

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Medio Ambiente y
Desarrollo Sustentable



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal
al 2030, mediante teledetección en Chiara - Ayacucho**

**Tesis para optar el grado de Doctor en Medio Ambiente y
Desarrollo Sustentable**

Autor:

Mg. Lozano Rodríguez, Jorge Luis
Código ORCID: 0000-0002-0288-2874

Asesor:

Dr. Domínguez Castañeda, Jorge Marino
Código ORCID: 0000-0003-0488-5726
DNI N° 32975182

Línea de Investigación
Biodiversidad y cambio climático

Nuevo Chimbote - PERÚ
2026



CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, **Dr. Domínguez Castañeda, Jorge Marino**, certifico mi asesoramiento de la tesis titulada: “**Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal al 2030, mediante la teledetección en Chiara – Ayacucho**”, cuyo autor es el **Mg. Lozano Rodríguez, Jorge Luis**, ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al Reglamento General de grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, febrero del 2026

Dr. Domínguez Castañeda, Jorge Marino

Asesor

DNI N° 32975182

Código ORCID: 0000-0003-0488-5726



Aval de Conformidad del Jurado

Tesis titulada: “Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal al 2030, mediante la teledetección en Chiara – **Ayacucho**”, cuyo autor es el **Mg. Lozano Rodríguez, Jorge Luis**.

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. Loayza Aguilar, Rómulo Eugenio
Presidente
DNI N° 32813194
Código ORCID: 0000-0002-1247-8277

Dr. Reyes Avalos, Walter Eduardo
Secretario
DNI N° 17878579
Código ORCID 0000-0002-4277-9521

Dr. Domínguez Castañeda, Jorge Marino
Asesor/Vocal
DNI: 32975182
Código ORCID: 0000-0003-0488-5726



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los diecisiete días del mes de febrero del año 2026, siendo las 12:15 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 474-2024-EPG-UNS de fecha 25.09.2024, conformado por los docentes: Dr. Rómulo Eugenio Loayza Aguilar (Presidente), Dr. Walter Eduardo Reyes Avalos (Secretario) y Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis intitulada: "**CONDICIONES AMBIENTALES EN LA DINÁMICA DE LA COBERTURA VEGETAL AL 2030, MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN EN CHIARA - AYACUCHO**"; presentado por el tesista **Jorge Luis Lozano Rodríguez**, egresado del programa de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 116-2026-EPG-UNS de fecha 11 de febrero de 2026.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como APROBADO, asignándole la calificación de DIECIOCHO.

Siendo las 13:30 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dr. Rómulo Eugenio Loayza Aguilar
Presidente


Dr. Walter Eduardo Reyes Avalos
Secretario


Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Vocal/Asesor

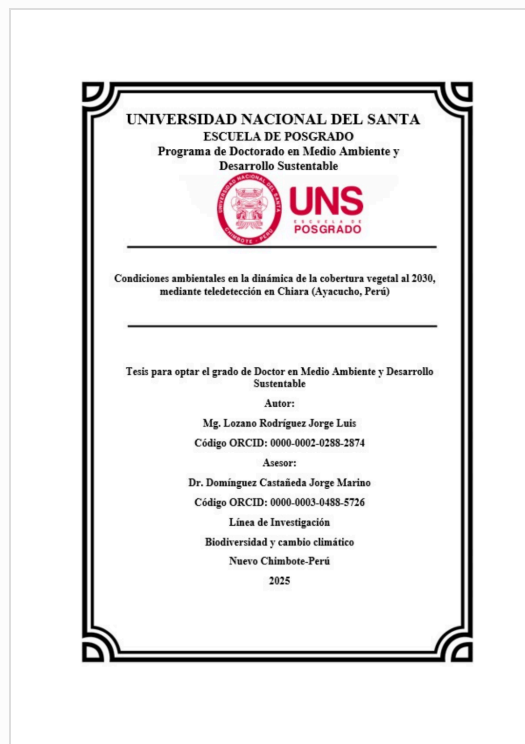


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Jorge Dominguez
Título del ejercicio: Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura veget...
Título de la entrega: Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura veget...
Nombre del archivo: TESIS_FINAL_CORREGIDA_EMPASTE_-_JORGE_LUIS.doc
Tamaño del archivo: 27.91M
Total páginas: 134
Total de palabras: 28,546
Total de caracteres: 168,588
Fecha de entrega: 12-mar-2026 12:11p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2901380292



Condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal al 2030, mediante teledetección en Chiara (Ayacucho, Perú)

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	1 %
Fuente de Internet		
2	repositorio.uns.edu.pe	1 %
Fuente de Internet		
3	repositorio.undac.edu.pe	1 %
Fuente de Internet		
4	repositorio.utc.edu.ec	1 %
Fuente de Internet		
5	ridum.umanizales.edu.co	1 %
Fuente de Internet		
6	editorial.ual.es	1 %
Fuente de Internet		
7	hdl.handle.net	<1 %
Fuente de Internet		
8	repositoriodigital.uns.edu.ar	<1 %
Fuente de Internet		
9	southfloridapublishing.com	<1 %
Fuente de Internet		
10	myb.ojs.inecol.mx	<1 %
Fuente de Internet		
11	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	<1 %
Trabajo del estudiante		

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional del Santa, específicamente a la Escuela de Posgrado de la UNS y a la plana de docentes del doctorado en medio ambiente y desarrollo sustentable por sus saberes para mis logros académicos.

Al Doctor Domínguez Castañeda Jorge Marino, por su asesoría y apoyo en la elaboración del presente trabajo de tesis.

A los trabajadores de la Municipalidad del distrito de Chiara, por haber participado en esta experiencia educativa.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE.....	vi
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación.....	14
1.2. Antecedentes de la investigación.....	15
1.3. Formulación del problema de investigación.....	20
1.4. Delimitación del estudio.....	20
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	22
1.6. Objetivos de la investigación.....	25

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos teóricos de la investigación.....	26
2.2. Marco conceptual.....	29

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Hipótesis central de la investigación.....	33
3.2. Variables e indicadores de la investigación	34
3.3. Metodología de la investigación.....	36
3.4. Diseño de Investigación.....	41
3.5. Población y muestra.....	43

3.6. Técnicas e instrumentos de la recolección de datos.....	44
3.7. Procedimiento para la recolección de datos.....	45
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.....	46

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado descriptivo.....	50
4.2. Resultado inferencial.....	91

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.....	103
5.2. RECOMENDACIONES.....	104
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	105
ANEXOS.....	115
ANEXO 1 Matriz de consistencia.....	116
ANEXO 2 Evaluación de las condiciones ambientales según el indicador NDVI.....	117
ANEXO 3 Comportamiento pasado presente y futuro de las condiciones ambientales.....	124
ANEXO 4 NDVI por meses al año para relacionar con la temperatura y la precipitación...	126

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de teledetección para el cálculo del NDVI.....	28
Figura 2. Espectro electromagnético y su relación con la longitud de onda y frecuencia.....	29
Figura 3. Firmas espectrales típicas de vegetación sana, suelo desnudo y agua clara.....	32
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.....	40
Figura 5. Evolución temporal de la vegetación (km ²) según NDVI del 2000 al 2021.....	55
Figura 6. Evolución anual del suelo desnudo (Km ²), 2000-2021, proyectado al 2030.....	57
Figura 7. Evolución anual del suelo con vegetación escasa (km ²), 2000-2021 proyectado al 2030.....	58
Figura 8. Evolución anual del suelo con vegetación estresada (km ²), 2000-2021 proyectado al 2030	60

Figura 9. Evolución anual del suelo con vegetación ligeramente vigorosa (km ²), 2000-2021 proyectado al 2030.....	62
Figura 10. Evolución anual del suelo con vegetación vigorosa (km ²), 2000-2021 proyectado al 2030	64
Figura 11. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de enero del 2000-2021 proyectado al 2030.....	66
Figura 12. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de febrero 2000-2021 proyectado al 2030.....	68
Figura 13. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de marzo 2000-2021 proyectado al 2030.....	69
Figura 14. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de abril 2000-2021 proyectado al 2030.....	70
Figura 15. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de mayo 2000-2021 proyectado al 2030.....	71
Figura 16. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de junio 2000-2021 proyectado al 2030.....	73
Figura 17. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de julio 2000-2021 proyectado al 2030.....	74
Figura 18. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de agosto 2000-2021 proyectado al 2030.....	75
Figura 19. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de setiembre 2000-2021 proyectado al 2030.....	77
Figura 20. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de octubre 2000-2021 proyectado al 2030.....	78
Figura 21. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de noviembre 2000-2021 proyectado al 2030	79
Figura 22. Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de diciembre 2000-2021 proyectado 2030.....	80
Figura 23. Píxeles de la vegetación vigorosa, según el indicador NDVI-2021.....	82
Figura 24. Comportamiento de la temperatura-NDVI del 2000 al 2021.....	84
Figura 25. Comportamiento de la precipitación-NDVI del 2000 al 2021.....	87

Lista de cuadros

Cuadro 1. Operacionalización de variables en la extracción.....	35
Cuadro 2. Guía de observación.....	44
Cuadro 3. Técnica e Instrumentos.....	45
Cuadro 4. Cobertura vegetal según valores del NDVI.....	47
Cuadro 5. Fluctuación de la vegetación según el NDVI periodo 2000-2021.....	51
Cuadro 6. Datos del NDVI por estaciones del 2000 al año 2030.....	89
Cuadro 7. Pruebas de normalidad NDVI	92
Cuadro 8. Pruebas de normalidad de las características de cobertura vegetal	94
Cuadro 9. Prueba para una muestra de las características de cobertura vegetal.....	95
Cuadro 10. Pruebas de normalidad pasado, presente y futuro.....	96
Cuadro 11. Estadísticos de prueba de Friedman.....	97
Cuadro 12. Pruebas de normalidad.....	98
Cuadro 13. Correlaciones NDVI y Temperatura.....	98
Cuadro 14. Correlaciones NDVI y Precipitación.....	99
Cuadro 15. Pruebas de normalidad.....	101
Cuadro 16. Estadísticos de prueba Friedman.....	101

RESUMEN

La dinámica de la cobertura vegetal constituye un indicador clave de la respuesta de los ecosistemas frente a la variabilidad climática. El presente estudio evalúa la evolución espacio-temporal de la cobertura vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho, Perú) durante el periodo 2000–2021, con proyección al año 2030, mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). A partir de 506 imágenes satelitales MODIS Terra (MOD13Q1), se analizó la variación mensual y estacional del NDVI, la distribución de las clases de cobertura vegetal y su relación con la temperatura media y la precipitación, empleando técnicas de análisis temporal y modelamiento ARIMA para la proyección futura. Los resultados evidencian una marcada estacionalidad del NDVI, con valores más elevados en otoño y primavera (0.50–0.55), asociados a condiciones térmicas moderadas y mayor disponibilidad hídrica, y valores mínimos en invierno (0.30–0.35), vinculados a estrés ambiental. Se identificó una relación positiva moderada entre NDVI y temperatura dentro de rangos óptimos (13–15 °C), mientras que la precipitación emergió como el principal factor modulador del vigor vegetal. Eventos extremos, como el periodo 2015–2016, generaron descensos abruptos del NDVI, seguidos por una recuperación progresiva, lo que evidencia la resiliencia del sistema vegetal. Además, con el comportamiento temporal por estaciones del año se concluyó que los valores del NDVI determinaron las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal incrementándose la superficie con proyección al 2030 con vegetación vigorosa a 2799.206 km² y disminución de vegetación de suelos desnudos a 17390.3 km².

Palabras Claves: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Imágenes de satélite, Chiara.

ABSTRACT

The dynamics of vegetation cover is a key indicator of the response of ecosystems to climate variability. This study evaluates the spatio-temporal evolution of the vegetation cover of the district of Chiara (Ayacucho, Peru) during the period 2000–2021, with a projection to the year 2030, through the use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). From 506 MODIS Terra (MOD13Q1) satellite images, the monthly and seasonal variation of the NDVI, the distribution of vegetation cover classes and their relationship with average temperature and precipitation were analyzed, using temporal analysis techniques and ARIMA modeling for future projection. The results show a marked seasonality of the NDVI, with higher values in autumn and spring (0.50–0.55), associated with moderate thermal conditions and greater water availability, and minimum values in winter (0.30–0.35), linked to environmental stress. A moderate positive relationship between NDVI and temperature within optimal ranges (13–15 °C) was identified, while precipitation emerged as the main modulating factor of plant vigor. Extreme events, such as the 2015–2016 period, generated abrupt declines in NDVI, followed by a progressive recovery, which shows the resilience of the plant system. In addition, with the temporal behavior by seasons of the year, it was concluded that the values of the NDVI **determined** the environmental conditions in the dynamics of the vegetation cover, increasing the area with projection to 2030 with vigorous vegetation to 2799,206 km² and decrease of vegetation of bare soils to 17390.3 km².

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index, Satellite images, Chiara.

INTRODUCCIÓN

La cobertura vegetal constituye un componente esencial de los ecosistemas terrestres, al desempeñar funciones clave en la regulación climática, la conservación del suelo, el ciclo hidrológico y la captura de carbono. No obstante, a escala global, la pérdida y degradación de la vegetación se ha intensificado en las últimas décadas como consecuencia de la expansión agrícola, la deforestación, la urbanización y los efectos del cambio climático. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura reporta que entre 1990 y 2020 el planeta perdió aproximadamente 420 millones de hectáreas de bosques, siendo América Latina una de las regiones más afectadas (FAO, 2022). Paralelamente, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza señaló que en 2024 más del 30 % de las especies de árboles a nivel mundial se encuentran en peligro de extinción, lo que compromete gravemente la estabilidad de los ecosistemas (UICN, 2024).

En el contexto regional, los ecosistemas andinos presentan una alta vulnerabilidad frente a la variabilidad climática. El incremento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como sequías prolongadas asociadas al fenómeno El Niño, ha generado alteraciones significativas en los patrones de precipitación y temperatura, afectando negativamente la productividad y regeneración de la vegetación natural (Zeng et al., 2021). En el Perú, el Ministerio del Ambiente reporta que la degradación de la cobertura vegetal se manifiesta especialmente en zonas altoandinas, donde la presión antrópica sobre los recursos naturales se ve agravada por condiciones climáticas adversas y limitaciones en la gestión territorial (MINAM, 2023).

A nivel local, el distrito de Chiara, ubicado en la provincia de Huamanga (Ayacucho), evidencia transformaciones aceleradas de su cobertura vegetal como resultado de la expansión de la frontera agrícola, la ganadería extensiva y la extracción de recursos naturales, en combinación con una marcada variabilidad climática. Estudios recientes señalan que en regiones andinas similares se han registrado reducciones del 10 % al 25 % de la cobertura vegetal en periodos menores a dos décadas, lo que incrementa la erosión del suelo, reduce la disponibilidad hídrica y debilita la resiliencia de los ecosistemas locales

(Hansen et al., 2021). Sin embargo, en Chiara aún no se cuenta con evaluaciones sistemáticas que permitan cuantificar y comprender la dinámica espacial y temporal de estos cambios.

En este escenario, la teledetección satelital se consolida como una herramienta fundamental para el monitoreo ambiental, debido a su capacidad de generar información multiescalar y multitemporal con alta consistencia espacial. Los índices de vegetación, particularmente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ha demostrado ser eficaz para evaluar la salud, densidad y dinámica de la vegetación, así como para identificar procesos de degradación y recuperación ecológica (Pettorelli et al., 2022). A nivel global, programas como Copernicus de la Agencia Espacial Europea y las misiones Landsat y MODIS de la NASA han permitido analizar tendencias de pérdida y ganancia de cobertura vegetal, aportando evidencia científica para la formulación de políticas públicas y estrategias de mitigación del cambio climático (Hansen et al., 2021).

Estudios han evidenciado que el análisis multitemporal del NDVI permite no solo describir cambios pasados, sino también proyectar escenarios futuros de cobertura vegetal. Investigaciones publicadas por Poorter et al. (2016) en *Nature* estiman que la regeneración natural de bosques tropicales podría capturar hasta 23,4 gigatoneladas de carbono en 30 años, siempre que se cuente con información precisa para orientar acciones de restauración (Huffington, 2023). No obstante, persisten vacíos en la integración de variables ambientales locales como precipitación, temperatura y estacionalidad con el análisis del NDVI, especialmente en territorios andinos.

En este contexto, la investigación analiza la influencia de las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho, Perú) durante el periodo 2000–2021, con proyección al año 2030, mediante técnicas de teledetección satelital. El estudio busca aportar evidencia cuantitativa y espacialmente explícita que permita comprender los procesos de cambio de la vegetación, fortalecer la gestión sostenible de los recursos naturales y contribuir a la planificación territorial en un escenario de cambio climático y creciente presión antrópica (Wang et al., 2024).

CÁPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación

El distrito de Chiara enfrenta una progresiva transformación de su cobertura vegetal como resultado de la interacción entre factores climáticos y actividades humanas. La variabilidad interanual de las precipitaciones, asociada a eventos climáticos como El Niño, ha intensificado periodos de sequía que limitan la regeneración natural de la vegetación, mientras que la expansión agrícola y ganadera ha incrementado la deforestación y el uso inadecuado del suelo. A nivel nacional, se estima que la degradación de tierras afecta aproximadamente al 15 % del territorio peruano, siendo las zonas altoandinas las más vulnerables (MINAM, 2023).

La pérdida de cobertura vegetal en Chiara, no solo compromete la biodiversidad local, sino que también afecta servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica, la fertilidad del suelo y la captura de carbono, incrementando la vulnerabilidad de las comunidades locales frente al cambio climático (Hansen et al., 2021). Sin embargo, pese a la magnitud del problema, no se dispone de estudios que analicen de manera integral la dinámica espacio-temporal de la vegetación ni su relación con las condiciones ambientales específicas del distrito.

Si bien la teledetección ha demostrado ser una herramienta eficaz para el monitoreo de la cobertura vegetal a nivel regional y global, su aplicación a escala local en Chiara ha sido limitada. Según Pettorelli et al. (2022), la ausencia de análisis multitemporales integrados dificulta la identificación de tendencias, la evaluación de impactos ambientales y la formulación de estrategias de manejo sostenible basadas en evidencia científica. Esta brecha de información restringe la capacidad de anticipar escenarios futuros y de implementar medidas de adaptación y mitigación adecuadas.

En consecuencia, resulta necesario desarrollar un estudio que, mediante el uso del NDVI y datos ambientales, permita cuantificar los cambios históricos de la cobertura vegetal,

analizar su comportamiento estacional y proyectar su evolución futura hacia el año 2030. Este enfoque contribuirá a mejorar la comprensión de los procesos de degradación y recuperación de la vegetación en Chiara, proporcionando insumos técnicos para la toma de decisiones en gestión ambiental y ordenamiento territorial (Zeng et al., 2021).

1.2. Antecedentes de la investigación

Diversos estudios han demostrado que la dinámica de la cobertura vegetal está fuertemente condicionada por la disponibilidad de agua y las condiciones térmicas, factores que regulan los procesos fisiológicos básicos de las plantas, especialmente la actividad fotosintética y la acumulación de biomasa. En este contexto, la precipitación y la temperatura constituyen variables ambientales clave que determinan el crecimiento, vigor y productividad de la vegetación, particularmente en ecosistemas de montaña y regiones semiáridas, donde la escasez de agua y la variabilidad térmica limitan directamente la fotosíntesis y la fenología vegetativa (Piao et al., 2020).

Investigaciones basadas en teledetección han evidenciado que los incrementos estacionales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se asocian directamente con periodos de mayor humedad del suelo y temperaturas favorables, ya que estas condiciones incrementan la absorción de radiación fotosintéticamente activa y la reflectancia en el infrarrojo cercano, características propias de una vegetación sana y activa. Pettorelli et al. (2022) señalan que, en regiones donde la disponibilidad de agua es el principal factor limitante, la variabilidad temporal del NDVI responde de manera predominante a los patrones de precipitación.

De manera complementaria, Zhu et al. (2021), mediante el análisis de series temporales de imágenes MODIS a escala regional, concluyen que la combinación de precipitaciones estacionales y rangos térmicos óptimos favorece el crecimiento vegetal y el aumento de la biomasa, reflejándose en valores elevados del NDVI. Estos resultados concuerdan con lo señalado por el IPCC (2021), que reconoce a la temperatura y la disponibilidad hídrica como los principales controladores de la productividad primaria terrestre, destacando que

condiciones térmicas moderadas, junto con suficiente humedad, potencian los procesos fotosintéticos.

En el contexto peruano, estudios e informes técnicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) indican que la vegetación de la sierra sur presenta una marcada respuesta estacional al régimen de lluvias concentrado en los meses de verano, lo cual se traduce en un incremento del vigor vegetal durante la temporada húmeda y una disminución durante el periodo de estiaje (SENAMHI, 2023; SENAMHI, 2024). Estos antecedentes confirman que la interacción entre disponibilidad hídrica y condiciones térmicas favorables constituye un factor determinante en la dinámica de la cobertura vegetal, validando su uso como base conceptual para el análisis del NDVI en el distrito de Chiara.

Asimismo, Hernández (2020) analizó la dinámica de la vegetación para la mejora de los servicios ecosistémicos hídricos en la subcuenca del río Bao, en la República Dominicana. El estudio evaluó la tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para distintas clases de cobertura en las zonas baja, media y alta durante un periodo proyectado de 10 años. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales anuales correspondientes al periodo 1996–2020, lo que permitió construir series temporales de NDVI y evidenciar un mayor deterioro ambiental en las zonas media y baja de la subcuenca. Monje (2020) realizó un monitoreo mediante teledetección de los atributos de calidad de la cobertura vegetal durante un periodo de recuperación. Los resultados evidenciaron que la duración de la sequía fue un factor determinante en la capacidad de recuperación del césped bermuda Tifway. En tanto, se observó que los valores de NDVI obtenidos presentaron alta similitud con aquellos derivados de métodos tradicionales de observación. Gaitán et al. (2021) señalaron que la variación temporal del NDVI permite anticipar cambios en la cobertura vegetal en tierras áridas de la Patagonia argentina. El estudio se desarrolló en 239 sitios pertenecientes a la red de monitoreo a largo plazo MARAS, ubicada en la estepa patagónica. A partir de datos NDVI obtenidos del sensor MODIS, se elaboró un modelo empírico que explicó hasta el 40 % de los cambios en la cobertura vegetal medidos

en campo, permitiendo estimar y cartografiar dichos cambios a bajo costo en un extenso bioma de tierras secas.

García et al. (2021) establecieron la relación entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación en áreas del ingenio azucarero Urbano Noris, ubicado en la provincia de Holguín, Cuba. El NDVI evidenció amplias áreas bajo estrés vegetal, con valores inferiores a 0,5, mientras que el índice salino mostró una alta proporción de suelos con elevado contenido de sales, presentando valores negativos entre -1 y 0 .

Ceceña et al. (2021) evaluaron los cambios en la cobertura vegetal de Isla Guadalupe mediante índices de vegetación, con el objetivo de analizar la transformación y recuperación de la vegetación tras la erradicación de cabras salvajes en 2007. Se calcularon los índices NDVI y SAVI a partir de imágenes satelitales QuickBird y WorldView-2 correspondientes a los años 2004 y 2013. Los resultados evidenciaron un incremento de la biomasa en coberturas de bosque de ciprés (*Cupressus sempervirens*), pino (*Pinus pinaster*) y palmar (*Phoenix dactylifera*), así como la duplicación del área de pastizales y la reducción del suelo descubierto. No obstante, el NDVI presentó limitaciones para detectar cambios en el matorral, siendo el SAVI más efectivo para este tipo de cobertura. En general, se constató una recuperación significativa de la vegetación hacia 2013.

Yi et al. (2022) analizaron los cambios dinámicos de las plantaciones y los bosques naturales en el curso medio del río Yangtsé y su relación con factores climáticos. A partir de imágenes Landsat y series temporales MODIS NDVI (1999–2015), se evaluaron las tendencias del NDVI y su relación con variables meteorológicas. Los resultados mostraron una tendencia general creciente del NDVI, especialmente en los bosques naturales, aunque se evidenció una reducción del área de estos ecosistemas. Asimismo, se determinó que la humedad relativa tuvo un efecto inhibitorio significativo sobre el crecimiento de la vegetación, mientras que la duración de la insolación presentó un efecto positivo.

Zhao et al. (2022) evaluaron la dinámica de la vegetación en respuesta al cambio climático y a las actividades humanas en la prefectura de Gannan de la provincia de Gansu, China, en la meseta tibetana. Mediante el uso de NDVI MODIS, variables climáticas y análisis de

tendencias, se determinó un incremento del NDVI durante la temporada de crecimiento, con una mejora generalizada de la vegetación. El cambio climático fue el principal factor explicativo, aunque las actividades humanas también contribuyeron positivamente, especialmente en las áreas del proyecto Grain to Green.

Jiang et al. (2022) analizaron los roles relativos del cambio climático y las actividades humanas en la dinámica de la vegetación costera de China entre 2000 y 2019. Los resultados evidenciaron un marcado reverdecimiento de la vegetación, atribuible principalmente a las actividades humanas, especialmente en regiones agrícolas y forestales. El estudio destacó la utilidad del análisis de tendencias residuales para la formulación de políticas de conservación ecológica.

Lunetta et al. (2022) exploraron el uso de datos multitemporales MODIS NDVI para la detección automática de cambios en el Sistema del Estuario Albemarle-Pamlico, en Estados Unidos. La metodología permitió alcanzar una precisión de detección del 88 % y evidenciar variaciones espaciales y temporales en las tasas de cambio de la vegetación, aunque se reconocieron limitaciones asociadas a la resolución espacial de los datos NDVI.

Dutta et al. (2022) evaluaron la utilidad del NDVI hipertemporal como indicador del reverdecimiento o desverdecimiento en el Territorio de la Capital Nacional de Delhi. Los resultados mostraron una tendencia decreciente de la vegetación asociada principalmente a la expansión urbana, mientras que en áreas puntuales se evidenció un reverdecimiento inducido por acciones antrópicas positivas, como la plantación y mantenimiento de áreas verdes.

Celemin y Arias (2023) analizaron los cambios en la cobertura vegetal y el espacio construido en la ciudad de Mar del Plata (Argentina) entre 2018 y 2022. A partir de imágenes Sentinel-2, se evidenció una disminución del NDVI y un incremento del NDBI, lo que reflejó el impacto de la urbanización sobre la vegetación urbana.

Li et al. (2023) examinaron la relación entre el NDVI y los factores climáticos estacionales, así como la influencia de las actividades humanas en la cuenca del lago Wuliangsu. Los

resultados mostraron una marcada heterogeneidad espacial del NDVI y una alta vulnerabilidad de pastizales y bosques frente al cambio climático y las actividades humanas. Minatti et al. (2023) realizaron un análisis multitemporal del NDVI en el Monumento Natural Morro de Santo Antônio, en Brasil. Los resultados indicaron un incremento del NDVI en las áreas protegidas y su zona de amortiguamiento, evidenciando la efectividad de la unidad de conservación en la protección de la vegetación.

Liu et al. (2024) analizaron el reverdecimiento de los pastizales alpinos en la meseta tibetana del norte, determinando que el cambio climático fue el principal impulsor del aumento del NDVI, seguido por la contribución positiva de las actividades humanas.

Gao et al. (2024) evaluaron los efectos del cambio climático y las actividades humanas sobre la vegetación de la meseta de Zoige. Se identificó una tendencia general al reverdecimiento, aunque con un incremento del oscurecimiento de la vegetación a partir de 2011, atribuible principalmente a la intensificación de la actividad humana.

Yang et al. (2024) estudiaron la relación entre la degradación del permafrost y los cambios abruptos del NDVI en el hemisferio norte. Los resultados evidenciaron una fuerte coherencia entre el incremento del NDVI y la degradación del permafrost, superando la influencia directa de la temperatura y la precipitación.

Lu et al. (2024) analizaron el impacto del clima y la actividad humana sobre el NDVI en la Región de las Fuentes de los Tres Ríos, China. Los resultados indicaron que el cambio climático tuvo un impacto significativamente mayor que la actividad humana en el incremento del NDVI durante la temporada de crecimiento.

Wen et al. (2024) analizaron los factores impulsores de la evolución espacio-temporal del ecosistema vegetal en áreas de restauración de desertificación rocosa en la provincia de Guizhou. Los resultados demostraron que el cambio climático fue el principal impulsor del NDVI, mientras que la ingeniería ecológica desempeñó un papel clave en la recuperación de la productividad vegetal.

Estos estudios evidencian la relevancia de la teledetección y del NDVI como herramientas fundamentales para el monitoreo ambiental y la evaluación de los efectos del cambio

climático y las actividades humanas, contribuyendo a la prevención y predicción de escenarios ambientales futuros posteriores al año 2030.

1.3. Formulación del problema de investigación

1.3.1. Problema general

- ¿Cómo influyen las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, mediante teledetección, en el distrito de Chiara (Ayacucho, Perú)?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cómo son los cambios en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021 según el NDVI?
- ¿Cómo ha evolucionado la extensión espacial según el NDVI de los distintos tipos de vegetación de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021?
- ¿Cuál es la evolución temporal de las áreas con vegetación según su nivel de vigor durante el periodo 2000–2021 y su proyección al 2030?
- ¿Cómo se comporta la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara al 2030, considerando los escenarios ambientales del 2000 al 2021?
- ¿Qué relación existe entre la temperatura, la precipitación y la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021?
- ¿Cómo varía el NDVI del distrito de Chiara a lo largo del año según la estacionalidad climática?

1.4. Delimitación del estudio

1.4.1. Delimitación espacial

El ámbito geográfico en el que se desarrolló el presente proyecto de investigación corresponde al distrito de Chiara, ubicado a una altitud de 3 515 m s. n. m., con coordenadas geográficas de 13°52'05" de latitud sur y 74°40'03" de longitud oeste del

meridiano de Greenwich. El distrito cuenta con una extensión territorial de 498,42 km², por lo que el análisis se circunscribió exclusivamente a la información correspondiente a dicha zona de la región Ayacucho.

1.4.2. Delimitación social

El distrito de Chiara presenta una dinámica socioeconómica basada principalmente en la actividad agrícola, orientada al autoconsumo y al abastecimiento del mercado interno de la región Ayacucho. La población depende del uso agrícola de sus parcelas, destinadas a la producción de hortalizas, árboles frutales y otros productos de pan llevar, constituyendo una actividad fundamental para su sustento social y económico.

En este contexto, el monitoreo de la cobertura vegetal mediante técnicas de teledetección se ha convertido en un enfoque clave para afrontar problemáticas socioeconómicas vinculadas a la actividad agrícola y pecuaria, así como problemas ambientales asociados a la expansión urbana, la deforestación, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. Estas técnicas permiten realizar evaluaciones rápidas y eficientes a diferentes escalas espaciales y temporales, proporcionando información relevante para la gestión de los ecosistemas y la planificación territorial (Pettorelli et al., 2022).

La generación de información mediante tecnologías adecuadas contribuirá a optimizar la producción de los pequeños productores, en función de la aptitud de los recursos tierra y de la variabilidad climática.

1.4.3. Delimitación temporal

La investigación se desarrolló desde una perspectiva ecológica, considerando las condiciones ambientales como variables clave que influyen en los procesos naturales, tales como el crecimiento de la vegetación, la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas. En tal sentido, el estudio se delimitó temporalmente al periodo comprendido entre los años 2000 y 2021, incorporando además modelos predictivos con proyección al año 2030, con

énfasis en los cambios potenciales derivados de factores ambientales y de la intervención humana durante dicho intervalo.

1.4.4. Delimitación conceptual

El estudio se centró en el análisis de los cambios en la extensión, estructura y composición de las formaciones vegetales del distrito de Chiara, producto de procesos naturales, como el clima, los suelos y la sucesión ecológica, así como de actividades humanas, entre ellas la deforestación, la agricultura y la urbanización. Para ello, se emplearon tecnologías de teledetección mediante sensores remotos, utilizando imágenes satelitales MODIS y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Asimismo, fue necesario considerar conceptos fundamentales de electromagnetismo, teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las imágenes satelitales fueron procesadas y analizadas mediante el software ENVI, lo que permitió la interpretación y evaluación de la cobertura vegetal del área de estudio.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

1.5.1. Justificación

La presente investigación se justifica en el contexto de los múltiples desafíos ambientales y socioeconómicos que enfrenta el país, entre los que destacan el incremento de los efectos del cambio climático, la crisis hídrica, el sobreconsumo de los recursos naturales, la pérdida progresiva de la biodiversidad y la persistente lucha contra la pobreza, los cuales condicionan el desarrollo sostenible a mediano y largo plazo (Lozano, 2024). Estos problemas adquieren particular relevancia en regiones con alta dependencia de los recursos naturales, como Ayacucho, donde las actividades productivas y el bienestar de la población están estrechamente vinculados al estado de los ecosistemas.

Asimismo, los efectos derivados de la pandemia de la COVID-19 generaron impactos diferenciados sobre la cobertura vegetal en la región de Ayacucho. Por un lado, la reducción temporal de determinadas actividades humanas favoreció la recuperación parcial de la vegetación en algunas áreas; sin embargo, la interrupción de programas de conservación, restauración y reforestación representó un riesgo para la sostenibilidad ecológica a largo plazo, generando cambios significativos con implicancias sociales y ambientales relevantes (CIUP, 2021).

Desde una perspectiva ecosistémica, la investigación adquiere importancia al considerar a la agricultura familiar como un componente clave del sistema socioecológico, en el que interactúan factores bióticos, abióticos y sociales, influyendo directamente en la seguridad alimentaria y en la calidad de vida de la población. No obstante, el crecimiento demográfico y el cambio inadecuado en el uso del suelo vienen perturbando el equilibrio ambiental, intensificando los procesos de degradación de los ecosistemas (INEI, 2023). En este sentido, la región de Ayacucho posee una significativa disponibilidad de recursos naturales que, bajo criterios técnicos y científicos adecuados, pueden ser aprovechados de manera sostenible sin generar impactos ambientales negativos.

Finalmente, la investigación se justifica porque permite no solo monitorear los cambios en la cobertura vegetal, sino también comprender las causas subyacentes de dichos cambios y generar información científica que sirva de base para la formulación de estrategias y propuestas de gestión ambiental adaptadas al contexto local. Los resultados del estudio serán de utilidad para los gobiernos regionales, la Municipalidad Provincial de Huamanga y la Municipalidad Distrital de Chiara, así como para la comunidad académica de las diversas escuelas de ingeniería y la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, contribuyendo al fortalecimiento de la toma de decisiones y a la planificación territorial sostenible.

1.5.2. Importancia

La presente investigación aporta al mundo científico al fortalecer la comprensión de la dinámica espacio-temporal de la cobertura vegetal en ecosistemas altoandinos, mediante la aplicación sistemática de técnicas de teledetección y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de imágenes satelitales MODIS. Este enfoque contribuye a ampliar la evidencia empírica sobre el comportamiento de la vegetación en contextos geográficos poco estudiados, como el distrito de Chiara, en la región Ayacucho.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio valida el uso del NDVI como indicador robusto para el monitoreo de cambios ambientales a escala local y regional, integrando análisis históricos (2000–2021) con proyecciones al año 2030. Esta combinación temporal permite generar un marco analítico replicable en otras zonas con características ecológicas y socioambientales similares, contribuyendo al desarrollo y refinamiento de modelos predictivos aplicados al estudio de la vegetación.

Asimismo, la investigación aporta conocimiento sobre la interacción entre factores climáticos, uso del suelo y actividades humanas en la dinámica de la cobertura vegetal, proporcionando insumos científicos que enriquecen la discusión teórica sobre la resiliencia y vulnerabilidad de los ecosistemas frente al cambio climático. Los resultados permiten contrastar hallazgos previos reportados en la literatura internacional y contextualizarlos en un escenario andino, fortaleciendo la comparabilidad y la generalización del conocimiento científico.

Finalmente, el estudio genera una base de datos geoespacial y una línea base ambiental que puede ser utilizada por futuras investigaciones interdisciplinarias en áreas como ecología, geografía, ingeniería ambiental y planificación territorial. De este modo, el trabajo contribuye a la acumulación de conocimiento científico aplicado, orientado a la comprensión, conservación y gestión sostenible de los ecosistemas en el marco de los desafíos ambientales globales.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

Evaluar las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, mediante la teledetección satelital en Chiara-Ayacucho.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021 según el NDVI.
- Determinar la evolución de la extensión espacial según el NDVI de los distintos tipos de vegetación de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.
- Evaluar la evolución temporal de las áreas con vegetación escasa, estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa durante el periodo 2000–2021 y su proyección al 2030.
- Proyectar la dinámica futura de la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030, considerando los escenarios ambientales del 2000 al 2021.
- Determinar la relación entre el NDVI, la temperatura y la precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.
- Analizar la variación estacional del NDVI en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.

CÁPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos teóricos de la investigación

2.1.1. Nociones generales de teledetección

El desarrollo tecnológico ha permitido que la recolección de datos en el ámbito de la investigación científica se realice sin la presencia física del ser humano, constituyéndose en una alternativa eficiente para la obtención de información en zonas de difícil o nulo acceso. Estas tecnologías facilitan la adquisición simultánea de múltiples variables de manera rápida y confiable, lo cual ha mejorado significativamente los procesos de análisis espacial y temporal en las últimas décadas.

Los antecedentes de la teledetección se remontan a 1859, cuando Gaspar Félix Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo aerostático. Posteriormente, en 1915, J. T. C. Moore contribuyó al desarrollo de las observaciones fotográficas aéreas con fines científicos. A partir de estos hitos, se inicia un proceso continuo de perfeccionamiento de la fotografía aérea como herramienta de análisis territorial.

Un acontecimiento clave en la evolución de la teledetección fue el lanzamiento, el 23 de julio de 1972, del primer satélite de la serie ERTS, proyecto conocido posteriormente como Landsat. Este hecho marcó el inicio del uso sistemático de imágenes satelitales para la investigación científica, incrementando notablemente el interés y las aplicaciones de la teledetección en estudios ambientales, geográficos y ecológicos (Pérez et al., 2006).

2.1.2. Fundamentos físicos de la teledetección

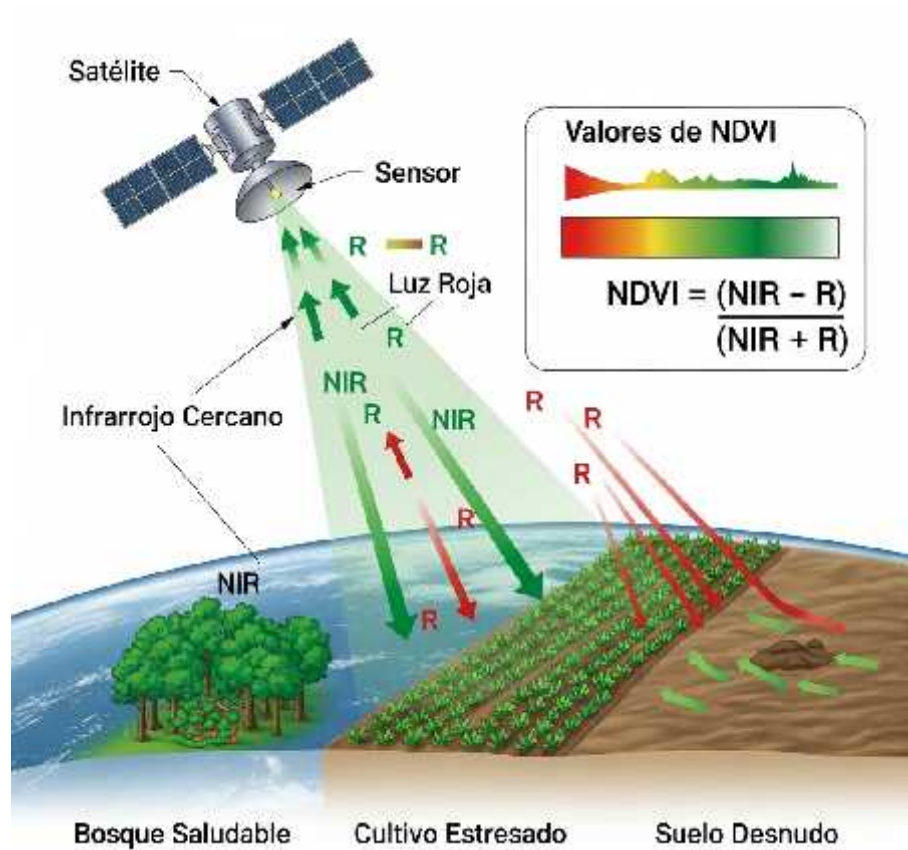
La teledetección es un proceso físico que se basa en la medición, registro y análisis de la radiación electromagnética que se propaga en forma de ondas y que interactúa con los objetos de la superficie terrestre, permitiendo obtener información a distancia sin contacto directo (Sobrino, 2001).

Este proceso mostrado en la Figura 1, comprende una serie de etapas fundamentales, las cuales se describen a continuación:

1. **Fuente de energía:** La mayoría de los sistemas de teledetección pasiva utilizan el Sol como principal fuente de energía, cuya radiación incide sobre la superficie terrestre.
2. **Interacción atmosférica:** Durante su recorrido a través de la atmósfera, la radiación solar experimenta procesos de absorción y dispersión debido a la presencia de gases como el ozono, el dióxido de carbono y el vapor de agua, lo que modifica la cantidad y calidad de energía que alcanza la superficie.
3. **Interacción con la superficie:** Al llegar a la superficie terrestre, la energía incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida por los objetos. La combinación de estos procesos define la firma espectral de cada material. La reflectancia espectral, entendida como la proporción de energía reflejada respecto a la energía incidente, constituye una característica distintiva de cada tipo de cobertura.
4. **Detección por el sensor:** Los sensores remotos, ubicados en plataformas satelitales o aéreas, registran la radiación reflejada o emitida por los objetos, midiendo la energía en bandas específicas del espectro electromagnético.
5. **Transmisión y procesamiento de datos:** La información captada por los sensores es transmitida a estaciones terrestres, donde se procesa y transforma en imágenes digitales aptas para su análisis e interpretación.

Figura 1

Proceso de teledetección para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)



Nota. Adaptado de Teledetección, por Sobrino y Rodríguez (2001).

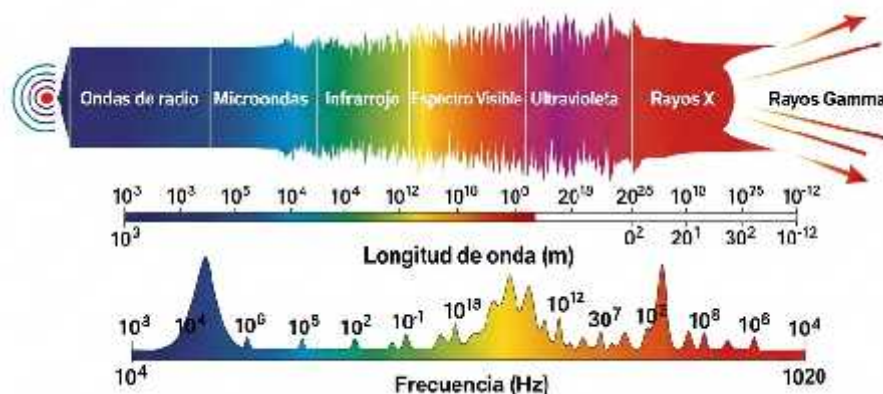
2.1.3. Onda electromagnética

La onda electromagnética es una perturbación que se propaga en el espacio transportando energía. Está compuesta por la oscilación simultánea y perpendicular de un campo eléctrico y un campo magnético. Esta interacción permite que la onda se desplace incluso a través del vacío, sin requerir un medio material, a una velocidad aproximada de 3×10^8 m/s, conocida como la velocidad de la luz (Sobrino, 2001).

El conjunto de todas las longitudes de onda y frecuencias posibles conforma el espectro electromagnético, como se muestra en la Figura 2, el cual es fundamental en la teledetección, ya que los sensores registran la energía en regiones específicas del espectro para analizar distintos tipos de cobertura terrestre.

Figura 2

Espectro electromagnético y su relación con la longitud de onda y frecuencia



Nota. Adaptado de Fundamentos de la teledetección (percepción remota), por NASA Applied Sciences (2023). Copyright 2023 por NASA Applied Sciences.

2.1.4. Índice de Vegetación

El índice de vegetación es un parámetro derivado de los valores de reflectancia registrados en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Entre los índices más utilizados, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) destaca por su capacidad para caracterizar de manera eficiente la presencia, distribución y estado de la vegetación verde en la superficie terrestre.

El NDVI permite analizar la evolución espacial y temporal de la cobertura vegetal, siendo sensible a las variaciones inducidas por factores climáticos, ambientales y antrópicos, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para el monitoreo de ecosistemas (Sobrino, 2001).

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Análisis de la vegetación

En el procesamiento digital de imágenes satelitales se emplean diversas operaciones que permiten generar información temática de forma automatizada. Posteriormente, esta información puede ser extraída mediante el uso de máscaras, las cuales delimitan áreas específicas de interés.

Entre los distintos tipos de operaciones destacan los índices espectrales, que consisten en cocientes o combinaciones matemáticas de bandas espectrales. Estos índices se utilizan para discriminar diferentes tipos de cobertura terrestre, como vegetación, cuerpos de agua, nieve o suelo desnudo. Los valores obtenidos generalmente oscilan entre -1 y $+1$, permitiendo una interpretación cuantitativa del estado de la superficie analizada (Sobrino, 2001).

2.2.2. Clasificación de valores del NDVI

El NDVI presenta valores comprendidos entre -1 y $+1$, los cuales se interpretan de acuerdo con rangos específicos para clasificar la cobertura terrestre (Universidad de Almería, 2025). Esta clasificación se basa principalmente en la intensidad de la reflectancia registrada en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo.

-) **NDVI: 0.028 – 0.47 (Suelo desnudo o construcciones):** Indica áreas con ausencia o mínima cobertura vegetal, como suelos expuestos, zonas urbanas o construcciones, caracterizadas por alta reflectancia en el espectro visible y baja reflectancia en el infrarrojo cercano (Zhu et al., 2021).
-) **NDVI: 0.48 – 0.54 (Vegetación escasa):** Representa zonas con vegetación limitada o degradada, tales como matorrales, pastizales poco densos o áreas agrícolas con baja cobertura vegetal (Feng et al., 2023).
-) **NDVI: 0.55 – 0.60 (Vegetación estresada):** Corresponde a vegetación sometida a estrés ambiental, asociado a factores como déficit hídrico, temperaturas extremas o presión antrópica, que afectan su capacidad fotosintética (Hu et al., 2023).
-) **NDVI: 0.61 – 0.63 (Vegetación ligeramente vigorosa):** Indica áreas con vegetación en condiciones aceptables, aunque no óptimas, como cultivos en desarrollo o ecosistemas adaptados a condiciones ambientales moderadas.
-) **NDVI: 0.64 – 0.66 (Vegetación vigorosa):** Comprende zonas con vegetación densa y saludable, como bosques, pastizales productivos o cultivos en buen estado, caracterizadas por una alta reflectancia en el infrarrojo cercano y elevada actividad fotosintética (Gessesse et al., 2023).

2.2.3. NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más utilizados en teledetección para evaluar la salud y densidad de la vegetación. Este índice se basa en la diferencia normalizada entre la radiación reflejada en la banda del rojo (Red) y la del infrarrojo cercano (NIR), considerando que las plantas sanas absorben intensamente la radiación roja para la fotosíntesis y reflejan gran parte de la radiación en el infrarrojo cercano.

Los valores bajos de NDVI indican vegetación escasa, estresada o ausencia de cobertura vegetal, mientras que valores altos reflejan vegetación densa y saludable (UAL, 2025).

Fórmula del NDVI:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Rojo}) / (\text{NIR} + \text{Rojo})$$

Donde:

-) **NIR:** Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (aproximadamente entre 0,7 μm y 1,3 μm).
-) **Rojo:** Reflectancia en la banda del rojo (aproximadamente entre 0,6 μm y 0,7 μm).

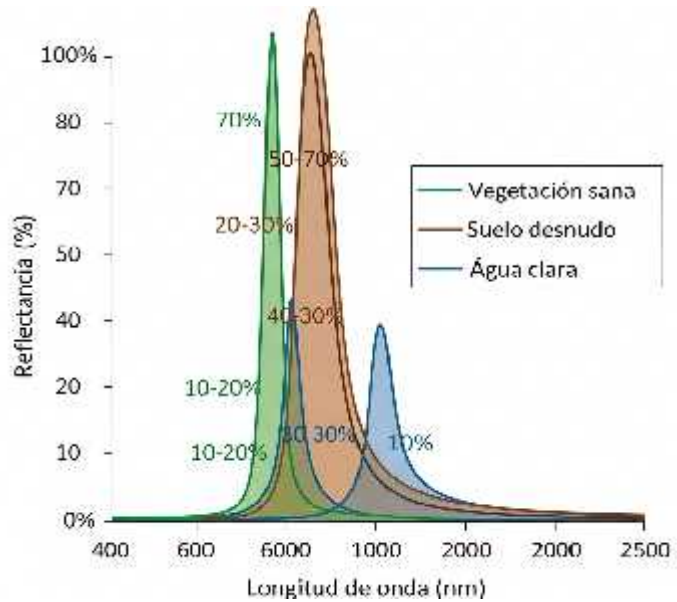
2.2.4. Firmas espectrales

Las firmas espectrales representan gráficamente la interacción de la energía electromagnética con un objeto, mostrando los niveles de reflectancia o absorbancia a lo largo de distintas longitudes de onda (NASA, 2023). Cada tipo de material presenta una respuesta espectral particular, lo que permite su identificación y diferenciación en las imágenes satelitales.

En este sentido, la firma espectral puede considerarse como la “huella digital” de un objeto dentro del espectro electromagnético, tal como se observa en la Figura 3, siendo fundamental para la clasificación y análisis de la cobertura terrestre.

Figura 3

Firmas espectrales típicas de vegetación sana, suelo desnudo y agua clara



Nota. Adaptado de Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota), por NASA Applied Sciences (2023). Copyright 2023 por NASA Applied Sciences.

CÁPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Hipótesis central de la investigación

3.1.1. *Hipótesis general*

Las condiciones ambientales, expresadas a través del tiempo y las variables climáticas (temperatura y precipitación), influyen significativamente en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho) durante el periodo 2000–2021 y en su proyección al año 2030, evaluadas mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

3.1.2. *Hipótesis específicas*

- Existen cambios significativos en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021, evidenciadas por la fluctuación del NDVI.
- Las áreas según el NDVI de suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa presentan cambios significativos en su extensión espacial durante el periodo 2000–2021.
- La evolución temporal de las áreas con vegetación permite identificar tendencias diferenciadas en los niveles de vigor de la vegetación y proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal al año 2030.
- Las tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales actuales permiten proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030.
- Existe una relación significativa entre el NDVI y las variables climáticas de temperatura y precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.
- El NDVI presenta una variación significativa en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales.

3.2. Variables e indicadores de la investigación

En este estudio, orientado a analizar las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal al 2030 mediante teledetección en el distrito de Chiara (Ayacucho, Perú), se han definido dos variables principales mostradas en el Cuadro 1: la variable 1, referida a las *condiciones ambientales*, y la variable 2, relacionada con la *dinámica de la cobertura vegetal*. Ambas variables han sido estructuradas en dimensiones e indicadores pertinentes al enfoque espacial, temporal y ambiental de la investigación.

La variable condiciones ambientales se operacionaliza a través de indicadores climáticos clave, como la temperatura y la precipitación, considerando su comportamiento anual y mensual durante el periodo 2000–2021. Estos indicadores permiten evaluar la influencia del clima sobre los procesos de crecimiento, estrés y distribución de la vegetación, aspectos esenciales para comprender la variabilidad de la cobertura vegetal en el área de estudio.

Por su parte, la variable dinámica de la cobertura vegetal se operacionaliza mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), obtenido a partir de imágenes satelitales Terra MODIS, el cual posibilita cuantificar el vigor y la salud de la vegetación. Asimismo, se consideran indicadores espaciales expresados en área (km²), que permiten clasificar la cobertura vegetal en suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa, así como analizar su evolución temporal y proyección al año 2030.

La utilización de técnicas de teledetección, análisis espacial y análisis temporal garantiza la objetividad, precisión y replicabilidad de los resultados, mientras que la definición de escalas de medición, técnicas e instrumentos asegura la validez y confiabilidad de los datos empleados. En conjunto, el cuadro de operacionalización de variables establece un marco metodológico sólido que orienta la recolección, procesamiento y análisis de la información, permitiendo contrastar las hipótesis planteadas y alcanzar los objetivos propuestos en la investigación.

Cuadro 1

Operacionalización de variables en el análisis de las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal al 2030

Variable	Dimensión	Indicadores	Definición operacional	Escala de medición	Técnica	Instrumento/Fuente
Variable 1 Condiciones ambientales	Temperatura	Temperatura media anual	Valor promedio anual de la temperatura del aire en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021	Intervalo (°C)	Análisis documental	Registros meteorológicos (SENAMHI / bases climáticas satelitales)
		Temperatura media mensual	Promedio mensual de temperatura utilizado para el análisis estacional del NDVI	Intervalo (°C)	Análisis documental	Registros meteorológicos
	Precipitación	Precipitación acumulada anual	Suma anual de precipitación registrada en el área de estudio	Razón (mm)	Análisis documental	Registros meteorológicos (SENAMHI / CHIRPS)
		Precipitación mensual	Precipitación acumulada por mes asociada a la variabilidad del NDVI	Razón (mm)	Análisis documental	Registros meteorológicos
Variable 2 Dinámica de la cobertura vegetal	Vigor de la vegetación	NDVI promedio anual	Valor medio anual del NDVI obtenido de imágenes MODIS para el distrito de Chiara	Intervalo (–1 a +1)	Teledetección	Imágenes satelitales Terra MODIS
		NDVI mensual	Valor promedio mensual del NDVI para analizar la variabilidad estacional	Intervalo	Teledetección	Imágenes MODIS
	Cobertura vegetal	Área de suelo desnudo	Superficie (km ²) clasificada con valores bajos de NDVI	Razón (km ²)	Clasificación digital	Software ENVI / SIG
		Área de vegetación escasa	Superficie con valores intermedios bajos de NDVI	Razón (km ²)	Clasificación digital	ENVI
		Área de vegetación estresada	Superficie con NDVI indicativo de estrés fisiológico	Razón (km ²)	Clasificación digital	ENVI
		Área de vegetación ligeramente vigorosa	Superficie con NDVI moderado	Razón (km ²)	Clasificación digital	ENVI
		Área de vegetación vigorosa	Superficie con NDVI alto, indicativo de buena salud vegetal	Razón (km ²)	Clasificación digital	ENVI
	Dinámica temporal	Tendencia del NDVI	Variación temporal del NDVI durante el periodo 2000–2021	Intervalo	Análisis temporal	Series NDVI
	Proyección futura	NDVI proyectado al 2030	Estimación del comportamiento futuro del NDVI basada en tendencias históricas	Intervalo	Modelamiento predictivo	Series temporales NDVI

3.3. Metodología de la investigación

3.3.1. Determinación del área en estudio

El área de estudio de la presente investigación comprende el distrito de Chiara, perteneciente a la provincia de Huamanga, región Ayacucho, Perú. Dicho distrito se localiza geográficamente en la zona centro-sur del país, aproximadamente entre las coordenadas 13°05 y 13°15 de latitud sur y 74°10 y 74°25 de longitud oeste, constituyendo un espacio representativo de la dinámica de la cobertura vegetal andina y de las actividades agrícolas predominantes en la región.

La delimitación espacial del área de estudio se realizó considerando los límites político-administrativos oficiales del distrito de Chiara, los cuales fueron definidos y verificados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, se empleó un sistema de referencia geográfica, lo que permitió una correcta georreferenciación y localización del área de estudio sobre la superficie terrestre.

Asimismo, la extensión territorial delimitada resultó adecuada para el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales de resolución espacial media, específicamente las correspondientes al sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra, las cuales proporcionan cobertura completa y continua del distrito. Esta delimitación espacial constituyó la base para la selección, organización y análisis de la información geoespacial empleada en el desarrollo de la investigación.

3.3.2. Descarga y procesamiento de las imágenes satelitales

Para el desarrollo de la presente investigación, se realizó la descarga de imágenes satelitales correspondientes al periodo 2000–2021 a partir de los repositorios oficiales administrados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), específicamente a través del Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). Las imágenes utilizadas fueron generadas por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra, ampliamente empleado en estudios

de monitoreo ambiental debido a su alta resolución temporal y cobertura espacial continua, características fundamentales para el análisis multitemporal de la cobertura vegetal (Justice et al., 2021; NASA LP DAAC, 2023).

Inicialmente, se descargaron los productos MODIS correspondientes al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en formato HDF (Hierarchical Data Format), el cual permite almacenar múltiples capas de información espectral y metadatos asociados, facilitando la selección del área de estudio, la fecha de adquisición y los indicadores biofísicos de interés (Didan et al., 2021). Este formato resulta adecuado para el manejo de grandes volúmenes de información satelital y es estándar en los productos MODIS.

Posteriormente, los archivos HDF fueron convertidos al formato GeoTIFF, con el objetivo de garantizar su compatibilidad con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y permitir su adecuado procesamiento digital. Esta conversión y el posterior preprocesamiento de las imágenes se realizaron utilizando el software especializado ENVI, herramienta ampliamente empleada en estudios recientes de teledetección aplicada al análisis de la vegetación (Huete et al., 2022).

En una segunda etapa, se organizó la base de datos satelital considerando el intervalo temporal del estudio, seleccionando de manera sistemática las imágenes correspondientes a los 22 años de análisis (2000–2021). Seguidamente, se identificaron las fechas disponibles y consistentes de los productos MODIS, priorizando la continuidad temporal y la calidad radiométrica de los datos, aspectos esenciales para estudios de dinámica y tendencia de la cobertura vegetal (Zhu et al., 2022).

Finalmente, se seleccionaron y procesaron las bandas espectrales necesarias para el análisis del NDVI, indicador central de la investigación, el cual ha demostrado ser eficaz para evaluar la condición, distribución y variabilidad temporal de la vegetación en respuesta a factores climáticos y ambientales. A partir de esta información, se efectuó el análisis multitemporal de la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara, constituyendo la base para la interpretación de los cambios observados y su proyección al año 2030 (Zhao et al., 2023; Pettorelli et al., 2022).

3.3.3. Cálculo de los Índices de Vegetación

La cobertura vegetal del área de estudio fue evaluada mediante el uso de imágenes satelitales correspondientes al periodo 2000–2021, a partir de las cuales se generaron datos cuantitativos sobre el estado y la dinámica de la vegetación. Dichos datos se obtuvieron mediante el cálculo de índices espectrales de vegetación, los cuales permiten caracterizar las cubiertas vegetales en función de su respuesta espectral y su comportamiento biofísico a lo largo del tiempo (Didan et al., 2021; Huete et al., 2022).

Entre los índices espectrales disponibles, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fue seleccionado como el principal indicador de análisis, debido a su amplia validación científica y a su eficacia para estimar la condición, densidad y vigor de la vegetación. El NDVI se calcula a partir de una relación matemática entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (Red), generando valores adimensionales comprendidos entre **-1 y +1**, los cuales reflejan el estado fisiológico de la vegetación (NASA LP DAAC, 2023).

Los valores obtenidos del NDVI permiten identificar y diferenciar diversos tipos de cobertura superficial, así como detectar áreas con vegetación sana, vegetación estresada o ausencia de cobertura vegetal, asociadas a factores como la disponibilidad hídrica, sequías, cambios en el uso del suelo y otras condiciones ambientales (Zhao et al., 2023). La interpretación general de los valores del NDVI se resume de la siguiente manera:

-) **Valores cercanos a 0:** corresponden a suelos desnudos o con escasa cobertura vegetal, característicos de áreas expuestas o degradadas.
-) **Valores positivos altos (0.6 a 1.0):** indican zonas con alta densidad de biomasa y vegetación vigorosa, asociadas a una elevada actividad fotosintética.
-) **Valores bajos negativos (-0.1 a -1.0):** representan la presencia de cuerpos de agua superficial, nieve o nubes, los cuales reflejan poca o nula radiación en el infrarrojo cercano.

El cálculo y análisis del NDVI permitió identificar espacial y temporalmente las áreas con mayor y menor desarrollo vegetativo dentro del distrito de Chiara, constituyendo una herramienta fundamental para evaluar la dinámica de la cobertura vegetal y su relación con las condiciones ambientales durante el periodo de estudio (Pettorelli et al., 2022).

3.3.4. Correlación de los parámetros ambientales

Para evaluar la relación entre las condiciones ambientales y la dinámica de la cobertura vegetal, se integraron los datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) obtenidos a partir de imágenes satelitales MODIS correspondientes al periodo 2000–2021. Los datos climáticos incluyeron variables como la temperatura media y la precipitación acumulada, las cuales constituyen parámetros ambientales clave que influyen en los procesos fisiológicos y espaciales de la vegetación (Zhao et al., 2023; Liu et al., 2022).

Con la finalidad de identificar patrones espaciales y temporales, se elaboraron mapas temáticos de NDVI por estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera), así como gráficas de series de tiempo que permitieron visualizar la evolución del vigor y la extensión de la cobertura vegetal en función de las variaciones climáticas registradas. Estas representaciones gráficas y cartográficas facilitaron la observación de tendencias estacionales y la comparación directa entre los índices de vegetación y las variables ambientales (Zhu et al., 2022).

Posteriormente, se aplicaron técnicas de análisis de correlación estadística para contrastar cuantitativamente las relaciones entre el NDVI y los parámetros ambientales, permitiendo determinar el grado de asociación entre las fluctuaciones climáticas y la dinámica de la vegetación en el área de estudio. Este enfoque metodológico no solo permitió la vigilancia y el seguimiento de los cambios en la cobertura vegetal, sino que también contribuyó a

determinar cómo las variaciones climáticas influyen en la estructura y condición de los ecosistemas vegetales del distrito de Chiara (Wang et al., 2022; Zhang et al., 2024).

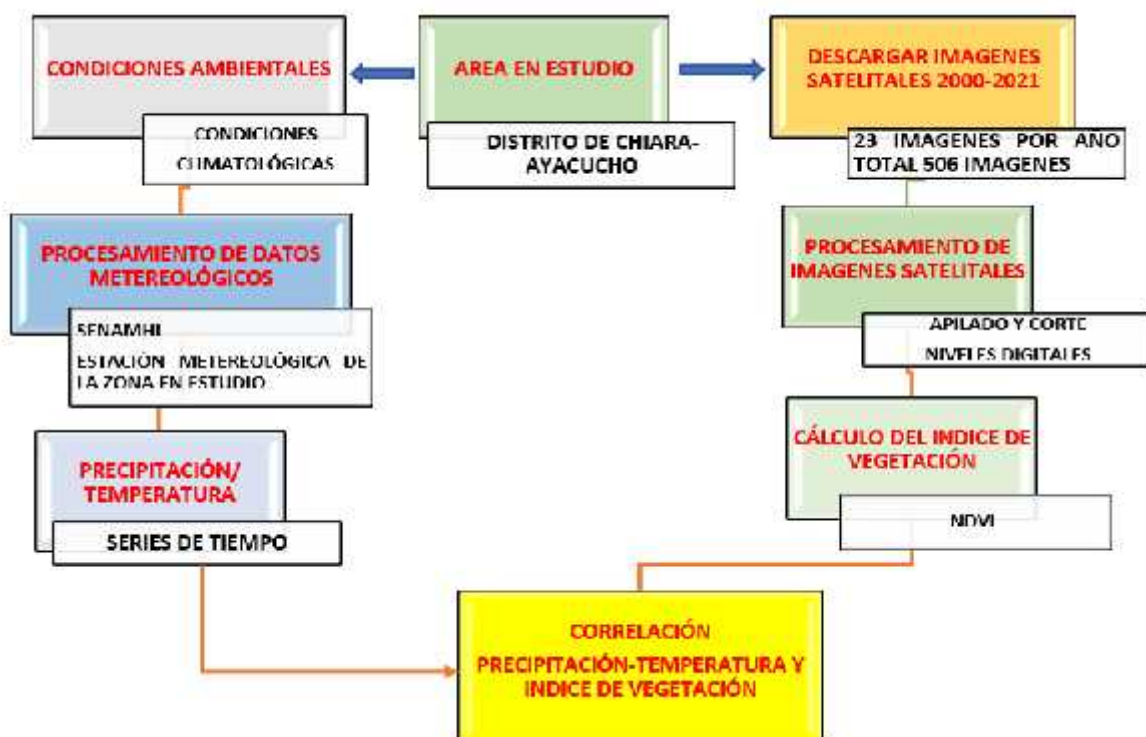
3.3.5. Método de investigación

La presente tesis se apoya fuertemente en un enfoque deductivo para probar las hipótesis sobre la relación entre las condiciones ambientales y la dinámica de la cobertura vegetal. Complementariamente, con un razonamiento analítico permite desglosar y comprender los componentes de cada variable. (Hernández, Fernández y Baptista, 2018).

En la figura 4, muestra un flujo metodológico enfocado en analizar la relación entre condiciones climáticas que incluyen la temperatura, precipitación y NDVI, las cuales son fundamentales para evaluar cambios en la dinámica de la cobertura vegetal (Gessesse et al., 2023). El análisis final examina cómo la precipitación y temperatura influyen en los valores de NDVI, reflejando la respuesta de la vegetación a cambios climáticos. Este enfoque permite comprender dinámicas ecosistémicas en áreas específicas (Feng et al., 2023).

Figura 4

Diagrama de flujo de la metodología de la investigación



3.4. Diseño de Investigación

3.4.1. Tipo, Nivel, Enfoque y Diseño metodológico

Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como finalidad generar conocimiento orientado a la solución de un problema concreto vinculado al monitoreo y análisis de la dinámica de la cobertura vegetal bajo condiciones ambientales cambiantes. A diferencia de la investigación básica, que busca ampliar el conocimiento teórico, la investigación aplicada se orienta a la utilización práctica de los resultados para la toma de decisiones y la gestión sostenible del territorio.

En este sentido, los resultados obtenidos permiten aportar información técnica y científica útil para la planificación ambiental, la gestión de los recursos naturales y el ordenamiento territorial en el distrito de Chiara, región Ayacucho. De acuerdo con Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio (2018), la investigación aplicada se caracteriza porque sus hallazgos “se utilizan para el beneficio de la sociedad”, lo cual se alinea con los objetivos del presente estudio.

Nivel de investigación

La investigación corresponde a un nivel descriptivo-correlacional. Es descriptiva porque permite caracterizar espacial y temporalmente la cobertura vegetal del distrito de Chiara mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), identificando sus patrones, tendencias y variaciones a lo largo del periodo 2000–2021. Asimismo, es correlacional porque analiza la relación existente entre la dinámica de la cobertura vegetal y los parámetros ambientales, principalmente la temperatura y la precipitación.

Este nivel de investigación posibilita identificar el grado y sentido de asociación entre las variables estudiadas, sin pretender establecer relaciones de causalidad directa,

lo cual es coherente con estudios ambientales basados en series temporales y observación indirecta (Hernández-Sampieri et al., 2018).

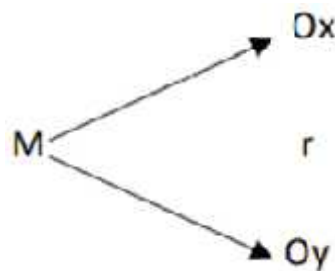
Enfoque de investigación

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que emplea datos numéricos provenientes del procesamiento de imágenes satelitales y de registros meteorológicos. El análisis se basa en el cálculo del NDVI, cuyos valores se obtienen a partir de relaciones matemáticas entre bandas espectrales, así como en el tratamiento estadístico de variables ambientales como la temperatura y la precipitación.

Diseño metodológico

El diseño de la investigación es no experimental y longitudinal. Es no experimental porque las variables no son manipuladas deliberadamente, sino que se observan y analizan tal como ocurren en su contexto natural, a partir de información secundaria proveniente de imágenes satelitales y registros climáticos.

Asimismo, es longitudinal debido a que el estudio analiza la evolución temporal de la cobertura vegetal durante un periodo de 22 años (2000–2021), lo que permite identificar tendencias, fluctuaciones y patrones de cambio a lo largo del tiempo. Este tipo de diseño es adecuado para investigaciones ambientales que requieren evaluar procesos dinámicos y continuos (Álvarez & Risco, 2020).



Esquema del diseño de investigación:

Donde:

- **M:** Muestra (área de estudio: distrito de Chiara)
- **Ox:** Observación de la variable 1 (parámetros ambientales: temperatura y precipitación)
- **Oy:** Observación de la variable 2 (dinámica de la cobertura vegetal medida mediante NDVI)
- **r:** Relación o grado de correlación entre las variables estudiadas

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población de estudio está constituida por el conjunto total de datos satelitales multitemporales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), generados a partir de imágenes del sensor MODIS, correspondientes al período 2000–2021, que abarcan la región de Ayacucho, con una superficie aproximada de 43 814,80 km², se localiza en las coordenadas geográficas 13°09'47" de latitud sur y 74°13'28" de longitud oeste, y posee una altitud media de 2 746 m s.n.m.

3.5.2. Muestra

Constituida por la totalidad de imágenes satelitales MODIS (MOD13Q1) que cubren espacialmente el distrito de Chiara durante el periodo de análisis 2000–2021. El distrito presenta una superficie aproximada de 498,42 km², se ubica en las coordenadas 13°52'05" de latitud sur y 73°40'03" de longitud oeste, y registra una altitud media de 3 515 m s.n.m.

La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, sustentado en criterios técnicos y metodológicos, tales como la cobertura espacial completa del área de estudio y la continuidad temporal de la serie de datos.

3.6. Técnicas e instrumentos de la recolección de datos

3.6.1. Técnicas:

La documentación. Es la técnica de recolección de datos, para estudios retrospectivos, que conllevó a revisar la documentación de las imágenes satelitales del 2000 al 2021.

Guía de observación. Es un documento o protocolo estructurado que detalla los pasos, criterios y procedimientos para analizar de manera sistemática y reproducible los datos de del sensor MODIS, con el fin de obtener información específica sobre el área de estudio, que permitió encausar la acción de observar ciertos fenómenos plasmados en imágenes digitales, como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2

Guía de observación para imágenes satelitales Terra MODIS



GUIA DE OBSERVACIÓN				
Criterio de evaluación (Aspectos a observar)				
Años	C01: Imagen descargada	C02: Resolución espacial de las bandas espectrales	C03: Diario de trabajo del procesamiento de los índices	C04: Escala de medición del I.V.
Registro de observación				
2000				
2001				
2002				
...				
2021				

3.6.2. Instrumentos:

Instrumentos mecánicos. Se utilizaron los softwares ArcGIS-ENVI para el procesamiento de las imágenes, instrumentos mecánicos necesarios para garantizar lo medido, como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3

Técnica e Instrumentos para el procesamiento de imágenes Terra MODIS

Instrumentos	Procesamiento de las imágenes				
Softwares ArcGIS-ENVI	Técnica	Propósito de la actividad	Criterio de evaluación	Planificación de la observación	Ejecución del procesamiento
	<ul style="list-style-type: none">  Documentación  Guía de observación 				

3.7. Procedimiento para la recolección de datos

3.7.1. Programa de procesamiento de datos con el Software ENVI

Para el procesamiento y análisis de los datos satelitales se utilizó el software ENVI (Environment for Visualizing Images), herramienta especializada en el tratamiento de imágenes de teledetección. Este software permitió la visualización, corrección y análisis espectral de las imágenes MODIS, así como el cálculo automatizado del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

3.7.2. Guía documental de análisis

Tres procesos fueron la base del análisis de esta investigación:

1. Un proceso de comunicación que permitió recuperar la información que se había transmitido.
2. Un proceso de transformación de datos para analizarlos, convertirlos en un documento secundario más hacedero de usar y difundirlos.
3. Una vía sistemática y analítica que permitió una interpretación y sistematización detalladas, así como la generación de información precisa y abreviada.

3.7.3. *Procesamiento con ArcGis, QGIS*

Consistió en un método efectivo para procesar y examinar, cuyas funciones rásteres se aplican directamente a los píxeles de las bases de datos en la visualización del mapa. La variedad de índices nos permite analizar datos multibanda de vegetación NDVI.

3.8. *Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados*

De acuerdo con el tema e hipótesis de la investigación, este estudio recopiló información bibliográfica y cartográfica de instituciones como el MINAM, Gore Ayacucho, MINAG, INRENA, ZEE –AYACUCHO. Seguidamente se descargó de la página MRTWEB de la Nasa, las imágenes satelitales producto MODIS Terra (MOD13Q1) (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del año 2000 hasta 2021, que brindó una cobertura espacial y frecuencia temporal adecuadas, lo que permitió recopilar información de la superficie en un amplio rango espectral debido a que tiene 36 bandas espectrales.

3.8.1. *Análisis documental de imágenes satelitales y categorización de la cobertura vegetal*

La investigación se desarrolló mediante un análisis documental basado en imágenes satelitales multitemporales. Para ello, se descargaron 506 escenas del producto MODIS Terra MOD13Q1, correspondientes al periodo 2000–2021, desde la plataforma oficial de la NASA – Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Este producto proporciona composiciones de 16 días del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ampliamente utilizadas para el monitoreo de la cobertura vegetal a escala regional.

Posteriormente, las imágenes fueron preprocesadas, organizadas y recortadas espacialmente utilizando un archivo vectorial (shapefile) del área de estudio, lo que permitió delimitar con precisión la región analizada. Las escenas se agruparon de acuerdo con las






estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera), con el fin de evaluar la variabilidad estacional de la cobertura vegetal.

El cálculo y análisis del NDVI, así como la determinación del área ocupada por cada tipo de cobertura vegetal, se realizaron empleando los softwares especializados ENVI 4.8 y ArcGIS 10.0, herramientas ampliamente reconocidas por su capacidad para el procesamiento digital de imágenes satelitales y análisis geoespacial. A partir de los valores de NDVI obtenidos, se procedió a la clasificación de la cobertura vegetal, aplicando filtros de color para facilitar la interpretación espacial y visual de los resultados.

La categorización de la cobertura vegetal según rangos de NDVI, presentada en el Cuadro 4, se fundamentó en criterios establecidos en los trabajos de Rouse et al. (1974) y Huete et al. (2002), quienes definen rangos de NDVI asociados a suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada y vegetación vigorosa. Esta clasificación sustentada en el principio de que los valores del NDVI reflejan la capacidad fotosintética de la vegetación, determinada principalmente por la cantidad de biomasa verde, el contenido de clorofila y la disponibilidad hídrica (Rouse et al., 1974; Pettorelli et al., 2022), permitió identificar y cuantificar las diferentes condiciones de la vegetación presentes en el área de estudio.

Cuadro 4

Cobertura vegetal según valores del NDVI

NDVI	COBERTURA VEGETAL	FILTROS DE COLORES
0.028-0.47	suelo desnudo	
0.48-0.54	vegetación escasa	
0.55-0.60	vegetación estresada	
0.61-0.63	vegetación ligeramente vigorosa	
0.64-0.66	vegetación vigorosa	

Nota. Los rangos de NDVI y su clasificación de cobertura vegetal se basan en criterios propuestos por Rouse et al. (1974) y Huete et al. (2002), adaptados a las condiciones ambientales del área de estudio y a investigaciones recientes con imágenes MODIS (Zhu et al., 2021; Gessesse et al., 2023).

Donde, los valores más bajos de NDVI, comprendidos entre **0.028 y 0.47**, corresponden a la categoría de **suelo desnudo**, la cual representa áreas con escasa o nula cobertura vegetal, tales como suelos expuestos, zonas rocosas o áreas degradadas. En estos casos, la baja

reflectancia en el infrarrojo cercano y la alta reflectancia en el rojo limitan el valor del índice, situación ampliamente documentada en estudios de teledetección en regiones áridas y altoandinas (Huete et al., 2002; Zhu et al., 2021).

El rango de **0.48 a 0.54**, clasificado como **vegetación escasa**, indica la presencia de cobertura vegetal incipiente o de baja densidad, común en áreas sometidas a estrés hídrico, pastoreo intensivo o etapas tempranas de crecimiento vegetal. Investigaciones similares en ecosistemas andinos reportan valores de NDVI comparables para coberturas ralas o en recuperación (Gao et al., 2020).

La categoría de **vegetación estresada**, definida por valores de NDVI entre **0.55 y 0.60**, refleja una cobertura vegetal presente pero afectada por condiciones ambientales adversas, como déficit hídrico, temperaturas extremas o degradación del suelo. Este comportamiento ha sido asociado a periodos de transición climática o a eventos extremos, donde la actividad fotosintética disminuye sin llegar a desaparecer completamente (IPCC, 2021; Pettorelli et al., 2022).

Los valores comprendidos entre **0.61 y 0.63**, correspondientes a **vegetación ligeramente vigorosa**, indican una cobertura vegetal saludable, con una actividad fotosintética elevada y condiciones ambientales relativamente favorables. Estudios realizados en zonas agrícolas y ecosistemas naturales reportan este rango como característico de vegetación en crecimiento activo durante la temporada húmeda (Zhu et al., 2021).

Finalmente, los valores más altos del NDVI, entre **0.64 y 0.66**, representan la categoría de **vegetación vigorosa**, asociada a una alta densidad de biomasa y óptimas condiciones fisiológicas. Este rango es típico de vegetación bien desarrollada, como cultivos en su máximo crecimiento o coberturas naturales densas, y coincide con resultados reportados en estudios de monitoreo de vegetación mediante sensores MODIS en regiones tropicales y andinas (Huete et al., 2002; Pettorelli et al., 2022).

3.8.2. Programas para el procesamiento de datos

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó con ENVI, software ampliamente utilizado en teledetección para el análisis espectral, la corrección geométrica y el cálculo del NDVI, permitiendo la generación de productos temáticos de cobertura vegetal a partir de datos MODIS (L3Harris Geospatial, 2023). Complementariamente, se empleó ArcGIS para la gestión y análisis espacial de información raster y vectorial, así como para la elaboración de mapas temáticos del área de estudio (Esri, 2022).

La dinámica temporal de la cobertura vegetal durante el periodo 2000–2021 se analizó mediante la integración de herramientas de hoja de cálculo y métodos estadísticos. Inicialmente, los datos de NDVI fueron organizados y analizados de forma exploratoria en Microsoft Excel, práctica común en estudios ambientales (Wang et al., 2023). Posteriormente, se aplicaron modelos de regresión lineal y polinómica para identificar tendencias de largo plazo, seleccionando el mejor ajuste según el coeficiente de determinación (R^2) (Forkel et al., 2021; Zhu et al., 2021).

Finalmente, se emplearon modelos ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), para modelar la autocorrelación temporal y proyectar la evolución de la cobertura vegetal y la serie de valores de NDVI hacia el año 2030, enfoque ampliamente validado en el análisis de series temporales ambientales (Liu et al., 2023; Vicente-Serrano et al., 2021).

Los modelos ajustados de ARIMA (1,1,1) para la cobertura vegetal y NDVI fueron:

$$Y_t = \beta_1 Y_{t-1} + \epsilon_t + \beta_2 Y_{t-1}$$

$$NDVI_t = \beta_1 NDVI_{t-1} + \epsilon_t + \beta_2 NDVI_{t-1}$$

Donde:

- Y_t : cambio anual de la cobertura vegetal
- $NDVI_t$: cambio mensual del NDVI
- β_1 : coeficiente autorregresivo
- β_2 : coeficiente de media móvil
- ϵ_t : término de error aleatorio

CÁPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados descriptivos

En esta sección se presentan los resultados descriptivos obtenidos a partir del procesamiento y análisis de las imágenes satelitales MODIS correspondientes al periodo 2000–2021, mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los resultados permiten caracterizar la dinámica espacial y temporal de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara, así como identificar patrones de variación asociados a condiciones ambientales y estacionales.

4.1.1. Cambios en la dinámica de la cobertura vegetal según las fluctuaciones del NDVI

Con el propósito de describir la evolución temporal de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara, se analizaron los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondientes al periodo 2000–2021. Este análisis permitió identificar las fluctuaciones interanuales y estacionales del estado de la vegetación, así como su clasificación cualitativa en función de los rangos del NDVI.

En ese sentido, el Cuadro 5, muestra el resumen de los valores representativos del NDVI obtenidos para cada año de estudio, considerando fechas clave y su correspondiente calificación del estado de la vegetación (baja, regular y alta). Estos resultados constituyen la base descriptiva para la interpretación de la dinámica vegetal y para la posterior proyección de tendencias hacia el año 2030.

Cuadro 5*Fluctuación de la vegetación según el NDVI periodo 2000-2021*

Año	Fecha	Valores NDVI	Calificación de la vegetación
2000	10 febrero	0,26471927	Regular
	30 de marzo	0,56655320	Alta
2001	15 de abril	0,57100751	Alta
	06 de setiembre	0,30243205	Regular
2002	10 de febrero	0,32820865	Regular
	1 de mayo	0,58458271	Alta
2003	14 de marzo	0,57899000	Alta
	24 de octubre	0,31691250	Regular
2004	15 de abril	0,58108258	Alta
	22 de setiembre	0,29392975	Regular
2005	14 de marzo	0,63535662	Alta
	06 de setiembre	0,29628179	Regular
2006	10 de febrero	0,64679430	Alta
	22 de setiembre	0,30010755	Regular
2007	10 de febrero	0,63627104	Alta
	24 de octubre	0,27813773	Regular
2008	09 de enero	0,61729993	Alta
	15 de abril	0,27158930	Regular
2009	14 de marzo	0,64719600	Alta
	25 de noviembre	0,18962529	Regular
2010	15 de abril	0,65194152	Alta
	06 de setiembre	0,29549693	Regular
2011	30 de marzo	0,27967081	Regular
	15 de abril	0,61293555	Alta
2012	26 de febrero	0,59957792	Alta
	22 de setiembre	0,30705012	Regular
2013	30 de marzo	0,59708059	Alta
	22 de setiembre	0,39238570	Regular
2014	30 de marzo	0,61203340	Alta
	08 de octubre	0,32069318	Regular
2015	26 de febrero	0,30788540	Alta
	24 de octubre	0,14730435	Baja
2016	20 de julio	0,16226788	Baja
	25 de noviembre	0,42820000	Regular
2017	15 de abril	0,61880000	Alta
	22 de setiembre	0,32880000	Regular
2018	30 de marzo	0,57260000	Alta
	08 de octubre	0,35020000	Regular
2019	30 de marzo	0,62720000	Alta
	21 de agosto	0,31710000	Regular
2020	30 de marzo	0,58830000	Alta
	22 de setiembre	0,29460000	Regular
2021	15 de abril	0,62580000	Alta
	06 de setiembre	0,33100000	Regular

El Cuadro 5 evidencia una marcada estacionalidad en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021. Los valores más altos de NDVI (0,50), asociados a una vegetación densa y saludable, se registran de manera recurrente entre los meses de febrero y abril, coincidiendo con la temporada de lluvias y después de las lluvias. Este comportamiento puede atribuirse al incremento de la disponibilidad hídrica y a la presencia de condiciones térmicas adecuadas durante la temporada lluviosa, factores que controlan directamente los procesos fisiológicos de la vegetación.

La mayor humedad del suelo y temperaturas moderadas favorecen la absorción de radiación fotosintéticamente activa, incrementan la actividad fotosintética y promueven la acumulación de biomasa, lo cual se manifiesta en valores elevados del NDVI, conforme confirman estudios recientes basados en teledetección que la interacción entre precipitación y temperatura es uno de los principales determinantes de la dinámica temporal del NDVI, especialmente en ecosistemas andinos y regiones semiáridas (Zhu et al., 2021; IPCC, 2021; Pettorelli et al., 2022). En contraste, los valores más bajos de NDVI, con promedios cercanos a 0,30, se concentran entre los meses de julio y noviembre, periodo correspondiente a la estación seca, caracterizada por la reducción de las precipitaciones y el aumento del estrés hídrico. Por ejemplo, en el año 2005, el NDVI alcanzó un valor de 0,6353 en marzo, mientras que en septiembre del mismo año descendió a 0,2962, reflejando la influencia directa de la estacionalidad climática sobre el vigor de la vegetación. Este patrón ha sido ampliamente documentado en ecosistemas andinos y semiáridos mediante estudios de teledetección (Zhu et al., 2021; Pettorelli et al., 2022). No obstante, los años 2015 y 2016 presentan anomalías significativas, con valores de NDVI clasificados como bajos (0,1473 en octubre de 2015 y 0,1622 en julio de 2016), lo que indica estrés severo de la vegetación. Estas disminuciones pueden estar asociadas a eventos climáticos adversos, como sequías prolongadas y anomalías térmicas. El Informe Técnico ENFEN N.º 06-2024 del SENAMHI (2024) señala que la variabilidad interanual de las precipitaciones y la ocurrencia de eventos extremos influyen significativamente en la productividad vegetal de la sierra sur del Perú, lo que sustenta estos resultados atípicos. Asimismo, el análisis de

tendencia temporal muestra una pendiente prácticamente horizontal, lo que sugiere una estabilidad relativa de la cobertura vegetal en el largo plazo. Sin embargo, se identifica una leve tendencia decreciente del NDVI promedio, lo que podría indicar un proceso gradual de degradación vegetal, asociado a presiones antrópicas y a los efectos acumulativos del cambio climático. Resultados similares se reportaron en estudios recientes en regiones rurales andinas, donde la estabilidad aparente del NDVI oculta procesos de degradación progresiva del ecosistema (IPCC, 2021; Pettorelli et al., 2022). En conjunto, estos resultados confirman que la dinámica de la vegetación en Chiara está fuertemente condicionada por la estacionalidad climática, y respaldan el uso del NDVI como un indicador robusto para el monitoreo ambiental y la proyección de escenarios al 2030.

4.1.2. Áreas según el NDVI por el tipo de vegetación durante el periodo 2000–2021

🌍 Evolución temporal de los tipos de vegetación (km²) según el NDVI del 2000-2021

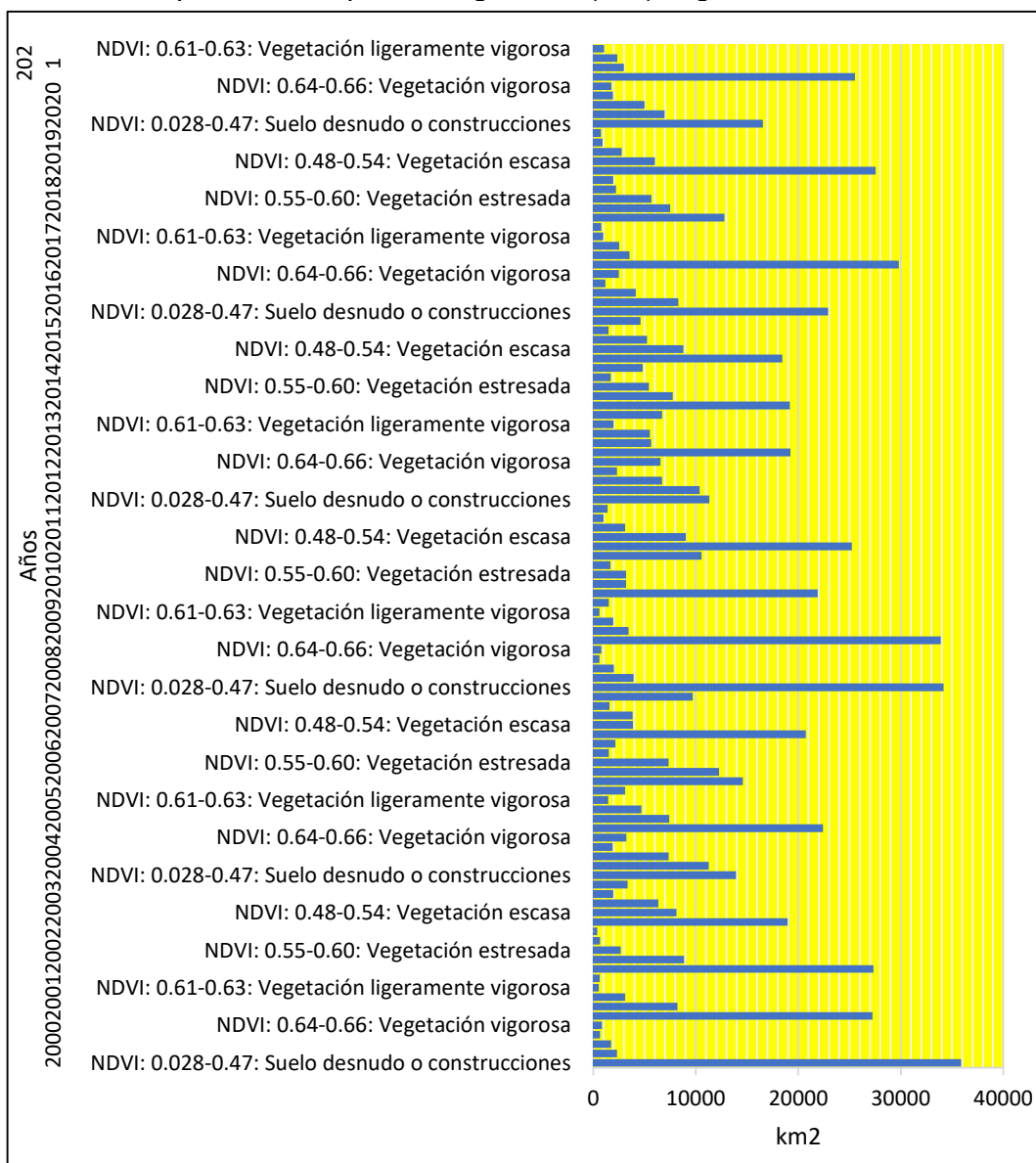
La Figura 5 muestra la evolución temporal de la cobertura vegetal, expresada en km², para el periodo 2000–2021, clasificada en cinco categorías según rangos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): suelo desnudo o construcciones, vegetación escasa, vegetación estresada, vegetación ligeramente vigorosa y vegetación vigorosa. Esta representación permite analizar la dinámica espacial y temporal del estado de la vegetación en el área de estudio a lo largo de más de dos décadas.

De manera general, se observa que la categoría dominante durante todo el periodo de análisis corresponde a la vegetación ligeramente vigorosa (NDVI 0.61–0.63), seguida por la vegetación estresada (NDVI 0.55–0.60) y, en menor proporción, por la vegetación vigorosa (NDVI 0.64–0.66). Esta distribución sugiere que la cobertura vegetal del área de estudio se mantiene mayoritariamente en condiciones intermedias de vigor, lo cual es característico de ecosistemas andinos sometidos a una marcada estacionalidad climática y a limitaciones ambientales propias de la altitud, como bajas temperaturas nocturnas y variabilidad en la disponibilidad hídrica (Huete et al., 2002; Zhu et al., 2021). La superficie asociada a suelo

desnudo o construcciones (NDVI 0.028–0.47) se mantiene relativamente estable a lo largo del periodo, con ligeras fluctuaciones interanuales. Este comportamiento puede atribuirse a la persistencia de áreas naturalmente desprovistas de vegetación, suelos erosionados o zonas intervenidas por actividades antrópicas, cuya dinámica de cambio es más lenta en comparación con la vegetación natural (Pettorelli et al., 2022). Resultados similares y reportados en estudios realizados en regiones altoandinas del Perú y Bolivia, donde la cobertura de suelo desnudo presenta variaciones moderadas asociadas principalmente a procesos de degradación y uso del suelo (Gao et al., 2020). En cuanto a la vegetación estresada, se evidencia una presencia recurrente y significativa en varios años del periodo analizado. Esta condición refleja episodios de estrés fisiológico de la vegetación, asociados principalmente a déficits hídricos estacionales, variabilidad interanual de las precipitaciones y eventos climáticos extremos, como sequías o anomalías térmicas. Diversos estudios han demostrado que el NDVI responde de manera sensible a estas condiciones, disminuyendo cuando la disponibilidad de agua en el suelo es limitada o cuando las temperaturas afectan la eficiencia fotosintética (Rouse et al., 1974; IPCC, 2021). Por otro lado, la vegetación vigorosa, aunque presente en menor proporción, muestra incrementos puntuales en determinados años, lo cual puede relacionarse con periodos de mayor precipitación y condiciones térmicas favorables, que estimulan el crecimiento de la biomasa y la actividad fotosintética. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Huete et al. (2002), quienes señalan que valores elevados de NDVI están directamente asociados a una mayor densidad foliar y contenido de clorofila, especialmente durante la temporada húmeda.

Figura 5

Evolución temporal de los tipos de vegetación (km²) según NDVI del 2000 al 2021



Desde una perspectiva temporal, la Figura 5 no evidencia cambios abruptos o rupturas drásticas en la estructura general de la cobertura vegetal, sino más bien una dinámica relativamente estable con fluctuaciones interanuales, lo cual sugiere que el ecosistema ha mantenido un equilibrio funcional a lo largo del periodo 2000–2021. No obstante, la persistencia de amplias superficies bajo categorías de vegetación estresada y ligeramente

vigorosa podría indicar una vulnerabilidad latente frente al cambio climático, especialmente ante escenarios de incremento de la temperatura y alteración del régimen de precipitaciones, tal como advierte el IPCC (2021).

En comparación con estudios previos realizados mediante imágenes MODIS en regiones similares, los resultados obtenidos son consistentes. Investigaciones en zonas andinas de Sudamérica reportan que la mayor parte de la cobertura vegetal se concentra en rangos intermedios de NDVI, con incrementos estacionales durante los periodos húmedos y descensos durante el estiaje (Gao et al., 2020; Zhu et al., 2021). Esto refuerza la validez de los resultados y confirma la utilidad del NDVI como indicador robusto para el monitoreo de la dinámica vegetal a escala regional.

4.1.3. Evolución temporal anual de áreas del vigor de vegetación 2000–2021 con proyección al 2030

Evolución anual de área con suelo desnudo (km²) 2000-2021 proyectado al 2030

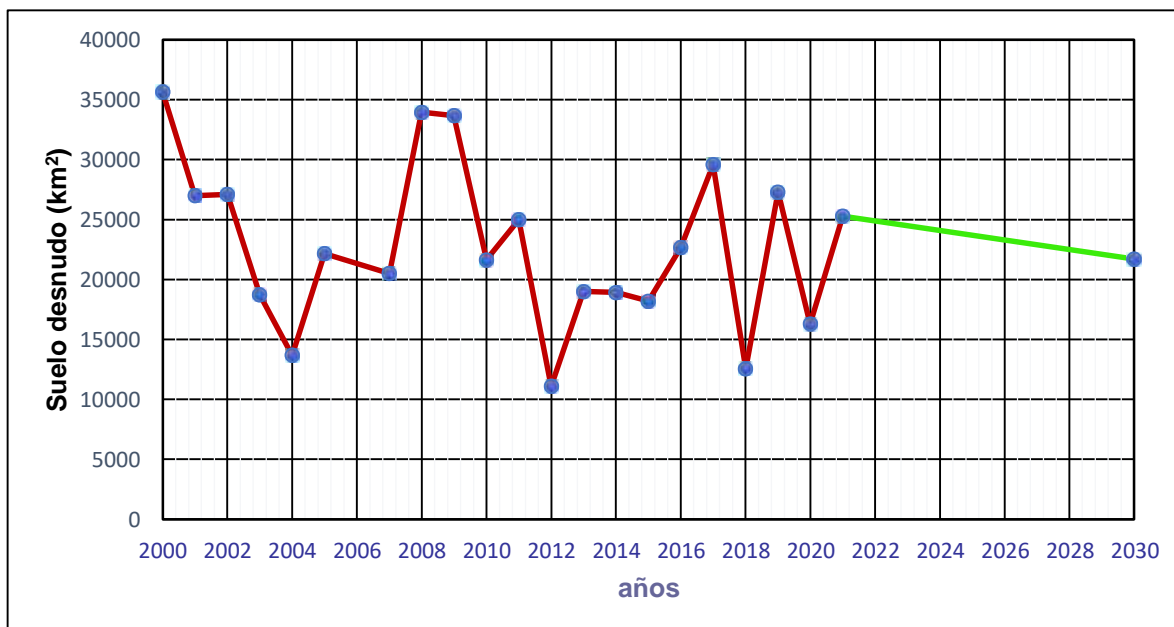
La Figura 6 muestra la evolución temporal anual del área de suelo desnudo para el periodo 2000–2021, así como su proyección al año 2030, estimada mediante la aplicación de un modelo de series de tiempo ARIMA. El análisis evidencia una marcada variabilidad interanual en la extensión del suelo desnudo, con valores que oscilan aproximadamente entre 11 000 km² y 36 000 km² a lo largo del periodo de estudio. Esta alta fluctuación refleja la sensibilidad del suelo desnudo frente a cambios climáticos, particularmente la variabilidad de las precipitaciones, así como a la presión antrópica asociada al uso del suelo y a los procesos de degradación ambiental.

Durante los primeros años de la serie (2000–2004) se observa una tendencia decreciente del área de suelo desnudo, seguida de incrementos y descensos abruptos en los años posteriores, destacándose picos elevados en 2008, 2009 y 2017, y mínimos pronunciados en 2004, 2012 y 2018. Este comportamiento no lineal es característico de sistemas ecológicos altamente dependientes de la variabilidad climática interanual, donde los periodos húmedos favorecen la recuperación temporal de la cobertura vegetal, mientras que

los periodos secos o de estrés hídrico intensifican la exposición del suelo (Vicente-Serrano et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Figura 6

Evolución anual del suelo desnudo (km²), 2000-2021, proyectado al 2030



La proyección al año 2030 realizado mediante un modelo ARIMA (1,1,1), indica que el área de suelo desnudo tendería a estabilizarse hacia el horizonte de proyección, alcanzando un valor aproximado de 21 700 km².

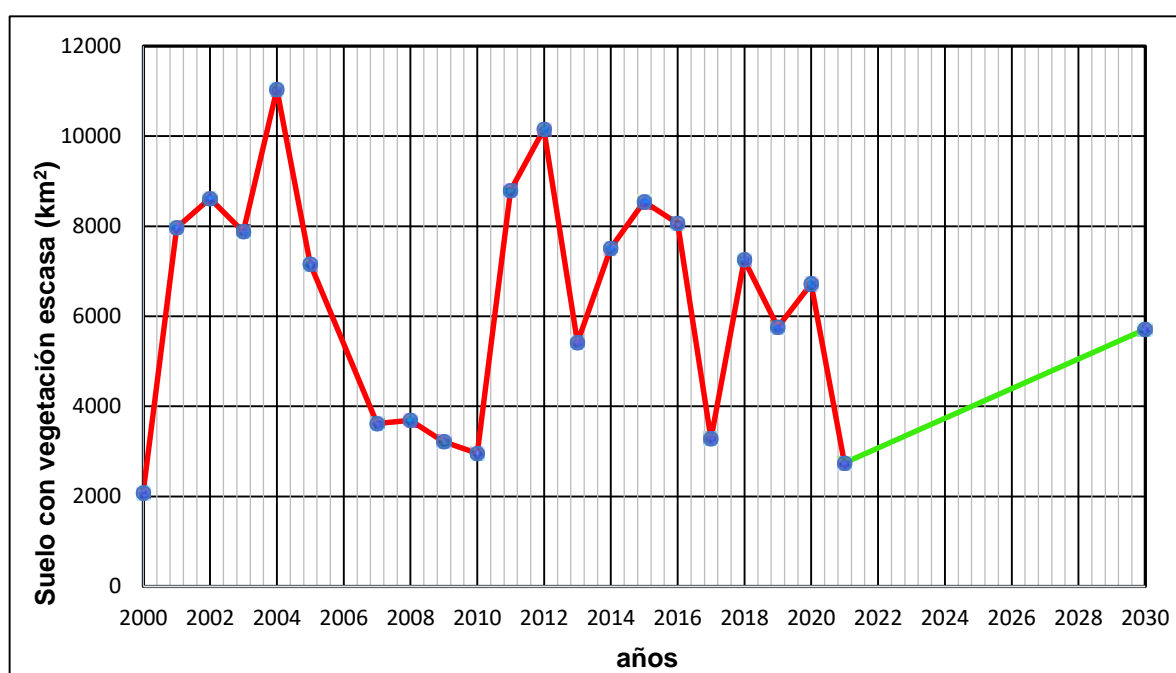
Desde una perspectiva interpretativa, esta estabilización proyectada sugiere que, de mantenerse las condiciones ambientales y antrópicas actuales, el sistema territorial analizado se encontraría en un estado de equilibrio dinámico, en el cual las pérdidas y recuperaciones de cobertura vegetal se compensan a lo largo del tiempo. Este tipo de comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios basados en series temporales de NDVI y cobertura del suelo en regiones semiáridas y altoandinas, donde la variabilidad interanual domina sobre las tendencias lineales de largo plazo (Forkel et al., 2021; Liu et al., 2023).

🌍 Evolución anual de área con vegetación escasa (km²) 2000-2021 proyectado al 2030

La Figura 7 muestra la evolución temporal anual del área clasificada como vegetación escasa para el periodo 2000–2021. Los resultados evidencian una alta variabilidad interanual, con valores que oscilan aproximadamente entre 2 000 km² y 11 000 km², lo que refleja un comportamiento dinámico y sensible a las condiciones ambientales y antrópicas que caracterizan el área de estudio.

Figura 7

Evolución anual del suelo con vegetación escasa (km²), 2000-2021 proyectado al 2030



Durante los primeros años de la serie (2000–2004), se observa un incremento significativo del área de vegetación escasa, alcanzando un máximo cercano a 11 000 km² en 2004. Posteriormente, entre 2005 y 2010, se registra una tendencia decreciente, con valores que descienden progresivamente hasta aproximadamente 3 000 km². Este patrón sugiere una transición temporal desde superficies con cobertura vegetal limitada hacia escenarios de mayor cobertura vegetal o, en algunos casos, hacia suelo desnudo, dependiendo de la intensidad de los factores climáticos y del uso del suelo.

A partir del año 2011, la serie presenta nuevamente fluctuaciones marcadas, con incrementos notables en 2012 y 2015, seguidos de descensos abruptos en 2013 y 2017.

Este comportamiento no lineal es consistente con lo reportado en estudios de dinámica de la vegetación basados en series temporales de NDVI, donde las categorías de vegetación escasa suelen actuar como estados transicionales entre coberturas vegetales más densas y áreas de suelo desnudo, respondiendo rápidamente a variaciones en la disponibilidad hídrica y a perturbaciones antrópicas (Forkel et al., 2021; Zhu et al., 2021).

La proyección al año 2030 se realizó mediante un modelo ARIMA, seleccionado tras evaluar la estacionariedad de la serie, la estructura de autocorrelación y los criterios de ajuste estadístico. Los resultados del modelo indican una tendencia general a la disminución moderada del área de vegetación escasa, proyectándose un valor cercano a 5 702 km² hacia el año 2030. Esta tendencia sugiere que, bajo condiciones similares a las observadas en el periodo histórico, la vegetación escasa tendería a reducirse gradualmente, ya sea por procesos de recuperación vegetal en años favorables o por su transición hacia categorías de mayor degradación en contextos de estrés ambiental persistente.

Desde el punto de vista ecológico, la reducción proyectada de la vegetación escasa puede interpretarse como el resultado de dos procesos contrapuestos. Por un lado, en años con mayor disponibilidad hídrica, estas áreas pueden evolucionar hacia estados de vegetación más vigorosa, incrementando los valores de NDVI. Por otro lado, en escenarios de déficit hídrico prolongado, sobrepastoreo o presión agrícola, la vegetación escasa puede degradarse hacia suelo desnudo, reduciendo su extensión espacial como categoría intermedia. Este doble comportamiento ha sido ampliamente documentado en regiones semiáridas y altoandinas, donde la vegetación responde de manera rápida y reversible a la variabilidad climática interanual (Vicente-Serrano et al., 2021; Zhang et al., 2022).

La comparación con estudios previos confirma la validez de los resultados obtenidos. Investigaciones recientes basadas en productos MODIS y análisis ARIMA han señalado que las clases de vegetación de baja densidad presentan mayor volatilidad temporal que las coberturas densas, pero también una mayor capacidad de recuperación bajo condiciones climáticas favorables (Liu et al., 2023). En este sentido, la proyección al 2030 obtenida en el presente estudio se alinea con los patrones regionales observados en ecosistemas de

montaña andinos, donde las tendencias de largo plazo suelen ser suaves, mientras que la variabilidad interanual domina la señal temporal.

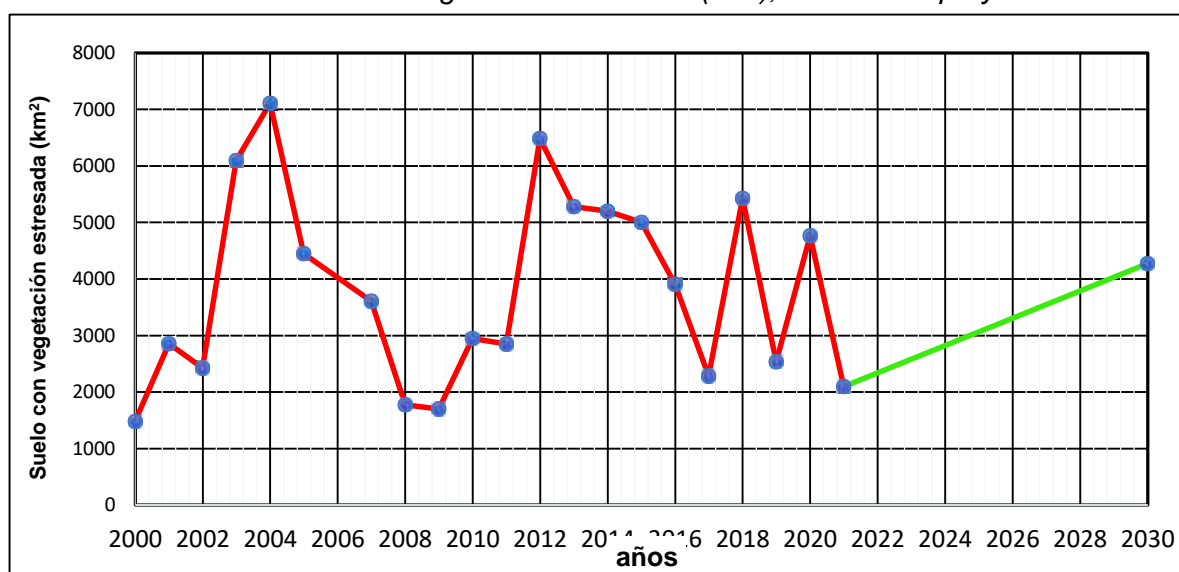
🌈 Evolución anual de área de suelo con vegetación estresada 2000-2021 proyectado al 2030

La Figura 8 muestra la dinámica temporal del área cubierta por vegetación estresada, definida por valores de NDVI entre 0.55 y 0.60, para el periodo 2000–2021, así como su proyección al año 2030. Los resultados evidencian un comportamiento altamente variable, caracterizado por incrementos y descensos abruptos en la extensión espacial de esta categoría de cobertura vegetal.

Durante los primeros años del periodo de análisis (2000–2004), el área con vegetación estresada experimentó un incremento significativo, pasando de 1 477 km² en 2000 a 7 105 km² en 2004. Este aumento puede interpretarse como una expansión de zonas con vegetación sometida a condiciones subóptimas, posiblemente asociadas a déficits hídricos moderados, irregularidad en las precipitaciones o incrementos en la temperatura superficial, factores que afectan negativamente la eficiencia fotosintética sin provocar una pérdida total de la cobertura vegetal (Pettorelli et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2021).

Figura 8

Evolución anual del suelo con vegetación estresada (km²), 2000-2021 proyectado al 2030



Posteriormente, entre 2005 y 2009, se observa una reducción progresiva del área con vegetación estresada, alcanzando un mínimo de 1 699 km² en 2009. Esta disminución sugiere una transición dinámica hacia otras categorías de cobertura, ya sea por recuperación parcial de la vegetación hacia estados más vigorosos durante años con condiciones climáticas favorables, o por degradación hacia categorías de vegetación escasa o suelo desnudo durante episodios de estrés más severo (Zhu et al., 2021).

Un segundo periodo de expansión se registra entre 2010 y 2014, destacando un pico de 6 482 km² en 2012, seguido de valores elevados y relativamente estables hasta 2014. Este patrón es consistente con lo reportado en estudios basados en series temporales MODIS en regiones semiáridas y andinas, donde la vegetación responde de manera sensible a la variabilidad interanual de las precipitaciones y a eventos climáticos extremos, como sequías o anomalías térmicas, que inducen estados transitorios de estrés fisiológico (Forkel et al., 2021; Wang et al., 2023).

A partir de 2015, se evidencia una tendencia general decreciente, con fluctuaciones interanuales, hasta alcanzar 2 092 km² en 2021, uno de los valores más bajos del periodo analizado. Esta reducción podría estar relacionada con una progresiva degradación de la cobertura vegetal, que habría desplazado parte de estas áreas hacia categorías de menor vigor (vegetación escasa o suelo desnudo), o con procesos de recuperación localizados en áreas específicas, reflejando la complejidad de la dinámica ecosistémica regional.

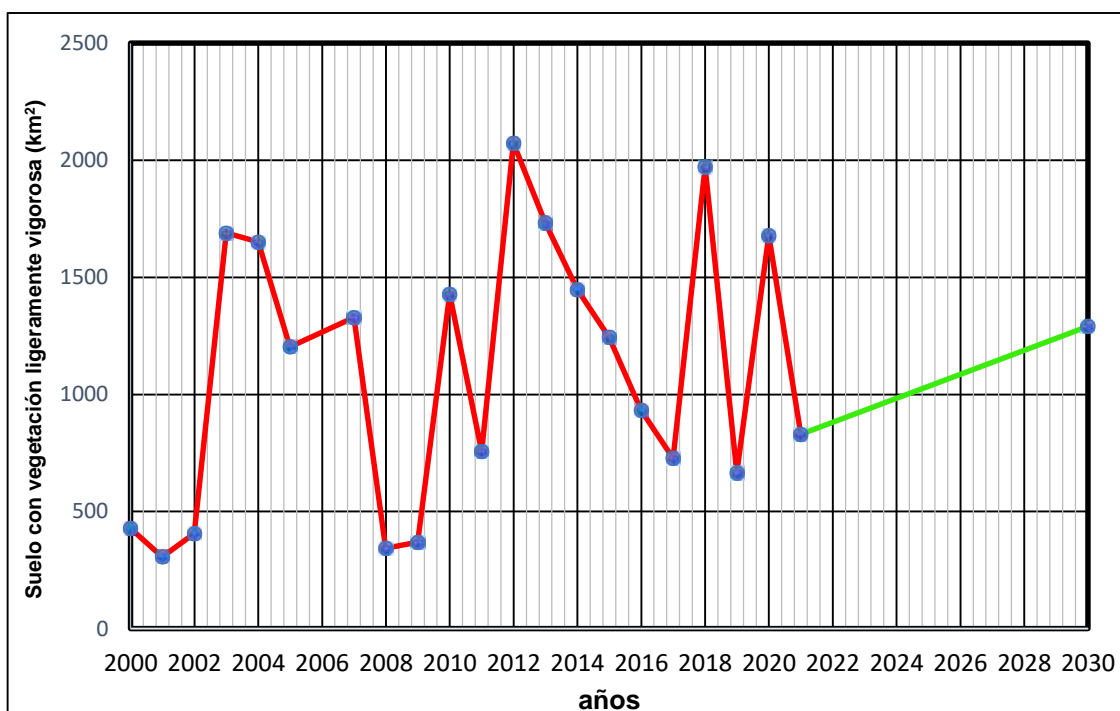
La proyección al año 2030, estimada en 4 270 km², indica un incremento moderado del área con vegetación estresada respecto a 2021. Este resultado sugiere que, bajo un escenario de continuidad de las condiciones climáticas y de uso del suelo actuales, la vegetación tendería a mantenerse en un estado intermedio de estrés, sin una recuperación sostenida hacia condiciones plenamente vigorosas. Proyecciones similares han sido reportadas en estudios que aplican modelos de series temporales (como ARIMA) a datos de NDVI, destacando que la vegetación estresada actúa como una categoría de transición altamente sensible a las variaciones climáticas futuras (Liu et al., 2023; Vicente-Serrano et al., 2021).

🌍 Evolución anual de área con vegetación ligeramente vigorosa 2000-2021 con proyección al 2030

La Figura 9 muestra la dinámica temporal del área ocupada por vegetación ligeramente vigorosa, definida por valores del NDVI comprendidos entre 0.61 y 0.63, durante el periodo 2000–2021, así como su proyección al año 2030. Esta categoría representa superficies con una actividad fotosintética moderadamente alta, propias de coberturas vegetales que, si bien presentan condiciones relativamente favorables, aún no alcanzan niveles óptimos de vigor.

Figura 9

Evolución anual del suelo con vegetación ligeramente vigorosa (km²), 2000-2021 proyectado al 2030



Durante los primeros años del periodo analizado (2000–2002), el área con vegetación ligeramente vigorosa se mantuvo en valores reducidos, oscilando entre 306 y 428 km², lo que indica una presencia limitada de esta cobertura en el territorio de estudio. A partir de 2003, se observa un incremento abrupto, alcanzando 1 689 km², seguido de valores elevados en 2004 (1 651 km²) y 2005 (1 203 km²). Este comportamiento sugiere una mejora

temporal en las condiciones ambientales, principalmente asociada a una mayor disponibilidad hídrica y a condiciones térmicas favorables, que promovieron el incremento de la biomasa y la eficiencia fotosintética (Pettorelli et al., 2021; Zhu et al., 2021).

Entre 2007 y 2009, se registra una disminución marcada, con valores que descienden hasta 343 km² en 2008 y 368 km² en 2009, lo cual evidencia una alta sensibilidad de esta categoría a la variabilidad climática interanual. Estudios previos han demostrado que la vegetación en estados intermedios de vigor responde rápidamente a periodos de estrés hídrico o térmico, desplazándose hacia categorías de menor vigor ante condiciones desfavorables (Forkel et al., 2021).

Un nuevo periodo de expansión se identifica entre 2010 y 2013, destacando un máximo de 2 073 km² en 2012, el valor más alto de toda la serie. Este pico puede interpretarse como un episodio de recuperación parcial de la cobertura vegetal, posiblemente vinculado a años con precipitaciones superiores al promedio o a una reducción temporal de presiones antrópicas. Resultados similares han sido reportados en estudios de dinámica de la vegetación andina, donde los picos de NDVI intermedio suelen coincidir con periodos climáticos favorables (Vicente-Serrano et al., 2021).

Desde 2014 hasta 2017, el área con vegetación ligeramente vigorosa muestra una tendencia decreciente, alcanzando un mínimo relativo de 727 km² en 2017, lo que sugiere una transición hacia estados de mayor estrés o hacia categorías de vegetación escasa. Posteriormente, en 2018, se observa un repunte significativo hasta 1 971 km², seguido de nuevas fluctuaciones interanuales hasta 2021 (829 km²), confirmando el carácter altamente dinámico y transicional de esta categoría de cobertura vegetal.

La proyección al año 2030, estimada en 1 290 km², indica un incremento moderado respecto a 2021, lo que sugiere una tendencia a la recuperación parcial de la vegetación hacia estados de vigor intermedio. Sin embargo, el valor proyectado se mantiene por debajo de los máximos históricos registrados, lo que evidencia que, bajo las condiciones actuales, la recuperación de la cobertura vegetal no sería plenamente sostenida. Proyecciones similares han sido documentadas en investigaciones que aplican modelos de series

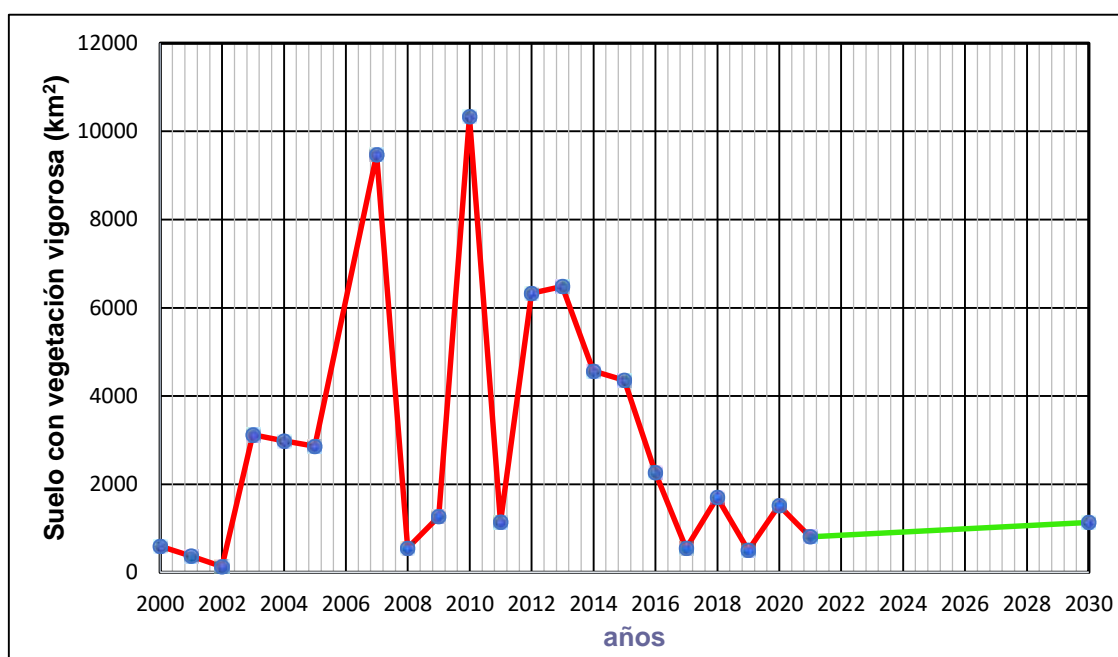
temporales a datos MODIS NDVI, destacando que las categorías intermedias de vigor actúan como indicadores tempranos de cambio ambiental frente a escenarios de variabilidad climática futura (Liu et al., 2023; Wang et al., 2023).

🌍 Evolución anual de área con vegetación vigorosa 2000-2021 proyectado al 2030

La Figura 10 muestra la dinámica temporal del área ocupada por vegetación vigorosa, caracterizada por valores del NDVI entre 0.64 y 0.66, los cuales representan coberturas con alta densidad foliar, elevada actividad fotosintética y óptimas condiciones fisiológicas de la vegetación. Esta categoría constituye el estado más favorable dentro de la clasificación de la cobertura vegetal y es altamente sensible a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de recursos hídricos.

Figura 10

Evolución anual del suelo con vegetación vigorosa (km²), 2000-2021 proyectado al 2030



Durante el periodo inicial 2000–2002, el área con vegetación vigorosa se mantuvo en valores muy reducidos (593–128 km²), lo que sugiere una presencia limitada de coberturas vegetales en óptimas condiciones. Este comportamiento es consistente con estudios que indican que, en regiones andinas, la vegetación de alto vigor suele restringirse a periodos

climáticos particularmente favorables o a zonas con condiciones edafoclimáticas específicas (Pettorelli et al., 2021).

A partir de 2003, se observa un incremento abrupto del área con vegetación vigorosa, alcanzando 3 117 km², manteniéndose elevada en 2004 y 2005. Este patrón sugiere un episodio de mejora significativa de las condiciones ambientales, probablemente asociado a una mayor disponibilidad hídrica y a temperaturas adecuadas que favorecieron el crecimiento de la biomasa y la eficiencia fotosintética. Sin embargo, en 2007 se registra un máximo excepcional de 9 467 km², seguido por una caída drástica en 2008 (548 km²), evidenciando una alta variabilidad interanual.

Un segundo pico extremo se identifica en 2010, cuando el área con vegetación vigorosa alcanza 10 325 km², el valor más alto de toda la serie. Este comportamiento confirma que la vegetación vigorosa responde de manera rápida y amplificada a condiciones ambientales óptimas, pero también presenta una marcada inestabilidad temporal, retornando a valores bajos en los años siguientes (2011: 1 139 km²). Investigaciones previas han documentado que los valores máximos de NDVI suelen coincidir con años excepcionalmente húmedos, mientras que su reducción abrupta refleja la influencia de sequías, heladas o estrés térmico (Forkel et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2021).

Entre 2012 y 2015, el área con vegetación vigorosa muestra valores relativamente elevados y más estables (6 326–4 354 km²), lo que sugiere un periodo de recuperación parcial y cierta estabilidad ecológica. No obstante, desde 2016 hasta 2019, se evidencia una tendencia decreciente, alcanzando mínimos de 544 km² en 2017 y 501 km² en 2019, lo que indica una reducción significativa de las superficies con vegetación en óptimas condiciones. Este comportamiento puede atribuirse a una combinación de variabilidad climática, incremento del estrés hídrico y presiones antrópicas, factores ampliamente reconocidos como determinantes en la degradación de la cobertura vegetal (Zhu et al., 2021).

En los años recientes (2020–2021), se observa una leve recuperación, con valores de 1 513 km² y 805 km², respectivamente, aunque sin alcanzar los niveles máximos históricos. La proyección al año 2030, estimada en 1 135 km², indica una recuperación moderada, pero

aún limitada, de la vegetación vigorosa. Este resultado sugiere que, bajo las tendencias actuales, las condiciones ambientales futuras permitirían solo una recuperación parcial y frágil de la cobertura vegetal de alto vigor.

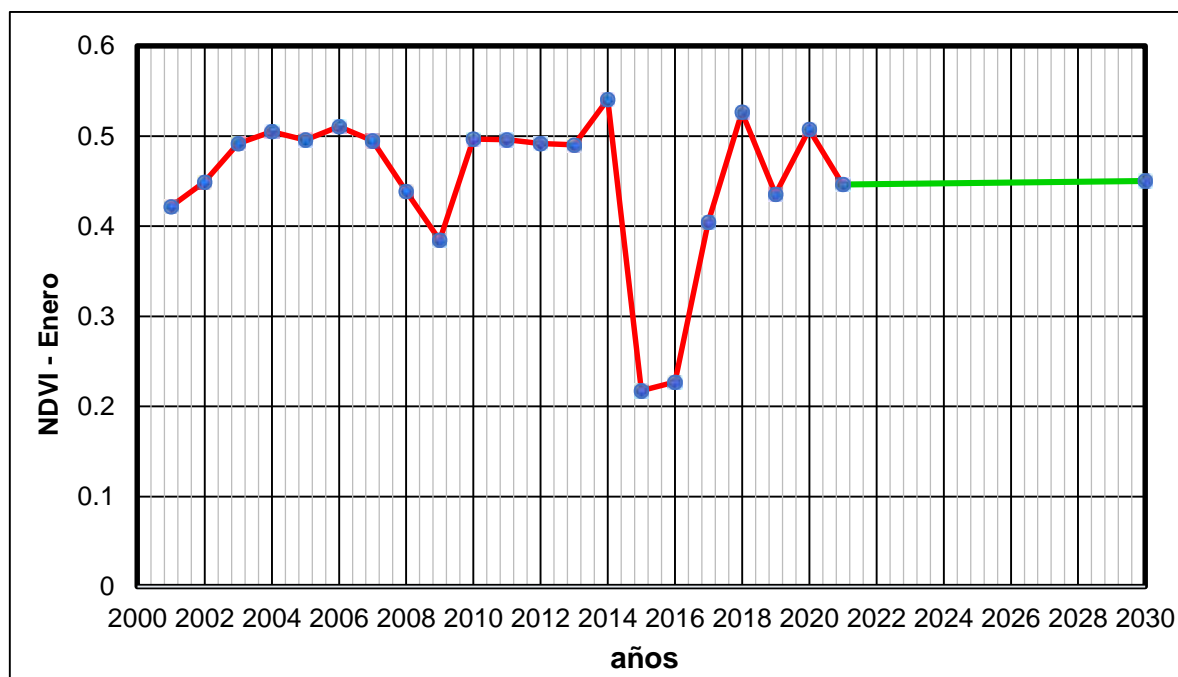
Este comportamiento proyectado es consistente con estudios basados en modelos de series temporales aplicados a datos MODIS NDVI, los cuales señalan que, en escenarios de cambio climático, las categorías de vegetación de mayor vigor tienden a reducir su extensión y a presentar una mayor intermitencia espacial y temporal (Liu et al., 2023; Wang et al., 2023).

4.1.4. Tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales proyectadas al 2030.

La Figura 11 muestra la serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al mes de enero en el periodo 2001–2021, revela variaciones interanuales significativas en el vigor vegetal de la zona de estudio (Chiara, Ayacucho, Perú), asimismo, proyecta al 2030.

Figura 11

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de enero del 2000-2021 proyectado al 2030

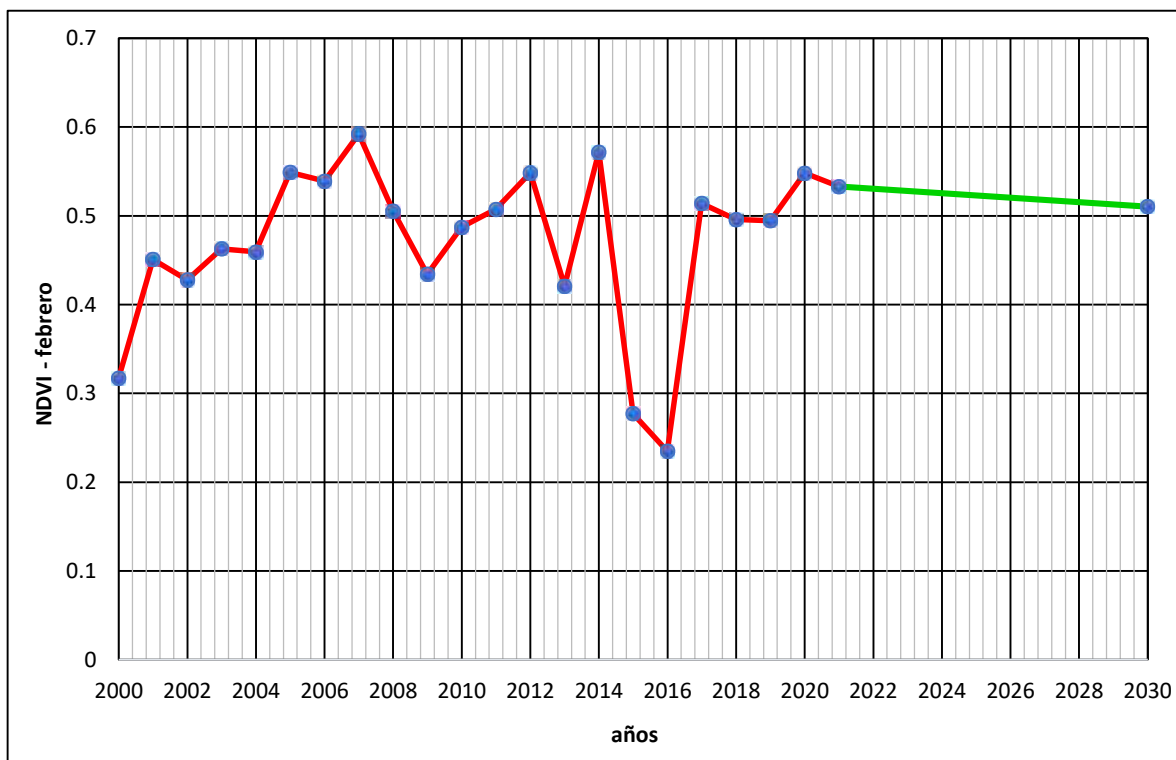


La Figura 11 evidencia que la dinámica del NDVI en enero durante el periodo 2001–2021 estuvo dominada por una elevada variabilidad interanual, con eventos críticos de degradación y recuperación parcial. La proyección ARIMA sugiere que, de mantenerse las condiciones actuales, el ecosistema analizado no experimentaría una mejora significativa de la vigorosidad vegetal hacia el 2030. La estabilización del NDVI alrededor de 0.45 indica una cobertura vegetal funcional, pero potencialmente vulnerable frente a nuevos eventos extremos. Estos resultados concuerdan con investigaciones recientes que reportan que, en regiones semiáridas y tropicales, las series de NDVI presentan recuperaciones parciales post-evento, pero sin cambios estructurales positivos a largo plazo cuando persisten presiones climáticas y antrópicas (Forkel et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2021), asimismo, refuerzan la necesidad de estrategias de gestión territorial y adaptación climática, orientadas a incrementar la resiliencia de la cobertura vegetal frente a escenarios futuros de variabilidad climática.

Por su parte la Figura 12, revela que la serie temporal del NDVI correspondiente al mes de febrero para el periodo 2000–2021 muestra un comportamiento marcadamente variable, con valores que oscilan entre 0.23 y 0.59, lo que evidencia una elevada sensibilidad de la cobertura vegetal a la variabilidad climática interanual. Los resultados confirman que la dinámica de la vegetación en febrero está dominada por eventos climáticos extremos y procesos de resiliencia ecológica, más que por una tendencia lineal de largo plazo. Según la proyección ARIMA sugiere que, bajo condiciones similares a las actuales, la cobertura vegetal en el mes de febrero mantendría una vigorosidad moderada hacia el año 2030 con NDVI DE 0.51, sin evidencias de degradación progresiva ni de recuperación estructural significativa. Este resultado es consistente con estudios recientes basados en productos MODIS, los cuales reportan que, en regiones expuestas a alta variabilidad climática, el NDVI tiende a oscilar alrededor de un valor de equilibrio determinado por la disponibilidad hídrica y la presión antrópica (Forkel et al., 2021; Wang et al., 2022).

Figura 12

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de febrero 2000-2021 proyectado al 2030



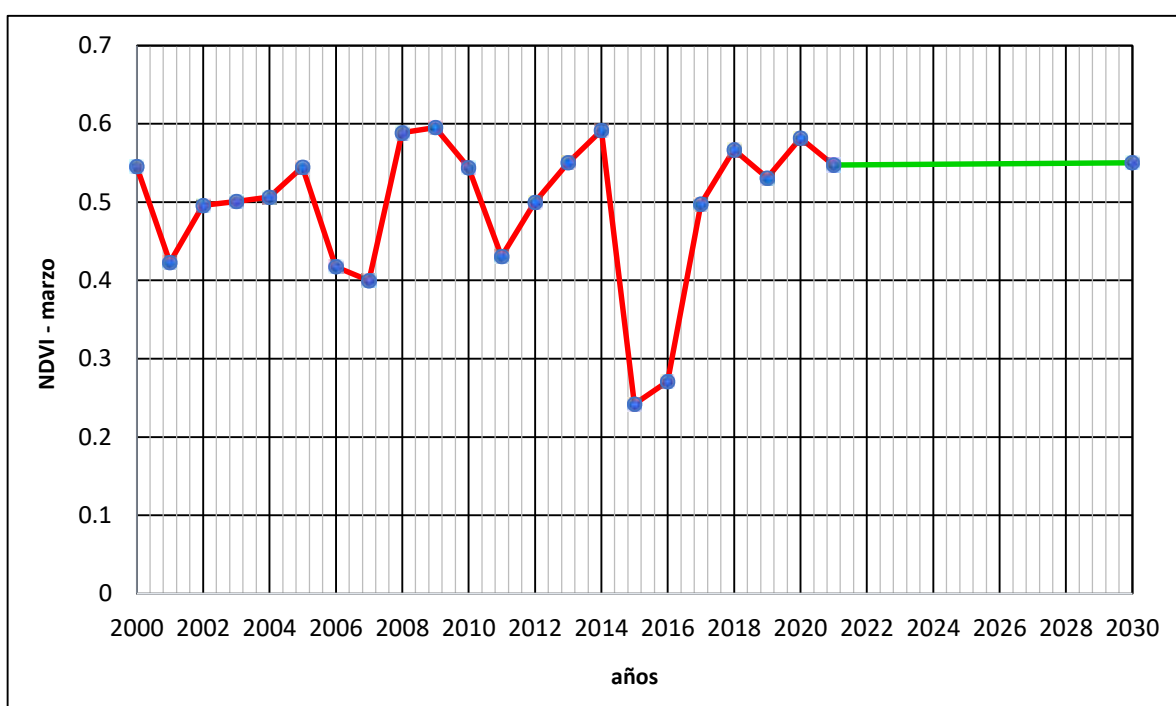
La serie temporal del NDVI correspondiente al mes de marzo para el periodo 2000–2021 mostrado en la Figura 13, evidencia una dinámica altamente variable, con valores comprendidos aproximadamente entre 0.24 y 0.59, lo que refleja la sensibilidad de la cobertura vegetal a las condiciones climáticas al inicio de la transición entre la estación lluviosa y la seca.

La proyección al 2030 con NDVI DE 0.55, indica un escenario de estabilidad relativa de la actividad fotosintética en marzo, sin evidencias de una degradación progresiva ni de una recuperación estructural marcada. Este resultado es consistente con la hipótesis de que, tras episodios extremos de estrés (2015–2016), el sistema vegetal ha mostrado una resiliencia parcial, retornando a un estado funcional similar al observado antes de dichos eventos.

Estudios basados en series MODIS NDVI han reportado comportamientos similares, donde la vegetación presenta una capacidad de recuperación posterior a sequías severas, aunque con una alta variabilidad interanual que limita la identificación de tendencias de largo plazo (Forkel et al., 2021; Zhu et al., 2021). Asimismo, investigaciones que aplican modelos ARIMA a series de NDVI mensuales señalan que las proyecciones tienden a converger hacia valores promedio recientes, reflejando la inercia del sistema ecológico bajo condiciones climáticas comparables (Liu et al., 2023).

Figura 13

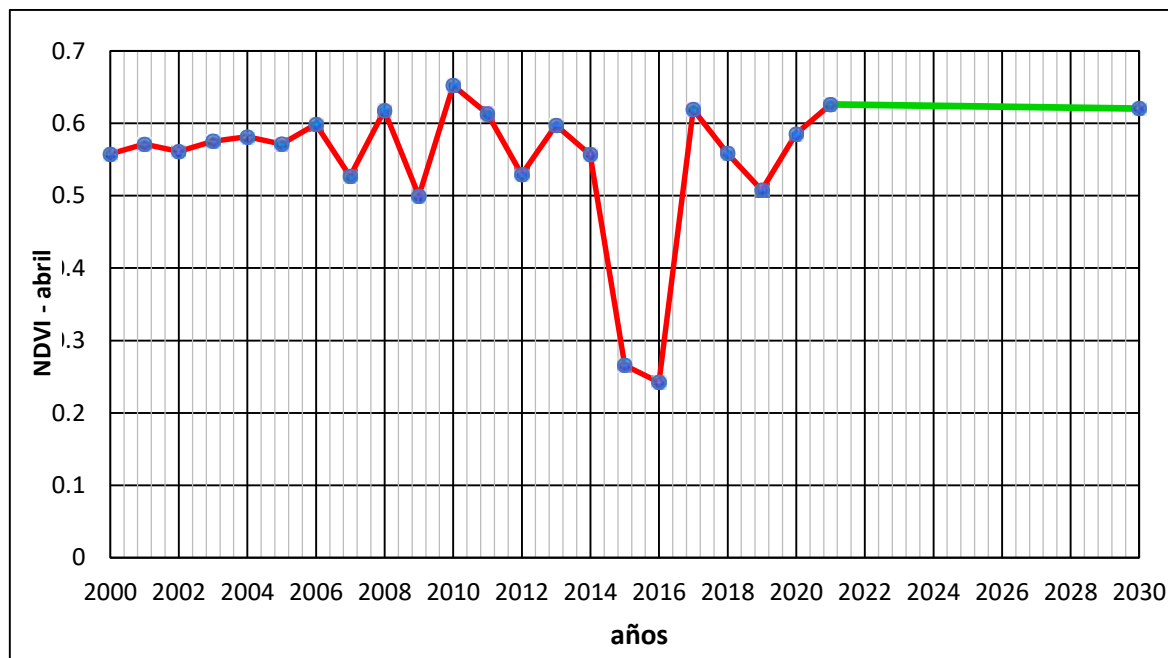
Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de marzo 2000-2021 proyectado al 2030



La serie temporal del NDVI correspondiente al mes de abril para el periodo 2000–2021, según la Figura 14 muestra valores predominantemente altos y estables, con un rango aproximado entre 0.50 y 0.65, lo que es característico de una etapa de máximo desarrollo vegetativo asociada al final de la temporada lluviosa en regiones tropicales y subtropicales.

Figura 14

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de abril 2000-2021 proyectado al 2030



Durante el periodo 2000–2014, el NDVI se mantiene mayoritariamente por encima de 0.55, reflejando una cobertura vegetal densa y fisiológicamente activa. Destacan picos relevantes en 2008, 2010 y 2011, con valores superiores a 0.61, indicativos de condiciones hídricas y térmicas óptimas para la actividad fotosintética.

En contraste, los años 2015 y 2016 registran una caída abrupta del NDVI (0.26 y 0.24, respectivamente), constituyendo una anomalía significativa dentro de la serie. Este descenso coincide con episodios de sequía extrema y alteraciones climáticas regionales, ampliamente documentados para ese periodo, que provocaron un marcado estrés hídrico y reducción temporal de la biomasa vegetal.

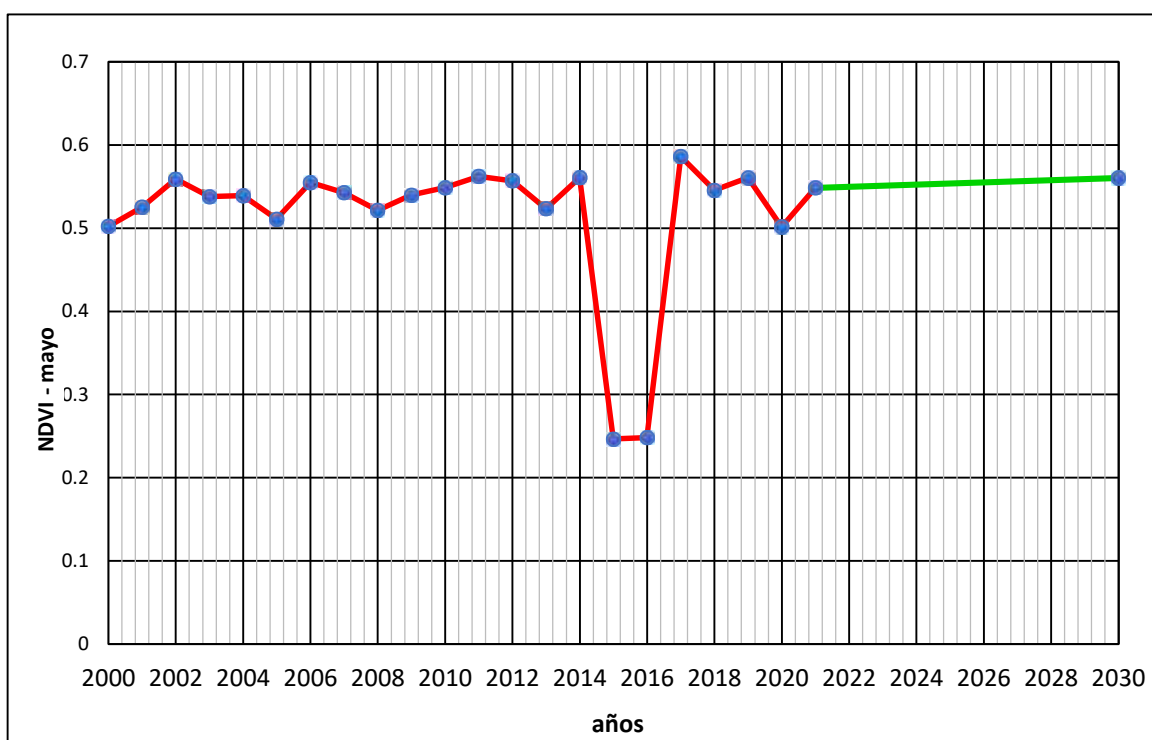
A partir de 2017, se observa una recuperación rápida y sostenida, alcanzando nuevamente valores altos (0.61), y manteniéndose relativamente estables hasta 2021. Este comportamiento evidencia una alta resiliencia del sistema vegetal, capaz de recuperar su funcionalidad tras perturbaciones severas.

La proyección ARIMA al 2030 para el mes de abril sugiere un escenario de estabilidad funcional de la cobertura vegetal, sin evidencia de una degradación progresiva del sistema. El valor proyectado (~ 0.62) es consistente con un estado de vegetación vigorosa, caracterizado por alta actividad fotosintética y adecuada disponibilidad de recursos hídricos. Resultado que concuerda con estudios que señalan que, en meses asociados al pico o final de la temporada húmeda, el NDVI tiende a presentar menor variabilidad estructural a largo plazo, aun bajo escenarios de variabilidad climática, debido al efecto amortiguador de la precipitación acumulada y la humedad del suelo (Zhu et al., 2021; Forkel et al., 2021).

La Figura 15 muestra la serie temporal del NDVI correspondiente al mes de mayo para el periodo 2000–2021, cuyos valores están comprendidos entre 0.50 y 0.59, lo que indica una cobertura vegetal moderada a vigorosa. Dicho comportamiento es consistente con una etapa de transición estacional, en la cual la vegetación aún refleja los efectos acumulados de la temporada de lluvias.

Figura 15

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de mayo 2000-2021 proyectado al 2030

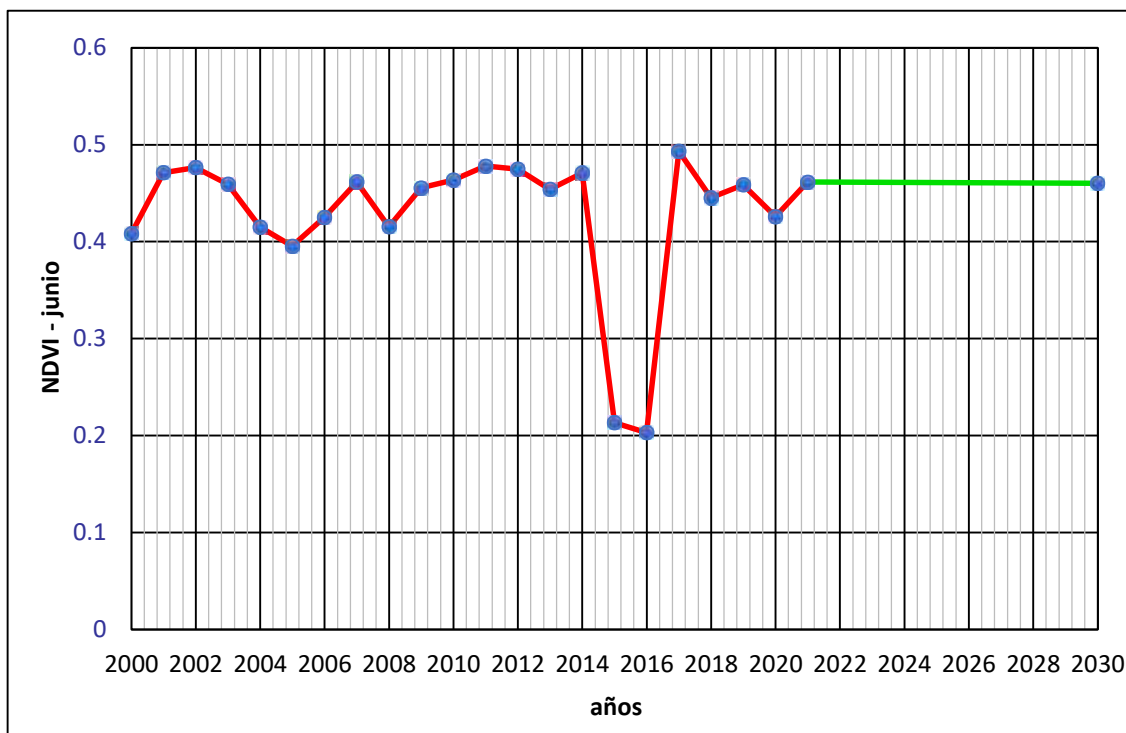


La proyección ARIMA al 2030 indica que el NDVI del mes de mayo tendería a mantenerse en valores moderadamente altos, cercanos al promedio histórico previo a los eventos extremos. El valor proyectado (~ 0.56) es ligeramente inferior al NDVI típico de abril, pero superior al observado en meses plenamente secos, lo cual concuerda con el carácter transicional de mayo dentro del ciclo fenológico anual. Estudios basados en series MODIS NDVI han reportado patrones similares, donde los meses posteriores al pico lluvioso muestran estabilidad relativa y menor sensibilidad a la variabilidad climática interanual (Forkel et al., 2021; Wang et al., 2022). Asimismo, investigaciones que emplean modelos ARIMA para la proyección del NDVI señalan que, en ausencia de cambios drásticos en el uso del suelo, las predicciones tienden a converger hacia valores medios representativos del régimen climático dominante (Liu et al., 2023). En este sentido, la Figura 15 refuerza la hipótesis de que la dinámica de la vegetación en el área de estudio presenta resiliencia y estabilidad estacional, aun frente a eventos extremos puntuales.

El comportamiento del NDVI de junio entre 2000 y 2021, junto con su proyección al 2030, la Figura 16 revela un sistema vegetal caracterizado por: (i) alta sensibilidad a eventos climáticos extremos, (ii) capacidad de recuperación parcial, y (iii) ausencia de una tendencia sostenida de mejora o deterioro a largo plazo. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas que destacan que la estabilidad promedio del NDVI puede ocultar episodios críticos de estrés, los cuales resultan fundamentales para la gestión ambiental y la planificación territorial (Alcaraz-Segura et al., 2013; de Jong et al., 2011). En consecuencia, el NDVI de 0.46 proyectado al 2030 debe interpretarse como un escenario de equilibrio frágil, altamente dependiente de la variabilidad climática futura y de las estrategias de manejo sostenible del suelo y la vegetación. La integración de estos resultados con información climática, hidrológica y socioambiental resulta esencial para una evaluación más precisa de la sostenibilidad de los ecosistemas analizados frente al cambio climático.

Figura 16

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de junio 2000-2021 proyectado al 2030



La serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el mes de julio entre 2000 y 2021 mostrado en la Figura 17 presenta valores mayoritariamente entre 0.166 y 0.394, con una clara anomalía negativa en 2015–2016, seguida de una recuperación progresiva hacia valores medios (~ 0.38). Esta dinámica refleja la combinación de factores climáticos, como la disponibilidad hídrica en transición hacia la estación seca, y procesos ecológicos de estrés y recuperación de la vegetación.

Los valores relativamente estables entre 2000 y 2014 ($0.35\text{--}0.39$) indican un patrón de cobertura vegetal que no experimenta tendencias sostenidas de mejora o degradación en el periodo histórico completo, pero sí oscilaciones significativas. Estas oscilaciones son típicas de sistemas vegetales sometidos a variaciones interanuales de precipitación y temperatura moderadas (Zhu et al., 2016; de Jong et al., 2011).

El descenso abrupto en 2015–2016 se asocia con condiciones de sequía severa que se ha observado en múltiples estudios recientes que analizan NDVI y estrés hídrico en ecosistemas tropicales y subtropicales (Zhang et al., 2019; Feng et al., 2016).

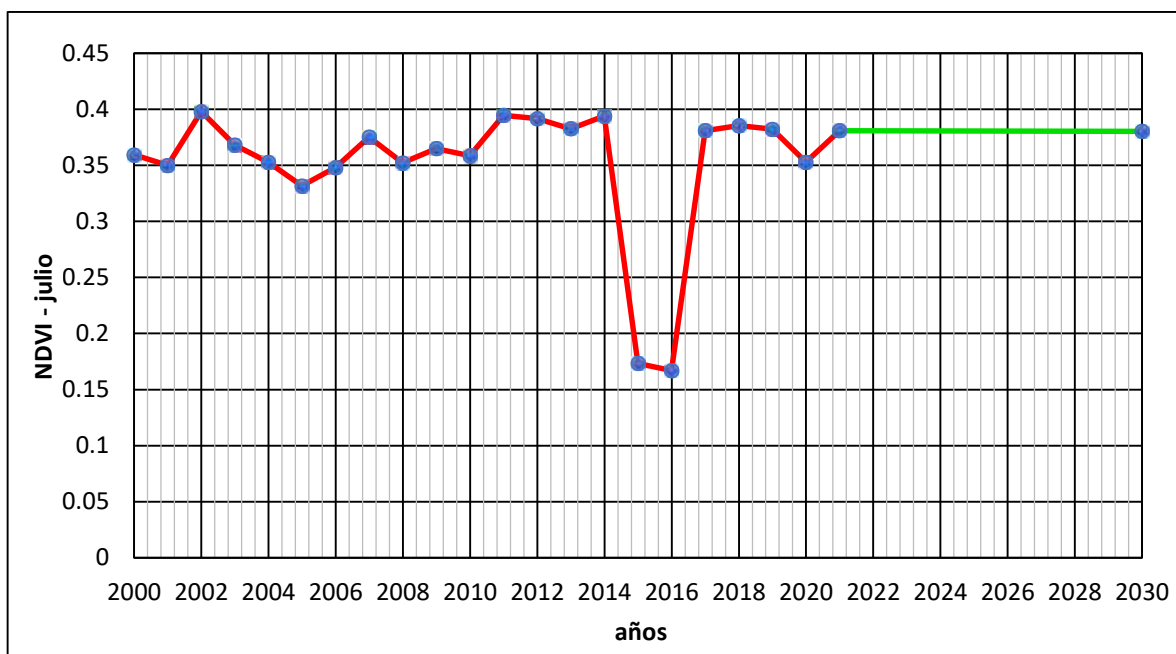
El NDVI de julio refleja fuertemente la influencia de la disponibilidad hídrica y las condiciones térmicas al inicio de la estación seca. Estudios globales han señalado que los índices de vegetación en meses secos están altamente correlacionados con la variabilidad de precipitación y eventos extremos de sequía (Li et al., 2018; Zhang et al., 2019).

La recuperación del NDVI a partir de 2017 sugiere un proceso de resiliencia ecológica. Estudios recientes muestran que muchos ecosistemas degradados o estresados pueden presentar recuperación del NDVI cuando las condiciones de precipitación y temperatura se normalizan (Peng et al., 2021; Zhang et al., 2019).

El ajuste con modelo ARIMA (1,1,1) y la proyección al 2030 sugieren que, bajo condiciones climáticas similares, el NDVI de julio tendería a estabilizarse en torno a 0.38–0.40, lo cual se ubica dentro del rango histórico medio.

Figura 17

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de julio 2000-2021 proyectado al 2030

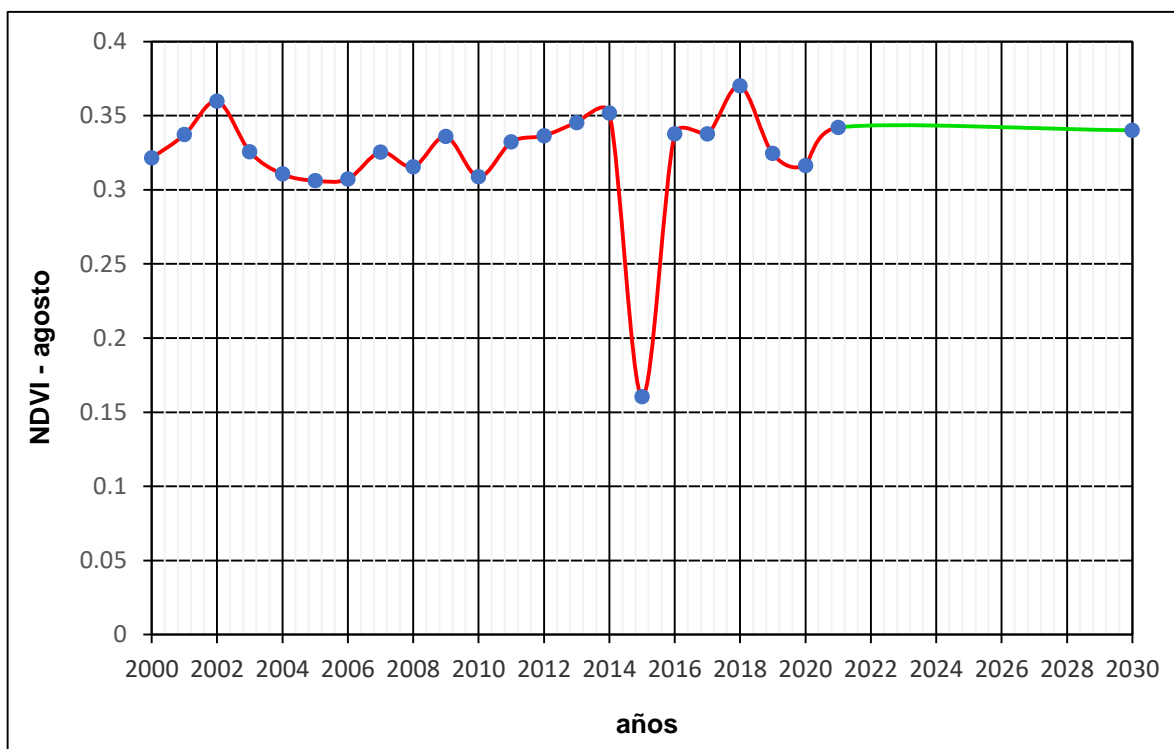


La serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al mes de agosto para el periodo 2000–2021, de acuerdo a la Figura 18, muestra valores comprendidos principalmente entre 0.30 y 0.36, lo que es indicativo de una cobertura vegetal moderada a baja, característica de etapas avanzadas de la estación seca o de transición climática en regiones con marcada estacionalidad. Este comportamiento concuerda con lo reportado en estudios que analizan la dinámica del NDVI en meses de menor disponibilidad hídrica, donde la actividad fotosintética disminuye de forma progresiva (Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020).

En conjunto, el análisis del NDVI de agosto para el periodo 2000–2021 revela una dinámica dominada por fluctuaciones interanuales, con un evento crítico de estrés vegetal en 2015 y una recuperación posterior que evidencia resiliencia del sistema. La aplicación del modelo ARIMA permitió generar una proyección robusta al 2030, la cual indica la estabilización del NDVI en valores cercanos al promedio histórico (0.34).

Figura 18

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de agosto 2000-2021 proyectado al 2030



La serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al mes de setiembre para el periodo 2000–2021, según la Figura 19, presenta valores que oscilan predominantemente entre 0.29 y 0.34, con un máximo relativo cercano a 0.36 en 2018 y un mínimo extremo en 2015 (NDVI = 0.16). Este rango caracteriza una cobertura vegetal baja a moderada, típica de periodos finales de la estación seca o de transición hacia la recuperación vegetativa, cuando la disponibilidad hídrica aún es limitada y la actividad fotosintética no alcanza su máximo anual.

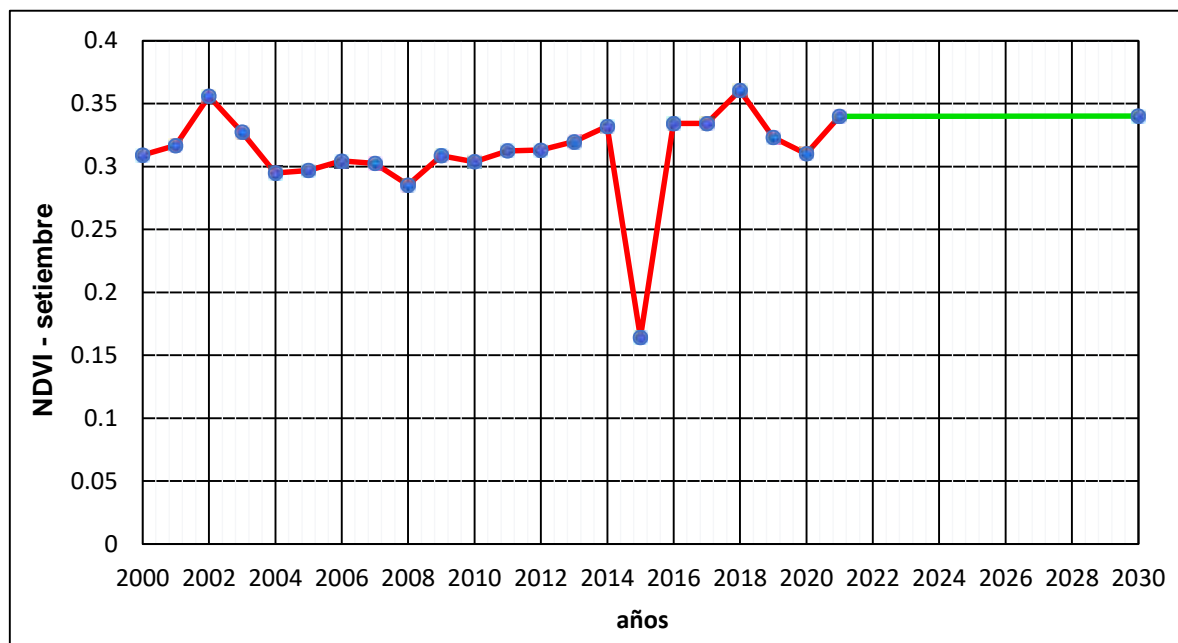
Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones publicadas en la última década que han aplicado modelos ARIMA y enfoques de series temporales al análisis del NDVI. Wang et al. (2020) demostraron que, en regiones con fuerte control climático, las proyecciones de NDVI tienden a estabilizarse alrededor de valores medios históricos cuando no existen forzantes antrópicos dominantes. De forma similar, Sun et al. (2021) reportaron que los modelos ARIMA reproducen adecuadamente la persistencia de la vegetación en meses secos o de transición, aun en presencia de perturbaciones interanuales.

Asimismo, Zhang et al. (2019) y Vicente-Serrano et al. (2021) documentaron que los descensos abruptos del NDVI asociados a sequías severas suelen ser seguidos por procesos de recuperación relativamente rápidos, siempre que la estructura del ecosistema no haya sido alterada permanentemente. Este patrón es plenamente consistente con la dinámica observada en la serie de setiembre, particularmente en el periodo posterior a 2015.

En suma, el análisis del NDVI correspondiente al mes de setiembre para el periodo 2000–2021 revela un sistema vegetal caracterizado por estabilidad interanual relativa, alta sensibilidad a eventos climáticos extremos y una notable capacidad de recuperación posterior. El ajuste mediante el modelo ARIMA permitió generar una proyección robusta al año 2030, la cual indica la persistencia de valores de NDVI cercanos al promedio histórico (0.34).

Figura 19

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de setiembre 2000-2021 proyectado al 2030



La serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al mes de octubre para el periodo 2000–2021, conforme a la Figura 20, muestra valores que oscilan mayoritariamente entre 0.29 y 0.37, con un promedio cercano a 0.34, lo que indica una cobertura vegetal baja a moderada. Este comportamiento es característico de meses de transición estacional, en los cuales la vegetación responde de manera sensible a la disponibilidad hídrica acumulada y a las condiciones térmicas previas, particularmente en regiones con marcada estacionalidad climática.

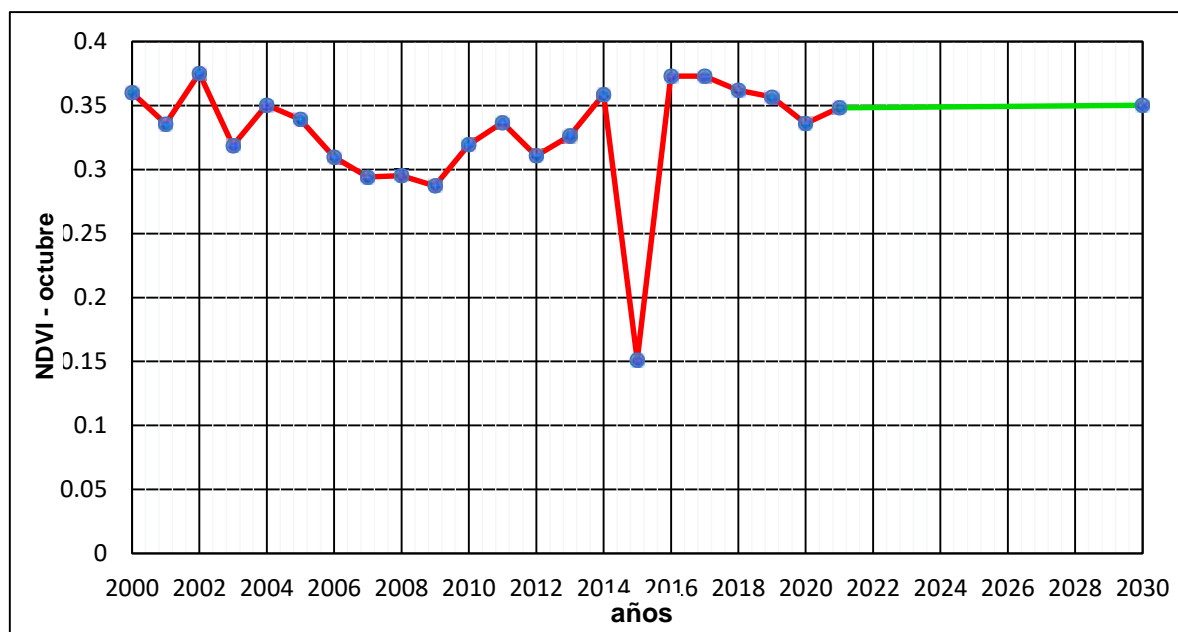
Los resultados obtenidos son coherentes con estudios publicados en la última década que han analizado la dinámica del NDVI mediante modelos ARIMA y enfoques de series temporales. Wang et al. (2020) demostraron que, en regiones con marcada variabilidad climática interanual, las proyecciones de NDVI tienden a converger hacia valores medios históricos, salvo que existan presiones antrópicas intensas. De manera similar, Sun et al. (2021) reportaron que los modelos ARIMA capturan eficazmente la persistencia del verdor vegetal y permiten identificar procesos de recuperación post-sequía.

Asimismo, Zhang et al. (2019) y Vicente-Serrano et al. (2021) documentaron que los eventos de sequía extrema generan caídas abruptas del NDVI, seguidas por fases de recuperación relativamente rápidas, patrón que coincide plenamente con la dinámica observada en la serie de octubre, particularmente en el periodo 2015–2017.

En conjunto, el análisis del NDVI correspondiente al mes de octubre para el periodo 2000–2021 evidencia un sistema vegetal caracterizado por variabilidad interanual moderada, alta sensibilidad a eventos climáticos extremos y una notable capacidad de resiliencia. El ajuste mediante el modelo ARIMA permitió generar una proyección robusta al año 2030, la cual indica la persistencia de valores de NDVI cercanos a 0.35–0.36, coherentes con el comportamiento histórico de la serie.

Figura 20

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de octubre 2000-2021 proyectado al 2030



La serie temporal de valores de NDVI correspondiente al mes de noviembre para el periodo 2000–2021 mostrado en la Figura 21, evidencia un comportamiento interanual marcadamente variable, con valores que oscilan entre 0.1876 (2015) y 0.4234 (2016–2017). En términos generales, los valores de NDVI se concentran mayoritariamente en el rango 0.32–0.41, lo que sugiere la presencia predominante de coberturas vegetales de vigor bajo

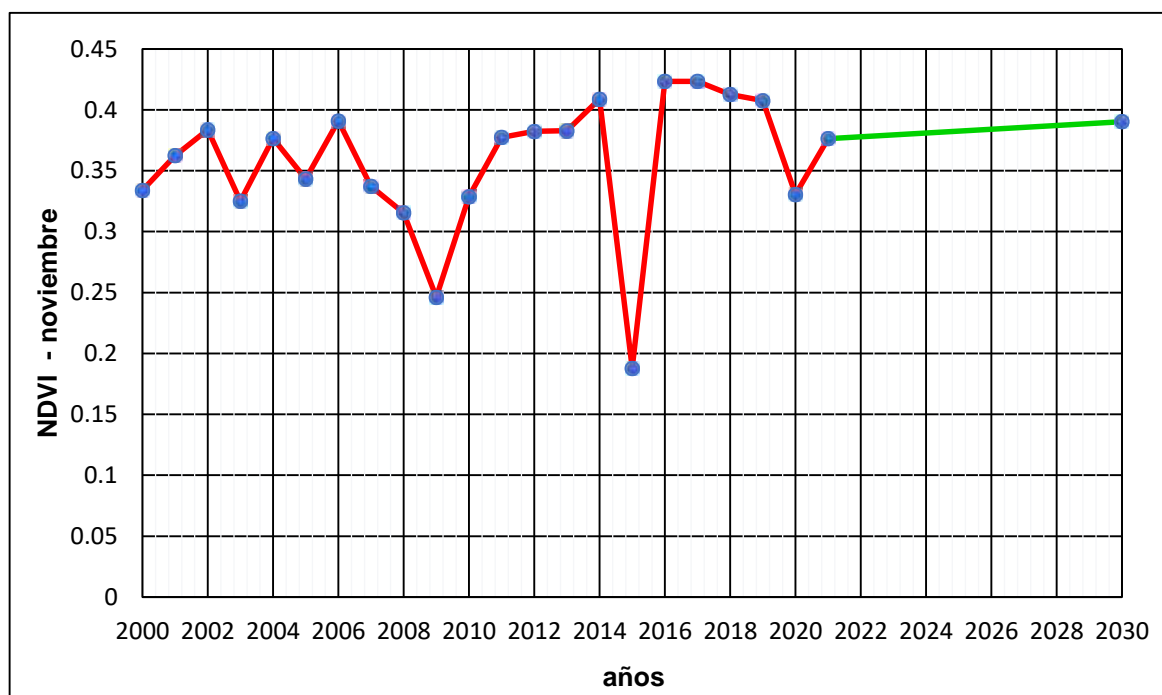
a moderado, típicas de ecosistemas sujetos a estrés hídrico estacional, limitaciones edáficas o presión antrópica, condiciones frecuentes en regiones semiáridas y subhúmedas durante el final del periodo seco o transición hacia la temporada de lluvias.

La proyección al año 2030 indica un valor de NDVI cercano a 0.38–0.40, lo que sugiere un escenario de estabilidad relativa, sin una tendencia clara hacia una degradación progresiva ni hacia una mejora sustancial de la cobertura vegetal para el mes de noviembre.

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones desarrolladas en los últimos diez años en ecosistemas similares. Por ejemplo, Vicente-Serrano et al. (2018) y Piao et al. (2020) reportan que el NDVI en regiones vulnerables al estrés hídrico muestra alta variabilidad interanual y respuestas rápidas a eventos extremos, pero sin tendencias monotónicas claras a largo plazo. Asimismo, Wang et al. (2020) y Dutta et al. (2022) demostraron que los modelos ARIMA son herramientas robustas para proyectar NDVI mensual, especialmente cuando el objetivo es evaluar escenarios tendenciales bajo condiciones climáticas relativamente estables.

Figura 21

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de noviembre 2000-2021 proyectado al 2030

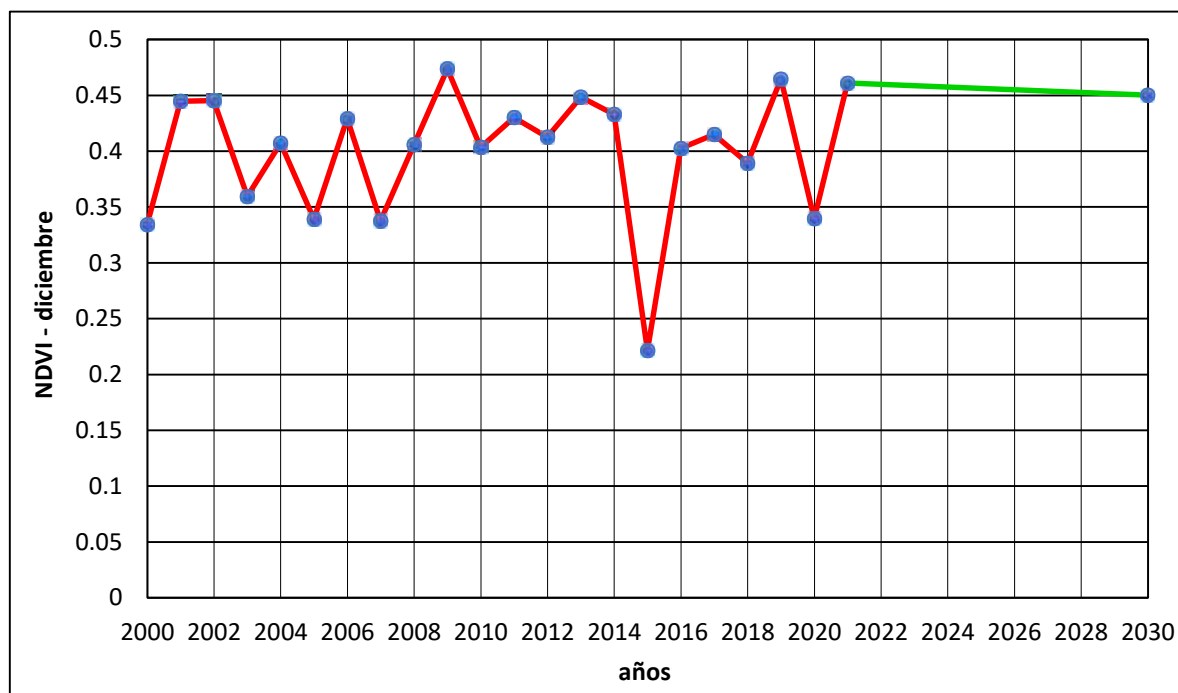


La serie temporal de valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al mes de diciembre para el periodo 2000–2021 evidencia una variabilidad interanual marcada, con valores que fluctúan entre 0.2213 (2015) y 0.4736 (2009). En términos generales, los valores predominantes se concentran en el rango 0.38–0.46, lo cual es característico de coberturas vegetales de vigor medio a alto, asociadas a una actividad fotosintética significativa durante el inicio y consolidación de la temporada húmeda en ecosistemas tropicales y subtropicales.

La proyección del NDVI al año 2030 indica un valor esperado cercano a 0.45, lo que sugiere un escenario de estabilidad relativa con ligera tendencia positiva para el mes de diciembre. Este resultado implica que, bajo condiciones climáticas y de uso del suelo similares a las históricas, no se evidenciaría una degradación progresiva de la cobertura vegetal, sino más bien una persistencia de niveles moderados a altos de vigor vegetal. Wang et al. (2020) y Hu et al. (2021) documentan valores de NDVI entre 0.40 y 0.50 en regiones con vegetación activa durante periodos húmedos, así como descensos abruptos asociados a sequías extremas.

Figura 22

Tendencias de la cobertura vegetal según NDVI meses de diciembre 2000-2021 proyectado 2030



4.1.5. Relación entre el NDVI, la temperatura y precipitación 2000-2021

La Figura 23 muestra la distribución espacial de los píxeles correspondientes a vegetación vigorosa para el año 2021, identificados a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los valores elevados de NDVI, generalmente superiores a 0.50, son indicativos de alta actividad fotosintética, elevada biomasa verde y buen estado fisiológico de la cobertura vegetal.

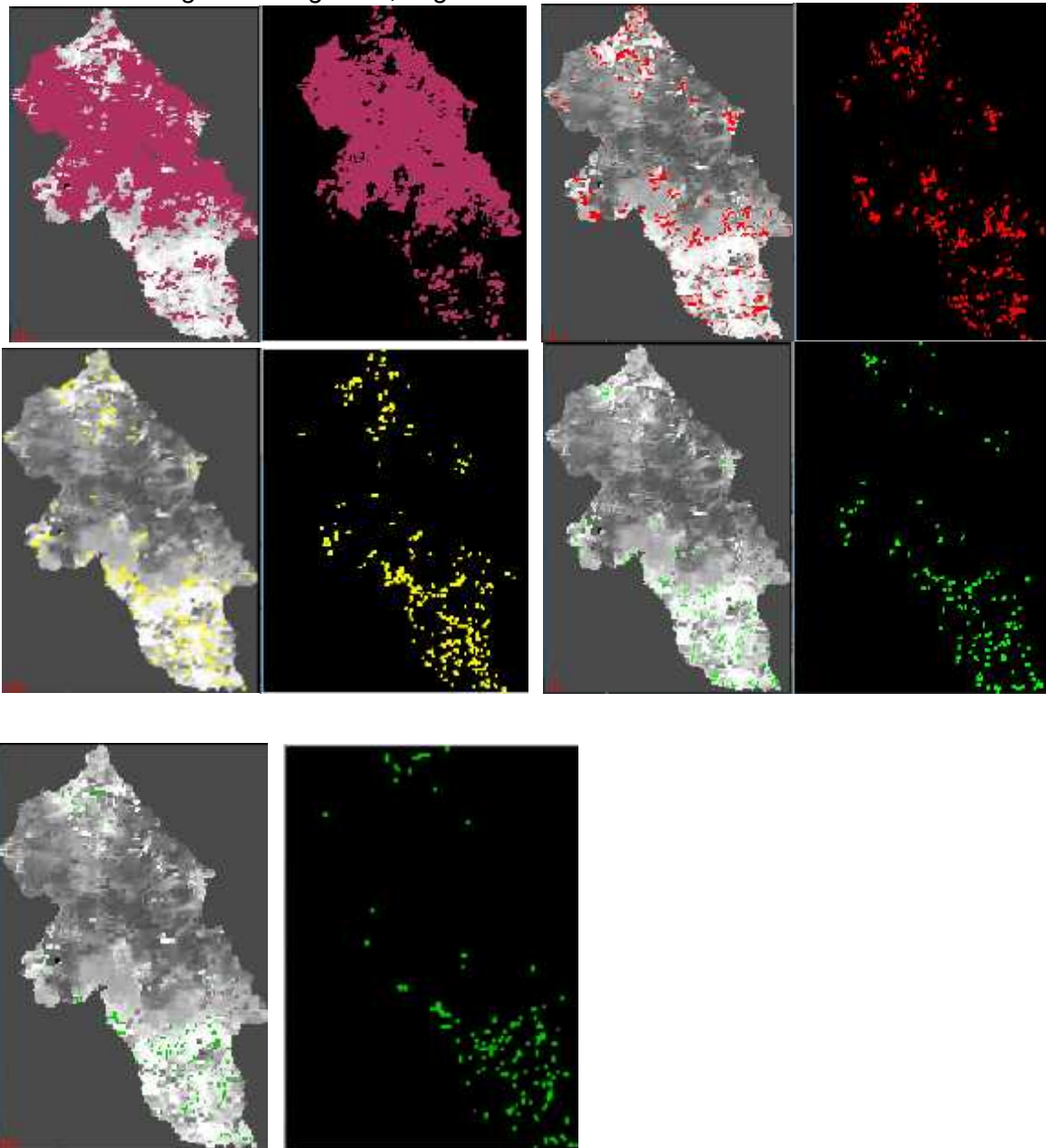
La concentración de estos píxeles refleja áreas donde las condiciones ambientales fueron favorables para el crecimiento vegetal durante el año analizado, lo que sugiere una adecuada disponibilidad de recursos, principalmente agua y radiación solar, así como una temperatura compatible con los rangos óptimos de la fotosíntesis. Este patrón espacial concuerda con lo señalado por estudios recientes, que destacan que valores altos de NDVI están estrechamente asociados con ecosistemas funcionalmente activos y con baja presencia de estrés hídrico o térmico (Pettorelli et al., 2018; Xue & Su, 2017).

Asimismo, la heterogeneidad espacial observada en la figura indica que el vigor vegetal no es uniforme en todo el territorio, lo que puede atribuirse a variaciones locales en el uso y cobertura del suelo, topografía, prácticas de manejo o disponibilidad hídrica. Investigaciones recientes sostienen que este tipo de variabilidad espacial del NDVI es un reflejo directo de la interacción entre factores climáticos y antrópicos, especialmente en paisajes agrícolas y agroecosistemas (Gu et al., 2019; Fensholt et al., 2020).

En conjunto, se evidencia que, durante 2021, una proporción significativa del área de estudio presentó vegetación vigorosa, lo que es coherente con la recuperación del NDVI observada en años recientes tras eventos de estrés climático previos. Este comportamiento respalda la utilidad del NDVI como un indicador robusto para evaluar el estado de la vegetación y monitorear cambios espaciales en el vigor vegetal a escala regional.

Figura 23

Píxeles de la vegetación vigorosa, según el indicador NDVI-2021



Comportamiento de la Temperatura y el NDVI del 2000 al 2021

En las Figuras 24 y 25 se presenta la relación de la variabilidad temporal de la cobertura vegetal, evaluada mediante el índice NDVI, en función de la temperatura y la precipitación. Los patrones observados son coherentes con los resultados reportados por Sobrino en su investigación sobre los cambios de la temperatura de la superficie terrestre y su relación con los valores de NDVI en Europa durante el periodo 1982–1999, donde se evidencia una interacción significativa entre ambos parámetros.

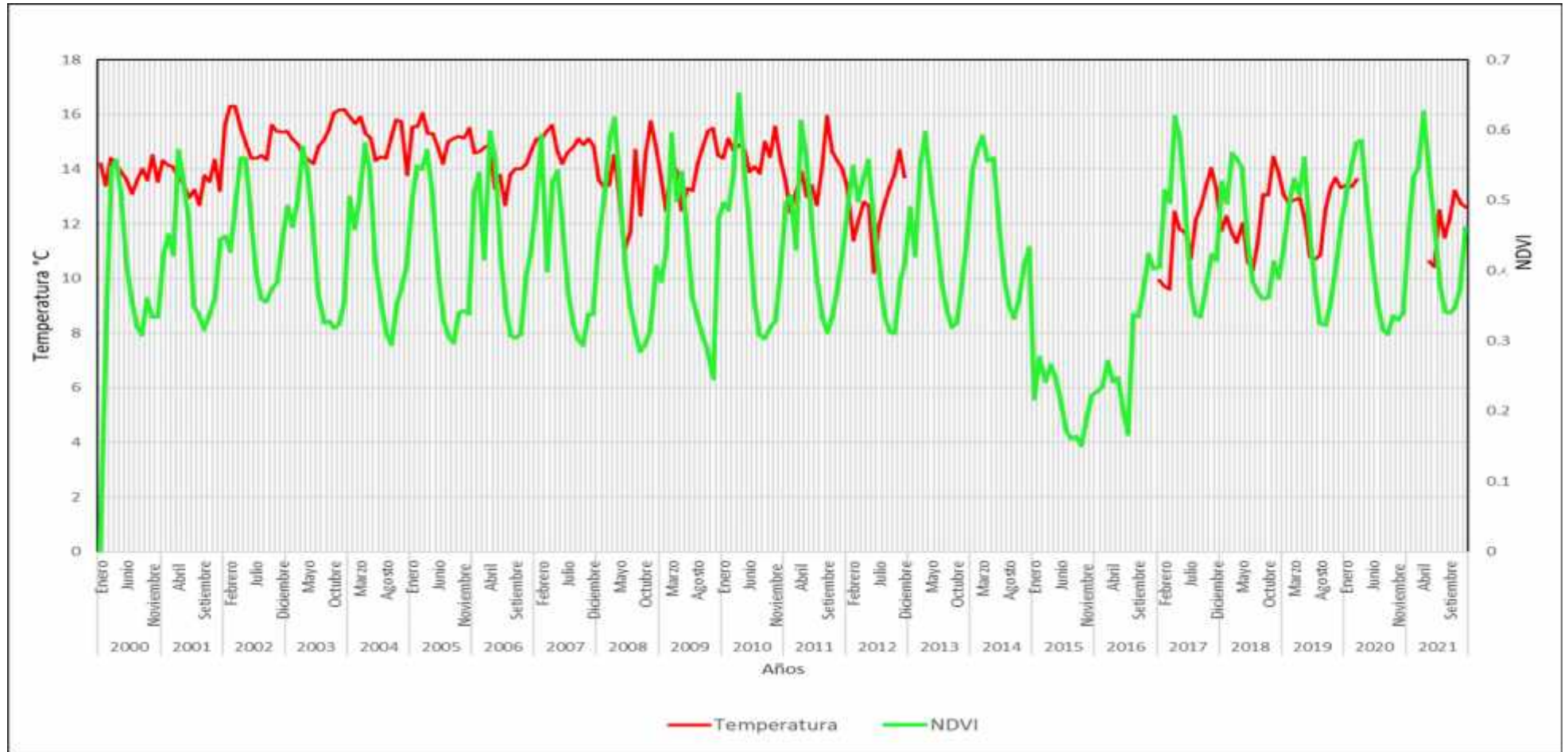
En este sentido, los resultados obtenidos permiten establecer la relación entre el NDVI y las condiciones ambientales, contribuyendo a la comprensión de la dinámica de la cobertura vegetal en el periodo 2000–2021. El análisis revela que, en general, incrementos en la temperatura se asocian con una reducción del vigor de la cobertura vegetal, mientras que posterior a los eventos de precipitación se observa un aumento del NDVI, lo que refleja una respuesta positiva de la vegetación ante una mayor disponibilidad hídrica.

La Figura 24 muestra la evolución temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y de la temperatura media durante el periodo 2000–2021. Los valores de NDVI oscilan aproximadamente entre 0.25 y 0.65, mientras que la temperatura media se mantiene dentro de un rango relativamente estrecho, cercano a 12–16 °C. Estos intervalos son característicos de ecosistemas con vegetación de vigor moderado a alto, desarrollados bajo condiciones térmicas estables, donde la actividad fotosintética no se ve limitada de forma significativa por el factor temperatura.

El NDVI evidencia un patrón estacional claramente definido, con valores máximos recurrentes (0.55–0.65) asociados a periodos de mayor crecimiento vegetal y actividad fotosintética, y mínimos (0.25–0.35) vinculados a fases de estrés ambiental. Este comportamiento coincide con lo reportado por Piao et al. (2019) y Zhu et al. (2016), quienes señalan que la variabilidad estacional del NDVI responde principalmente a la fenología vegetal y a la disponibilidad de recursos ambientales, particularmente el agua.

Figura 24

Comportamiento de la Temperatura y el NDVI del 2000 al 2021



Por su parte, la temperatura presenta oscilaciones estacionales regulares y una variabilidad interanual moderada, sin tendencias abruptas de incremento a lo largo del periodo analizado. Ello sugiere que, en este contexto, la temperatura actúa como un factor modulador, más que como un limitante directo del vigor vegetal, siempre que se mantenga dentro de rangos óptimos para la fotosíntesis (13–15 °C). Estudios recientes confirman que, en regiones con climas templados o subhúmedos, la respuesta del NDVI a la temperatura tiende a ser positiva solo hasta un umbral térmico específico, a partir del cual otros factores adquieren mayor relevancia (Peng et al., 2020; Zhao et al., 2022).

La relación entre NDVI y temperatura observada en la Figura 24 es positiva pero no estrictamente lineal. Este comportamiento se evidencia de manera clara durante el periodo 2015–2016, cuando el NDVI desciende hasta valores cercanos a 0.25, a pesar de que la temperatura se mantiene relativamente constante dentro del rango histórico. Este desacople indica que la dinámica de la vegetación estuvo condicionada por factores adicionales, principalmente la disponibilidad hídrica y la ocurrencia de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas. Resultados similares han sido documentados por Vicente-Serrano et al. (2018) y Yuan et al. (2019), quienes demostraron que la variabilidad del NDVI durante eventos secos extremos está más estrechamente relacionada con el déficit hídrico que con la temperatura del aire.

A partir de 2017, el NDVI muestra una recuperación progresiva, alcanzando nuevamente valores superiores a 0.50, lo que sugiere una elevada resiliencia del sistema vegetal frente a perturbaciones climáticas temporales. Este comportamiento es consistente con investigaciones recientes que indican que, en ausencia de cambios permanentes en el uso del suelo, la vegetación natural y seminatural puede recuperar su vigor estructural y funcional tras episodios de estrés climático, especialmente cuando se restablecen las condiciones de humedad (Wu et al., 2021; Zhang et al., 2020).

En síntesis, la Figura 24 confirma que la temperatura influye de manera significativa en la dinámica del NDVI, actuando como un factor regulador del vigor vegetal dentro de rangos térmicos óptimos. No obstante, la respuesta de la vegetación resulta del acoplamiento entre condiciones térmicas favorables y la disponibilidad de agua, lo que refuerza la necesidad de un enfoque integrado para la interpretación de la dinámica vegetal. Este resultado concuerda con el consenso científico reciente, que reconoce al NDVI como un indicador sensible a múltiples forzantes climáticos, siendo la precipitación y el balance hídrico factores determinantes en ecosistemas sujetos a variabilidad climática interanual.

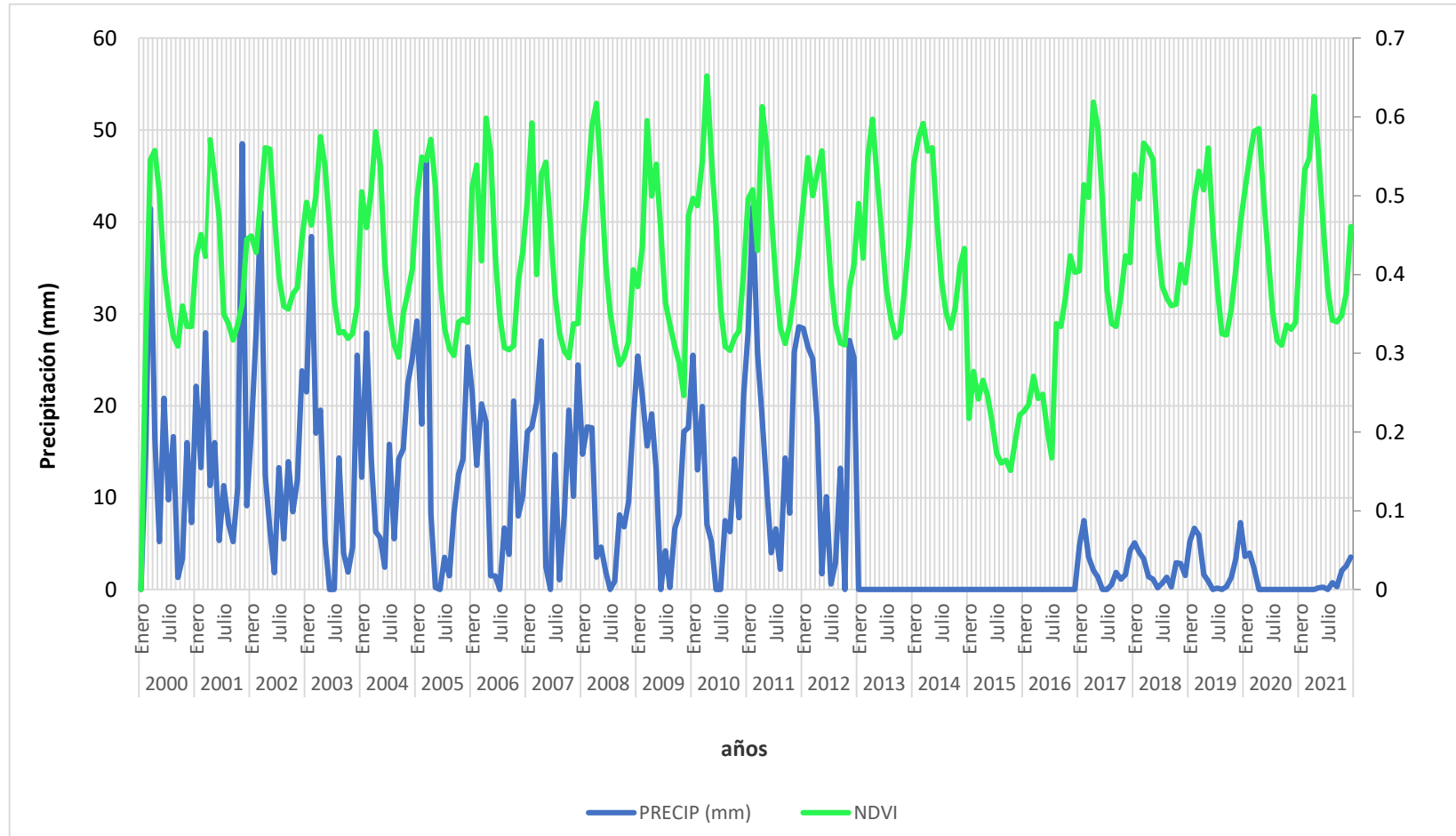
Los patrones observados son consistentes con investigaciones recientes que reportan que valores de NDVI entre 0.4 y 0.7 están asociados a vegetación activa bajo condiciones térmicas moderadas, mientras que descensos por debajo de 0.3 suelen relacionarse con estrés hídrico o climático, aun cuando la temperatura permanezca estable (Huang et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2020; Piao et al., 2022).

Comportamiento de la Precipitación y el NDVI del 2000 al 2021

La Figura 25 muestra una relación entre la precipitación y la dinámica del NDVI durante el periodo 2000–2021, confirmando que la disponibilidad hídrica constituye uno de los principales factores de control del vigor vegetal. Desde el marco teórico ecofisiológico, el NDVI se encuentra estrechamente vinculado a la actividad fotosintética y al contenido de clorofila, los cuales dependen directamente del estado hídrico del suelo y de la planta (Pettorelli et al., 2018). Los incrementos recurrentes del NDVI durante periodos de mayor precipitación reflejan una respuesta positiva de la vegetación a la recarga hídrica, favoreciendo procesos como la expansión foliar, la producción de biomasa y el aumento de la reflectancia en el infrarrojo cercano. Comportamiento ampliamente documentado en estudios recientes que demuestran que, en regiones con marcada estacionalidad climática, la precipitación explica gran parte de la variabilidad interanual del NDVI, superando incluso la influencia de la temperatura (Fensholt et al., 2015; Zhu et al., 2016).

Figura 25

Comportamiento de la Precipitación y el NDVI del 2000 al 2021



Por el contrario, los descensos del NDVI asociados a periodos de baja o irregular precipitación evidencian condiciones de estrés hídrico, las cuales reducen la eficiencia fotosintética y aceleran procesos de senescencia vegetal. Este patrón coincide con la teoría de limitación hídrica, que establece que, en ecosistemas naturales y agrícolas, el agua es el principal factor limitante del crecimiento vegetal cuando las temperaturas se mantienen dentro de rangos fisiológicamente tolerables (IPCC, 2021).

Asimismo, se identifican episodios en los que el NDVI no responde de manera inmediata a los eventos de precipitación, lo que sugiere la existencia de efectos de rezago temporal. Estos rezagos han sido reportados por investigaciones recientes, las cuales indican que la respuesta del NDVI depende de la intensidad, duración y distribución de la precipitación, así como de las características edáficas y del tipo de cobertura vegetal (Wu et al., 2015; Ding et al., 2020).

En conjunto, los resultados representados en la Figura 25 respaldan el enfoque conceptual que considera al NDVI como un indicador integrador del estado de la vegetación, sensible a la variabilidad hidrometeorológica. La evidencia empírica observada concuerda con antecedentes científicos recientes que destacan que la precipitación actúa como el principal modulador de la productividad vegetal en escalas temporales interanuales, especialmente en contextos de variabilidad climática y eventos extremos (Piao et al., 2020; IPCC, 2021).

4.1.6. NDVI presenta variación en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales.

El Cuadro 6 muestra la evolución estacional del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el periodo 2000–2021, así como su proyección al año 2030, permitiendo evaluar la dinámica temporal del vigor vegetal bajo un enfoque estacional. Los valores de NDVI registrados oscilan, en términos generales, entre 0.16 y 0.56, rangos característicos de coberturas vegetales con vigor bajo a moderado, y coherentes con ecosistemas sujetos a variabilidad climática interanual.

Cuadro 6

Datos del NDVI por estaciones del 2000 al año 2030

años	verano	otoño	invierno	primavera
2000	0.3650	0.4906	0.3422	0.3422
2001	0.4432	0.4966	0.3550	0.3550
2002	0.4464	0.5205	0.3900	0.3900
2003	0.4800	0.4986	0.3225	0.3225
2004	0.4761	0.5037	0.3519	0.3519
2005	0.5125	0.4729	0.3315	0.3315
2006	0.4948	0.4882	0.3585	0.3585
2007	0.4872	0.4865	0.3185	0.3185
2008	0.4858	0.5126	0.3149	0.3149
2009	0.4635	0.5054	0.3047	0.3047
2010	0.4942	0.5372	0.3261	0.3261
2011	0.5065	0.4954	0.3570	0.3570
2012	0.4985	0.5156	0.3507	0.3507
2013	0.4621	0.5248	0.3626	0.3626
2014	0.5409	0.5386	0.3817	0.3817
2015	0.2354	0.2536	0.1676	0.1676
2016	0.2625	0.2393	0.3873	0.3873
2017	0.4462	0.5598	0.3873	0.3873
2018	0.4978	0.5187	0.3832	0.3832
2019	0.4719	0.5288	0.3742	0.3742
2020	0.5060	0.5045	0.3258	0.3258
2021	0.5022	0.5269	0.3737	0.3737
2030	0.4182	0.5288	0.2772	0.2772

Desde una perspectiva estacional, se observa que el otoño presenta sistemáticamente los valores más elevados de NDVI (0.49–0.56), lo que indica que esta estación concentra las condiciones más favorables para el desarrollo vegetal. Este comportamiento puede atribuirse a la combinación de humedad residual del periodo lluvioso, temperaturas moderadas y una menor evapotranspiración, condiciones que optimizan la actividad fotosintética. Este patrón coincide con lo reportado por Piao et al. (2020) y Fensholt et al. (2015), quienes señalan que, en regiones con marcada estacionalidad climática, la máxima productividad vegetal suele alcanzarse en estaciones de transición con adecuada disponibilidad hídrica.

El verano muestra valores intermedios de NDVI (0.36–0.54), reflejando un vigor vegetal moderado. Aunque las temperaturas más altas pueden favorecer el crecimiento, la posible limitación hídrica y el incremento de la evapotranspiración restringen la respuesta positiva de la vegetación. Esta relación no lineal entre temperatura y NDVI ha sido ampliamente documentada, indicando que temperaturas elevadas sin suficiente disponibilidad de agua pueden inducir estrés fisiológico (Zhu et al., 2016; IPCC, 2021).

Por el contrario, el invierno y la primavera presentan los valores más bajos de NDVI (0.30–0.39), lo que sugiere una reducción de la actividad fotosintética asociada a temperaturas más bajas y, en algunos casos, a una menor radiación solar. Estos resultados concuerdan con la teoría ecofisiológica que establece que la fenología vegetal responde de manera diferenciada a los gradientes térmicos y radiativos a lo largo del año (Pettorelli et al., 2018).

Un aspecto crítico del análisis corresponde al periodo 2015–2016, donde se registra un descenso abrupto del NDVI en todas las estaciones, alcanzando valores mínimos cercanos a 0.17–0.26. Este comportamiento sugiere la ocurrencia de un evento de estrés ambiental severo, posiblemente asociado a sequías extremas o anomalías climáticas, como eventos El Niño intensos. Estudios recientes indican que estos eventos pueden generar reducciones significativas y simultáneas del NDVI en múltiples estaciones del año, afectando la productividad vegetal regional (Ding et al., 2020; IPCC, 2021).

Posteriormente, entre 2017 y 2021, se observa una recuperación progresiva del NDVI, especialmente en otoño e invierno, lo que evidencia una alta resiliencia del sistema vegetal. Este proceso de recuperación ha sido descrito en la literatura como una respuesta adaptativa de los ecosistemas cuando no se producen cambios permanentes en el uso del suelo (Piao et al., 2020). La proyección al 2030 indica una ligera disminución del NDVI en verano e invierno, mientras que el otoño mantiene valores relativamente estables (0.53). Este resultado sugiere que, bajo escenarios de continuidad climática, la estacionalidad seguirá siendo un factor determinante del vigor vegetal, aunque con una posible intensificación de los periodos de estrés en estaciones más vulnerables. Dichas tendencias coinciden con proyecciones recientes que advierten sobre un aumento de la variabilidad climática y su impacto diferencial sobre la vegetación según la estación del año (IPCC, 2021; Piao et al., 2020).

4.2. Resultado inferencial

La elección de la prueba estadística se tuvo en cuenta en tres aspectos: plan de investigación, número de mediciones y escala de variables. También se comprobó si los datos de la muestra tenían una distribución normal o no, según pruebas estadísticas, con 5% de error y 95% de confianza. Por tanto, el procesamiento estadístico inferencial se realizó utilizando el software SPSS en el cálculo de la normalidad de los datos con la prueba de Kolmogorov- Smirnov Lilliefors (>0.05) y Shapiro Wilk (>0.05) para acotar las hipótesis.

4.2.1. Dinámica de la vegetación al 2030 según el NDVI periodo 2000-2021

Prueba de hipótesis general

H₀: Las condiciones ambientales, expresadas a través del tiempo y las variables climáticas (temperatura y precipitación), no influyen significativamente en la dinámica de la cobertura

vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho) durante el periodo 2000–2021 y en su proyección al año 2030, evaluadas mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

H₁: Las condiciones ambientales, expresadas a través del tiempo y las variables climáticas (temperatura y precipitación), influyen significativamente en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho) durante el periodo 2000–2021 y en su proyección al año 2030, evaluadas mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Tras observar los datos del cuadro 7 y dado que la muestra es mayor a 50 se consideró la prueba de Kolmogórov-Smirnov, así mismo se observa que las variables no siguen una distribución normal ya que el p-valor es $<0,05$. Para la comprobación de las hipótesis, se realizó la prueba no paramétrica, aceptando en todos los casos que, las condiciones ambientales y la técnica de teledetección satelital, permiten conocer la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, en Chiara-Ayacucho.

Cuadro 7

Pruebas de normalidad NDVI

NDVI	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
	,072	263	,002	,978	263	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Los resultados de este estudio son fundamentales porque permitieron comprender la influencia de las condiciones ambientales y la técnica de teledetección satelital en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara, Ayacucho, desde el 2000 hasta el 2021, con una proyección al 2030. El procesamiento de imágenes satelitales y el análisis del NDVI fueron cruciales para obtener una visión clara de esta dinámica. Asimismo, las condiciones ambientales de temperatura y precipitación ejercieron una influencia cuantificable en los patrones de cambio de la vegetación observados (Figuras 5, 25 y 26).

4.2.2. Cambios en la dinámica de la cobertura vegetal según las fluctuaciones del NDVI

Prueba de hipótesis específica 1

H₀: No existen cambios significativos en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021, evidenciadas por la fluctuación del NDVI.

H₁: Existen cambios significativos en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021, evidenciadas por la fluctuación del NDVI.

Se acepta H₁, en consecuencia, la teledetección demostró ser una técnica efectiva para conocer y proyectar la dinámica de la cobertura vegetal del distrito. Estos hallazgos coinciden con Hernández (2020), quien, al analizar la tendencia del NDVI durante 10 años, determinó el deterioro ambiental en las zonas media y baja de la subcuenca del río Bao.

4.2.3. Variaciones en la dinámica de la cobertura vegetal según las fluctuaciones del NDVI

Prueba de hipótesis específica 2

H₀: Las áreas según el NDVI de suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa no presentan cambios significativos en su extensión espacial durante el periodo 2000–2021.

H₁: Las áreas según el NDVI de suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa presentan cambios significativos en su extensión espacial durante el periodo 2000–2021.

Se acepta H₁, de manera similar, Ceceña et al. (2021), en su artículo sobre la evaluación de cambios en la cobertura vegetal en Isla Guadalupe, emplearon índices de vegetación para cuantificar el cambio en la superficie y la tasa de variación de las comunidades vegetales. La eficacia de la teledetección también es respaldada por Monje (2020), quien encontró similitudes entre los resultados del monitoreo de atributos de calidad de la cobertura verde usando métodos tradicionales y los valores de NDVI para la recuperación del césped bermuda Tifway.

4.2.4. Evolución temporal anual de áreas del vigor de vegetación 2000–2021 con proyección al 2030.

Prueba de hipótesis específica 3

H_0 : La evolución temporal de las áreas con vegetación no permiten identificar tendencias diferenciadas en los niveles de vigor de la vegetación y proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal al año 2030.

H_1 : La evolución temporal de las áreas con vegetación permite identificar tendencias diferenciadas en los niveles de vigor de la vegetación y proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal al año 2030.

Cuadro 8

Pruebas de normalidad de las características de cobertura vegetal

COBERTURA VEGETAL	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
SUELO DESNUDO	,099	22	,200*	,967	22	,652
VEGETACION ESCASA	,161	22	,145	,945	22	,256
VEGETACION ESTRESADA	,170	22	,098	,932	22	,135
VEGETACION LIGERAMENTE VIGOROSA	,115	22	,200*	,937	22	,173
VEGETACION VIGOROSA	,197	22	,026	,822	22	,001

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Según los datos del cuadro 8 y dado que la muestra es menor a 50 se consideró la prueba de Shapiro-Wilk, así mismo se observa que las variables siguen una distribución normal ya que el p-valor es $>0,05$ excepto la vegetación vigorosa, a partir de ello se empleó la prueba de t de student para una sola muestra para comprobar la hipótesis planteada.

Cuadro 9*Prueba para una muestra de las características de cobertura vegetal*

COBERTURA VEGETAL	Valor de prueba = 49842 km ²					
	t	gl	Sig. (bilateral) (p-valor)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
SUELO DESNUDO	-18,320	21	,000	-27374,955	-30482,41	-24267,50
VEGETACION ESCASA	-70,916	21	,000	-43278,455	-44547,61	-42009,30
VEGETACION ESTRESADA	-119,132	21	,000	-45872,818	-46673,59	-45072,05
VEGETACION LIGERAMENTE VIGOROSA	-406,201	21	,000	-48729,545	-48979,02	-48480,07
VEGETACION VIGOROSA	-75,436	21	,000	-46944,818	-48238,99	-45650,65

El cuadro 9 muestra los resultados donde se observa con p-valor < 0.05, por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 . Se concluyó que la evolución temporal de las áreas con vegetación permite identificar tendencias diferenciadas en los niveles de vigor de la vegetación y proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal al año 2030, evidenciadas por la fluctuación del NDVI. mediante la teledetección satelital en Chiara-Ayacucho.

El tercer objetivo específico consistió en evaluar la evolución temporal de las áreas con vegetación escasa, estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa durante el periodo 2000–2021 y su proyección al 2030. Se observó un decaimiento proyectado al 2030 en suelos desnudos, con áreas que disminuyeron de 35652 km² en 2000 a 25279 km² en 2021. La vegetación escasa también mostró un decaimiento proyectado, pasando de 11033 km² en 2004 a 6717 km² en 2020. En contraste, la vegetación estresada registró un ligero incremento proyectado al 2030, de 7105 km² en 2004 a 4762 km² en 2020. La vegetación ligeramente vigorosa también mostró un ligero incremento, de 1651 km² en 2004 a 2073 km² en 2012. Finalmente, la vegetación vigorosa experimentó un ligero decaimiento proyectado, de 9467 km² en 2010 a 805 km² en 2021 (Figura 11). Las ventajas del NDVI son valiosas para monitorear la dinámica de la cobertura vegetal, distinguir tipos de cobertura y cuantificar áreas con vegetación. Su limitante principal es la saturación en vegetación muy densa, lo que dificulta la interpretación. Estos resultados concuerdan con el

estudio de Yi et al. (2022), quienes determinaron cambios en plantaciones y bosques naturales en el curso medio del río Yangtze, encontrando una correlación parcial con factores climáticos.

4.2.5. Tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales proyectadas al 2030.

Prueba de hipótesis específica 4

H₀: Las tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales actuales no permiten proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030.

H₁: Las tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales actuales permiten proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030.

Cuadro 10

Pruebas de normalidad pasado, presente y futuro

AÑOS	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
ENERO	,246	21	,002	,758	21	,000
FEBRERO	,160	21	,169	,853	21	,005
MARZO	,231	21	,005	,853	21	,005
ABRIL	,257	21	,001	,704	21	,000
MAYO	,345	21	,000	,543	21	,000
JUNIO	,284	21	,000	,630	21	,000
JULIO	,334	21	,000	,613	21	,000
AGOSTO	,292	21	,000	,637	21	,000
SETIEMBRE	,240	21	,003	,716	21	,000
OCTUBRE	,173	21	,099	,758	21	,000
NOVIEMBRE	,194	21	,037	,859	21	,006
DICIEMBRE	,211	21	,015	,862	21	,007

a. Corrección de significación de Lilliefors

Con respecto a los datos del cuadro 10 y dado que la muestra es menor a 50 se consideró la prueba de Shapiro-Wilk, así mismo se observa que las variables no siguen una

distribución normal ya que el p- valor es $<0,05$, a partir de ello se empleó la prueba no paramétrica de Friedman para k muestras relacionadas para comprobar la hipótesis planteada.

En tanto, el cuadro 11 muestra los resultados donde se observa con p valor < 0.05 , por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 . Se concluyó que, las tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales actuales permiten proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030, mediante la teledetección satelital.

Cuadro 11

Estadísticos de prueba de Friedman

Estadístico	Valor
N	21
Chi-cuadrado	177,403
gl	11
Sig. Asintótica (p-valor)	,000

En cuanto al cuarto objetivo específico, se determinó las condiciones ambientales actuales permitieron proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal. El análisis de las condiciones ambientales en Ayacucho reveló períodos con anomalías significativas, como las bajas temperaturas nocturnas en 2014, la influencia de factores de degradación ambiental y la presencia de peligros geológicos. Estas tendencias (pasadas, presentes y proyectadas al 2030) se correlacionaron con los cambios observados y proyectados en el NDVI, permitiendo determinar la variabilidad mensual de la vegetación desde 2000 hasta 2021 y su proyección al 2030. Estos hallazgos coinciden con Dutta et al. (2022), quienes resaltan la potencialidad del NDVI como indicador temporal de reverdecimiento. Asimismo, Zhao et al. (2022), en su artículo sobre la dinámica de la vegetación en respuesta al cambio climático y las actividades humanas en una región alpina de la meseta tibetana, determinaron los cambios interanuales en la dinámica de la vegetación entre 2000 y 2020.

4.2.6. Relación entre el NDVI, la temperatura y precipitación 2000-2021

Prueba de hipótesis específica 5

H_0 : No existe una relación significativa entre el NDVI y las variables climáticas de temperatura y precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.

H_1 : Existe una relación significativa entre el NDVI y las variables climáticas de temperatura y precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.

Cuadro 12

Pruebas de normalidad

FACTORES AMBIENTALES	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
NDVI	,085	203	,001	,951	203	,000
Temperatura	,075	203	,007	,960	203	,000
Precipitación	,147	203	,000	,881	203	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tras observar los datos del cuadro 12 y dado que la muestra es mayor a 50 se consideró la prueba de Kolmogorov- Smirnov, así mismo se observa que las variables no siguen una distribución normal ya que el p- valor es <0,05, a partir de ello se empleó la prueba no paramétrica del coeficiente de correlación de Rho de Spearman para comprobar la hipótesis planteada.

Cuadro 13

Correlaciones NDVI y Temperatura

		Temperatura	NDVI
Rho de Spearman	Temperatura	Coefficiente de correlación	1,000
		Sig. (unilateral) (p-valor)	.
		N	203
	NDVI	Coefficiente de correlación	-,127*
		Sig. (unilateral)	,036
		N	202
		203	263

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (unilateral).

El coeficiente de correlación entre Temperatura y NDVI es de -0.127. Esto indica una correlación negativa débil. Es decir, a medida que aumenta la temperatura, tiende a disminuir el NDVI (y viceversa). Sin embargo, la relación es débil, lo que significa que la temperatura no explica una gran proporción de la variabilidad en el NDVI.

Cuadro 14

Correlaciones NDVI y Precipitación

		Precipitación	NDVI
Rho de Spearman	PRECIPITACION	Coeficiente de correlación	1,000
		Sig. (unilateral)	.
		N	264
NDVI	NDVI	Coeficiente de correlación	,225**
		Sig. (unilateral)	,000
		N	264

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (unilateral).

En el cuadro 14, el coeficiente de correlación entre Precipitación y NDVI es de 0.225. Esto indica una correlación positiva débil. Es decir, a medida que aumenta la precipitación, tiende a aumentar también el NDVI, lo que sugiere una mayor cantidad o mejor salud de la vegetación. Por lo cual se concluye que se acepta la H_1 , que indica que existe una relación significativa entre el NDVI y las variables climáticas de temperatura y precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021, que permiten conocer la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030.

El quinto objetivo específico, que buscaba determinar la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada y los factores ambientales, confirmó que las condiciones ambientales, especialmente la temperatura y la precipitación, son determinantes clave en la dinámica de la cobertura vegetal en Chiara. Las fluctuaciones en la temperatura y el NDVI entre 2000 y 2021 mostraron un claro patrón estacional, con picos y valles que se repiten anualmente, lo cual es esperable dada la influencia estacional sobre la temperatura y la vegetación. Durante la temporada de crecimiento, se observó una correlación positiva entre la temperatura y el NDVI. Sin embargo, en las estaciones secas,

la relación se volvió negativa, ya que las altas temperaturas combinadas con poca precipitación generaron estrés hídrico en las plantas, reflejado en una disminución del NDVI. El coeficiente de correlación entre temperatura y NDVI fue de -0.127, indicando una correlación negativa débil: a mayor temperatura, el NDVI tiende a disminuir. En cuanto a la precipitación y el NDVI, se observó una fuerte relación entre ambas variables a lo largo del periodo 2000-2021. Esta relación es esperable, pues la disponibilidad de agua es un factor determinante para el crecimiento vegetal. El coeficiente de correlación entre precipitación y NDVI fue de 0.225, lo que indica una correlación positiva débil: a medida que aumenta la precipitación, el NDVI tiende a aumentar, lo que sugiere una mayor cantidad o mejor salud de la vegetación. Estos resultados coinciden con los de Li et al. (2023), quienes exploraron la relación entre el NDVI y elementos climáticos estacionales, hallando que los índices estacionales de precipitación y temperatura, junto con el NDVI, mostraron heterogeneidad espacial, y que los cambios en pastizales y bosques eran vulnerables al cambio climático. No obstante, no coinciden con Dutta et al. (2022), quienes reportaron una correlación negativa ($r = -0.8$) entre precipitación y NDVI, sugiriendo que la precipitación no fue el principal factor de control de la tendencia de la vegetación en su área de estudio, sino que las actividades antropogénicas desempeñaron un papel importante en el agotamiento de la vegetación.

4.2.7. NDVI y la variación de los cambios climáticos estacionales.

Prueba de hipótesis específica 6

H₀: El NDVI no presenta una variación significativa en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales.

H₁: El NDVI presenta una variación significativa en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales.

Cuadro 15*Pruebas de normalidad*

Estaciones	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
VERANO	,256	23	,000	,743	23	,000
OTOÑO	,357	23	,000	,574	23	,000
INVIERNO	,257	23	,000	,749	23	,000
PRIMAVERA	,163	23	,113	,796	23	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tras observar los datos del cuadro 15 y dado que la muestra es menor a 50 se consideró la prueba de Shapiro-Wilk, así mismo se observa que las variables no siguen una distribución normal ya que el p- valor es $<0,05$, a partir de ello se empleó la prueba no paramétrica de Friedman para k muestras relacionadas para comprobar la hipótesis planteada.

Cuadro 16*Estadísticos de prueba^a Friedman*

Estadístico	Valor
N	23
Chi-cuadrado	48,130
gl	3
Sig. Asintótica (p-valor)	,000

a. Prueba de Friedman

El cuadro 16 muestra los resultados donde se observa con $p < 0.05$, por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 . Se concluyó que, el NDVI presenta una variación significativa en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales., mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada, mostrando cambios significativos.

Finalmente, el sexto objetivo específico abordó el comportamiento temporal por estaciones de la cobertura vegetal de 2000 a 2021, con proyección al 2030. En el distrito de Chiara, los veranos son cortos, frescos y nublados, mientras que los inviernos son cortos, fríos y parcialmente nublados, con temperaturas anuales que oscilan entre 3°C y 18°C , rara vez

disminuyendo a menos de 1°C o superando los 20°C. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Lunetta et al. (2022), quienes exploraron el uso de datos compuestos multitemporales MODIS NDVI (cada 16 días, a 250 m) para la detección automática de cambios y alertas en un intervalo de un año, aplicando sus métodos y resultados a áreas no agrícolas. En particular, los datos obtenidos mediante el NDVI mostraron que las zonas con mayor altitud exhibieron una mayor resiliencia, manteniendo una cobertura vegetal relativamente estable en comparación con áreas más bajas y de uso agrícola intensivo. Este comportamiento podría estar asociado a la influencia de microclimas locales y una menor intervención humana en zonas montañosas.

En efecto, apoyados en los fundamentos descritos en los párrafos anteriores se determina que, la teledetección satelital y las condiciones ambientales permite conocer la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, cuyos modelos de regresión basados en series temporales sugieren una posible disminución adicional de la cobertura vegetal si no se implementan medidas de mitigación efectivas. Este escenario es especialmente preocupante para áreas de vegetación nativa, cuya pérdida podría tener consecuencias irreversibles en la biodiversidad local y en los servicios ecosistémicos en el distrito de Chiara-Ayacucho.

CÁPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del análisis de la dinámica de la cobertura vegetal en Chiara-Ayacucho, utilizando la teledetección satelital, han permitido validar los objetivos y las hipótesis planteadas en la investigación, concluyendo que:

1. La dinámica de la cobertura vegetal en Chiara (2000–2021) mostró una marcada variabilidad interanual y estacional, con valores de NDVI entre 0.1676 y 0.5409, con un promedio aproximado de 0.42, lo que indica una cobertura vegetal de vigor moderado, interrumpidos por episodios de estrés severo, evidenciando la alta sensibilidad del ecosistema a anomalías climáticas.
2. La extensión espacial de los distintos tipos de cobertura vegetal presentó heterogeneidad significativa según los rangos de NDVI, predominando áreas con vegetación moderadamente vigorosa (NDVI entre 0.40 y 0.55), mientras que las áreas con vegetación escasa o estresada presentaron valores entre 0.17 y 0.35.
3. La evolución temporal 2000 - 2021, evidenció una dinámica heterogénea, con fases de reducción y recuperación asociadas a la variabilidad ambiental. La vegetación estresada registró entre 1477 km² y 7105 km², mientras que la vigorosa presentó una mayor amplitud, entre 128 km² y 10325 km². Al 2030 se estima 4270 km², 1290 km² y 1135 km² para vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa respectivamente.
4. La dinámica futura de la cobertura vegetal al año 2030, estimada mediante el modelo ARIMA, mantendrá valores de NDVI dentro de rangos funcionalmente estables, con valores proyectados de 0.4182 en verano, 0.5288 en otoño y 0.2772 en invierno.
5. Se confirmó una relación funcional directa entre el NDVI y las condiciones climáticas durante el periodo 2000–2021. Los valores más altos de NDVI (0.50–0.65) se asociaron a periodos con mayor precipitación y temperaturas moderadas (13–15 °C), mientras

que los valores más bajos (0.17–0.30) ocurrieron en condiciones de menor disponibilidad hídrica.

6. Se estableció que el NDVI presenta una marcada variación estacional durante el periodo 2000–2021, registrando los valores más altos en otoño (hasta 0.5288) y verano (hasta 0.5409), y los valores más bajos en invierno (hasta 0.1676), evidenciando la influencia directa de la estacionalidad climática en el vigor vegetal.

5.2. Recomendaciones

Con base a los resultados y conclusiones, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Implementar un Monitoreo Continuo de la cobertura vegetal mediante teledetección para seguir de cerca las tendencias de disminución de la vegetación vigorosa y el aumento de las áreas estresadas y de suelo desnudo.
2. Priorizar la gestión sostenible del recurso hídrico como factor clave en la conservación de la cobertura vegetal.
3. Implementar programas de restauración ecológica en zonas con NDVI persistentemente bajo.
4. Integrar los resultados en políticas públicas de adaptación al cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz-Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., & Trishchenko, A. (2013). Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: Differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2), 760–770. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02040.x>
- Álvarez, M., & Risco, D. (2020). *Diseños de investigación longitudinal en estudios ambientales y territoriales*. Editorial Académica Española.
- AQUA EOS. <http://Aqua.nasa.gov>. consultado el 5 de abril de 2014.
- Cadena SER. (2024, marzo 15). Los efectos del cambio climático en Europa. Cadena SER. <https://cadenaser.com/>
- Cadena SER. (2025, enero 20). Los retos ambientales para la próxima década. Cadena SER. <https://cadenaser.com/>
- Callahan, C. W. y Mankin, J. S. (2022). Atribución nacional de los daños climáticos históricos. *Climatic Change*, 172(3), 40.
- Ceceña-Sánchez, M. L., Eaton-González, R., Solís-Cámara, A. B., Delgadillo-Rodríguez, J., Luna-Mendoza, L., & Ortega-Rubio, A. (2021). Evaluación de cambios en la cobertura vegetal en Isla Guadalupe mediante índices de vegetación. *Madera y bosques*, 27(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712018>.
- Celemin, J. P., & Arias, M. E. (2023). Evolución de la cobertura vegetal y área construida en la ciudad de Mar del Plata (Argentina), en el periodo 2018-2022. <http://hdl.handle.net/11336/223855>.
- Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico - CIUP. (2021). Análisis del impacto económico de la pandemia en América Latina. Universidad del Pacífico. <https://www.up.edu.pe/>
- Chuvieco-Salineró, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. España: Editorial Ariel.

- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., & Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692–702.
- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>
- Didan, K., Barreto Munoz, A., Solano, R., & Huete, A. (2021). *MODIS vegetation index user's guide (MOD13/MYD13, Collection 6.1)*. University of Arizona.
- https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2021.pdf
- Dutta, D., Rahman, A., Paul, S. K. y Kundu, A. (2022). Tendencias espaciales y temporales de los espacios verdes urbanos: una evaluación utilizando conjuntos de datos hipertemporales del NDVI. *Geocarto International*, 37(25), 7983-8003.
- El País. (2024, octubre 15). Los desafíos climáticos de Europa en 2024. El País.
- <https://elpais.com/>
- Esri. (2022). *ArcGIS Desktop: Release 10.8.2*. Environmental Systems Research Institute.
- <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>
- FAO. (2022). Global forest resources assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>.
- Feng, Y., et al. (2023). "Climatic drivers of vegetation changes analyzed through NDVI and time series data." *Global Ecology and Biogeography*.
- Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S. D., Tucker, C., Scholes, R. J., Le, Q. B., Bondeau, A., Eastman, R., Epstein, H., Gaughan, A. E., Hellden, U., Mbow, C., Olsson, L., Paruelo, J., Schweitzer, C., Seaquist, J., & Wessels, K. (2020). Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2015: An Earth observing satellite-based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111503.
- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111503>

- Forkel, M., Dorigo, W., Lasslop, G., Churkina, G., Migliavacca, M., Thurner, M., & Carvalhais, N. (2021). Recent global and regional trends in gross primary productivity driven by rising atmospheric CO₂ concentration. *Nature Climate Change*, 11(2), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00949-6>
- Gaitan, J., Ciano, N., Oliva, G., Bran, D., Butti, L., Cariac, G., ... & Maestre, F. (2021). La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas*, 30(3), 2229-2229. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2229>.
- Gao, B., Liu, E., Yang, Y., Yang, M., Yao, Y., Guan, L., & Feng, Y. (2024). Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in the Zoige Plateau from 2001 to 2020. *Journal of Mountain Science*, 21(9), 3031-3046. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8720-y>
- García-Reyes, R. A., González Posada-Dacosta, Mario Damián, Villazón-Gómez, Juan Alejandro, & Rodríguez-Rodríguez, Sergio. (2021). Salinity-sugarcane cultivation relationship determined by remote sensing at the Urbano Noris Sugar Mill. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(2), e02. Epub 01 de abril de 2021. Recuperado en 28 de septiembre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542021000200002&lng=es&tlng=en.
- Gessesse, A., et al. (2023). "Climatic determinants of vegetation dynamics using remote sensing in arid regions." *Journal of Environmental Management*.
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2023). La materia orgánica del suelo y su papel en la retención de agua y la estructura del suelo. *Revista de Ciencia del Suelo*, 68(2), 123-135.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2019). A five-year analysis of MODIS NDVI and climate data reveals large-scale drought impacts on vegetation in the U.S.

- Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111283.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111283>
- Hansen, M. C., et al. (2021). Global land use and land cover change: Pathways to a sustainable future. *Nature*, 593(7857), 215–224. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03564-9>
- Hernández Tiburcio, E. E. (2020). Análisis de la dinámica de la vegetación como línea base para la mejora de los servicios ecosistémicos hídricos en la subcuenca del río Bao, República Dominicana (Doctoral dissertation, CATIE, Turrialba (Costa Rica)).
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Hu, L., et al. (2023). "NDVI as an indicator for vegetation health in climate variability studies." *Ecological Indicators*.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2022). *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. *Remote Sensing of Environment*, 249, 112–123.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112123>
- Huffington, C. (2023). Natural forest regeneration and climate mitigation. *Nature Climate Change*, 13, 215–223.
- HuffPost. (2024, diciembre 2). Los científicos identifican el extraño fenómeno que ocurre en los bosques de todo el mundo. <https://www.huffingtonpost.es/planeta/cientificos-identifican-extrano-fenomeno-ocurre-bosques-mundo.html>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2023). *Compendio Estadístico Ayacucho 2023*
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Sixth Assessment Report (AR6): The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Jiang, H., Xu, X., Zhang, T., Xia, H., Huang, Y., & Qiao, S. (2022). The relative roles of climate variation and human activities in vegetation dynamics in coastal China from 2000 to 2019. *Remote Sensing*, 14(10), 2485.

<https://doi.org/10.3390/rs14102485>

Justice, C. O., Román, M. O., Csiszar, I., Vermote, E., Wolfe, R., Hook, S. J., Friedl, M., Wang, Z., Schaaf, C., Miura, T., Toller, G., Riggs, G., Hall, D., Lyapustin, A., Devadiga, S., Davidson, C., Masuoka, E., & Roy, D. P. (2021). *An overview of MODIS land data processing and product status*. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.005>

L3Harris Geospatial. (2023). *ENVI 5.6 User's Guide*. L3Harris Technologies. <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>

Li, C., Jia, X., Zhu, R., Mei, X., Wang, D. y Zhang, X. (2023). Cambios espaciotemporales estacionales en el NDVI y sus fuerzas impulsoras en la cuenca del lago Wuliangsu, norte de China, de 1990 a 2020. *Teledetección*, 15(12), 2965.

Liu, Y., Wang, Q., Zhang, Z., Tong, L., & Li, J. (2023). Time series modeling and forecasting of vegetation dynamics using ARIMA and remote sensing indices under climate variability. *Ecological Indicators*, 147, 109894.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109894>

Liu, Y., Zhang, X., Du, X., Du, Z., & Sun, M. (2024). Alpine grassland greening on the Northern Tibetan Plateau driven by climate change and human activities considering extreme temperature and soil moisture. *Science of The Total Environment*, 916, 169995. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169995>

Lozano Rodríguez, R. (2024). Evaluación temporal de la cobertura vegetal mediante teledetección en la provincia de Huanta, Ayacucho. [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional de la Universidad Continental.

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15746/1/IV_FIN_107_T E_Lozano_Rodriguez_2024.pdf

Lu, Q., Kang, H., Zhang, F., Xia, Y., & Yan, B. (2024). Impact of climate and human activity on NDVI of various vegetation types in the Three-River Source Region, China. *Journal of Arid Land*, 16(8), 1080-1097. <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0104-1>.

Lunetta, R. S., Knight, J. F., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G. y Worthy, L. D. (2022). Detección de cambios en la cobertura terrestre utilizando datos MODIS NDVI multitemporales. En *Manual de información geoespacial para recursos hídricos y gestión de cuencas hidrográficas*, volumen II (págs. 65-88). CRC Press.

MINAM. (2023). *Informe nacional sobre degradación de tierras en el Perú*. Ministerio del Ambiente.

Minatti, E., Ribeiro, A. A., Encina, C. C. C., & Paranhos Filho, A. C. (2023). Análise multi-temporal de imagens de satélite e NDVI em unidade de conservação. *Research, Society and Development*, 12(4), e1112440839-e1112440839.

<https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.40839>.

Monje Jiménez, R. J. (2020). Respuesta y recuperación a la sequía de especies formadoras de céspedes utilizadas en campos de golf en Andalucía. Modelo de gestión.

NASA Applied Sciences. (2023). Fundamentos de la teledetección (percepción remota). Recuperado de https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals_of_RS_Span.pdf

Peng, J., Dan, L., Huang, J., & Liu, Y. (2021). Global vegetation dynamics under climate change: Trends, drivers and resilience. *Nature Climate Change*, 11(9), 768–776. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01096-9>

Pereira, H. M., Navarro, L. M., & Martins, R. (2020). Remote sensing for monitoring vegetation cover change and ecological integrity. *Ecological Applications*, 30(3), e02052. <https://doi.org/10.1002/eap.2052>

Pérez, J., Navarro, F., & Rodríguez, L. (2006). *Teledetección: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria. Universidad Nacional de Quilmes. Argentina.

Pettorelli, N., Schulte to Bühne, H., Tulloch, A., Dubois, G., Macinnis-Ng, C., Queirós, A. M., Keith, D. A., Wegmann, M., Schrodt, F., Stellmes, M., Sonnenschein, R., Geller, G. N., Roy, S., Somers, B., Murray, N., Bland, L., Geijzendorffer, I., Kerr, J. T., Broszeit, S., ... Skidmore, A. K. (2018). Satellite remote sensing of ecosystem functions: Opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 71–93.

<https://doi.org/10.1002/rse2.59>

Pettorelli, N., et al. (2022). Satellite remote sensing for biodiversity research and conservation: Methods and applications. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(6), 1101–1114. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13853>

Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X., He, Y., ... Myneni, R. B. (2020). *Characteristics, drivers and feedbacks of global greening*. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 14–27. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x>

Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Zambrano, A. M. A., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., Chazdon, R. L., Craven, D., de Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A. L., de Jong, B. H. J., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., ... Rozendaal, D. M. A. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>

Revista Minera. (2023, julio 15). Impacto de la minería en los ecosistemas andinos. Revista Minera. <https://www.revistaminera.com/>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. En Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Vol. 1, pp. 309–317). National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2023). *Caracterización climática de la región Ayacucho*. SENAMHI.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2024). Informe técnico ENFEN N°06-2024: Estado del sistema de alerta. SENAMHI. Recuperado de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3312>

Sobrino (2000). Teledetección, Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia.

Sobrino (2001). A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data, *Remote Sensing of Environment*, 75, 256-266.

Sun, Q., Li, B., Zhou, W., Wu, Y., & Zhang, J. (2021). Modeling vegetation dynamics and post-drought recovery using ARIMA time series analysis. *Ecological Indicators*, 125, 107552.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107552>

UICN. (2024). *The state of the world's trees*. International Union for Conservation of Nature.

Universidad de Almería - UAL (2025). Introducción a la Teledetección en Agronomía y ciencias afines. <https://editorial.ual.es/media/unalmeria/files/sample-159795.pdf>

USGS MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb), 2010.<http://mrtweb.cr.usgs.gov>, consultado del 25 de agosto de 2020 hasta 5 de noviembre de 2020.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Gimeno, L., Eklundh, L., Giuliani, G., Weston, D., Kenawy, A. E., López-Moreno, J. I., Nieto, R., Ayenew, T., Konte, D., & Tadesse, T. (2021). Challenges for drought mitigation in Africa: The potential use of remote

- sensing and climate information. *Science of the Total Environment*, 755, 142513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142513>
- Wang, J., Wang, Y., Li, G., & Qi, Z. (2024). Integration of Remote Sensing and Machine Learning for Precision Agriculture: A Comprehensive Perspective on Applications. *Agronomy*, 14(9), 1975.
- Wen, Y., Cai, H., & Han, D. (2024). Driving factors analysis of spatial–temporal evolution of vegetation ecosystem in rocky desertification restoration area of Guizhou Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 13122-13140. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31934-w>.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yang, Y., Wang, X., & Wang, T. (2024). Permafrost degradation induces the abrupt changes of vegetation NDVI in the Northern Hemisphere. *Earth's Future*, 12(10), e2023EF004309. <https://doi.org/10.1029/2023EF004309>.
- Yi, Y., Shi, M., Yi, X., Liu, J., Shen, G., Yang, N., & Hu, X. (2022). Dynamic changes of plantations and natural forests in the middle reaches of the Yangtze River and their relationship with climatic factors. *Forests*, 13(8), 1224. <https://doi.org/10.3390/f13081224>.
- ZEE-OT. (2013). Zonificación Ecológica Económica y Ordenamiento Territorial de la región Ayacucho. Elaborado por oficina de recursos naturales del Gobierno Regional de Ayacucho.
- Zeng, Y., et al. (2021). A comprehensive review of remote sensing-based vegetation indices: Definitions, properties, and applications. *Environmental Reviews*, 29(3), 258–276. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0056>

- Zhang, Y., Peng, C., Li, W., Fang, X., Zhang, T., Zhu, Q., Chen, H., & Zhao, P. (2019). Multiple afforestation programs accelerate the greenness recovery of China's vegetation after drought events. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111286>
- Zhang, L., Zhao, W., Hu, Z., Chen, S., & Wang, X. (2024). Spatiotemporal responses of vegetation dynamics to climate variability in mountainous regions using MODIS NDVI data. *Science of the Total Environment*, 908, 168225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168225>
- Zhao, G., Ren, L., & Ye, Z. (2022). Vegetation dynamics in response to climate change and human activities in a typical alpine region in the Tibetan Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12359. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912359>
- Zhu, Z., et al. (2021). "Landsat time series for vegetation and land cover dynamics." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

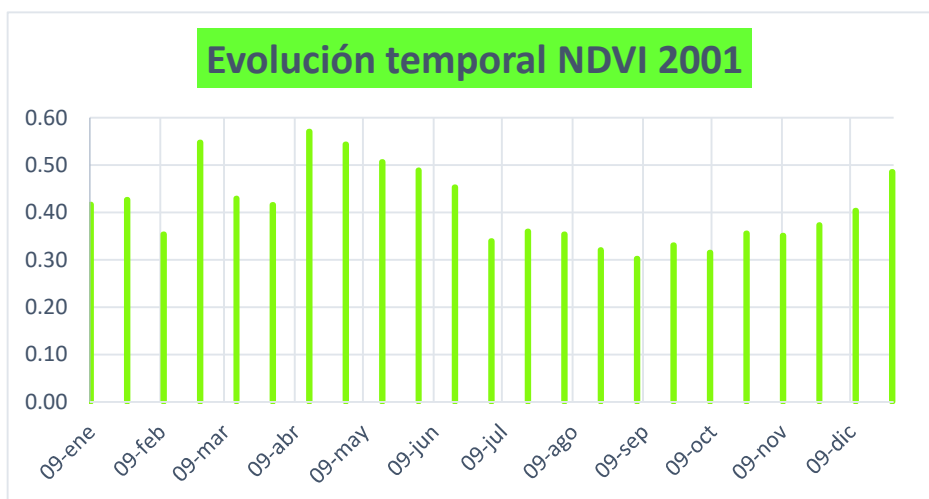
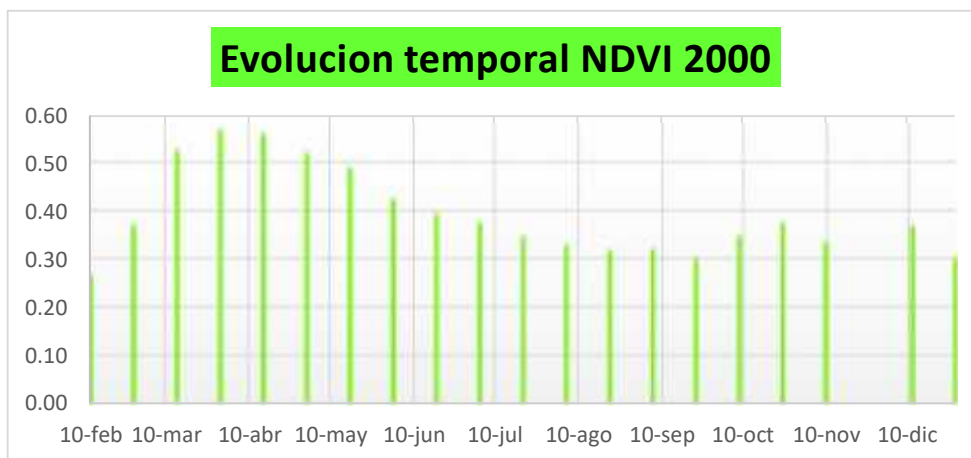
ANEXOS

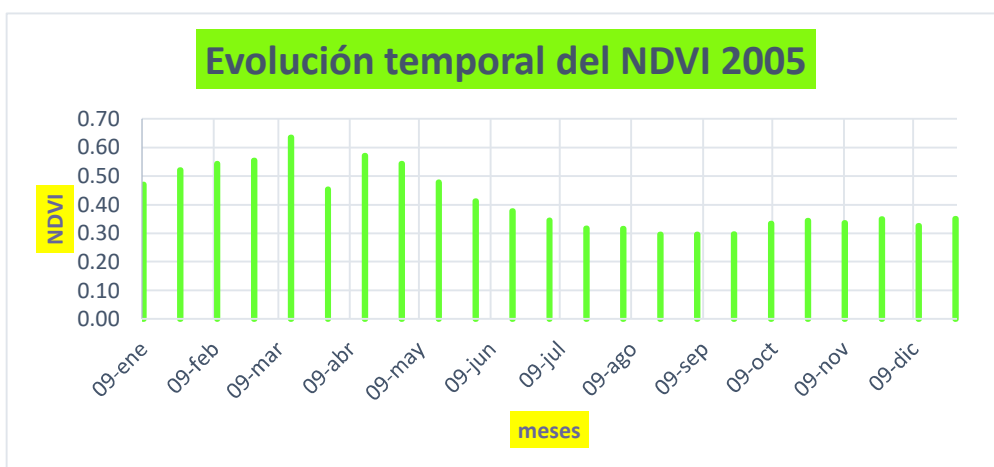
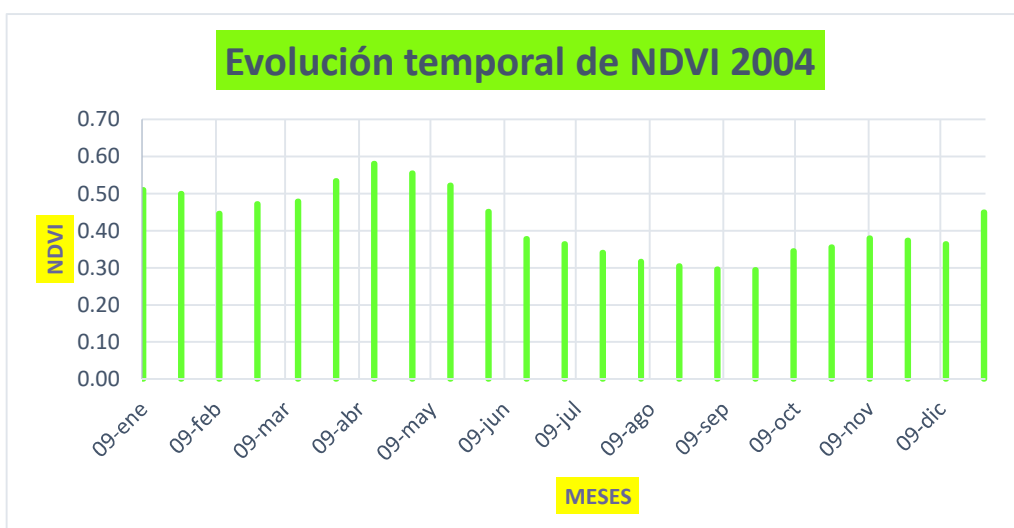
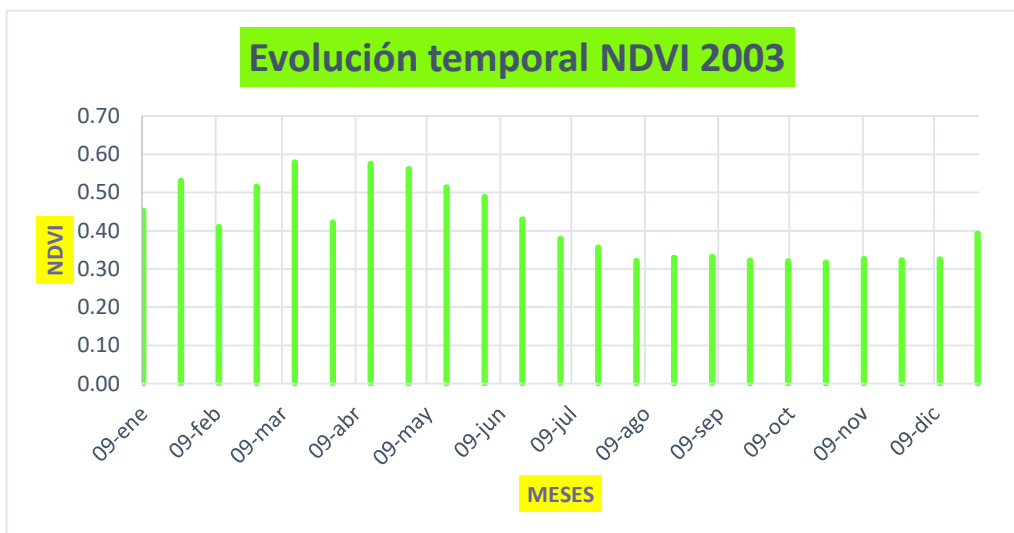
ANEXO 1: Matriz de consistencia

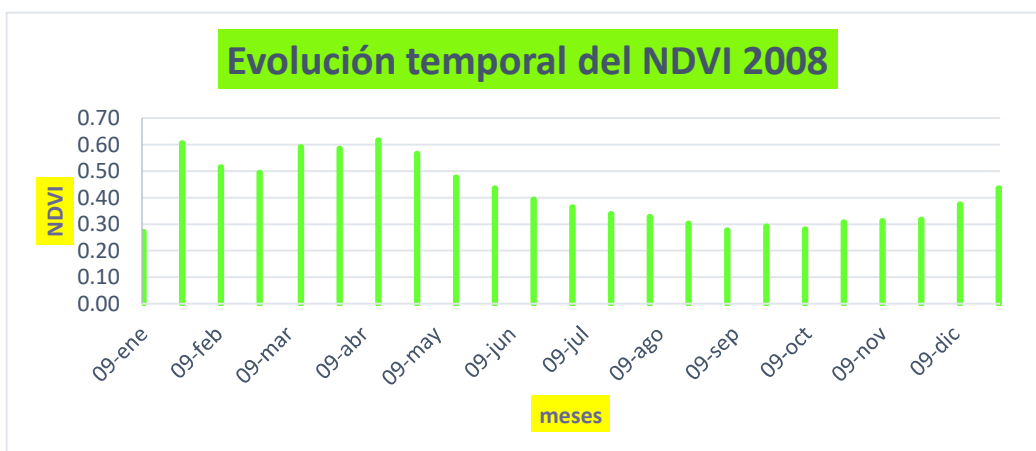
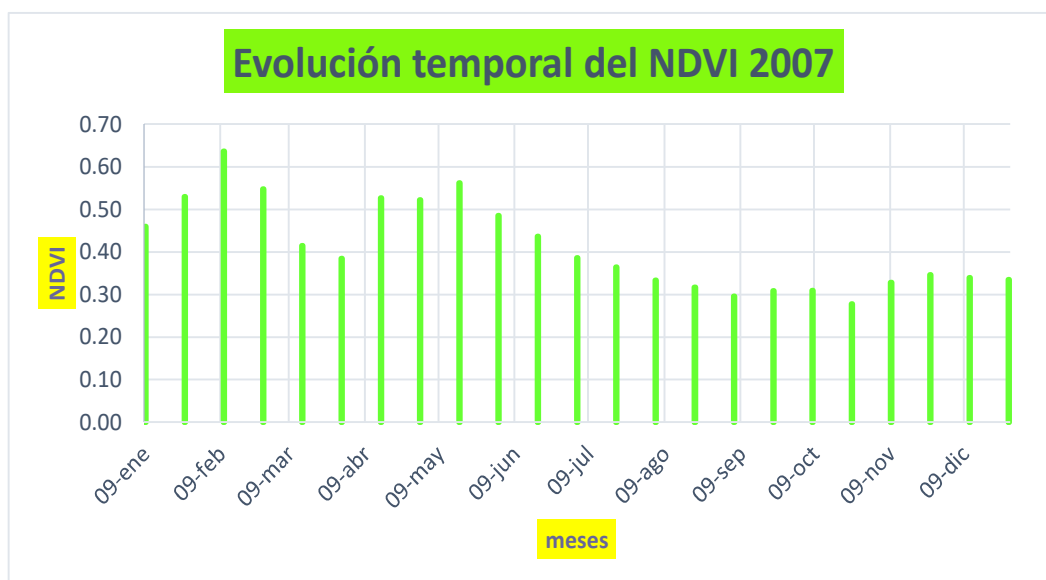
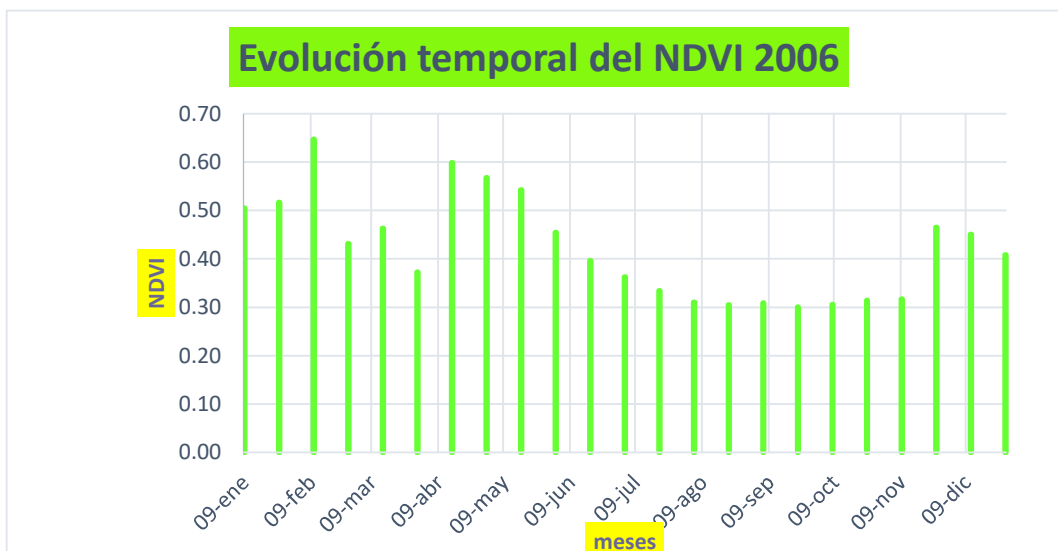
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Métodos	Técnicas e Instrumentos
¿Cómo influyen las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, mediante teledetección, en el distrito de Chiara (Ayacucho, Perú)?	Evaluar las condiciones ambientales en la dinámica de la cobertura vegetal del 2000 al 2021 con proyección al 2030, mediante la teledetección satelital en Chiara-Ayacucho.	Las condiciones ambientales, expresadas a través del tiempo y las variables climáticas (temperatura y precipitación), influyen significativamente en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara (Ayacucho) durante el periodo 2000–2021 y en su proyección al año 2030, evaluadas mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).	Tipo de Investigación: ⑥ Aplicada Nivel de investigación ⑥ Descriptivo-relacional Diseño de Investigación: ⑥ No experimental ⑥ Corte transversal Población: Imágenes de toda la región de Ayacucho cuenta con una superficie: 43 815 km ² con coordenadas 13°09'47" S 74°13'28" O y una altitud media de 2746 m.s.n.m. Muestra: Imágenes del área de estudio es el distrito de Chiara que posee una superficie total de 498,42 km ² con coordenadas 13°52'05" S 73°40'03" O y una altitud media de 3515 m.s.n.m.	Técnicas: ⑥ Documental ⑥ Guía de observación Instrumento: ⑥ Softwares SIG ⑥ Procesamiento de imágenes con el Software ArcGis y ENVI Fuentes: ⑥ Libros y textos especializados ⑥ Revistas científicas ⑥ Catálogos virtuales ⑥ Páginas web.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicos		
⑥ ¿Cómo son los cambios en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021 según el NDVI? ⑥ ¿Cómo ha evolucionado la extensión espacial según el NDVI de los distintos tipos de vegetación de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021? ⑥ ¿Cuál es la evolución temporal de las áreas con vegetación según su nivel de vigor durante el periodo 2000–2021 y su proyección al 2030? ⑥ ¿Cómo se comporta la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara al 2030, considerando los escenarios ambientales del 2000 al 2021? ⑥ ¿Qué relación existe entre la temperatura, la precipitación y la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021? ⑥ ¿Cómo varía el NDVI del distrito de Chiara a lo largo del año según la estacionalidad climática?	⑥ Determinar los cambios en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021 según el NDVI. ⑥ Determinar la evolución de la extensión espacial según el NDVI de los distintos tipos de vegetación de la cobertura vegetal en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021. ⑥ Evaluar la evolución temporal de las áreas con vegetación escasa, estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa durante el periodo 2000–2021 y su proyección al 2030. ⑥ Proyectar la dinámica futura de la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030, considerando los escenarios ambientales del 2000 al 2021. ⑥ Determinar la relación entre el NDVI, la temperatura y la precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021. ⑥ Analizar la variación estacional del NDVI en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021.	⑥ Existen cambios significativos en la dinámica de la cobertura vegetal del distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021, evidenciadas por la fluctuación del NDVI. ⑥ Las áreas según el NDVI de suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación estresada, ligeramente vigorosa y vigorosa presentan cambios significativos en su extensión espacial durante el periodo 2000–2021. ⑥ La evolución temporal de las áreas con vegetación permite identificar tendencias diferenciadas en los niveles de vigor de la vegetación y proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal al año 2030. ⑥ Las tendencias históricas del NDVI y las condiciones ambientales actuales permiten proyectar cambios significativos en la cobertura vegetal del distrito de Chiara al año 2030. ⑥ Existe una relación significativa entre el NDVI y las variables climáticas de temperatura y precipitación en el distrito de Chiara durante el periodo 2000–2021. ⑥ El NDVI presenta una variación significativa en el distrito de Chiara, asociada a los cambios climáticos estacionales.		

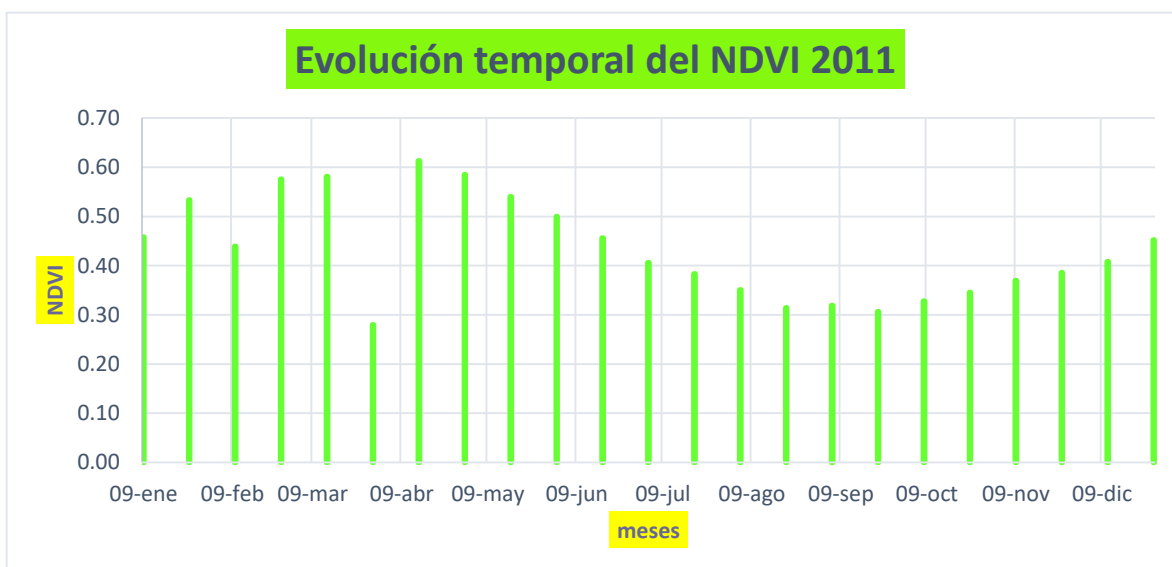
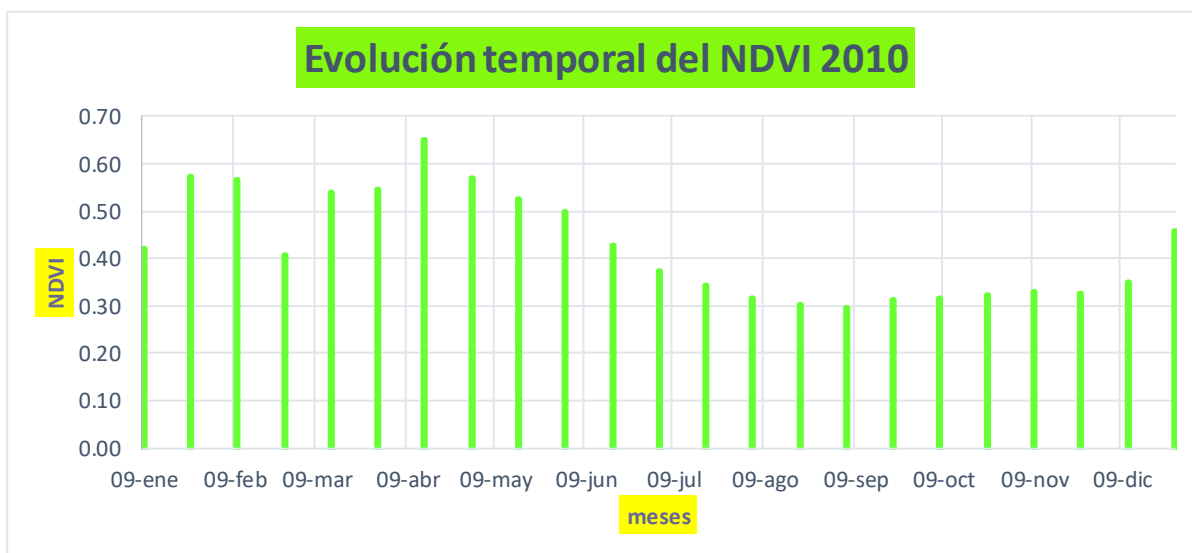
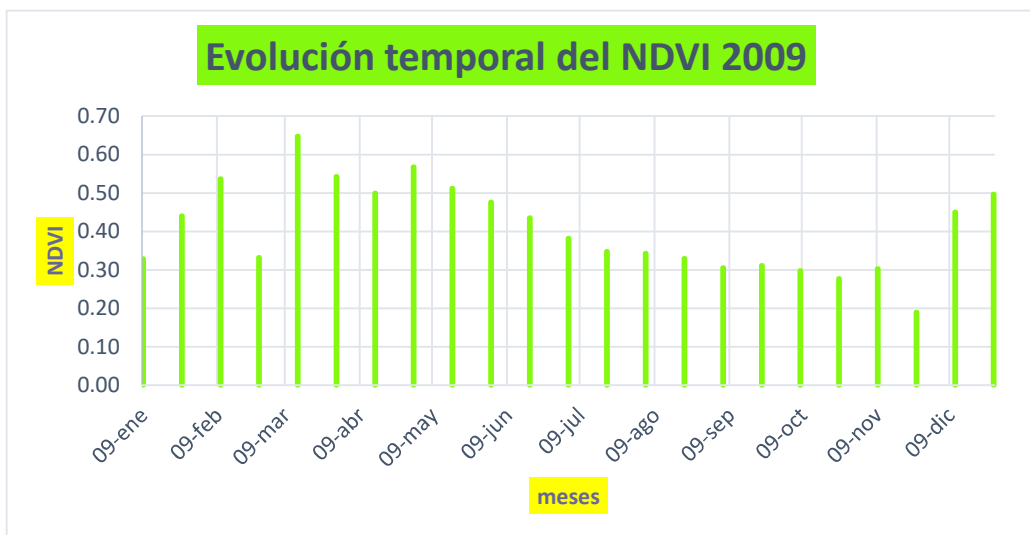
ANEXO 2

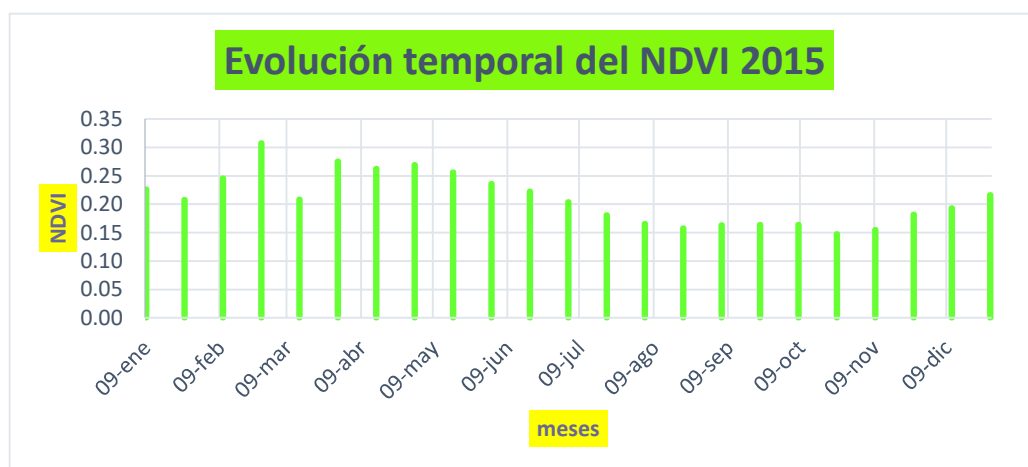
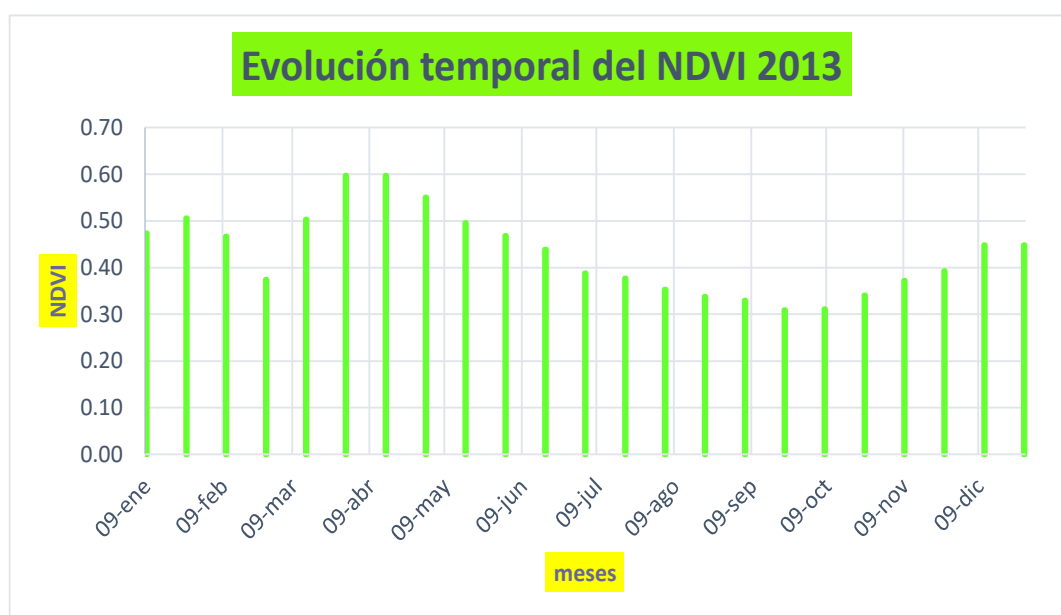
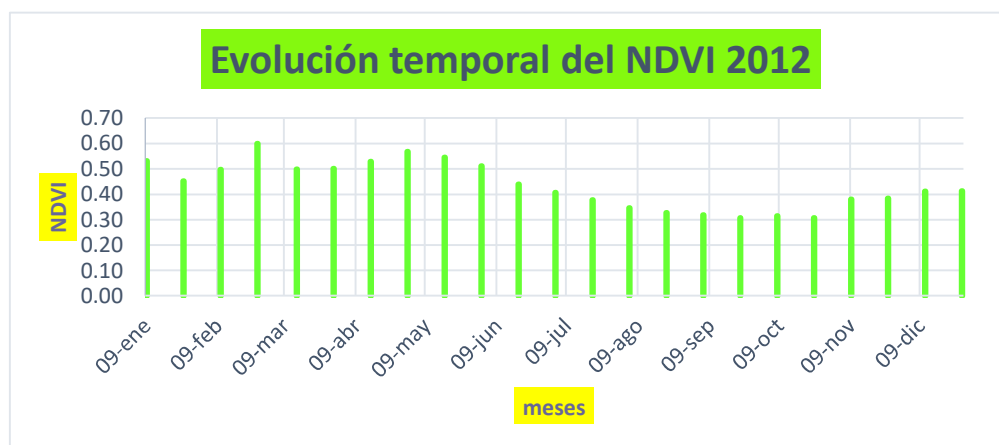
Evaluación de las condiciones ambientales según el indicador NDVI.

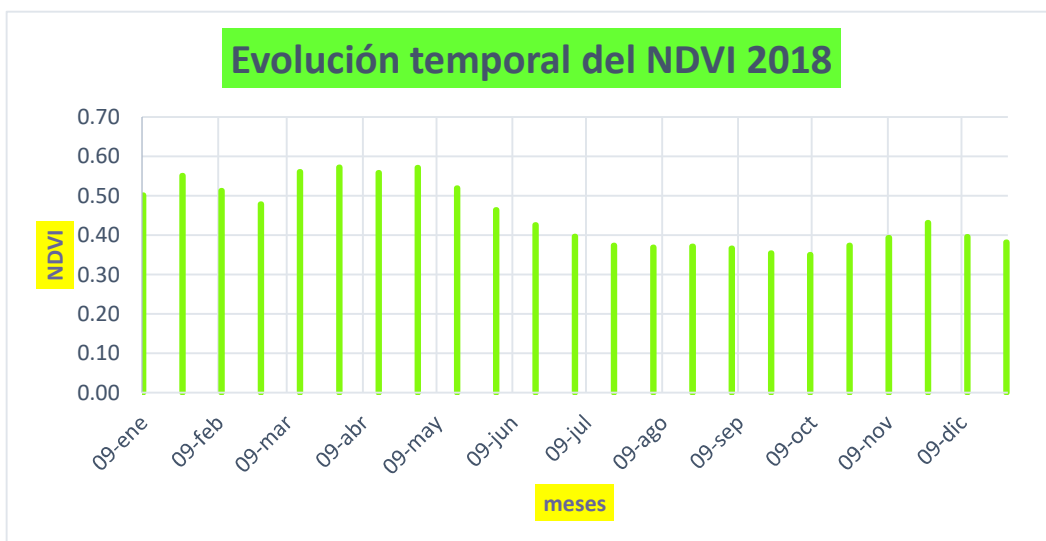
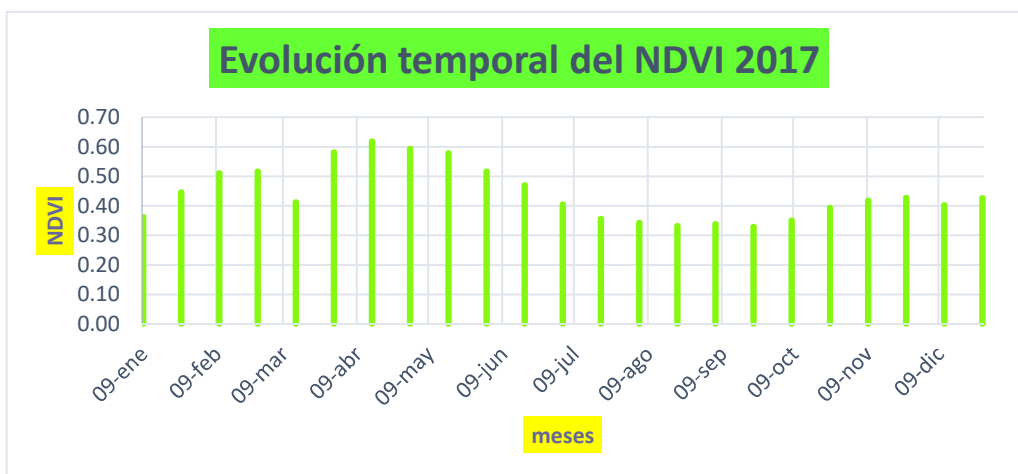
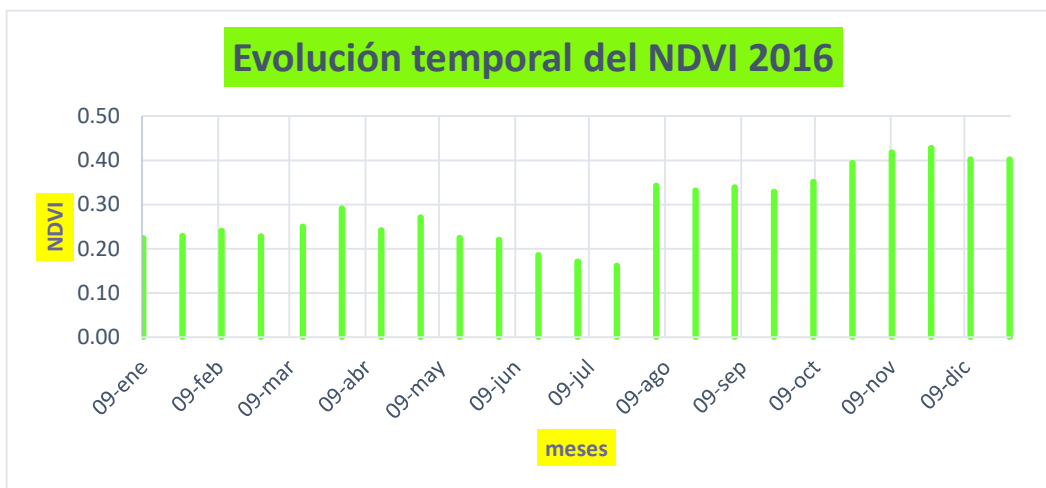












ANEXO 3

Comportamiento pasado presente y futuro de las condiciones ambientales según el indicador NDVI por meses del 2000 al 2021

Año	Características de la vegetación	km²
2000	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	35654
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	2076
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	1477
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	428
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	593
2001	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	26990
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	7964
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2854
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	306
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	373
2002	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	27095
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	8611
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2420
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	405
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	128
2003	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	18720
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	7874
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	6093
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1689
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	3117
2004	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	13671
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	11033
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	7105
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1651
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	2980
2005	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	22167
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	7161
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	4447
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1203
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	2857
2006	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	14361
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	12018
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	7108
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1271
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	1902
2007	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	20504
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	3614
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	3604
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1328
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	9467
2008	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	33945

	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	3689
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	1772
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	343
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	548
2009	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	33665
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	3213
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	1699
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	368
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	1264
2010	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	21641
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	2951
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2941
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1428
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	10325
2011	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	24994
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	8789
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2849
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	756
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	1139
2012	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	11095
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	10149
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	6482
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	2073
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	6326
2013	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	19003
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	5413
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	5277
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1732
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	6481
2014	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	18925
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	7509
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	5198
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1447
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	4563
2015	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	18201
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	8538
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	4998
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1244
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	4354
2016	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	22665
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	8060
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	3906
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	932
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	2257
2017	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	29574
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	3276
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2283

	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	727
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	544
2018	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	12537
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	7248
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	5427
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1971
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	1701
2019	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	27293
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	5755
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2528
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	665
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	501
2020	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	16296
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	6717
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	4762
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	1678
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	1513
2021	NDVI: 0.028-0.47: Suelo desnudo	25279
	NDVI: 0.48-0.54: Vegetación escasa	2740
	NDVI: 0.55-0.60: Vegetación estresada	2092
	NDVI: 0.61-0.63: Vegetación ligeramente vigorosa	829
	NDVI: 0.64-0.66: Vegetación vigorosa	805

ANEXO 4

NDVI por meses al año para relacionar con la temperatura y la precipitación.

Año	Mes	Temperatura	Precipitación	NDVI
2000	Enero	14.2	0	0
	Febrero	13.40	15.08	0.31705027
	Marzo	14.40	41.47	0.54527801
	Abril	14.20	16.38	0.55728077
	Mayo	13.90	5.2	0.50210901
	Junio	13.65	20.8	0.40788469
	Julio	13.10	9.75	0.35923036
	Agosto	13.60	16.64	0.3216232
	Setiembre	14.00	1.3	0.30903274
	Octubre	13.60	3.38	0.35999019
	Noviembre	14.50	15.99	0.33382178
	Diciembre	13.55	7.28	0.33382178

2001	Enero	14.30	22.1	0.42153374
	Febrero	14.15	13.26	0.45067365
	Marzo	14.10	27.95	0.42264198
	Abril	13.70	11.31	0.57100751
	Mayo	13.50	15.99	0.52521365
	Junio	12.95	5.33	0.47108581
	Julio	13.25	11.31	0.349819
	Agosto	12.70	7.15	0.33724197
	Setiembre	13.75	5.2	0.31650997
	Octubre	13.55	11.05	0.33556633
	Noviembre	14.35	48.49	0.36236745
	Diciembre	13.20	9.1	0.44461679
2002	Enero	15.60	17.16	0.44878068
	Febrero	16.30	28.08	0.4276686
	Marzo	16.30	41.08	0.49556078
	Abril	15.45	12.48	0.560774
	Mayo	14.90	6.63	0.55893157
	Junio	14.40	1.82	0.47629533
	Julio	14.40	13.26	0.39775118
	Agosto	14.50	5.5	0.35967687
	Setiembre	14.35	13.91	0.35578667
	Octubre	15.60	8.45	0.37501643
	Noviembre	15.40	11.96	0.38348932
	Diciembre	15.35	23.79	0.44505544
2003	Enero	15.40	21.5	0.49150215
	Febrero	15.10	38.4	0.46256635
	Marzo	14.90	17	0.50058018
	Abril	14.50	19.5	0.57503288
	Mayo	14.35	5.4	0.53785723
	Junio	14.20	0	0.45919249
	Julio	14.85	0	0.36794745
	Agosto	15.05	14.3	0.32566493
	Setiembre	15.45	4	0.32736878

	Octubre	16.05	1.9	0.31856926
	Noviembre	16.15	4.6	0.32494981
	Diciembre	16.20	25.5	0.35933407
2004	Enero	15.95	12.2	0.50480435
	Febrero	15.65	27.9	0.45927191
	Marzo	15.90	14.5	0.50620152
	Abril	15.30	6.3	0.58108258
	Mayo	15.15	5.6	0.53884423
	Junio	14.30	2.4	0.41494007
	Julio	14.45	15.8	0.35271261
	Agosto	14.40	5.5	0.31064613
	Setiembre	15.10	14.2	0.29479917
	Octubre	15.80	15.3	0.35030923
	Noviembre	15.75	22.4	0.37635618
	Diciembre	13.80	25.2	0.4070178
2005	Enero	15.55	29.2	0.49555589
	Febrero	15.55	18	0.54882324
	Marzo	16.05	47	0.54462034
	Abril	15.30	8.3	0.5711543
	Mayo	15.30	0.2	0.51085049
	Junio	14.80	0	0.39523541
	Julio	14.20	3.5	0.33157567
	Agosto	15.00	1.5	0.30614053
	Setiembre	15.10	8.2	0.2968703
	Octubre	15.20	12.5	0.33918749
	Noviembre	15.15	14.2	0.34316054
	Diciembre	15.50	26.4	0.3389303
2006	Enero	14.60	21.5	0.51026794
	Febrero	14.65	13.5	0.53888248
	Marzo	14.80	20.2	0.4171683
	Abril	14.90	18.2	0.59829828
	Mayo	13.30	1.5	0.55464777
	Junio	13.80	1.5	0.4250026

	Julio	12.70	0	0.34783706
	Agosto	13.80	6.7	0.30726395
	Setiembre	14.00	3.8	0.30429917
	Octubre	14.00	20.5	0.30967537
	Noviembre	14.20	8	0.39087409
	Diciembre	14.70	10.2	0.42896622
2007	Enero	15.10	17.16	0.49462554
	Febrero	15.10	17.68	0.59218619
	Marzo	15.40	20.41	0.39947105
	Abril	15.60	27.04	0.52653437
	Mayo	14.70	2.47	0.54253353
	Junio	14.20	0	0.46145516
	Julio	14.60	14.69	0.37509273
	Agosto	14.80	1.04	0.32540265
	Setiembre	15.10	8.19	0.30241141
	Octubre	14.90	19.5	0.2940161
	Noviembre	15.10	10.14	0.33709513
	Diciembre	14.85	24.44	0.3374442
2008	Enero	13.60	14.7	0.438474
	Febrero	13.35	17.7	0.50544444
	Marzo	13.40	17.6	0.58833982
	Abril	14.50	3.5	0.61729993
	Mayo	13.05	4.6	0.5213661
	Junio	11.00	2	0.41525516
	Julio	11.70	0	0.3521296
	Agosto	14.70	0.9	0.31555629
	Setiembre	12.30	8.1	0.2852638
	Octubre	14.60	6.8	0.29508667
	Noviembre	15.75	9.6	0.31522252
	Diciembre	14.85	18.3	0.40575061
2009	Enero	13.70	25.4	0.38433545
	Febrero	12.50	21.1	0.43409548
	Marzo	14.10	15.6	0.59498546

	Abril	14.00	19.1	0.49932587
	Mayo	12.50	12.9	0.53971036
	Junio	13.30	0	0.45542444
	Julio	13.20	4.2	0.36474317
	Agosto	14.20	0.2	0.33589772
	Setiembre	14.80	6.6	0.30855293
	Octubre	15.40	8.2	0.28708073
	Noviembre	15.50	17.2	0.24602316
	Diciembre	14.50	17.6	0.47355601
2010	Enero	14.40	25.5	0.49657805
	Febrero	15.10	13	0.48696389
	Marzo	14.70	19.9	0.543735
	Abril	14.90	7.1	0.65194152
	Mayo	14.70	5.2	0.54858161
	Junio	13.90	0	0.46346207
	Julio	14.10	0	0.35829568
	Agosto	13.85	7.5	0.30876384
	Setiembre	15.00	6.3	0.30368739
	Octubre	14.45	14.2	0.31937846
	Noviembre	15.55	7.8	0.32858252
	Diciembre	14.40	21.1	0.40328455
2011	Enero	13.60	28.1	0.49569109
	Febrero	12.40	41.6	0.50726151
	Marzo	13.20	25.7	0.43027911
	Abril	13.90	18.7	0.61293555
	Mayo	13.00	11.2	0.56222948
	Junio	13.40	4	0.47779518
	Julio	12.70	6.6	0.39443618
	Agosto	14.05	2.2	0.33222611
	Setiembre	15.95	14.3	0.31233538
	Octubre	14.65	8.3	0.33653721
	Noviembre	14.30	25.8	0.37737016
	Diciembre	14.00	28.6	0.43004164

2012	Enero	13.30	28.4	0.49149112
	Febrero	11.40	26.4	0.54831249
	Marzo	12.15	25.1	0.49965385
	Abril	12.80	17.9	0.52893127
	Mayo	12.65	1.7	0.55685844
	Junio	10.20	10.1	0.47470498
	Julio	11.95	0.6	0.39151262
	Agosto	12.70	2.9	0.33642878
	Setiembre	13.30	13.2	0.31294327
	Octubre	13.80	0	0.31057458
	Noviembre	14.70	27.1	0.38217197
	Diciembre	13.70	25.2	0.41250325
2013	Enero			0.48996444
	Febrero			0.42057774
	Marzo			0.55015998
	Abril			0.59700696
	Mayo			0.52328285
	Junio			0.45394608
	Julio			0.38249603
	Agosto			0.34525016
	Setiembre			0.31962721
	Octubre			0.32615961
	Noviembre			0.38272227
	Diciembre			0.44839405
2014	Enero			0.54048263
	Febrero			0.57173937
	Marzo			0.59144912
	Abril			0.55649537
	Mayo			0.5607673
	Junio			0.47077867
	Julio			0.39372057
	Agosto			0.35180498
	Setiembre			0.33180407

	Octubre			0.35858874
	Noviembre			0.40869786
	Diciembre			0.43294614
2015	Enero			0.21720207
	Febrero			0.27685798
	Marzo			0.24178157
	Abril			0.26572326
	Mayo			0.2462853
	Junio			0.21313399
	Julio			0.17325636
	Agosto			0.16040021
	Setiembre			0.16401039
	Octubre			0.15105457
	Noviembre			0.18764384
	Diciembre			0.22134219
2016	Enero			0.22670279
	Febrero			0.23476065
	Marzo			0.27067284
	Abril			0.24234254
	Mayo			0.24805339
	Junio			0.20289789
	Julio			0.1668124
	Agosto			0.33765
	Setiembre			0.33405
	Octubre			0.37295
	Noviembre			0.42335
	Diciembre			0.4024
2017	Enero	9.92	4.748387097	0.4045
	Febrero	9.72	7.503571429	0.51385
	Marzo	9.59	3.567741935	0.4975
	Abril	12.45	2.106666667	0.6188
	Mayo	11.81	1.322580645	0.586
	Junio	11.66	0	0.49315

	Julio	10.72	0	0.38075
	Agosto	12.17	0.516129032	0.33765
	Setiembre	12.63	1.86	0.33405
	Octubre	13.36	1.125806452	0.37295
	Noviembre	14.03	1.6	0.42335
	Diciembre	13.29	4.248387097	0.4148
2018	Enero	11.75	5.083870968	0.5265
	Febrero	12.26	4.057142857	0.49565
	Marzo	11.70	3.335483871	0.56655
	Abril	11.30	1.393333333	0.5582
	Mayo	12.02	1.116129032	0.5455
	Junio	10.59	0.19	0.44515
	Julio	10.31	0.667741935	0.38525
	Agosto	11.40	1.322580645	0.37
	Setiembre	13.06	0.276666667	0.36035
	Octubre	13.04	2.919354839	0.3619
	Noviembre	14.44	2.803333333	0.41255
	Diciembre	13.90	1.525806452	0.3891
2019	Enero	13.08	5.212903226	0.43525
	Febrero	12.77	6.642857143	0.4944
	Marzo	12.88	5.906451613	0.53075
	Abril	12.94	1.643333333	0.5075
	Mayo	12.16	0.883870968	0.56045
	Junio	10.78	0.013333333	0.4585
	Julio	10.70	0.148387097	0.38205
	Agosto	10.84	0	0.32445
	Setiembre	12.50	0.306666667	0.323
	Octubre	13.30	1.319354839	0.35655
	Noviembre	13.68	3.37	0.40745
	Diciembre	13.33	7.274193548	0.4646
2020	Enero	13.41	3.606451613	0.50735
	Febrero	13.34	3.968965517	0.54785
	Marzo	13.61	2.278571429	0.5815

	Abril			0.585
	Mayo			0.50135
	Junio			0.4256
	Julio			0.3527
	Agosto			0.31635
	Setiembre			0.31
	Octubre			0.33585
	Noviembre			0.33045
	Diciembre			0.33945
2021	Enero			0.4461
	Febrero			0.5328
	Marzo			0.5473
	Abril			0.6258
	Mayo	10.61	0.184210526	0.54845
	Junio	10.44	0.25	0.46125
	Julio	12.50	0	0.3808
	Agosto	11.49	0.735483871	0.342
	Setiembre	12.17	0.310344828	0.33975
	Octubre	13.20	2.034482759	0.3481
	Noviembre	12.74	2.568965517	0.37625
	Diciembre	12.60	3.516666667	0.4608