y otoño, cuando la evapotranspiración excede la escasa humedad disponible en el suelo. Este patrón se acentúa en 2019 y 2022, años asociados a menor precipitación acumulada según registros satelitales y meteorológicos.

La superficie con NDVI medio (entre 0.2 y 0.5), asociada a vegetación en estado intermedio de desarrollo, mostró la mayor estabilidad en el tiempo. Estas áreas parecen corresponder a zonas resilientes del bosque, donde el algarrobo y especies adaptadas como el faique logran mantener cierta actividad fotosintética incluso en condiciones de aridez. Sin embargo, su extensión también fluctúa estacionalmente, alcanzando valores máximos en primavera y cayendo hacia el invierno, lo que evidencia la influencia de la temperatura y la humedad residual sobre su vigor.

Comparativamente, el año 2024 destacó por una recuperación parcial del NDVI alto en primavera y verano, luego de dos años consecutivos de reducción sostenida. Este repunte puede estar vinculado a lluvias excepcionales registradas entre diciembre de 2023 y febrero de 2024. La respuesta inmediata de la vegetación fue un incremento en las clases NDVI alto y medio, lo que demuestra que, pese al estrés acumulado, el ecosistema mantiene una capacidad de regeneración significativa bajo condiciones favorables.

En resumen, el análisis estacional de la variabilidad del NDVI permite concluir que el comportamiento del Bosque de Cañoncillo está estrechamente condicionado por la disponibilidad hídrica, con respuestas vegetales rápidas y marcadas frente a eventos climáticos. La distribución de áreas por clases de NDVI a lo largo del año evidencia la naturaleza pulsátil del ecosistema seco, con brotes vigorosos durante las lluvias y contracción vegetativa durante las fases secas. Este patrón cíclico refuerza la necesidad de conservar los pulsos hídricos estacionales, ya que sostienen la funcionalidad ecológica del bosque.

Interpretación de la relación NDVI–Clima

La comparación entre los registros meteorológicos de la estación de Guadalupe (SENAMHI) y la base satelital LARC NASA revela una importante complementariedad. Si bien SENAMHI proporciona una serie confiable hasta 2014 (Figura 20), existe un vacío de datos para el período 2015-2020, lo que imposibilita un seguimiento continuo desde fuentes terrestres. En ese contexto, los datos de LARC NASA han permitido suplir esta carencia y extender la serie climática hasta el año 2024, como se observa en las Figuras 21 a 23. Estas muestran una continuidad en las tendencias térmicas, validando la consistencia de la fuente

satelital respecto a los valores históricos registrados localmente, lo que respalda su uso en estudios longitudinales como este.

Respecto a la precipitación, la Figura 24 (SENAMHI 1971-2014) indica un régimen extremadamente árido, con lluvias ocasionales y marcadamente estacionales. Esta tendencia es confirmada por los datos satelitales representados en las Figuras 25 y 26 (LARC NASA 2017-2024), que muestran pulsos de precipitación coincidentes con eventos climáticos como El Niño. La correspondencia entre ambas fuentes en la representación del patrón estacional y la frecuencia de lluvias excepcionales refuerza la fiabilidad de LARC NASA como proxy en la región. Sin embargo, se detectan leves discrepancias en la intensidad de los eventos: LARC tiende a estimar precipitaciones ligeramente superiores en comparación con los registros históricos de SENAMHI, lo cual es esperable dada la naturaleza de la captación satelital.

El análisis conjunto de NDVI con temperatura y precipitación, mostrado en las Figuras 27 a 42, permite validar aún más la funcionalidad de los datos LARC NASA. Las figuras de correlación entre NDVI y variables climáticas demuestran que la vegetación del Bosque de Cañoncillo responde directamente a los patrones identificados por ambos sistemas, siendo especialmente sensible a los pulsos de humedad y las anomalías térmicas. En años donde LARC detectó aumentos de temperatura y lluvias anómalas, se evidenció una expansión en las clases de NDVI medio y alto. Aunque se cuenta con datos cruzados LARC-SENAMHI sólo hasta 2014, el alto grado de convergencia hasta esa fecha valida el uso extendido de la fuente satelital para series largas y análisis climáticos en regiones con limitaciones de cobertura meteorológica local.

Durante el período 2017–2024, se observa una relación directa entre la temperatura media mensual y la expansión de áreas con valores elevados de NDVI, particularmente en los años con temperaturas templadas moderadas. En estaciones como primavera y verano, donde las temperaturas superan los 24 °C pero aún no alcanzan extremos térmicos, el incremento en temperatura favorece la actividad fotosintética, resultando en un aumento de áreas clasificadas con NDVI medio y alto. Este patrón se repite en los años 2017, 2020 y 2024, donde tras leves aumentos térmicos estacionales se registraron brotes de vegetación vigorosa,

especialmente en zonas periféricas del bosque donde se concentran especies herbáceas de ciclo rápido.

Sin embargo, en años donde la temperatura superó umbrales críticos, como 2019 y 2022, el incremento térmico no se tradujo en una mejora en la cobertura vegetal, sino más bien en estrés hídrico generalizado. La alta evapotranspiración, combinada con baja precipitación, derivó en una contracción significativa de las áreas de NDVI alto. En estos años, grandes extensiones del bosque pasaron a clasificarse en rangos de NDVI bajo (<0.2), reflejando vegetación estresada, senescente o áreas desnudas. Este efecto es más notorio en los mapas de calor térmico y de distribución NDVI presentados en las figuras del capítulo IV, donde se evidencia el impacto negativo de la temperatura cuando no está acompañada por humedad suficiente.

Los años con menor amplitud térmica y temperaturas más estables, como 2018 y 2021, mostraron una mayor persistencia de NDVI medio durante el invierno y parte del otoño, lo cual sugiere que la temperatura estable, aunque moderadamente baja, puede sostener una cierta actividad vegetal en áreas con acceso a humedad edáfica remanente. Esto es particularmente relevante en microambientes alrededor de las lagunas estacionales y depresiones interdunares, que retienen humedad por más tiempo. En estos casos, la influencia térmica no está asociada directamente al pico de verdor, sino a la capacidad de mantenimiento de cobertura vegetal basal durante las fases de transición climática.

En conjunto, el análisis multianual evidencia que la temperatura, por sí sola, no es un factor determinante para el aumento de áreas verdes, sino que su efecto está mediado por la disponibilidad de humedad. Las mejores condiciones de vegetación reflejadas en altas áreas con NDVI > 0.5, se dieron en condiciones de temperaturas moderadas con soporte hídrico, mientras que las temperaturas elevadas sin precipitación actuaron como factores de deterioro vegetal. Esto refuerza la necesidad de considerar el binomio temperatura–precipitación en la interpretación del NDVI y en la planificación de estrategias de conservación, ya que ambos factores interactúan para definir la salud de los ecosistemas secos como el Bosque de Cañoncillo.

El análisis multitemporal del NDVI para el periodo 2017–2024 muestra una fuerte dependencia de la vegetación con respecto a la precipitación. En los años donde se registraron pulsos de lluvia significativos, especialmente en 2017, 2020 y 2024, se evidenció un incremento sustancial en la cobertura vegetal, expresado en un aumento de las áreas clasificadas como NDVI medio (0.2–0.5) y alto (>0.5). Este patrón es claro en los mapas de distribución y correlación del NDVI con la precipitación mensual (Figuras 35 a 42), donde la vegetación respondió casi de inmediato a los eventos lluviosos, generando brotes herbáceos y una regeneración visible en especies arbóreas.

En contraste, los años con precipitaciones escasas o mal distribuidas, como 2019 y 2022, evidencian una clara disminución en la cobertura vegetal. Durante estos años, la mayoría del bosque se mantuvo en las clases de NDVI bajo (<0.2), con grandes extensiones sin actividad fotosintética significativa. La reducción del verdor en esos periodos refleja la alta sensibilidad del ecosistema a la escasez hídrica. Incluso con temperaturas adecuadas, la falta de lluvias limitó la regeneración vegetal, afectando especialmente a las zonas expuestas sin acceso a humedad edáfica o cercanía a cuerpos de agua estacionales.

Otro aspecto relevante es la influencia del **timing** de las lluvias. En años como 2018 y 2021, aunque la cantidad total de precipitación no fue especialmente alta, su ocurrencia durante los meses clave (diciembre–febrero) permitió una respuesta vegetal eficiente, visible en un repunte temporal del NDVI medio durante primavera y verano. Esto resalta que no solo importa cuánto llueve, sino **cuándo** llueve. Las lluvias tempranas o tardías respecto al ciclo fenológico vegetal reducen la eficiencia en el uso del agua, afectando negativamente la capacidad del ecosistema para desarrollar biomasa.

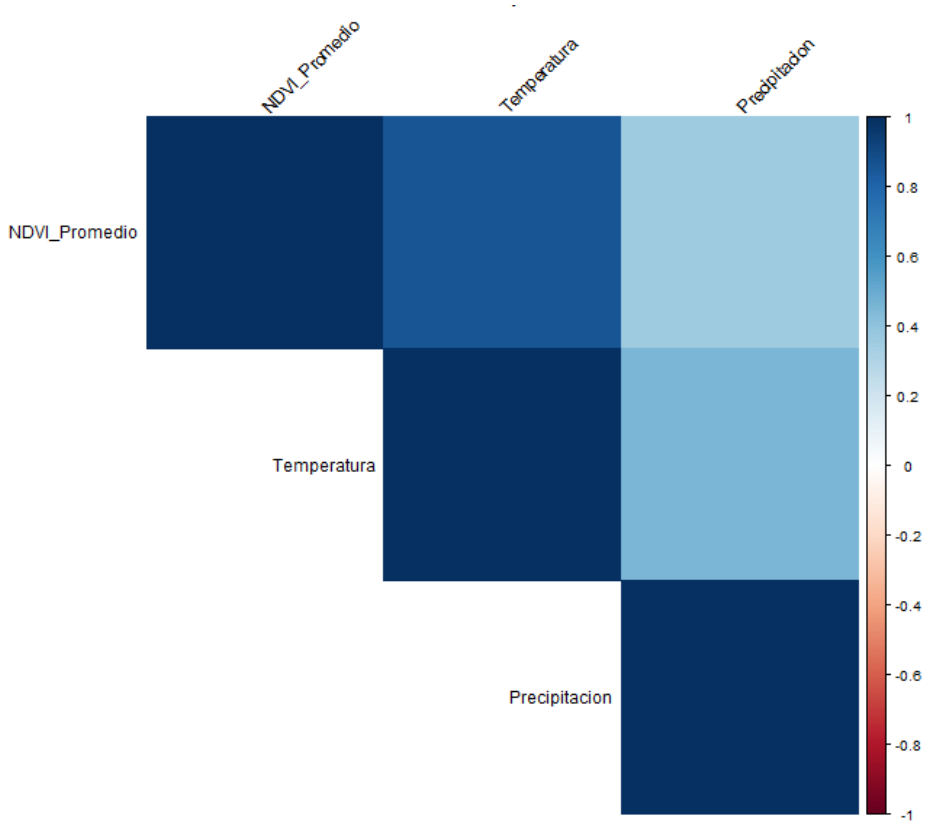
En suma, la precipitación actúa como el principal factor limitante para la dinámica vegetal del Bosque de Cañoncillo. Su efecto se expresa claramente en la expansión o contracción de áreas verdes detectadas mediante NDVI. Los años con lluvias bien distribuidas y dentro de las ventanas estacionales críticas producen respuestas vegetales rápidas y generalizadas; mientras que los años secos o con lluvias erráticas inducen estrés ecológico visible en la reducción del índice. Este comportamiento confirma que la gestión de este ecosistema seco debe centrarse en la protección de microhábitats con mejor retención hídrica y en estrategias de conservación adaptadas a la alta variabilidad interanual de las lluvias.

El análisis conjunto de temperatura y precipitación revela que la vegetación del Bosque de Cañoncillo responde no solo a la magnitud individual de estas variables, sino a su interacción sinérgica. Los años con temperaturas moderadas combinadas con lluvias oportunas, como 2017, 2020 y 2024, favorecieron ampliamente el desarrollo vegetal, lo cual se tradujo en una mayor extensión de áreas clasificadas con NDVI medio y alto. En estos periodos, la temperatura promovió la fotosíntesis, mientras que la disponibilidad hídrica eliminó las restricciones edáficas, permitiendo la expansión temporal de especies herbáceas y el reverdecimiento de las especies leñosas. Este equilibrio climático optimizó la productividad primaria, como se evidencia en los picos de cobertura vegetal observados en los mapas y gráficos del capítulo IV.

Por el contrario, en años donde se registraron temperaturas elevadas sin soporte hídrico, como 2019 y 2022, la vegetación no solo no respondió favorablemente, sino que sufrió una contracción significativa. En estos casos, la evapotranspiración superó la capacidad del ecosistema para retener humedad, generando un estrés fisiológico que redujo la cobertura vegetal, lo cual quedó reflejado en la expansión de áreas con NDVI bajo. Esta relación confirma que, en un ecosistema seco como el de Cañoncillo, la temperatura actúa como un **factor potenciador o limitante**, dependiendo del contexto hídrico. Por ello, cualquier estrategia de conservación o restauración deberá tomar en cuenta este binomio climático, especialmente ante escenarios futuros de mayor variabilidad e incertidumbre climática.

4.3.3 Matriz de correlación general

Figura 44. Matriz de correlación de Spearman entre variables de estudio en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024



La matriz revela una correlación positiva fuerte entre el NDVI y la temperatura (coeficiente ≈ 0.8), indicando que a mayor temperatura, mayor vigor vegetal en el Bosque Natural El Cañoncillo. Por el contrario, la correlación entre NDVI y precipitación es positiva pero débil (coeficiente ≈ 0.3), sugiriendo una influencia limitada de las lluvias sobre la vegetación durante el período estudiad

Relación entre variables climáticas: Se observa una correlación negativa moderada entre temperatura y precipitación (coeficiente ≈ -0.5), patrón climático característico donde los períodos más cálidos coinciden con menor pluviosidad. Este comportamiento explica por qué la temperatura emerge como el factor determinante en la dinámica del NDVI, mientras que la precipitación muestra una contribución secundaria en la regulación de la vegetación del bosque

4.4 Contrastes de hipótesis

4.4.1 Hipótesis general

H_0: No existe una relación estadísticamente significativa entre el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la variabilidad climática (temperatura y precipitación) en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017-2024.

H_1: Existe una relación estadísticamente significativa entre el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la variabilidad climática (temperatura y precipitación) en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017-2024.

4.4.2 Hipótesis específica 1

H_0: No existen diferencias significativas en los valores promedio del NDVI entre las estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera) durante el periodo 2017-2024.

H_1: Existen diferencias significativas en los valores promedio del NDVI entre las estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera) durante el periodo 2017-2024.

Prueba de Chi-cuadrado (x^2)

Esta prueba se empleó para determinar si existen diferencias significativas en la distribución de frecuencias del NDVI entre las estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera) durante el periodo 2017–2024.

Matemáticamente, la prueba se expresa como:

$$x^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

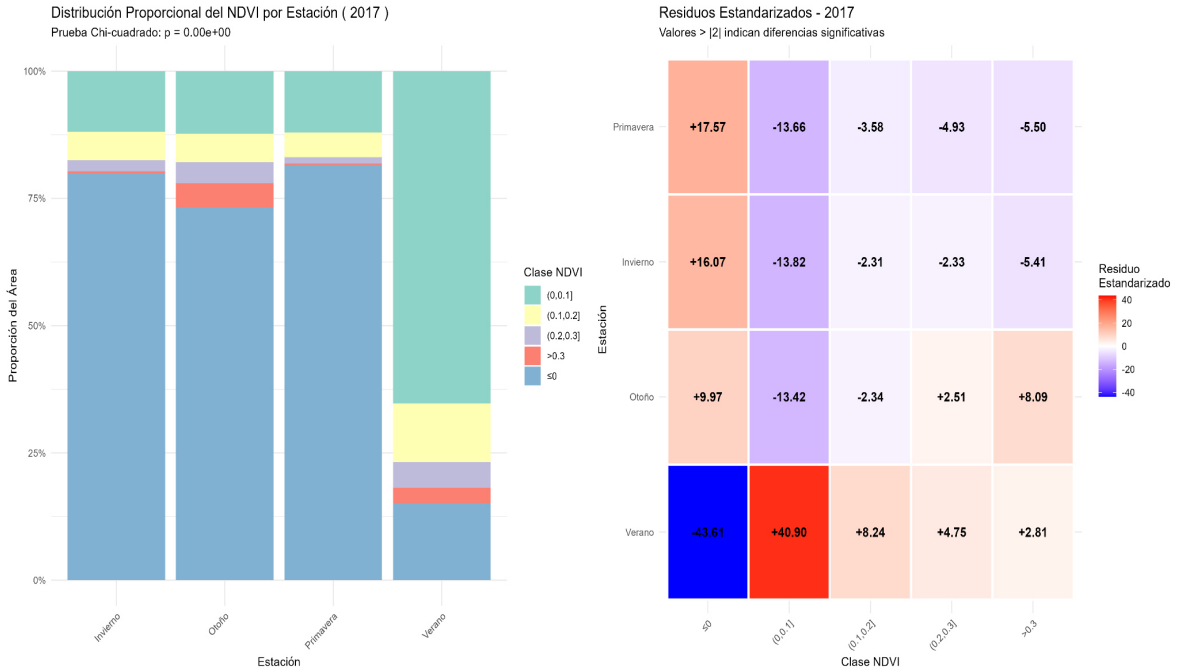
Donde:

- O_i = Frecuencia observada en la categoría *i*
- E_i = Frecuencia esperada en la categoría *i*
- k= Número total de categorías o clases

El valor calculado de x^2 se compara con el valor crítico de la distribución x^2con $(k-1)$ grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Si $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0), concluyendo que existen diferencias significativas entre las estaciones. Esta prueba fue aplicada individualmente para cada año del periodo 2017–2024, permitiendo identificar la variabilidad estacional del vigor vegetal en función de las clases del NDVI.

2017

Figura 45. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2017

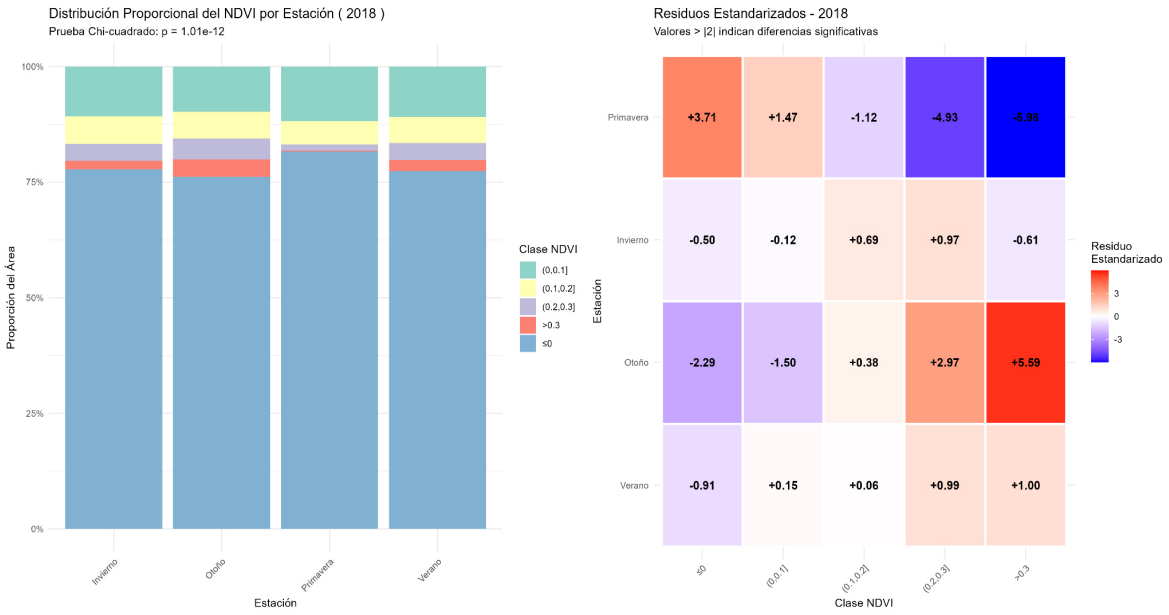


Durante el año 2017 se observó una reducción promedio en el vigor vegetal alto, destacando la estación de otoño con el mayor cambio (2.6 %). La distribución de clases NDVI muestra que en verano predomina la clase (0, 0.1], con un desplazamiento progresivo hacia valores ≤ 0 durante el invierno. En general, las proporciones de NDVI alto (> 0.3) se mantuvieron bajas en todas las estaciones. La prueba Chi-cuadrado arrojó un valor de $\chi^2(12) = 2176.19$ con un valor p = 0.00, indicando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las estaciones. El análisis de residuos estandarizados evidenció un exceso de valores positivos en verano para las clases (0, 0.1], (0.1, 0.2], (0.2, 0.3] y > 0.3, mientras que las demás

estaciones mostraron un exceso de valores ≤ 0. En contraste, otoño, invierno y primavera presentaron déficits en las clases de mayor NDVI, confirmando una marcada variación estacional del vigor vegetal a lo largo del año

2018

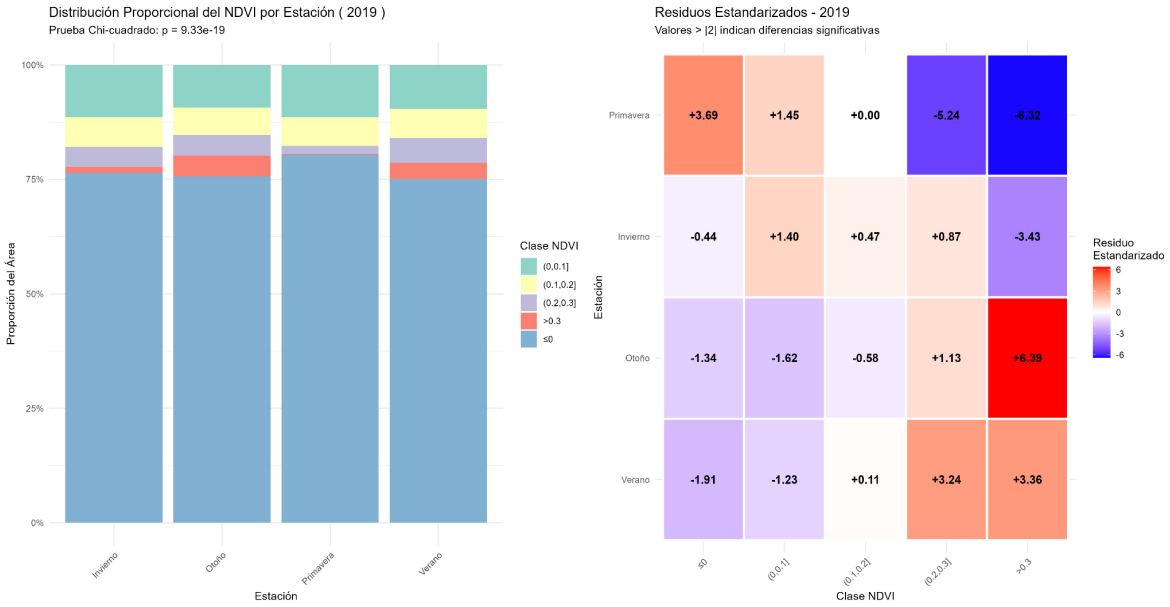
Figura 46. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2018



En 2018 se registró una reducción promedio en el vigor alto, siendo la primavera la estación con mayor cambio (1.9 %). La clase dominante en verano fue ≤ 0, con un desplazamiento hacia las clases ≤ 0 y (0.1, 0.2] durante el invierno. Las proporciones de NDVI alto (> 0.3) se mantuvieron estables en todas las estaciones. La prueba Chi-cuadrado indicó un valor de $\chi^2(12) = 83.20$ con $p = 1.01 \times 10^{-12}$, demostrando diferencias estadísticamente significativas entre estaciones ($p < 0.05$). Los residuos estandarizados revelaron un exceso de valores ≤ 0 en primavera y un déficit en otoño, mientras que las clases (0.2, 0.3] y > 0.3 presentaron excesos en otoño y déficits en primavera. Estos resultados evidencian una variación significativa en la cobertura vegetal a lo largo del año, con un incremento del vigor en los meses intermedios y una reducción en el cierre del ciclo anual

2019

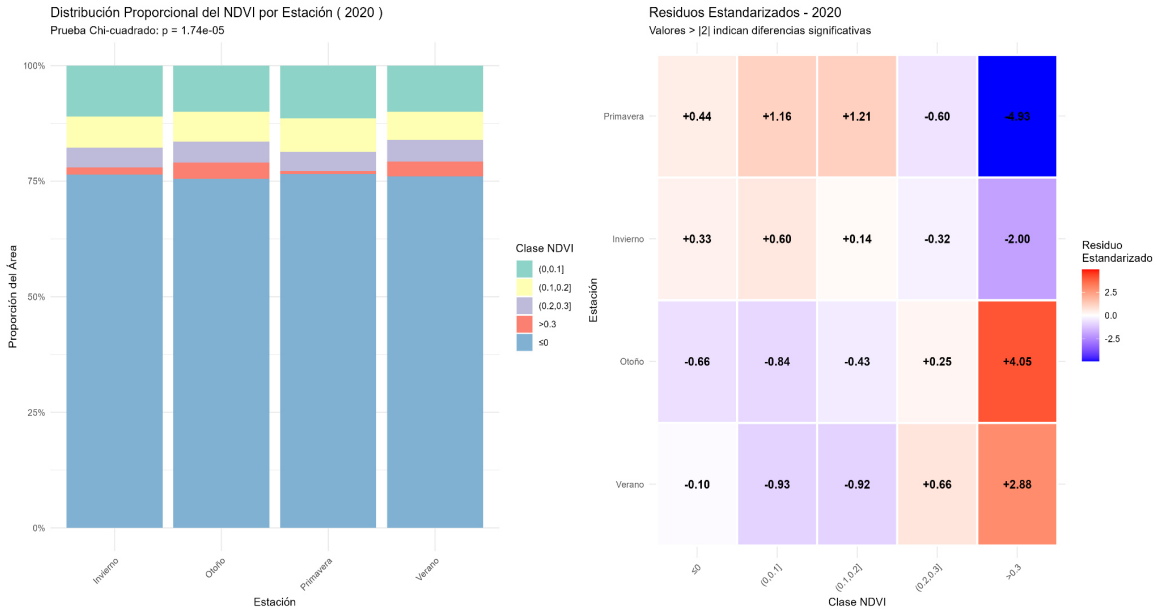
Figura 47. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2019



Durante 2019 se observó una reducción promedio en el vigor alto, con el mayor cambio en la estación de otoño (2.2 %). En este año, la clase predominante en verano fue ≤ 0, mostrando un desplazamiento hacia las clases ≤ 0, (0, 0.1] y (0.1, 0.2] durante el invierno. El NDVI alto (> 0.3) se mantuvo bajo en todas las estaciones. La prueba Chi-cuadrado obtuvo $\chi^2(12) = 114.07$ y $p = 9.33 \times 10^{-19}$, confirmando diferencias significativas entre estaciones ($p < 0.05$). Los residuos mostraron un exceso de valores > 0.3 en verano y otoño, y déficits en invierno y primavera, además de un exceso en la clase (0.2, 0.3] durante verano. Esto indica un comportamiento más vigoroso de la vegetación en el primer semestre, asociado probablemente a mejores condiciones de humedad y radiación.

2020

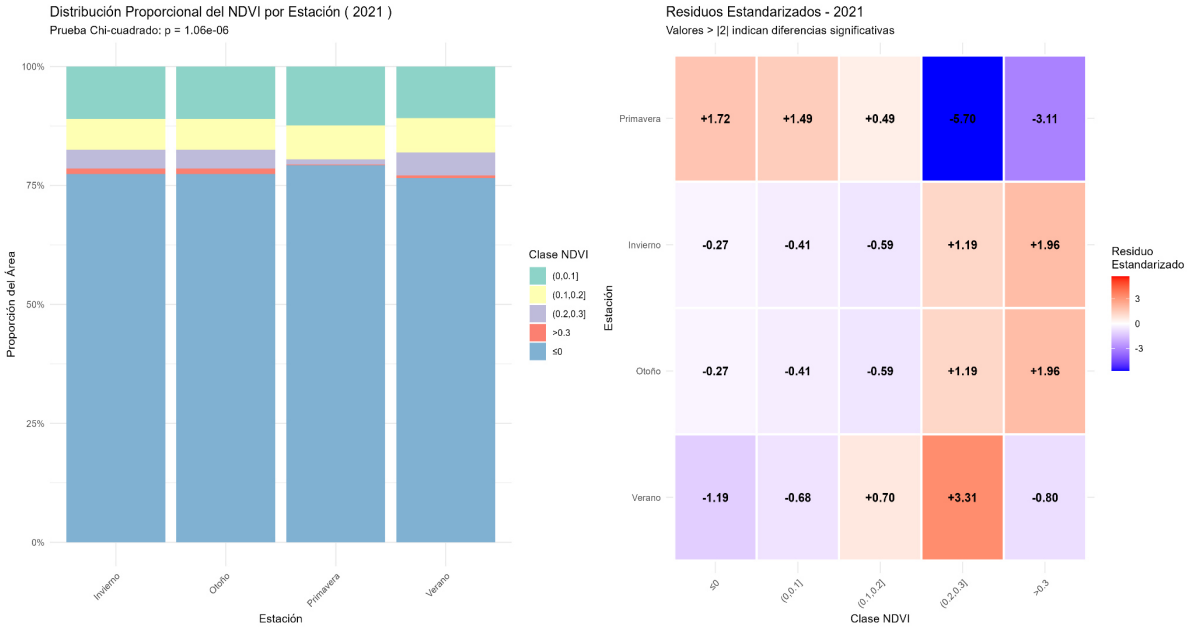
Figura Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2020



En 2020 la reducción promedio del vigor alto fue notoria, siendo la primavera la estación con mayor variación (1.62 %). La clase predominante en verano fue ≤ 0, con desplazamientos hacia ≤ 0, (0, 0.1] y (0.1, 0.2] en invierno. Las proporciones de NDVI alto (> 0.3) se mantuvieron constantes a lo largo del año. La prueba Chi-cuadrado mostró un valor de $\chi^2(12) = 43.67$ con $p = 1.74 \times 10^{-5}$, confirmando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Los residuos estandarizados señalaron excesos de NDVI alto (> 0.3) en verano y otoño, y un déficit marcado en primavera. Esta dinámica refleja una recuperación temporal del vigor vegetal en la primera mitad del año, seguida de una disminución hacia el final del ciclo estacional

2021

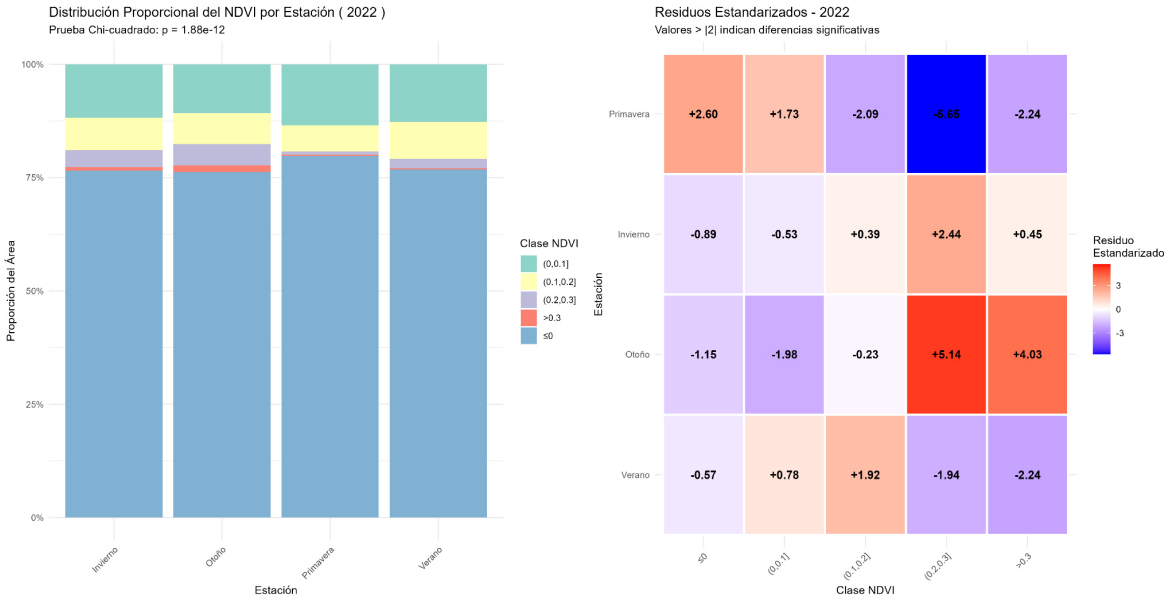
Figura 48. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2021



Para 2021, la reducción promedio del vigor alto fue leve, con mayor variación en primavera (0.61 %). La clase dominante en verano fue ≤ 0, con desplazamiento hacia ≤ 0, (0, 0.1] y > 0.3 durante el invierno. Las proporciones de NDVI alto (> 0.3) permanecieron bajas. La prueba Chi-cuadrado arrojó $\chi^2(12) = 50.68$ con $p = 1.06 \times 10^{-6}$, lo que confirma diferencias significativas entre estaciones ($p < 0.05$). El análisis de residuos evidenció excesos en la clase (0.2, 0.3] durante verano y déficits en primavera, además de una disminución del NDVI alto (> 0.3) en esta última estación. En conjunto, los resultados sugieren una leve pero significativa variación estacional en la cobertura vegetal

2022

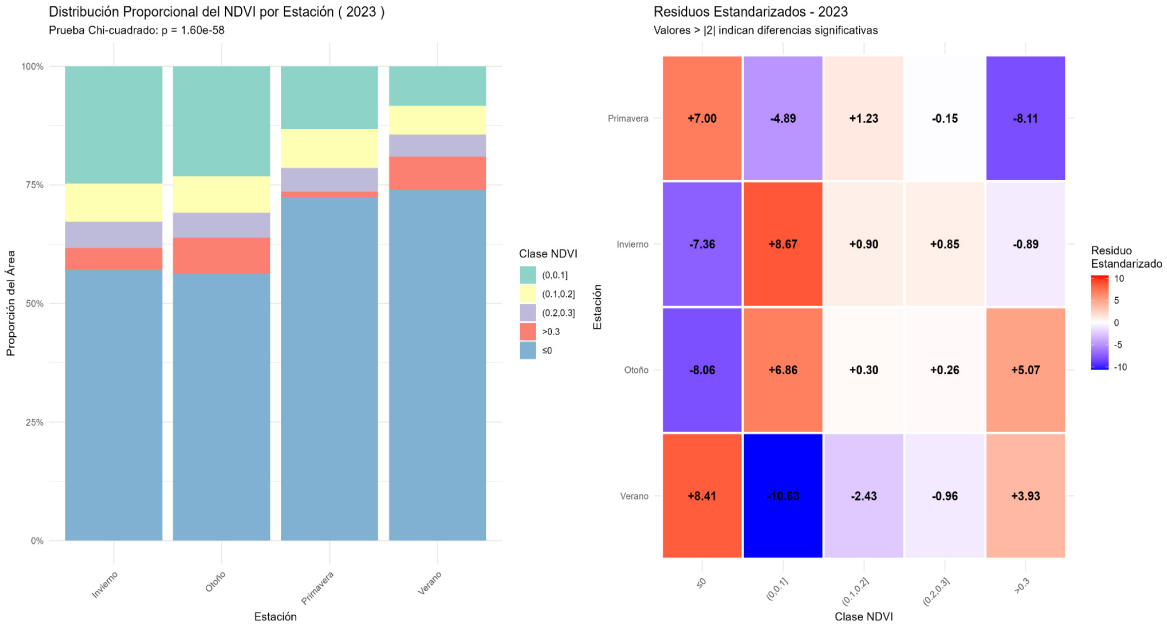
Figura 49. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2017



Durante 2022, la reducción promedio en el vigor alto fue moderada, siendo el otoño la estación con mayor cambio (0.74 %). La clase dominante en verano fue ≤ 0, mientras que el desplazamiento estacional se orientó hacia las clases (0.2, 0.3] y > 0.3 durante invierno. Las proporciones de NDVI alto (> 0.3) se mantuvieron similares entre estaciones. La prueba Chi-cuadrado presentó $\chi^2(12) = 81.78$ con $p = 1.88 \times 10^{-12}$, evidenciando diferencias significativas ($p < 0.05$). Los residuos estandarizados mostraron excesos de NDVI en otoño e invierno en las clases (0.2, 0.3] y > 0.3, y déficits en primavera. Este comportamiento sugiere una respuesta positiva de la vegetación durante las estaciones más templadas y una reducción del vigor en los meses de transición

2023

Figura 50. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2023

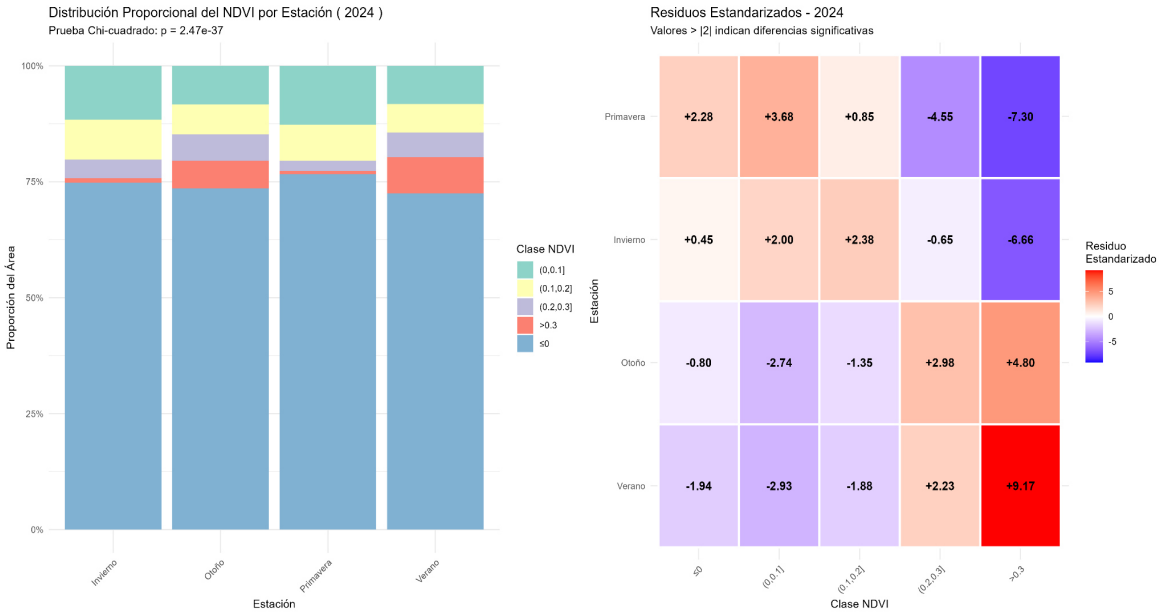


Fuente. Elaboración propia

En 2023 se registró una reducción promedio del vigor alto, siendo la primavera la estación con mayor cambio (3.99 %). La clase predominante en verano fue ≤ 0, con desplazamientos hacia (0, 0.1], (0.1, 0.2] y (0.2, 0.3] durante invierno. La proporción de NDVI alto (> 0.3) se mantuvo baja. La prueba Chi-cuadrado arrojó $\chi^2(12) = 306.99$ y $p = 1.60 \times 10^{-58}$, indicando diferencias altamente significativas ($p < 0.05$). Los residuos evidenciaron un exceso de valores ≤ 0 en verano y primavera, y un exceso de NDVI alto (> 0.3) en verano y otoño. Este patrón sugiere una marcada alternancia estacional, con recuperación de vigor en verano y pérdida en primavera, probablemente influenciada por condiciones climáticas extremas o estrés hídrico

2024

Figura 51. Distribución estacional de clases NDVI y residuos estandarizados en el Bosque Natural El Cañoncillo, 2024



Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en 2024 se observó una reducción promedio en el vigor alto, destacando el verano con el mayor cambio (3.97 %). La clase dominante en verano fue ≤ 0, con desplazamientos hacia ≤ 0, (0, 0.1] y (0.1, 0.2] durante el invierno. El porcentaje de NDVI alto (> 0.3) se mantuvo bajo en todas las estaciones. La prueba Chi-cuadrado resultó en $\chi^2(12) = 205.43$ con $p = 2.47 \times 10^{-37}$, confirmando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Los residuos mostraron excesos en NDVI alto (> 0.3) para verano y otoño, y déficits en invierno y primavera, además de un exceso en valores intermedios (0.2, 0.3] durante otoño. Los resultados reflejan una clara variabilidad estacional, con un mayor vigor en las estaciones cálidas y una reducción significativa en las más frías.

4.4.3 Hipótesis específica 2

H_0: No existen diferencias significativas en los valores de temperatura y precipitación media anual entre los años 2017 y 2024 en el Bosque de Cañoncillo.

H_1: Existen diferencias significativas en los valores de temperatura y precipitación media anual entre los años 2017 y 2024 en el Bosque de Cañoncillo.

Análisis de Varianza (ANOVA)

El ANOVA de una vía fue utilizado para evaluar si existen diferencias significativas entre las medias de temperatura y precipitación en los distintos años del periodo 2017–2024.
Su expresión general es la siguiente:

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} = \frac{SS_B\ /(k\ -\ 1)}{SS_W\ /(N\ -\ k)}$$

Donde:

- F = Estadístico de Fisher
- SS_B = Suma de cuadrados entre grupos (Between)
- SS_W = Suma de cuadrados dentro de los grupos (Within)
- MS_B = Media cuadrática entre grupos
- MS_W = Media cuadrática dentro de los grupos
- k = Número de grupos (años)
- N= Número total de observaciones

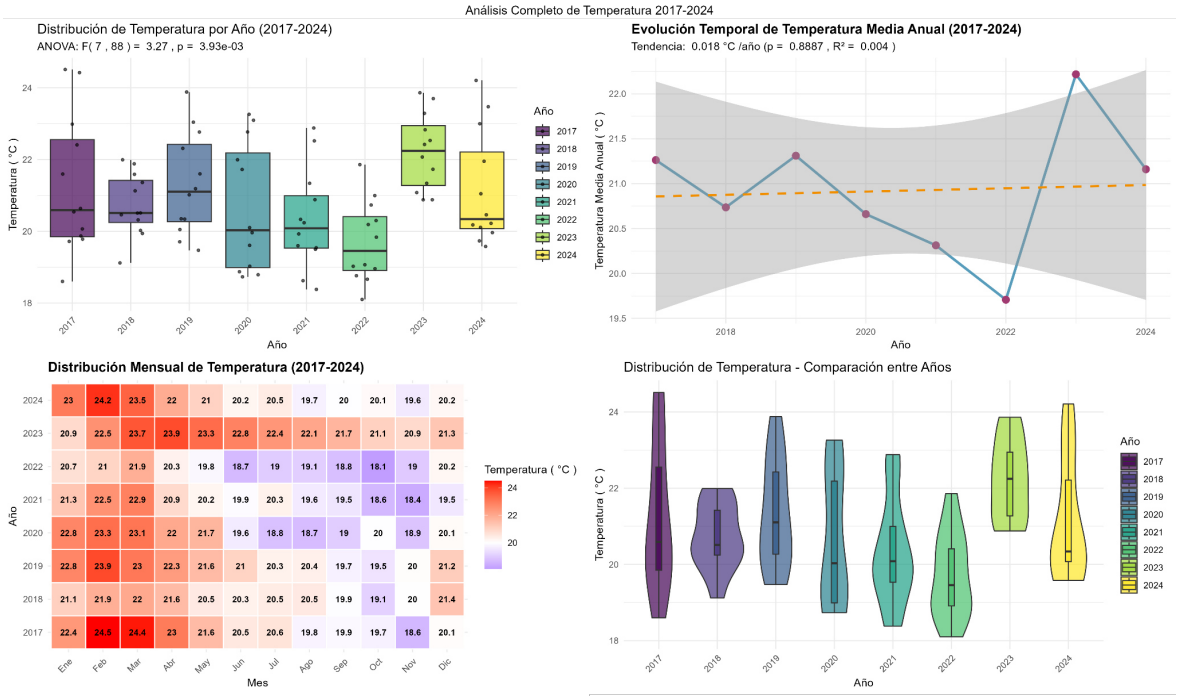
La hipótesis nula plantea que las medias de los grupos son iguales, mientras que la hipótesis alterna sostiene que al menos una difiere. Si el valor $p < 0.05$, se rechaza H_0, indicando diferencias estadísticamente significativas. Además, se verificaron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) antes de aplicar la prueba.

Temperatura

El análisis estadístico de la temperatura media anual en el Bosque de Cañoncillo para el periodo 2017–2024 evidenció diferencias significativas entre los años evaluados (ANOVA:

F(7,88) = 3.2681; p = 0.0039), cumpliéndose el supuesto de homogeneidad de varianzas (p = 0.3507). Los valores medios oscilaron entre 19.71°C (2022) y 22.22°C (2023), siendo este último el año más cálido del periodo. Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) confirmaron que la mayoría de los conjuntos de datos presentan distribución normal, exceptuando el año 2024 (p = 0.032). El coeficiente de variación (CV) menor al 10% en todos los años indica una baja dispersión térmica, lo que sugiere condiciones relativamente estables en la región.

Figura 52. Análisis de la distribución y tendencia temporal de la temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024



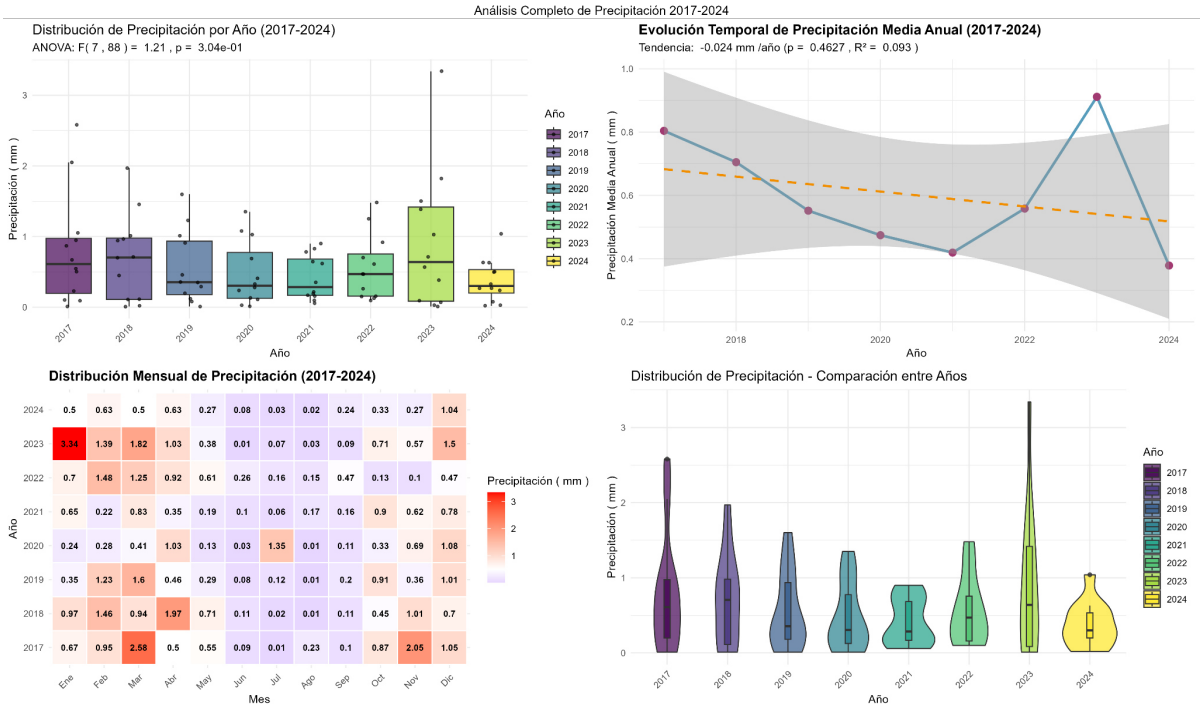
Precipitación

En cuanto a la precipitación media anual, el análisis de varianza (ANOVA: F(7,88) = 1.2132; p = 0.304) indicó que no existen diferencias significativas entre los años evaluados, cumpliéndose además el supuesto de homogeneidad de varianzas (p = 0.0897). Los valores medios de precipitación oscilaron entre 0.38 mm (2024) y 0.91 mm (2023), presentando coeficientes de variación elevados (74.8% a 108.3%), lo que refleja una alta variabilidad intraanual típica de zonas áridas o semiáridas. La prueba de normalidad mostró que la

mayoría de los años presentan distribución normal, con excepción de 2017 y 2023, lo que sugiere la presencia de algunos eventos atípicos de precipitación.

Por otro lado, el análisis de tendencia temporal no evidenció una variación significativa en las precipitaciones a lo largo del periodo (pendiente = -0.0236 mm/año; p = 0.4627; R^2 = 0.093), descartándose la existencia de una tendencia marcada al aumento o disminución. Dado que no se detectaron diferencias significativas entre los años ni tendencias lineales, se **acepta la hipótesis nula (H_0)**, indicando que las precipitaciones en el Bosque de Cañoncillo se han mantenido estables durante el periodo 2017–2024, con fluctuaciones mensuales naturales pero sin cambios estructurales en el régimen pluvial.

Figura 53. Análisis de la distribución y tendencia temporal de la precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024



4.4.4 Hipótesis específica 3

H_0: No existe correlación significativa entre los valores del NDVI y las variables climáticas (temperatura y precipitación) en el periodo 2017-2024.

H_1: Existe correlación significativa entre los valores del NDVI y las variables climáticas (temperatura y precipitación) en el periodo 2017-2024.

Pruebas de correlación

Para evaluar la relación entre el NDVI y las variables climáticas (temperatura y precipitación), se seleccionó la correlación de Spearman (ρ) como prueba principal, dado que cumple tres condiciones metodológicas concurrentes en este estudio: (i) la muestra es de tamaño reducido (n = 8 pares de datos anuales), lo que limita la potencia de pruebas paramétricas; (ii) las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (Anexo 2) evidenciaron que tres de los dieciséis conjuntos de datos no siguen una distribución normal (Temperatura 2024: p = 0.032; Precipitación 2017: p = 0.042; Precipitación 2023: p = 0.040), incumpliéndose el supuesto distribucional requerido por Pearson; y (iii) la relación entre actividad fotosintética y variables climáticas en ecosistemas áridos no necesariamente es lineal, sino que responde a umbrales y respuestas diferidas que Spearman captura mejor al operar sobre rangos. Como pruebas complementarias de validación se aplicaron adicionalmente la correlación de Kendall (τ), robusta frente a valores atípicos, y la correlación de Pearson (r), cuya coincidencia con Spearman en los resultados significativos refuerza la solidez del hallazgo. En todos los casos, el criterio de decisión fue $p < 0.05$ para rechazar la hipótesis nula de ausencia de correlación.

- **Correlación de Pearson:** Apta para datos normales y relaciones lineales:

$$r = \frac{\sum (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \underline{x})^2 \sum (y_i - \underline{y})^2}}$$

  Donde:

  - r = Coeficiente de correlación de Pearson
  - x_i , y_i = Valores de las variables NDVI y clima
  - $\underline{x} , \underline{y}$ = Medias de las variables

- **Correlación de Spearman (ρ):** Adecuada para muestras pequeñas y relaciones no lineales:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

- d_i = Diferencia entre los rangos de cada par de observaciones
- n = Número de pares de datos

- **Correlación de Kendall (τ):** Robusta frente a valores atípicos:

$$\tau = \frac{(C - D)}{\frac{1}{2} n(n - 1)}$$

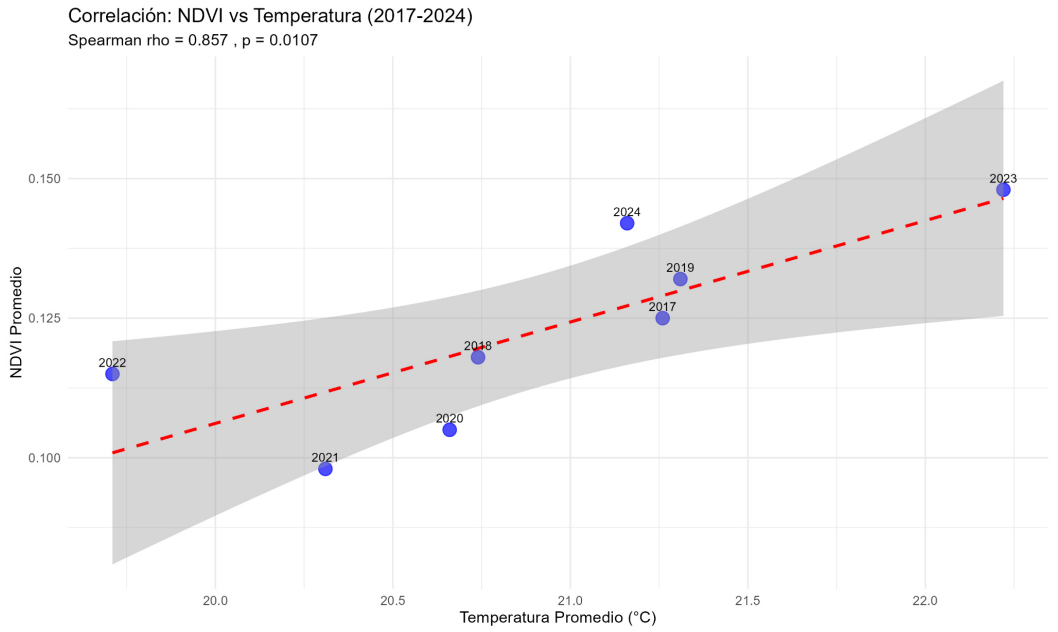
Donde:

- C = Número de pares concordantes
- D = Número de pares discordantes
- n = Número total de observaciones

En todos los casos, la **hipótesis nula (H_0)** establece que no existe correlación significativa ($r = 0$), mientras que la **hipótesis alterna (H_1)** plantea la existencia de una correlación diferente de cero ($r \neq 0$).
Si $p < 0.05$, se rechaza H_0, concluyendo la existencia de una relación significativa entre el NDVI y la variable climática correspondiente.

Temperatura vs NDVI

Figura 54. Correlación de Spearman entre NDVI y temperatura en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024

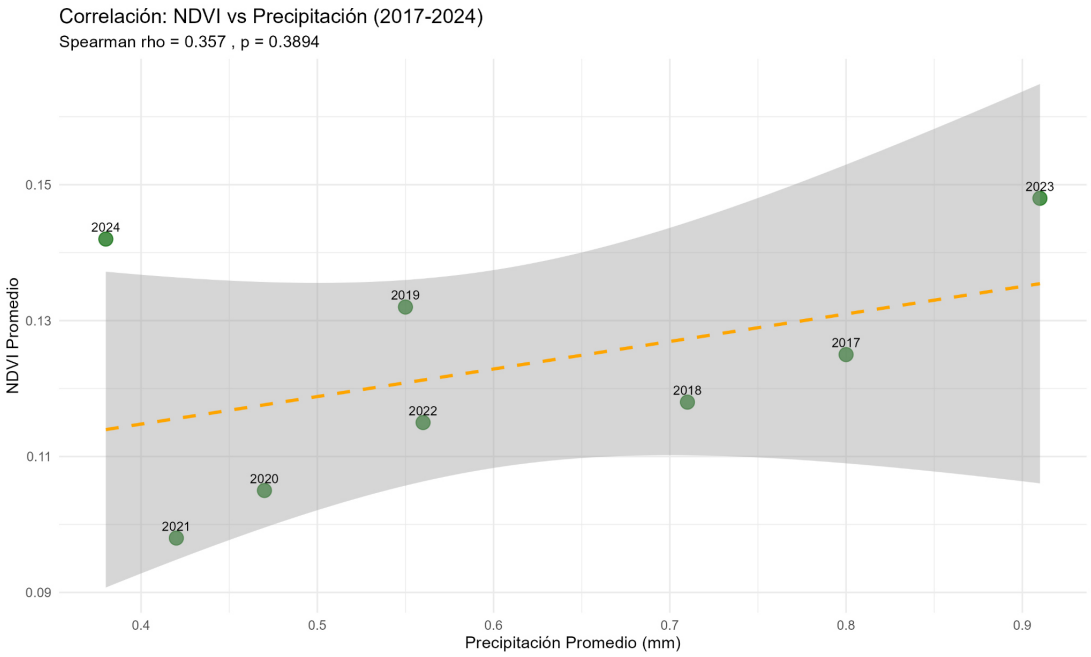


Fuente. Elaboración propia

El análisis de correlación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la temperatura media anual en el Bosque de Cañoncillo, durante el periodo 2017–2024, evidenció una relación positiva y significativa. Según la prueba de Spearman se obtuvo un coeficiente rho = 0.8571 con un valor de p = 0.0107, indicando una correlación fuerte y estadísticamente significativa ($p < 0.05$). Este resultado fue consistente con las pruebas de Kendall ($\tau = 0.7143$, $p = 0.0141$) y Pearson ($r = 0.7861$, $p = 0.0207$), lo que refuerza la solidez del hallazgo. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1), concluyendo que existe una asociación directa entre la temperatura y la cobertura vegetal. Es decir, los incrementos de temperatura tienden a estar acompañados por un mayor vigor de la vegetación, lo que sugiere que, en este ecosistema árido, la temperatura podría estar actuando como un factor limitante positivo para la productividad vegetal, siempre que la humedad del suelo sea suficiente para sostener el crecimiento.

Precipitación vs NDVI

Figura 55. Correlación de Spearman entre NDVI y precipitación en el Bosque Natural El Cañoncillo, período 2017-2024



Fuente. Elaboración propia

El análisis de correlación entre el NDVI y la precipitación media anual no mostró una relación estadísticamente significativa. La prueba de Spearman arrojó un coeficiente rho = 0.3571 con un p = 0.3894, mientras que la prueba de Kendall indicó un $\tau = 0.3571$ con p = 0.2751, confirmando la ausencia de asociación relevante entre ambas variables ($p > 0.05$). En consecuencia, se mantiene la hipótesis nula (H_0), señalando que la precipitación no presenta una correlación significativa con el NDVI en el periodo analizado. Este comportamiento podría explicarse por el bajo volumen y la alta irregularidad de las lluvias registradas en la zona, donde la vegetación natural se encuentra adaptada a condiciones de aridez y depende en mayor medida de la temperatura y la humedad edáfica residual que de la precipitación directa.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos permiten comprender el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024 y su relación con la variabilidad climática. La discusión se desarrolla considerando los tres objetivos específicos planteados en la investigación, integrando los hallazgos obtenidos con el conocimiento científico existente sobre ecosistemas secos y monitoreo de la vegetación mediante sensores remotos.

Respecto al primer objetivo específico, orientado a obtener los índices NDVI estacionales entre 2017 y 2024, los resultados evidencian que la cobertura vegetal del Bosque de Cañoncillo presenta una marcada variabilidad espacial y temporal. Las clases de NDVI de bajo vigor vegetal (≤ 0.1) ocuparon la mayor proporción del área durante gran parte del periodo de estudio, mientras que las clases superiores a 0.3 representaron superficies relativamente reducidas. Este comportamiento es consistente con las características ecológicas de los bosques secos costeros, donde la disponibilidad de agua constituye el principal factor limitante para el desarrollo de la vegetación. Asimismo, los mapas estacionales mostraron diferencias espaciales importantes entre años y estaciones, observándose sectores con mayor actividad fotosintética concentrados principalmente en zonas específicas del bosque, mientras que otras áreas mantuvieron valores bajos de NDVI de manera recurrente.

La prueba de Chi-cuadrado aplicada a la distribución de clases de NDVI confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre estaciones durante los años analizados, indicando que la vegetación responde de manera diferenciada a las condiciones ambientales propias de cada periodo estacional. Estos resultados coinciden con investigaciones desarrolladas en ecosistemas áridos y semiáridos de Asia, África y Sudamérica, donde se ha demostrado que el NDVI constituye un indicador sensible para detectar cambios fenológicos y variaciones en la productividad primaria asociadas a las condiciones climáticas. En consecuencia, los resultados obtenidos permiten afirmar que el NDVI representa una herramienta eficaz para evaluar la dinámica temporal de la vegetación en el Bosque de Cañoncillo y para identificar patrones de respuesta ecológica frente a condiciones ambientales cambiantes.

En relación con el segundo objetivo específico, referido a determinar la variabilidad climática térmica y de precipitación durante el periodo 2017–2024, los resultados evidenciaron fluctuaciones importantes tanto en temperatura como en precipitación. La temperatura presentó variaciones interanuales moderadas, mientras que la precipitación mostró una mayor irregularidad temporal, característica típica de los ecosistemas secos de la costa norte peruana. La presencia de años influenciados por eventos cálidos y fríos asociados a la variabilidad climática regional contribuyó a generar condiciones ambientales diferenciadas que se reflejaron en la dinámica de la vegetación.

La temperatura se comportó como una variable relativamente estable dentro de ciertos rangos climáticos, aunque con tendencias que permitieron diferenciar años más cálidos y años más frescos. Por su parte, la precipitación presentó una distribución altamente variable, con períodos de escasas lluvias alternados con episodios de mayor disponibilidad hídrica. Esta irregularidad resulta especialmente relevante en ecosistemas secos, donde pequeñas variaciones en el régimen de lluvias pueden generar respuestas importantes en la vegetación. Sin embargo, los resultados sugieren que la influencia de la precipitación sobre la cobertura vegetal no siempre es inmediata ni proporcional, debido a factores como la infiltración, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la profundidad radicular de las especies dominantes y la existencia de reservas hídricas subterráneas. Por ello, la respuesta de la vegetación no depende exclusivamente de la cantidad de precipitación registrada, sino de la interacción entre diversos factores climáticos y ecológicos.

En cuanto al tercer objetivo específico, relacionado con la determinación de la relación estadística entre el NDVI y las variables climáticas, los resultados mostraron que la temperatura presentó una correlación positiva fuerte y estadísticamente significativa con el NDVI. Los coeficientes obtenidos mediante las pruebas de Spearman, Kendall y Pearson evidenciaron una asociación consistente entre ambas variables, indicando que los incrementos de temperatura dentro de los rangos observados durante el periodo de estudio estuvieron acompañados por aumentos en los valores del NDVI. Este hallazgo sugiere que la temperatura constituye uno de los principales factores que regulan la actividad fotosintética y el vigor de la vegetación en el Bosque de Cañoncillo.

Por otro lado, la precipitación mostró una correlación positiva pero débil con el NDVI. Aunque existe una tendencia general a que mayores precipitaciones favorezcan el desarrollo vegetal, la magnitud de la asociación fue considerablemente menor que la observada para la temperatura. Este resultado puede explicarse por la naturaleza episódica de las lluvias en ecosistemas áridos, donde la vegetación frecuentemente responde de manera diferida a los eventos de precipitación y donde la disponibilidad efectiva de agua depende de múltiples procesos hidrológicos. Asimismo, especies características del bosque seco, como el algarrobo, poseen adaptaciones fisiológicas que les permiten acceder a reservas de agua profundas, reduciendo su dependencia inmediata de las precipitaciones superficiales.

En términos generales, la investigación demuestra que la variabilidad climática influye significativamente en el comportamiento del NDVI en el Bosque de Cañoncillo. Sin embargo, la intensidad de dicha influencia difiere entre variables climáticas. Mientras la temperatura presentó una relación fuerte y consistente con la dinámica de la vegetación, la precipitación mostró una influencia más limitada dentro del periodo analizado. Estos resultados permiten concluir que el comportamiento del NDVI responde a la interacción de múltiples factores ambientales, siendo la temperatura uno de los principales determinantes de la actividad vegetal en este ecosistema seco.

Finalmente, los hallazgos obtenidos contribuyen al conocimiento científico sobre la respuesta de los bosques secos costeros frente a la variabilidad climática y proporcionan información relevante para la gestión y conservación del Bosque de Cañoncillo. El uso del NDVI como herramienta de monitoreo permitió identificar patrones espaciales y temporales de la cobertura vegetal, constituyéndose en un instrumento útil para evaluar el estado de conservación del ecosistema y apoyar la toma de decisiones orientadas a su manejo sostenible frente a escenarios futuros de cambio climático.

V. CONCLUSIONES

Se determinó que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del Bosque de Cañoncillo presentó una variabilidad espacial y estacional significativa durante el periodo 2017–2024. Predominaron las clases de bajo vigor vegetal (NDVI ≤ 0.1), mientras que las áreas con valores superiores a 0.3 ocuparon superficies reducidas. Asimismo, las pruebas estadísticas evidenciaron diferencias significativas entre estaciones, confirmando que la cobertura vegetal responde de manera diferenciada a las condiciones ambientales estacionales propias del ecosistema de bosque seco costero.

La variabilidad climática del Bosque de Cañoncillo durante el periodo 2017–2024 estuvo caracterizada por fluctuaciones térmicas moderadas y una marcada irregularidad en la precipitación. La temperatura mostró un comportamiento relativamente estable entre años, mientras que la precipitación presentó una alta variabilidad temporal, asociada a las condiciones climáticas propias de la costa norte peruana. Estas diferencias climáticas generaron escenarios ambientales contrastantes que influyeron en la dinámica de la vegetación del área de estudio.

Se estableció que existe una relación estadísticamente significativa entre el NDVI y la temperatura, registrándose una correlación positiva fuerte que indica que los incrementos térmicos dentro de los rangos observados favorecieron el vigor de la vegetación. En contraste, la precipitación presentó una correlación positiva débil con el NDVI, lo que sugiere que su influencia sobre la cobertura vegetal es menos directa y depende de factores adicionales como la disponibilidad efectiva de agua en el suelo, las características fisiológicas de las especies y la ocurrencia temporal de las lluvias.

Se concluye que el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Bosque de Cañoncillo estuvo influenciado por la variabilidad climática durante el periodo 2017–2024, evidenciándose una respuesta más estrechamente asociada a la temperatura que a la precipitación. Los resultados demuestran que el NDVI constituye una herramienta eficaz para monitorear los cambios en la cobertura vegetal y evaluar la respuesta de los ecosistemas secos frente a las fluctuaciones climáticas, aportando información

relevante para la gestión, conservación y adaptación al cambio climático en el Bosque de Cañoncillo.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda implementar un sistema permanente de monitoreo climático y de la cobertura vegetal en el Área de Conservación Privada Bosque de Cañoncillo, mediante el procesamiento periódico de imágenes Sentinel-2 y Landsat 8/9, complementadas con datos de estaciones meteorológicas instaladas dentro o en las proximidades del área de estudio. El sistema deberá registrar, como mínimo, temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, humedad del suelo y evapotranspiración, permitiendo analizar oportunamente las variaciones estacionales del NDVI y establecer umbrales de alerta frente a sequías, olas de calor, incendios forestales y disminuciones anómalas del vigor vegetal. La integración de la información satelital con los registros de SENAMHI y NASA POWER contribuirá a reducir la incertidumbre y fortalecerá la toma de decisiones para la conservación del bosque.

2. Se recomienda que la administración del Área de Conservación Privada incorpore los resultados espaciales del NDVI en su planificación y gestión adaptativa, priorizando la protección de las áreas que presentan valores medios y altos, debido a que constituyen núcleos de resiliencia ecológica capaces de mantener actividad fotosintética aun bajo condiciones de aridez. Asimismo, se deberán identificar y restaurar progresivamente los sectores con valores bajos o con tendencias decrecientes de NDVI, mediante acciones de regeneración natural asistida, control del pastoreo, prevención de la tala, manejo de incendios y revegetación con especies nativas tolerantes a la sequía, principalmente algarrobo (Neltuma pallida) y faique (Acacia macracantha), evitando introducir especies que puedan alterar la estructura y funcionalidad del bosque seco.

3. Se recomienda ampliar las investigaciones sobre la respuesta de la vegetación a la variabilidad climática, extendiendo la serie temporal de análisis y empleando unidades de observación mensuales o estacionales que permitan incrementar el número de datos y evaluar posibles respuestas retardadas de la vegetación frente a la precipitación. Los estudios posteriores deberán incorporar variables como humedad edáfica, radiación solar, temperatura superficial, evapotranspiración, profundidad del nivel freático, características del suelo y

perturbaciones antrópicas, debido a que la ausencia de una correlación estadísticamente significativa entre precipitación anual y NDVI indica que la dinámica vegetal no depende exclusivamente de la lluvia directa. También se recomienda validar los resultados satelitales mediante parcelas permanentes, inventarios de vegetación y levantamientos multiespectrales con drones, con la finalidad de desarrollar modelos predictivos más robustos para la conservación de los bosques secos del norte peruano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baniya, B., Tang, Q., Huang, Z., Sun, S., & Techato, K. (2018). Spatial and temporal variation of NDVI in response to climate change and the implication for carbon dynamics in Nepal. *Forests*, 9(6), 329. https://doi.org/10.3390/f9060329

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 13(1-2), 95-120. https://doi.org/10.1080/02757259509532298

Bao, G., Bao, Y., Qin, Z., Zhou, Y., Li, W., & Sanjjav, A. (2014). NDVI-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau. *Remote Sensing*, 6(9), 8337-8358. https://doi.org/10.3390/rs6098337

Bao, G., Bao, Y., Sanjjava, A., & Qin, Z. (2015). NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124014

Berdimbetov, T., Ilyas, S., Ma, Z., & Bilal, M. (2021). Climatic change and human activities link to vegetation dynamics in the Aral Sea Basin using NDVI. *Environmental Earth Sciences*, 80, 224. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00224-7

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65*(1), 2-16.

Carbajal-Morán, H., Márquez-Camarena, J. F., Galván-Maldonado, C. A., Zárate-Quiñones, R. H., Galván-Maldonado, A. C., & Muñoz-De la Torre, R. J. (2023). Evaluation of Normalized Difference Vegetation Index by Remote Sensing with Landsat Satellites in the Tayacaja Valley in the Central Andes of Peru. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(7), 208–215. https://doi.org/10.12912/27197050/169530

Chapin, F. S., et al. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer.

Chapin, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., ... & Díaz, S. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature, 405*(6783), 234-242. https://doi.org/10.1038/35012241

Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 690, 1291-1303. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.141

Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution, 22*(7), 357-365. https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003

Conservamos por Naturaleza. (s.f.). Bosque Natural El Cañoncillo. Recuperado de https://www.conservamospornaturaleza.org/destino/bosque-del-canoncillo/

Correa Seminario, V. A., et al. (2023). Flora vascular del Área de Conservación Privada "Bosque Natural El Cañoncillo". *Revista de Investigación Científica REBIOL*, 43(1), 91-96.

FAO. (2015). *Estado mundial del recurso suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fayech, D., & Tarhouni, J. (2021). Climate variability and its effect on normalized difference vegetation index (NDVI) using remote sensing in semi-arid area. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 647–657. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00896-6

Galati, V. (2021). Time Series Application for Evapotranspiration and NDVI in Ucayali, Peru. *Alliance of Bioversity International and CIAT*.

Gao, W., Zheng, C., Liu, X., Lu, Y., Chen, Y., Wei, Y., & Ma, Y. (2022). NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land. *Ecological Indicators*, 135, 108562. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108562

Gao, X. (1996). NDVI saturation effect and alternative vegetation indices for arid regions. Remote Sensing of Environment, 58(3), 227-236. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00026-0

Gao, X. (1996). NDVI saturation effect and alternative vegetation indices for arid regions. *Remote Sensing of Environment, 58*(3), 227-236. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00026-0

Gitelson, A. A., et al. (2003). Reflectance indices for estimating chlorophyll content. *International Journal of Remote Sensing, 24*(19), 4373-4390.

Hernández, T. A., & Villanueva, F. A. (2022). Valoración económica de los servicios ecosistémicos del Bosque El Cañoncillo. *Tesis de licenciatura*, Universidad Privada del Norte.

Holmgren, M., Stapp, P., Dickman, C. R., Gracia, C., Graham, S., Gutierrez, J. R., ... & Meserve, P. L. (2006). Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment, 4*(2), 87-95.

Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment, 83*(1-2), 195-213.

Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W. (2002). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 59(3), 440-451. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5

Instituto Geofísico del Perú. (s.f.). NDVI - Infraestructura de datos espaciales. Recuperado de https://ide.igp.gob.pe/geovisor/ndvi/

Jensen, J. R. (2007). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

Liu, Q., Yang, Z., Han, F., Wang, Z., & Wang, C. (2016). NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: A case study in the Tianshan Mountains, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1987. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5987-5

Malingreau, J. P. (1986). Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. International Journal of Remote Sensing, 7(9), 1121-1146. https://doi.org/10.1080/01431168608948968

Measho, S., Chen, B., Trisurat, Y., Pellikka, P., & Guo, L. (2019). Spatio-temporal analysis of vegetation dynamics as a response to climate variability and drought patterns in the semiarid region, Eritrea. *Remote Sensing*, 11(6), 724. https://doi.org/10.3390/rs11060724

Mehmood, K., Anees, S. A., Rehman, A., & Tariq, A. (2024). Exploring spatiotemporal dynamics of NDVI and climate-driven responses in ecosystems: Insights for sustainable management and climate resilience. *Environmental Earth Sciences*, 83(1), 74. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.108574

Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33(2), 481-486. https://doi.org/10.1109/36.377948

Pennington, D. D., & Collins, S. L. (2007). Response of an aridland ecosystem to interannual climate variability and prolonged drought. *Landscape Ecology*, 22, 97–114. https://doi.org/10.1007/s10980-006-9071-5

Pennington, D. D., & Collins, S. L. (2007). Response of an aridland ecosystem to interannual climate variability and prolonged drought. *Landscape Ecology*, 22, 97–114. https://doi.org/10.1007/s10980-006-9071-5

Pettorelli, N., et al. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution, 20*(9), 503-510.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503-510. https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011

Philander, S. G. (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press.

Piao, S., et al. (2019). Plant phenology and global climate change. *Nature Reviews Earth & Environment, 1*(1), 39-53.

Rodríguez Mauricio, D. J. (2023). Análisis temporal del NDVI del humedal de Purrumpampa en Huamachuco y su relación con la expansión urbana. *Revista Geográfica de América Central*, 70(1), 429-448. https://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.16

Rojas Acuña, J., Rufasto Campos, E., Eche Llenque, J. C., & Carrillo Gomero, F. (2008). Modelo de la sequía en la costa norte de Perú usando los índices ENOS y las imágenes NDVI del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA. *Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica*, 21, 12-21. Recuperado de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/2008_n21/pdf/a03.pdf

Roque Quiroz, R. A., & Pacherres, C. O. (2022). NDVI trend in the Angostura Faical Regional Conservation Area of Tumbes, Peru, 1999-2019. *Manglar*, 19(3), 233-244. https://doi.org/10.17268/manglar.2022.029

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 1, 309-317.

Sun, R., Chen, S., & Su, H. (2021). Climate dynamics of the spatiotemporal changes of vegetation NDVI in northern China from 1982 to 2015. *Remote Sensing*, 13(2), 187. https://doi.org/10.3390/rs13020187

Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society, 78*(12), 2771-2777.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127-150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Xu, Y., Yang, J., & Chen, Y. (2016). NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 125, 181–195. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1572-1

Yin, G., Hu, Z., Chen, X., & Tiyip, T. (2016). Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia. *Journal of Arid Land*, 8(5), 757–770. https://doi.org/10.1007/s40333-016-0043-6

Zewdie, W., Csaplovics, E., & Inostroza, L. (2017). Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Applied Geography*, 80, 102–112. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.01.005

ANEXOS

ANEXO 1. DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
T	2017	22.41	24.51	24.42	22.99	21.6	20.54	20.64	19.78	19.87	19.72	18.6	20.07
T	2018	21.13	21.88	21.99	21.59	20.51	20.32	20.46	20.51	19.94	19.12	20.02	21.36
T	2019	22.77	23.88	23.04	22.31	21.6	21.02	20.34	20.35	19.71	19.47	20.05	21.19
T	2020	22.77	23.26	23.1	21.99	21.72	19.61	18.79	18.73	19.03	19.96	18.87	20.1
T	2021	21.34	22.52	22.88	20.88	20.24	19.93	20.33	19.6	19.5	18.62	18.38	19.54
T	2022	20.73	21	21.86	20.3	19.84	18.66	19.02	19.07	18.76	18.1	18.96	20.19
T	2023	20.88	22.53	23.7	23.86	23.29	22.83	22.42	22.07	21.73	21.08	20.88	21.34
T	2024	23	24.21	23.47	21.95	21.05	20.22	20.46	19.73	19.96	20.11	19.58	20.18
PP	2017	0.67	0.95	2.58	0.5	0.55	0.09	0.01	0.23	0.1	0.87	2.05	1.05
PP	2018	0.97	1.46	0.94	1.97	0.71	0.11	0.02	0.01	0.11	0.45	1.01	0.7
PP	2019	0.35	1.23	1.6	0.46	0.29	0.08	0.12	0.01	0.2	0.91	0.36	1.01
PP	2020	0.24	0.28	0.41	1.03	0.13	0.03	1.35	0.01	0.11	0.33	0.69	1.08
PP	2021	0.65	0.22	0.83	0.35	0.19	0.1	0.06	0.17	0.16	0.9	0.62	0.78
PP	2022	0.7	1.48	1.25	0.92	0.61	0.26	0.16	0.15	0.47	0.13	0.1	0.47
PP	2023	3.34	1.39	1.82	1.03	0.38	0.01	0.07	0.03	0.09	0.71	0.57	1.5
PP	2024	0.5	0.63	0.5	0.63	0.27	0.08	0.03	0.02	0.24	0.33	0.27	1.04

ANEXO 2. NORMALIDAD PARA DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk por año (2017-2024)

Variable	YEAR	n	media	desv_est	shapiro_W	shapiro_p	Normalidad
Temperatura (°C)	2017	12	21.262	1.927	0.9103	0.2151	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2018	12	20.736	0.867	0.9566	0.7345	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2019	12	21.311	1.424	0.9458	0.5762	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2020	12	20.661	1.785	0.8623	0.0523	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2021	12	20.313	1.393	0.9405	0.5039	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2022	12	19.708	1.127	0.9502	0.6393	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2023	12	22.218	1.064	0.9325	0.4077	Se acepta H0 (normal)
Temperatura (°C)	2024	12	21.160	1.598	0.8452	0.0320	Se rechaza H0 (no normal)
Precipitación (mm)	2017	12	0.804	0.794	0.8544	0.0416	Se rechaza H0 (no normal)
Precipitación (mm)	2018	12	0.705	0.612	0.9197	0.2834	Se acepta H0 (normal)
Precipitación (mm)	2019	12	0.552	0.511	0.8790	0.0850	Se acepta H0 (normal)
Precipitación (mm)	2020	12	0.474	0.454	0.8689	0.0634	Se acepta H0 (normal)
Precipitación (mm)	2021	12	0.419	0.313	0.8669	0.0596	Se acepta H0 (normal)
Precipitación (mm)	2022	12	0.558	0.458	0.8830	0.0959	Se acepta H0 (normal)
Precipitación (mm)	2023	12	0.912	0.987	0.8529	0.0399	Se rechaza H0 (no normal)
Precipitación (mm)	2024	12	0.378	0.298	0.9256	0.3355	Se acepta H0 (normal)