

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
RECURSOS NATURALES



Tesis

Evaluación de sequías empleando sensoramiento remoto MODIS Y

PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022

Asesor:

Mag. Reynaga Medina, Alexei

Autor:

Cardenas Ilizarbe, Pamela Milagros

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Andahuaylas – Apurímac – Perú

2024

Acta de sustentación

ACTA N° 003-2024-UTEA-FI-EPIARN

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS FACULTAD DE INGENIERÍA – ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES FILIAL ANDAHUAYLAS

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales Filial Andahuaylas, siendo las 9:00 A.M horas de la ciudad de Andahuaylas del 09 Martes de Abril del 2024 en reunión presencial programada en el Auditorio de la Universidad Tecnológica de los Andes Filial Andahuaylas, sustentación programada según memorándum múltiple N°0011-2024.UTEA-FA-EPIARN/SD, jurado designado según resolución sub Directoral N°019-2024-FJ-EPIARN/SD en el artículo segundo conformado por:

- Mag. Herbert Rodas Ccopa (Presidente)
- Ing. José Gabriel Barazorda Carrillo (Dictaminarte)
- Mag. María Fuentes Allecachuaman (Replicante).

Artículo primero indica a los aspirantes: Cárdenas Ilizarbe Pamela Milagros con la finalidad de sustentarla tesis titulada "Evaluación de sequías Empleando Sesoramiento Remoto MODIS y PISCO en la Cuenca del Río Pampas del Año 2002 al 2022", cuya tesis se da a la hora indicada, reunión dirigida por el presidente da inicio con la exposición por la aspirante, terminando la presentación se pasa a la ronda de preguntas, la cual inicia con la Mag. María Fuentes Allecachuaman seguidamente el Ing. José Gabriel Barazorda Carrillo, Mag. Herbert Rodas Ccopa; todos dando sus observaciones y preguntas.

El presidente da conocer el protocolo invita a retirarse a los presentes para liberar la nota correspondiente después del tiempo estimado, se considera la nota como siguiente:

- Mag. Herbert Rodas Ccopa (presidente): (14)
- Ing. José Gabriel Barazorda Carrillo (Dictaminarte): (15)
- Mag. María Fuentes Allecachuaman (Replicante): (14)

Se promedia la nota del jurado con una nota de 14 (catorce).

Primero levantar las observaciones de la tesis realizados por los jurados, para su posterior empastado con el visto bueno de cada miembro del jurado calificador.

Segundo. Realizada la deliberación se procede a clasificar la decisión del jurado la nota correspondiente.

A continuación, el presidente invita a pasar a la tesista para dar a conocer los resultados correspondientes, quedando expedido para la observación del título profesional del Ingeniero Ambiental, se da por concluido el acto siendo las 10:12 A.M del 09 martes de abril del 2024 a continuación firman los miembros del jurado y titular.



Mag. Herbert Rodas Ccopa
(Presidente)



Ing. José Gabriel Barazorda Carrillo
(Dictaminarte)



Mag. María Fuentes Allecachuaman
(Replicante)



Bach. Pamela Milagros Cárdenas
Ilizarbe

Reporte de similitud



Evaluación de sequías empleando sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	12%	3%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	4%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
5	scielo.sld.cu Fuente de Internet	<1%
6	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	web.archive.org Fuente de Internet	<1%

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	: Cardenas Iizarbe, Pamela Milagros
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 73336794
URL (ORCID)	:
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Mag. Reynaga Medina, Alexei
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 31176503
URL (ORCID)	: https://orcid.org/0000-0001-7444-4681
Datos de la investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	: Calidad ambiental
Rango de año en que se realizó la investigación	: mayo del 2023 – febrero del 2024
Fuentes de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 12% con depósito
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.07.01

Dedicatoria

A Dios, porque por medio de su infinita gracia, completé este proceso; también lo dedico a mis amados padres, por su apoyo incondicional y porque siempre estuvieron presente en todo momento, del mismo modo me gustaría dedicar este trabajo a aquellos que me guiaron durante todo el proceso y quienes me brindaron su apoyo en todo este tiempo.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y a Dios por su ayuda y por permitirme concretar todos estos logros. Quiero agradecer a la universidad, donde obtuve los conocimientos que me permitieron desarrollarme como profesional.

Resumen

Esta investigación aborda la evaluación de la sequía en la cuenca del río Pampas desde el año 2002 hasta 2022, empleando el sensoramiento remoto usando el sensor MODIS como principal herramienta de análisis. A través de este estudio, se ha logrado identificar patrones significativos relacionados con la gradiente altitudinal en la región. Específicamente, el NDVI, que es un indicador de la salud vegetal, mostró una disminución conforme aumentaba la altitud. Esta tendencia coincide con estudios previos que mencionan la predominancia de pastizales en zonas de alta montaña, asociados a valores de NDVI más bajos en comparación con áreas de menor altitud con vegetación más densa.

En cuanto a la estacionalidad, la investigación destaca la variabilidad de las lluvias en la región. Utilizando el producto PISCO, se identificó que las precipitaciones alcanzan su máximo en febrero y disminuyen considerablemente entre junio y julio. Esta estacionalidad tiene una influencia directa en el comportamiento vegetativo, evidenciando periodos claros de humedad y sequedad.

Uno de los hallazgos cruciales fue la identificación de eventos de sequía en los años 2005, 2016 y 2022. Estos episodios, influenciados por fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña, presentaron impactos notables en la precipitación y el NDVI.

Palabras clave: sequía, MODIS, NDVI, estacionalidad, PISCO.

Abstract

This research addresses the evaluation of drought in the Pampas River basin from 2002 to 2022, using remote sensing using the MODIS sensor as the main analysis tool. Through this study, it has been possible to identify significant patterns related to the altitudinal gradient in the region. Specifically, NDVI, which is an indicator of plant health, showed a decrease as altitude increased.

This trend coincides with previous studies that mention the predominance of grasslands in high mountain areas, associated with lower NDVI values compared to lower altitude areas with denser vegetation. Regarding seasonality, the research highlights the variability of rainfall in the region. Using the PISCO product, it was identified that rainfall reaches its maximum in February and decreases considerably between June and July.

This seasonality has a direct influence on vegetative behaviour, evidencing clear periods of humidity and dryness. One of the crucial findings was the identification of drought events in the years 2005, 2016 and 2022. These episodes, influenced by global climatic phenomena such as El Niño and La Niña, had notable impacts on precipitation and NDVI.

Key words: drought, MODIS, NDVI, seasonality, PISCO.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice general.....	ix
Índice de tablas	xv
Índice de figuras.....	xvi
Acrónimos	xix
Introducción	xx
CAPÍTULO I. PLAN DE INVESTIGACIÓN.....	22
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	22
1.2 Identificación y formulación del problema	24
1.2.1 Problema general.....	24
1.2.2 Problemas de la investigación.....	24
1.3 Justificación de la investigación	25
1.4 Objetivos de la investigación.....	26
1.4.1 Objetivo general	26

1.4.2 Objetivo específico	26
1.5 Delimitación de la investigación	27
1.5.1 Espacial.....	27
1.5.2 Temporal	28
1.5.3 Social	28
1.6 Variabilidad de la investigación	28
1.7 Limitaciones de la investigación.....	29
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	30
2.1 Antecedentes de la investigación	30
2.1.1 A nivel internacional	30
2.1.2 A nivel nacional	33
2.1.3 A nivel regional y local.....	37
2.2 Bases teóricas.....	38
2.2.1 Definición de sequías	38
2.2.2 Clasificación de sequías.....	39
2.2.3 Identificación de sequías derivados de sensoramiento remoto	40
2.2.3.1 NDVI.....	40
2.2.3.2 NDWI.....	41
2.2.3.3 GVMÍ	41
2.2.3.4 WDI	42
2.2.3.5 VTCÍ	42

2.2.4 Fundamentos de sensoramiento remoto	43
2.2.4.1 Espectro electromagnético	44
2.2.4.2 Relación entre las características de la vegetación y la radiación eléctrica	45
2.2.4.3 Imágenes satelitales.....	46
2.2.5 Monitoreo terrestre con datos satelitales MODIS.....	48
2.2.5.1 Sensor MODIS	48
2.2.5.2 Niveles de procesamiento	49
2.2.5.3 Productos MODLAND	50
2.2.5.4 Productos MOD009.....	51
2.3 Marco conceptual.....	51
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	55
3.1 Hipótesis	55
3.1.1 Hipótesis general.....	55
3.1.2 Hipótesis específicas.....	55
3.2 Método	56
3.3 Tipo de investigación.....	56
3.4 Nivel o alcance de investigación	56
3.5 Diseño de investigación	57
3.6 Operacionalización de variables.....	58
3.7 Población, muestra y muestreo	59
3.7.1 Población	59

3.7.2 Muestra	59
3.7.3 Muestreo	59
3.8 Técnicas e instrumentos	59
3.8.1 Datos.....	59
3.8.1.1 Reflectividad de superficie de satélite Terra MOD09A1	60
3.8.1.2 Precipitación PISCOv2.1	61
3.8.1.3 Modelo de elevación digital (DEM) del shuttle radar topography mision (srtm).....	62
3.8.1.4 Cuenca hidrográfica y limites políticos	62
3.8.2 Metodología.....	63
3.8.2.1 Preparación de datos	64
3.8.2.2 Análisis temporal de los datos.....	66
3.8.2.3 Estimación de los índices de sequía	66
3.8.2.3.1 Índice de condición de vegetación (VCI).....	66
3.8.2.3.2 Índice de condición de precipitación (PCI)	67
3.9 Condiciones éticas	68
3.9.1 Uso de datos	68
3.9.2 Precisión y honestidad	68
3.9.3 Procesamiento estadístico	69
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
4.1 Resultados	70
4.1.1 Análisis de datos de vegetación y precipitación	70

4.1.1.1 Análisis altitudinal de las variables	70
4.1.1.1.1 NDVI y el gradiente altitudinal	71
4.1.1.1.2 Precipitación y el gradiente altitudinal	74
4.1.2 Análisis del ciclo anual de la vegetación y precipitación en la cuenta del rio Pampas	76
4.1.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada mensual (NDVI)	76
4.1.2.2 Precipitación mensual - PISCO	78
4.1.3 Variabilidad interanual de la vegetación y precipitación	82
4.1.4 Análisis de los años de sequias extremas.....	85
4.1.5 Patrones espaciales de sequias mediante índice de sensoramiento	88
4.1.5.1 Condiciones de vegetación y las sequias.....	86
4.1.5.2 Condiciones de precipitación y las sequias	89
4.2 Discusión de resultados	93
4.3 Prueba de hipótesis.....	96
4.3.1 Relación entre la lluvia acumulada y la vegetación	96
Conclusiones.....	98
Recomendaciones.....	100
Aspectos administrativos.....	102
Presupuesto y financiamiento	103
Bibliografía	104

Anexos

Matriz de consistencia

Instrumento de recolección de información

Software QGIS

Software R

Software RStudio

Índice de tablas

Tabla 1.	Nivel de procesamiento de productos MODIS.....	49
Tabla 2.	Matriz de operacionalización de variables.....	58
Tabla 3.	Conjunto de datos satelitales.....	60
Tabla 4.	Características del control de calidad (sur-reft-stare-500m banda de calidad de estado).....	65
Tabla 5.	Categorización de sequias con el VCI.....	67
Tabla 6.	Categorización de sequias con el PCI.....	68
Tabla 7.	Cronograma de actividades.....	102
Tabla 8.	Presupuestos (materiales, equipos y otros).....	103

Índice de figuras

Figura 1.	Delimitación geográfica de la cuenca Pampas.....	27
Figura 2.	Espectro electromagnético y región de la luz visible.....	45
Figura 3.	Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas.....	46
Figura 4.	Esquema metodológico del estudio de la caracterización de sequías en la cuenca del río Pampas.....	63
Figura 5.	Comportamiento y variabilidad de NDVI promedio anual de los años 2002 al 2022, respecto al gradiente altitudinal se muestra el contraste altitud – NDVI en diferentes secciones transversales.....	72
Figura 6.	Representación espacial respecto al gradiente altitudinal promedio anual de los años 2002 al 2022 en: (a) se muestra el modelo digital de elevación, en (b) del NDVI promedio anual muestra la distribución espacial de NDVI.....	73
Figura 7.	Comportamiento y variabilidad de precipitación promedio anual de los años 2002 al 2022 respecto al gradiente altitudinal, se muestran el contraste altitud – precipitación en diferentes secciones transversales.....	74
Figura 8.	Representación espacial de la precipitación respecto al gradiente altitudinal promedio anual de los años 2002 al 2022 en: (a) se muestra el modelo digital de elevación, en (b) se muestra la distribución espacial de precipitación promedio anual.....	75
Figura 9.	Serie de valores históricos mensuales de NDVI obtenidos por el producto MODIS para toda la cuenca del río Pampas.....	77

Figura 10.	Series de valores históricos de lluvia obtenidos por el producto PISCO del SENAMHI (B) para toda la cuenca del rio Pampas.....	78
Figura 11.	Regímenes anuales de condición de vegetación para toda la cuenca del rio Pampas de enero (1) a diciembre (12) promedio anual de los años 2002 al 2022.....	80
Figura 12.	Regímenes anuales de condición de precipitación para toda la cuenca del rio Pampas de enero (1) a diciembre (12) promedio anual de los años 2002 al 2022.....	81
Figura 13.	Variabilidad interanual de las condiciones de vegetación para los meses de enero a agosto.....	83
Figura 14.	Variabilidad interanual de las condiciones de vegetación para los meses de septiembre a diciembre.....	83
Figura 15.	Variabilidad interanual de las condiciones de la precipitación total para los meses de enero a agosto.....	84
Figura 16.	Variabilidad interanual de las condiciones de la precipitación total para los meses de setiembre a diciembre.....	84
Figura 17.	Valores de NDVI por debajo del primer cuartil durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022 desde enero (1) a diciembre (12).....	86
Figura 18.	Valores de precipitación por debajo del primer cuartil durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022 desde enero (1) a diciembre (12) ampliamente.....	87
Figura 19.	Variaciones interanuales del índice de condición de vegetación (VCI) para el periodo 2002 – 2022 respecto al porcentaje de area en condiciones de sequía y condiciones húmedas para los meses de enero a agosto (a) y setiembre a diciembre (b).....	91

Figura 20.	Variaciones interanuales del índice de condición de precipitación (PCI) para el periodo 2002 al 2022 respecto al porcentaje de área en condiciones de sequías y condiciones húmedas para los meses de enero a agosto (a) y setiembre a diciembre (b).....	92
Figura 21.	Diagrama de dispersión entre la precipitación periodo enero a agosto (a) y periodo setiembre a noviembre (b) y las condiciones de vegetación (NDVI) entre setiembre y noviembre, para toda la cuenca del río Pampas, periodo 2002 al 2022.....	97
Figura 22.	Interfaz gráfica de QGIS.....	118
Figura 23.	Interfaz gráfica del lenguaje de programación R.....	119
Figura 24.	Interfaz gráfica del software RStudio.....	120

Acrónimos

- MODIS** : Espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada.
- PISCO** : Datos interpolados peruanos del sistema climatológico e hidrológico del SENAMHI.
- NDVI** : Índice de vegetación de diferencia normalizada.
- NDWI** : Índice normalizado de agua.
- GVMi** : Índice global de humedad de la vegetación.
- WDI** : Índice de déficit de agua.
- VTCl** : Índice de condición de la vegetación por temperatura.
- NIR** : Reflectancia en la banda infrarroja cercana.
- SWIR** : Reflectancia en la banda infrarroja de onda corta.
- TRMM** : Misión de medición de lluvias tropicales.
- R** : Lenguaje de programación.
- Tc** : Temperatura de la atmosfera medida por satélite.
- ETa** : Evapotranspiración real del cultivo.
- P** : Precipitación.
- SRTM** : Misión de topografía de radar del trasbordados.
- Tb** : Temperatura de la superficie terrestre medida por satélite.

Introducción

La cuenca del río Pampas desempeña un papel vital como recurso hídrico, siendo un soporte esencial tanto para las comunidades locales como para los ecosistemas circundantes. Durante las últimas dos décadas, se ha observado, con creciente preocupación, una marcada variabilidad climática (SENAMHI, 2019). Esta variabilidad se ha traducido en episodios de sequía, con correlatos notables en el cambio de la vegetación.

Esta dinámica ambiental, marcada por significativas alteraciones en parámetros como la precipitación y las condiciones vegetativas, exige una exploración exhaustiva. No se trata solo de un mero interés científico. El entendimiento profundo de estas variaciones tiene ramificaciones directas en la administración de recursos hídricos, prácticas agrícolas y esfuerzos de conservación en toda la región. Las comunidades, cuya subsistencia y modus vivendi se entrelazan íntimamente con los recursos de la cuenca, se encuentran en una posición de urgente demanda por información detallada y actualizada para adaptarse proactivamente y mitigar los efectos adversos de los episodios de sequía.

En respuesta a este llamado, el estudio examina la variabilidad de la sequía en la cuenca del río Pampas durante dos décadas, desde año 2002 hasta 2022. Se ha utilizado la tecnología de sensoramiento remoto del sensoramiento espectro radiométrico de imágenes de resolución moderada (MODIS), a bordo del satélite terra, integrante esencial del sistema de la observación de la tierra de la NASA. Este enfoque metodológico nos permite tejer nexos entre la precipitación y vegetación y evaluar como estas variables interaccionan e inciden en la manifestación y gravedad de la sequía. Las relaciones identificadas, formuladas como hipótesis iniciales, sientan las bases para una interpretación robusta y holística de los datos recolectados.

Con el respaldo de metodologías avanzadas de sensoramiento remoto y la riqueza de datos del sensor espectro radiómetro de las imágenes de resolución moderada (MODIS), se desarrolló una estrategia que desvela patrones y tendencias emergentes. Los insights derivados de este estudio brindan un mapa comprensivo de las condiciones de sequía en la región, convirtiéndose en una herramienta invaluable para las estrategias de gestión y planificación de recursos.

Concluyendo, se aspira a que los resultados de esta investigación no solo arrojen luz sobre la problemática de la sequía en la cuenca del río Pampas, sino que también empoderen a comunidades, agricultores y custodios de ecosistemas, proporcionándoles herramientas y perspectivas renovadas para una gestión hídrica.

CAPÍTULO I

PLAN DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad problemática

Como lo demuestra un estudio llevado a cabo por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en el 2012 la cuenca Pampas ha sufrido una disminución del caudal en los últimos años, teniendo una descarga media multianual en la salida de la cuenca de 257.7 m³/s, variado entre 731 m³/s en el mes de febrero y de 43.6 m³/s en el mes de julio, reduciéndose a su vez la cantidad, calidad y oportunidad del agua, la cual es cada vez más notoria, se muestra el aumento para cada mes del año. Este aumento va por delante de los (1°C y 2°C), lo que podría afectar negativamente la producción agrícola, ganadera y otros sectores que dependen del agua. Además, se ha observado un aumento de la temperatura y la evaporación, lo que ha agravado la sequía en la región. Así mismo, ha identificado la cuenca del río Pampas como una zona vulnerable a la sequía y ha declarado el estado de emergencia por déficit hídrico debido a la sequía en varias ocasiones en los últimos años. Por ejemplo, en 2016 se declaró el estado de emergencia por déficit hídrico desde septiembre de este año, que osciló entre el 40 % y el 80 %, noviembre fue el momento más crítico, con un rango del -100 %, correspondiente al trimestre setiembre 2016– noviembre 2016, en Apurímac junto a otras regiones (ANA, 2012).

La sequía es un tema crucial en la gestión del agua, especialmente en regiones donde los recursos hídricos son escasos y vitales para la población y la economía. Este problema recurrente afecta no solo a la población, sino también a la agricultura y ganadería en varias cuencas, incluyendo la cuenca del Río Pampas. (Tello LLamoja & Quevedo, 2021).

El término sequía se refiere comúnmente a periodos prolongados de escasez de precipitaciones, lo cual tiene consecuencias significativas y negativas. Entre ellas se encuentran la disminución de los rendimientos agrícolas, la pérdida de fauna, así como problemas en el uso del suelo, como la desertificación y su consecuente degradación (Keyantash & Dracup, 2002).

Sin embargo, la literatura científica describe cuatro tipos de sequía, las cuales son: Meteorología, Hidrología, Agricultura y Socioeconomía. El primero menciona la carencia de lluvia, en tanto la sequía hidrológica referente a la disminución del recurso hídrico superficial y subterránea. La insuficiencia de humedad en la superficie de suelo es relacionada a la sequía agrícola para el crecimiento de los cultivos y la socioeconomía socioeconómica se considera una consecuencia de los otros tipos de sequía que pueden impactar sobre la economía de la población (Keyantash & Dracup, 2002).

Por su parte, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ha señalado que la región Apurímac está expuesta a fenómenos meteorológicos extremos que han tenido un impacto significativo en la última década, donde se ha observado un aumento de la influencia con respecto al cambio climático en nuestra región. Además, se menciona que en Apurímac la mayor actividad económica viene a ser la agricultura, en su mayoría de los cultivos se manejan bajo el régimen de riego por secano, lo que significa que solo se pueden cultivar durante

una parte del año a espera de las lluvias. La ocurrencia de eventos meteorológicos extremos como sequías, puede impactar severamente sobre los cultivos, reduciendo sus rendimientos o su destrucción total, por lo que es imperativo conocer las características agroclimáticas particulares de cada zona. (Velazco Alarcón et al., 2011).

Además, la falta de infraestructura y tecnología adecuada para el monitoreo y pronóstico de eventos climáticos extremos en Apurímac ha limitado la capacidad de los agricultores y la población en general para adaptarse y prepararse para estos eventos. También existe un problema de acceso limitado a recursos hídricos para la agricultura debido a la falta de inversión en infraestructura de riego y conservación de agua. Estos problemas se suman a la complejidad del problema de sequía en la región Apurímac y enfatizan la importancia de atender no solo el causante de la sequía, sino también las barreras para la adaptación y mitigación de sus efectos en la población y la economía local.

1.2 Identificación y formulación de problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo evaluar y caracterizar las sequias empleando el sensoramiento remoto MODIS Y PISCO en la cuenca del rio Pampas del año 2002 al 2022?

1.2.2 Problemas específicos

- 1) ¿Es posible caracterizar espacial y temporalmente las sequias mediante el uso de sensoramiento remoto MODIS Y PISCO en la cuenca del rio Pampas del año 2002 al 2022?
- 2) ¿Cómo se puede evaluar la variabilidad temporal de la vegetación y la precipitación mediante el uso de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del rio Pampas del año 2002 al 2022?

- 3) ¿Cómo evaluar los impactos ocasionados aplicando los índices de sequías, empleando datos de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022?
- 4) ¿Qué relación hay entre la precipitación y las condiciones de la vegetación durante los años de sequía extrema en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022?

1.3 Justificación de la investigación

(Keyantash & Dracup, 2002) señalan que las sequías son uno de los riesgos naturales más costosos del mundo, ya que pueden ocasionar daños globales anuales que oscilan entre los 6 mil millones a 8 mil millones de dólares, afectando más personas que cualquier otro fenómeno natural. En el Perú, las cuencas también se ven afectadas por estos eventos, lo que genera muchas dificultades para su mitigación debido a su larga duración y extensa área de influencia, que a menudo supera a otros eventos climáticos como las inundaciones o las heladas (Wilhite et al., 2007).

La problemática de las sequías es recurrente debido al comportamiento cíclico del clima y la hidrología. Un gran porcentaje del territorio nacional es vulnerable a sequías periódicas, como menciona la Autoridad Nacional del Agua (ANA) se presentaron 163 eventos de sequías a nivel nacional entre 2000 y 2010, siendo la vertiente Pacífico la más afectada con 127 eventos, por su parte señalan que la vertiente del Lago Titicaca presentó 25 eventos y la del Amazonas 11 eventos. Estos eventos generan daños principalmente en el sector agrícola, lo que resulta en pérdidas económicas significativas (Pardo et al., 2013).

De acuerdo con los informes elaborados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se espera un aumento de las sequías periódicas y

severidad de eventos meteorológicos extremos como inundaciones, sequías y heladas. Tal contexto, la cuenca del río Pampas viene a ser particularmente sensible a estos acontecimientos, como se ha observado en los últimos años. (ANA, 2018).

En estos últimos tiempos se realizaron para poder comprender las causas y consecuencias con respecto a las sequías en el Perú, determinar los parámetros físicos relevantes para la ocurrencia de estos eventos y relacionarlos con la falta de precipitación en la región (ubicación de la cuenca del río Pampas) es crucial anticipar estos fenómenos meteorológicos extremos en los monzones (Febre, 2017). Considerando todo esto, aún continúan procedimientos que no están definidos en relación a los efectos de estas sequías sobre las plantas, sin mencionar el impacto económico y social.

Por lo tanto, caracterizar las sequías en la cuenca Pampas utilizando sensoramiento remoto es esencial para mejorar la comprensión de la variación del clima y sus impactos en la región. La información que se obtuvo a través de esta investigación será necesaria en el manejo de decisiones en gestión del agua y agricultura en nuestra región, y podrá ser utilizada para diseñar técnicas de adaptación y mitigación ante los déficits hídricos.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Evaluar y caracterizar las sequías empleando el sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.

1.4.2 Objetivos específicos

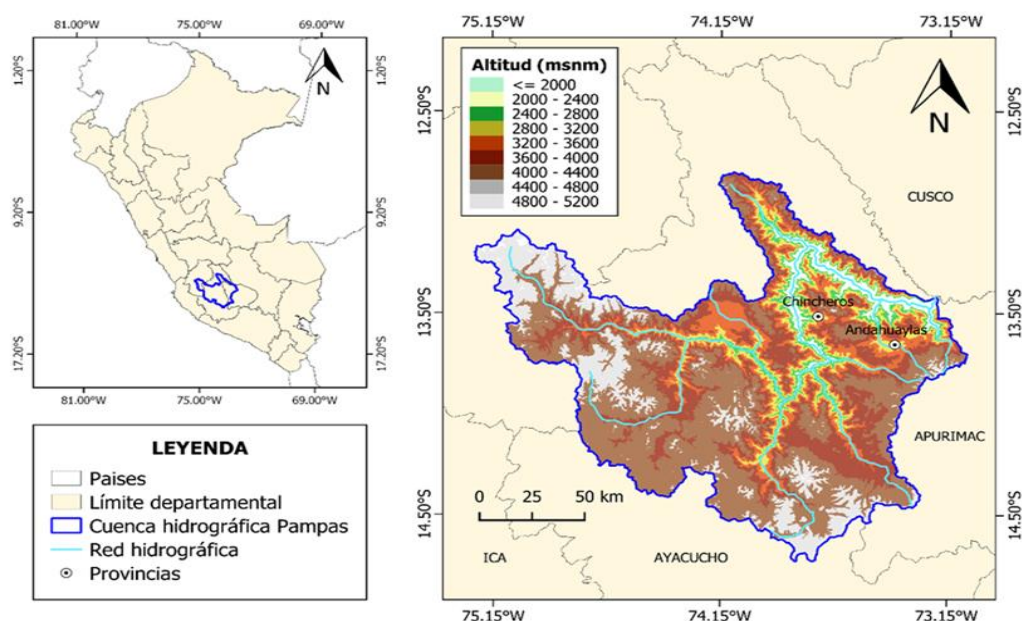
- 1) Caracterizar espacial y temporal las sequías mediante el uso de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.

- 2) Evaluar la variabilidad temporal de la vegetación y la precipitación mediante el uso de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.
- 3) Evaluar los impactos ocasionados aplicando los índices de sequía, empleando datos de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.
- 4) Analizar la relación que hay entre la precipitación y las condiciones de la vegetación durante los años de sequía extrema en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.

1.5 Delimitaciones de la investigación

1.5.1 Espacial

Figura 1. Delimitación geográfica de la cuenca Pampas



Fuente: Elaboración propia, con información de cuencas hidrográficas (ANA), límites departamentales (IGN) y modelo digital de elevación SRTM (NASA).

La cuenca Pampas forma parte del sistema hidrográfico del Atlántico, conformando una superficie de drenante (23 236 km²), se extiende desde su origen en la laguna Choclococha y Orococha, en la región de Huancavelica, a una altitud de

4 454 m s.n.m, desembocando en la margen izquierda del río Apurímac, en la provincia de Andahuaylas, a una altitud de 975 m s.n.m, alcanzando una longitud aproximada de 445 km, recogiendo las aguas provenientes de varios ríos principales como Caracha, Lucanas, Chicha, Torobamba, Huancaray, Chumbao y Pincos. Esta cuenca se localiza entre las coordenadas (UTM Zona 18S) 47300 y 710 000 E y 8 590 000 y 8 365 000 N.

1.5.2 Temporal

El periodo de estudio se ha delimitado entre los años 2002 al 2022, debido a la disponibilidad de los datos y al interés de analizar un periodo de tiempo que abarque por lo menos las últimas dos décadas, donde se han venido presentando, de forma más recurrente, episodios de sequías extremas en la región dentro de la cuenca Pampas.

1.5.3 Social

La población de estudio se define como la totalidad de personas que residen en la cuenca Pampas. Según el doceavo Censo de Población, séptimo de Vivienda y tercero de Comunidades Indígenas llevado a cabo en 2017, la población total de la cuenca Pampas se distribuye en la región Huancavelica (2 595 habitantes), la región Ayacucho (127 609 habitantes) y la región Apurímac (179 341 habitantes), siendo la provincia de Andahuaylas la más poblada con 133 998 habitantes.

1.6 Variabilidad de la investigación

Una de las actividades económicas principales en desarrollarse dentro de la cuenca Pampas lo conforma la agricultura, por lo que resulta importante entender cómo es el desarrollo espacial y temporal de las sequías, pues este tipo de fenómenos naturales podrían traer consecuencias económicas elevadas. También tienen influencia sobre el suministro de agua potable, generación de energía y el sector

pecuario, por lo que es crucial entender cómo los episodios de sequías podrían impactar en la población.

1.7 Limitaciones de la investigación

Los datos MODIS y PISCO son considerados datos de primera fuente al ser descargados directamente desde sus fuentes en su formato original. Las limitaciones en torno a este tipo de datos de primera fuente derivan de las características propias de los datos utilizados, las cuales se describen a continuación. En particular, en relación a los datos MODIS de reflectividad, uno de los principales desafíos es la presencia de cobertura nubosa, lo que puede resultar en la eliminación de una cantidad significativa de píxeles sobre la cuenca del río Pampas. En cuanto a los datos de precipitación PISCO, las limitaciones se relacionan con la representatividad espacial de la precipitación, ya que este producto está sujeto en su mayoría de la densidad en estaciones meteorológicas dentro o cerca del área de estudio. Asimismo, cuenta con una baja resolución espacial, la cual es aproximadamente de 10 km. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, ambos datos han sido ampliamente utilizados en el estudio de sequías en la región andina, como la cuenca Pampas con resultados importantes.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación

2.1.1 A nivel internacional

Bais (2017) en el estudio titulado "Caracterización de sequías hidrológicas en cuencas de la Patagonia de la República Argentina", tiene como objetivo identificar sequías desde un enfoque hidrológico, por lo que utilizó datos de los aportes anuales de cinco cuencas ubicadas en la Patagonia argentina. Para alcanzar este objetivo, el autor define los tipos de sequías a analizar y utiliza variables como caudales, precipitación y humedad del suelo. Como resultado de la investigación, se concluye que las sequías hidrológicas en las cinco cuencas estudiadas tienen una duración promedio de dos años y una intensidad media del 50% del caudal medio anual. Finalmente, el autor destaca la importancia de los datos paleo climáticos como una herramienta valiosa para evaluar en el pasado las sequías con respecto a su extensión, duración y severidad, y cómo estos datos pueden ser utilizados para mejorar las técnicas de predicción en etapas tempranas de desarrollo.

Pan et al. (2023) en su investigación titulada "Exactitud de los índices de sequía agrícola y análisis de las características de la sequía agrícola en China entre 2000 y 2019" con el objetivo de identificar un índice de sequía agrícola confiable y preciso que funcione bien tanto en climas secos como húmedos, para eso se calcularon y

compararon índices de sequía como el Índice de Condición de la Vegetación (VCI), Índice de Anomalía de Humedad del Suelo (SMA) y el Índice de Severidad de Sequía (DSI) con información de sequía in situ proporcionada por fuentes oficiales de China. Los resultados mostraron que el DSI basado en los productos del Sistema Global de Asimilación de Datos de la Tierra (GLDAS) fue el mejor para identificar la sequía agrícola tanto en regiones de clima seco como húmedo en China. También concluyen que hubo una disminución en la tendencia de sequía agrícola en el noroeste de China, ya que la región se está volviendo más cálida y húmeda debido al cambio climático, finalmente mencionan que esta región se ha beneficiado enormemente de las medidas de mitigación de sequías y la implementación de proyectos ecológicos.

Jiao et al. (2021) en su investigación titulada “Teledetección multisensorial para la caracterización de la sequía: estado actual, oportunidades y una hoja de ruta para el futuro” estudiaron el uso de sensores remotos para la caracterización de las sequías que pudieran ser usadas a nivel global, enfocándose en el nivel en sistema de sensor remoto para proporcionar información sobre esta sequía desde varias perspectivas, incluyendo el impacto en la vegetación y las respuestas hidrológicas. Posteriormente, se dará un análisis exhaustivo de estos estudios en sequía basados en sensores remotos que utilizan múltiples sensores y destacan la importancia de los avances en los sistemas de estas herramientas para mejorar la capacidad de caracterización de la sequía. La metodología empleada consistió en analizar una amplia gama de conjuntos de datos de sequía basados en la teledetección y revisan la literatura existente sobre los mecanismos y fenómenos relacionados con la sequía, como las respuestas de la vegetación a la sequía, la retroalimentación tierra-atmósfera durante la sequía, la mortalidad de los árboles relacionada con la sequía, los incendios en ecosistemas relacionados con la sequía y la recuperación postsequía.

Asimismo, analizan los avances en la modelización de la sequía y en la creación de índices integrados de sequía apoyado de múltiples sensores remotos. Como conclusiones, indican que manejar múltiples sensores remotos es esencial para avanzar en la comprensión, caracterización y descripción de la sequía en el futuro, y que estos deben enfocarse en la combinación de diferentes técnicas y sensores en una amplia gama de escalas espaciales y temporales nos da un razonamiento más complejo de estos mecanismos de la sequía y sus impactos en los ecosistemas.

(García, 2020) realizó un estudio titulado “Sensoramiento remoto de la salinidad en el agroecosistema Mayarí de la provincia Holguín, Cuba”, se determinaron los índices espectrales relacionados con la salinidad del suelo mediante el sensor remoto en dos épocas del año más relevantes por las precipitaciones, en el agro sistema de Mayali en la provincia de Holguín, Cuba. Las imágenes utilizadas fueron del mes de mayo de 2016 y diciembre de 2018, obtenidas 8 OLI/TIRS en la cuadrícula 011/046. Se utilizó el software QGIS 3.10 para la determinación de los índices espectrales; así como la corrección radiométrica, informe estadístico de los valores digitales de las imágenes y la confección de los mapas temáticos. Los resultados obtenidos muestran la variación de los valores digitales e los índices espectrales en ambas épocas del año estudiada, donde el índice salino (IS) presentó mayor contenido de y menor zonas con vegetación en mayo de 2016 lo que pudo estar dado por las sales finalización de la época de sequía y comienzo de la temporada de lluvia. Igual comportamiento fue ilustrado por los índices ENDWI, NDDI y VSSI los cuales influyeron en el comportamiento del IS y el NDVI.

Hao & Singh (2018) en su investigación titulada “Predicción de sequía estacional: avances, desafíos y perspectivas futuras” realizan una revisión exhaustiva sobre los índices de sequía multivariados y su aplicación, a nivel global, en la

caracterización de las sequías y sus impactos. La predicción de sequías es de importancia crítica para la alerta temprana para la gestión de sequías. Esta revisión proporciona una síntesis de la predicción de sequías basada en métodos estadísticos, dinámicos e híbridos. La predicción estadística de la sequía se logra modelando la relación entre los índices de sequía de interés y un conjunto de predictores potenciales, incluidos índices climáticos a gran escala, variables climáticas locales y condiciones iniciales de la tierra, La predicción meteorológica dinámica de sequías se basa en el pronóstico climático estacional a partir de modelos de circulación general (GCM), que pueden emplearse para impulsar modelos hidrológicos para la predicción de sequías agrícolas e hidrológicas con la previsibilidad determinada tanto por los forzamientos climáticos como por las condiciones iniciales en general, se ha reconocido que la aparición de sequías está asociada con un transporte anómalo de humedad que está vinculado a fenómenos climáticos a gran escala a través de la teleconexión atmósfera-océano, y que la gravedad y la duración de la sequía se ven afectadas por la retroalimentación de la superficie terrestre, que también puede verse influenciada por actividades humanas o globales.

2.1.2 A Nivel nacional

Ccanchi Espinoza (2021) en su investigación titulada “Evaluación de sequías y del riesgo potencial a la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas altoandinos mediante uso de sensores remotos” realizó una caracterización de condiciones vegetativas y climáticas en pastizales andinos, matorrales andinos y bosques naturales en las regiones de Cusco y Cajamarca, que han sido especialmente afectadas por eventos climáticos extremos durante el periodo de 2002 – 2016. Para este propósito, se analizaron las variables climáticas de precipitación y temperatura máxima utilizando el producto PISCO del SENAMHI, mientras que la

vegetación se caracterizó utilizando índices de vegetación y datos de reflectividad MOD09A1 del sensor MODIS. La investigación identificó que los bajos niveles de humedad y altas temperaturas causados por las sequías en las regiones en la cuenca andina – amazónica, relacionadas con anomalías positivas de la temperatura superficial del mar en el pacífico y el atlántico durante los años 2005, 2010 y 2016, tuvieron un impacto en las regiones evaluadas, lo que generó un ambiente propicio para el aumento severo de incendios forestales. Finalmente, que la monitorización de estos factores climáticos y vegetativos contribuirán ya establecer estrategias que conduzcan ya la reducción de los impactos negativos que tienen los incendios forestales sobre los ecosistemas altoandinos, los regímenes hidrológicos y la disponibilidad hídrica en el país.

Ortiz Vásquez (2017) en su investigación "Caracterización de sequías en la cuenca Puyango-Tumbes en base a los índices de flujo base y precipitación estandarizada" se enfocó en estudiar las sequías en la cuenca Puyango -Tumbes en el período 1974-2017 utilizando dos índices: el índice de flujo base y la precipitación estandarizada. El índice de flujo base (IFB) es una medida de la contribución de los acuíferos a los ríos, mientras que la precipitación estandarizada (PSE) es una medida de la anomalía de la precipitación en relación a la media histórica. Los resultados muestran que la cuenca experimentó sequías moderadas y severas con una frecuencia de 5 a 8 años y una duración de 6 a 10 meses. También se observó que las sequías están relacionadas con el fenómeno El Niño y La Niña, con una mayor incidencia durante el evento El Niño. Finalmente, concluye, con la información obtenida de esta podrían ser útiles para la toma de decisiones en la gestión del agua en la cuenca Puyango-Tumbes.

Zubieta Barragán et al. (2021) en su estudio “Impactos del cambio climático en diferentes tipos de sequías en la cuenca del Titicaca” presentaron un análisis sobre cómo el cambio climático podría afectar la frecuencia de las sequías en la cuenca del lago Titicaca, río Desaguadero y lago Poopó (también conocido como Sistema TDPS). Compararon estos resultados de los modelos climáticos con los datos observados desde 1984 hasta 2014 y se evaluaron las proyecciones hasta el año 2034-2064. Se utilizaron proyecciones climáticas mensuales del proyecto CMIP5 bajo el escenario de emisión RCP8.5, y manejaron índices estandarizados para medir la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. También se estimó la humedad del suelo y la escorrentía mediante un modelo hidrológico. Los resultados mostraron que las sequías en la región serían más intensas, frecuentes y prolongadas debido al aumento de la temperatura y los cambios en la cantidad y patrón espacial de la precipitación. Se proyectó el aumento en la frecuencia de sequías agrícolas e hidrológicas de duración 1 entre 2 meses. Además, se espera que la disminución de la precipitación se vio aumentada la evapotranspiración en parte de esta gran cuenca (Bolivia) produzca mayores impactos que en la región norte (Perú). Finalmente, el estudio concluye que el cambio climático tendrá un gran impacto en las sequías en la cuenca del Lago Titicaca y que es importante tomar medidas para adaptarse a estos cambios y reducir su impacto en la región.

Febre (2017) en su estudio titulado “Causa de sequías severas en el sur del Perú” investigó las sequías severas en Perú de la región suroriental, Para ello se analizó esta información en precipitación mensual de las estaciones meteorológicas del SENAMHI y del centro nacional de predicción ambiental/centro nacional de investigación atmosférica desde 1951 hasta 2010. Los resultados mostraron que las sequías en la zona asociada a caídas anómalas en la troposfera media. Estos

descensos se deben principalmente a procesos de advección de vorticidad anticiclónica, y en baja medida a la entrada de cueros de aire frío del sur en la troposfera baja. Además, se evidenció que la circulación anticiclónica en niveles medios es inducida, en su mayoría, por forzamiento a lo largo del pacífico tropical. Durante años EL NIÑO, el fuerte calentamiento a lo largo del pacífico ecuatorial central induce un fuerte dipolo divergente en la troposfera alta, lo que intensifica el transporte convergente de humedad hacia sureste del pacífico (SEP), afectando la fuente de humedad primaria para el sistema del alta de Bolivia. Otra posible causa de las sequías es la teleconexión del pacífico sur, en la cual la propagación de energía de ondas Rossby juega un papel importante para reducir patrones de ondas de larga escala que producen anticiclogénesis al sur de Chile. Se concluye que las sequías en la región suroriental de la región andina del Perú son el resultado de una combinación de factores atmosféricos, incluyendo la circulación anticiclónica y la entrada de masas de aire frío, y que las influenciadas por eventos climáticos como El Niño y la teleconexión del pacífico sur.

Gutierrez Cori, (2018) en su estudio “Estimación de índices de sequía mediante sensoramiento remoto integrando MODIS y TRMM en la cuenca andino amazónica, Perú” investigó la variabilidad espacial y temporal de indicadores de sequías extremas en la cuenca andino– amazónica de Perú durante el periodo 2001 – 2016 utilizando datos de sensores remotos. Se emplearon datos del satélite TERRA para la temperatura de superficie de suelo (LST) e índice de vegetación (NDVI) y datos del satélite TRMM para la precipitación diaria. También se utilizó información de lluvia observada y grillada del observatorio HYBAM. Se desarrollaron tres índices basados en sensoramiento remoto para caracterizar el comportamiento interanual de las sequías: el índice de condición de temperaturas (TCI), el índice de condición de

vegetación (VCI) y el índice de condición de precipitación (PCI). Los índices se categorizaron en niveles de intensidad de sequías como leve, moderada, severa y extrema. Se encontró que los años 2002 y 2010 fueron de categoría extrema, afectando hasta un 50% de la cuenca en 2010. También se analizó la relación entre las precipitaciones y la vegetación, encontrando que el volumen de precipitación acumulado explica moderadamente el desarrollo de la vegetación andino – amazónica, mientras que la frecuencia de días secos (DDF) y los valores de NDVI se encuentran significativamente relacionados, se desarrolló un indicador para mantener un seguimiento constante de las sequías extremas que podrían afectar la vegetación de la cuenca andino – amazónica, utilizando estaciones con precipitación a tiempo real (TRMM 3B42-RT).

2.1.3 A Nivel regional y local

Cuba & Surco (2022), investigación denominada “Estimación Temporal y Espacial de las Sequías e Inundaciones Meteorológicas con índice China-Z en la Inter cuenca Alto Apurímac, Perú” evalúan las sequías e inundaciones meteorológicas en términos de su distribución espacial y temporal en la Inter cuenca Alto (IAA) ubicada en la región montañosa del sur de los andes peruanos, Para ello, se utilizó el método del índice China-Z (CZI) del año de 1986 a 2015. Los datos utilizados incluyeron mediciones de precipitación observada y datos satelitales proporcionados por la misión de medición de lluvia tropical (TRMM). Se obtuvo que tanto los datos observados como los obtenidos del satélite TRMM mostraron características estadísticas similares y fueron lo suficientemente robustos como para representar información sobre la lluvia. Mediante el uso del CZI, se pudo identificar y clasificar las sequías e inundaciones en diferentes escalas temporales y espaciales. Se encontró que la sequía ocurrió mayormente en diciembre, en la zona oeste de la IAA, y los

años críticos fueron entre 1988 y 1992. Por otro lado, las inundaciones fueron más frecuentes en el mes de febrero, en la zona este de la IAA, y los años destacados fueron 2011 y 2012. Sus resultados demostraron que la aplicación del método CZI es efectiva para detectar y clasificar sequías e inundaciones en la región de los Andes sudamericanos.

Atúncar Zevallos, (2020) en su investigación "Análisis de las sequías en la cuenca del río Pampas durante el periodo 1981-2016", analizó el comportamiento de sequías en la cuenca del río Pampas, con el objetivo que es estudiar estas características espacio-temporales en sequías históricas y evaluar las tendencias de estos eventos extremos en las regiones homogéneas. Para ello, usó diversas metodologías como el índice estandarizado de precipitación (SPI), análisis estadísticos y herramientas geoespaciales. Los resultados muestran una disminución en la ocurrencia de sequías en la cuenca del río Pampas entre los años 1981 y 2016 y se identificaron tres regiones homogéneas con diferentes patrones espaciales y temporales. Este estudio es importante para entender la evolución y tendencias de las sequías en la cuenca del río Pampas y puede ser útil para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la región.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Definición de sequías

La sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando las precipitaciones en una región son inferiores a lo normal durante un período prolongado de tiempo. La definición de las sequías se divide en conceptual y operacional, siendo la conceptual una "deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado". La definición operacional se utiliza para identificar el inicio, la gravedad y la terminación de los períodos de sequía, permitiendo examinar la frecuencia,

intensidad y duración de los períodos. de regreso dado. Este fenómeno es perjudicial y poco investigado, por lo que es importante comprender sus características para prevenirla y adaptarse a sus efectos (Valiente, 2001; Wilhite & Glantz, 1985).

2.2.2 Clasificación de sequías

La sequía es un fenómeno complejo que puede tener diversas manifestaciones y afectar a diferentes sectores. En la literatura, se han propuesto varias clasificaciones para definir los distintos tipos de sequía y sus impactos en la sociedad y el medio ambiente. Una de las clasificaciones más utilizadas es la propuesta por (Wilhite & Glantz, 1985), que distingue entre sequía socioeconómica, agrícola, hidrológica y meteorológica.

- **Sequía meteorológica:** Según (Palmer, 1965) se define como el intervalo de tiempo en el que, en un lugar, las precipitaciones han estado por debajo de la media durante varios años seguidos, lo que afecta al balance hídrico de la zona.
- **Sequía hidrológica:** Se refiere al decaimiento en los caudales y volúmenes de los recursos hídricos subterráneos y superficiales. Este tipo de sequía se produce por las sequías meteorológicas, cuando la ausencia de precipitaciones se traduce en un descenso del flujo de los ríos y los porcentajes de los acuíferos (Valiente, 2001).
- **Sequía agrícola:** Según (Valiente, 2001) la sequía agrícola ocurre cuando la humedad y en la superficie no es apto para que se desarrolle un cultivo determinado, y esta depende de factores como esta condición meteorológica, la propiedad del suelo y los tipos de cultivos. Las consecuencias de la sequía agrícola pueden ser graves para producir alimentos y la seguridad alimentaria en una región.

- **Sequía socioeconómica:** Está ligada a los procesos de sequías ya mencionados, ya que genera impactos negativos en los diferentes sectores productivos de la cuenca de estudio o región. La sequía puede tener un impacto significativo en la economía, la salud, el bienestar y la calidad de vida de las personas que viven en zonas afectadas por este fenómeno. Es importante tener en cuenta que las sequías pueden tener distintas manifestaciones en diferentes regiones y que su impacto varía en función de la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación de las poblaciones afectadas. (Zevallos, 2020).

2.2.3 Indicadores de sequía derivados de sensoramiento remoto

Los indicadores de sequía son herramientas que se utilizan para cuantificar y monitorizar la sequía. Son una medida estadística que combina información sobre el balance hídrico, la precipitación y otros factores para proporcionar una evaluación cuantitativa de la intensidad, duración y extensión espacial de la sequía (Svoboda et al., 2012).

2.2.3.1 NDVI

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, es un indicador utilizado para medir la salud y densidad de la vegetación. Diseñado por Rouse et al., (1974). Se basa en la diferencia de la reflectancia de la superficie terrestre en el espectro visible e infrarrojo cercano, lo que permite inferir la actividad fotosintética de la vegetación. El NDVI es ampliamente utilizado en la detección de sequías, ya que una disminución en la actividad fotosintética puede ser un indicador temprano de sequía en las plantas (Zarco-Tejada et al., 2012).

El proceso de cálculo del índice NDVI se realiza a partir de la medición de la reflectancia de la radiación en dos bandas espectrales, la banda roja y la banda

infrarroja cercana (NIR), obtenida a través de imágenes satelitales. La fórmula para el cálculo del NDVI es:

$$NDVI = \frac{(NIR - Rojo)}{(NIR + Rojo)} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

NIR = reflectancia en la banda infrarroja cercana.

Rojo = reflectancia en la banda roja.

Se encuentra en un rango de -1 a 1, donde valores cercanos a 1 indican una alta actividad fotosintética, es decir, una mayor presencia de vegetación, valores cercanos a 0 corresponden a zonas con escasa vegetación, mientras que valores cercanos negativos están asociados a cuerpos de agua, nieve o nubes (Tucker, 1979a).

2.2.3.2 NDWI

Índice Normalizado de Agua, índice que se utiliza para estimar la cantidad de agua presente en una superficie a partir de imágenes satelitales. Fue desarrollado por McFeeters en 1996 y se basa en la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del verde (GR). La fórmula del NDWI es la siguiente:

$$NDWI = \frac{(NIR - GR)}{(NIR + GR)} \dots \dots \dots (2)$$

Los valores del NDWI oscilan entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican una mayor cantidad de agua y los valores cercanos a -1 indican una menor cantidad de agua (Silva Laurentino, 2014).

2.2.3.3 GVMÍ

El Índice Global de Humedad de la Vegetación, estima la cantidad de agua presente en la planta utilizando los datos recopilados por los sensores remotos en el espectro electromagnético. Para hacerlo, emplea un análisis de sensibilidad global.

Esto le permite cuantificar cómo el contenido de humedad en la vegetación afecta los niveles diferentes (atmósfera, hojas y dosel). De esta manera, se optimiza la precisión en la medición del contenido de agua de las plantas, mientras se minimizan los efectos adversos de factores geofísicos y atmosféricos (Ceccato et al., 2002).

$$GVM I = \frac{(NIR+0.1)-(SWIR+0.02)}{(NIR+0.1)+(SWIR+0.02)} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

NIR = reflectancia en la banda infrarroja cercana.

SWIR = reflectancia en la banda infrarroja de onda corta.

2.2.3.4 WDI

Índice de Déficit de Agua, índice que se utiliza en la evaluación del déficit de agua en un cultivo durante su ciclo de crecimiento.

La fórmula del WDI es la siguiente:

$$WDI = \frac{ETa - P}{ETa} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

ETa: evapotranspiración real del cultivo.

P: precipitación.

Los valores del WDI oscilan entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican un alto déficit de agua en el cultivo y los valores cercanos a 0 indican una situación del balance hídrico (Shuai & Basso, 2022).

2.2.3.5 VTCI

Índice de Condición de la Vegetación por Temperatura, índice que se utiliza al evaluar la condición de la vegetación a partir de la temperatura de la superficie terrestre desarrollado por (Kogan, 1995a). La fórmula del VTCI es la siguiente:

$$VTCI = \left(\frac{T_c - T_b}{T_c + T_b} \right) * NDVI \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

Tc: temperatura de la atmósfera medida por satélite.

Tb: temperatura de la superficie terrestre medida por satélite.

NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

Los valores del VTCl oscilan entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican una buena condición de la vegetación y los valores cercanos a -1 indican una condición deficiente (Zhou et al., 2020).

2.2.4 Fundamentos de sensores remotos

Los sensores remotos son herramientas valiosas para la adquisición de información sobre la superficie terrestre desde satélites, aviones y drones. Estos dispositivos registran la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre en diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que permite obtener información sobre las características físicas, químicas y biológicas de la superficie terrestre (Campbell & Wynne, 2011).

Para entender los fundamentos de los sensores remotos es importante conocer algunos conceptos básicos de la radiación electromagnética. La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas tienen diferentes longitudes de onda, frecuencias y energías, y se distribuyen en diferentes partes del espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma (Merchant, 2000).

La información recopilada por los sensores remotos se utiliza para generar imágenes y datos que se procesan y analizan para obtener información sobre la superficie terrestre. Por ejemplo, los índices de vegetación como el NDVI (Índice de

Vegetación de Diferencia Normalizada) se utilizan para evaluar la salud y el vigor de la vegetación (Tucker, 1979b; Zhang et al., 2014).

(Lillesand et al., 2015). Sin embargo, el análisis y la interpretación de los datos de los sensores remotos requieren un conocimiento profundo de los fundamentos de los sensores remotos y de las características de la superficie terrestre (Merchant, 2000).

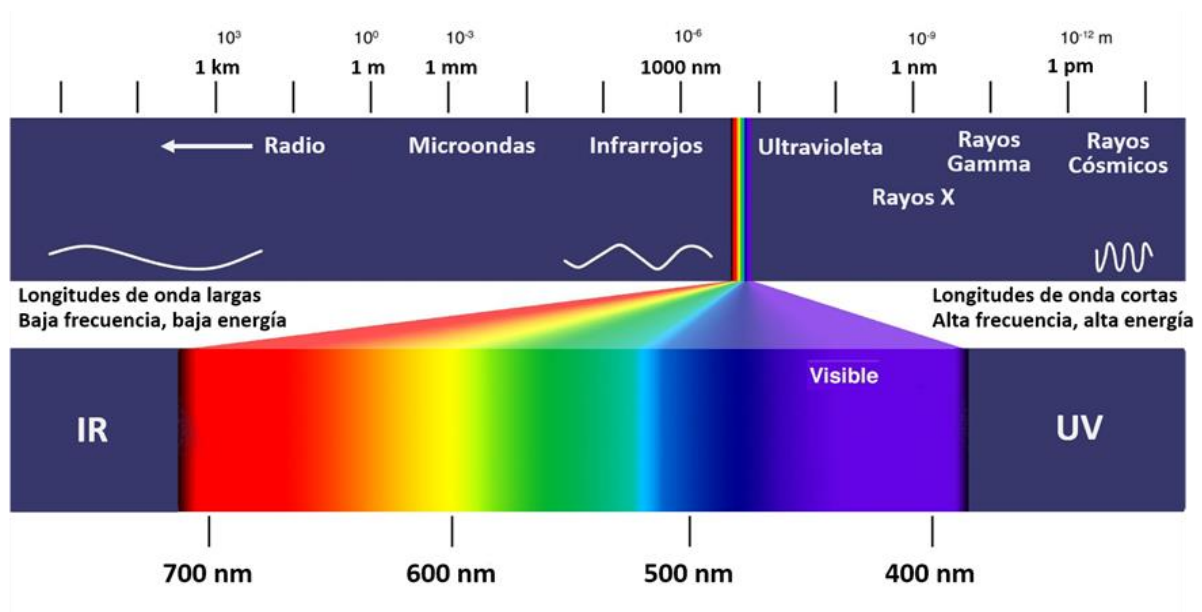
2.2.4.1 Espectro electromagnético

Es fundamental tener en cuenta el rango que abarca la vegetación para procesar y analizar imágenes satelitales que documentan su estado. De acuerdo con (Salas & Chuvieco, 1995), se refiere al conjunto de ondas electromagnéticas o radiación electromagnética que un material emite o absorbe de forma natural Y artificial. La radiación electromagnética se clasifica según su frecuencia o longitud de onda, y se establecen una serie de bandas en las que el comportamiento es similar. Aunque las longitudes de onda varían continuamente, en teledetección se utilizan bandas específicas del espectro electromagnético. Por ejemplo, en la detección remota de la vegetación, se utilizan bandas espectrales específicas para captar su comportamiento en la radiación electromagnética (Salas & Chuvieco, 1995). A continuación, se describen las Visible (400-700 nm): percibida por el ojo humano; radiación solar máxima.

- Banda Azul (400-500 nm): absorción por clorofila y otros pigmentos de la vegetación.
- Banda Verde (500-600 nm): reflexión por la vegetación; evaluación del contenido de clorofila.
- Banda Roja (600-700 nm): absorción por la clorofila; estimación de la cantidad de clorofila.

- Infrarrojo Cercano (700-1300 nm): discriminación de contenidos de humedad y masas vegetales.
- Infrarrojo Medio (1300-8000nm): reflexión entre la luz solar y la energía emitida por la superficie terrestre.
- Infrarrojo Lejano/Térmico (8000-14000 nm): fracción emisiva del espectro de la tierra.
- Microondas (>1000 nm): traspasa las cubiertas nubosas; importantes para aplicaciones de clima y atmósfera.

Figura 2. Espectro electromagnético y región de la luz visible.



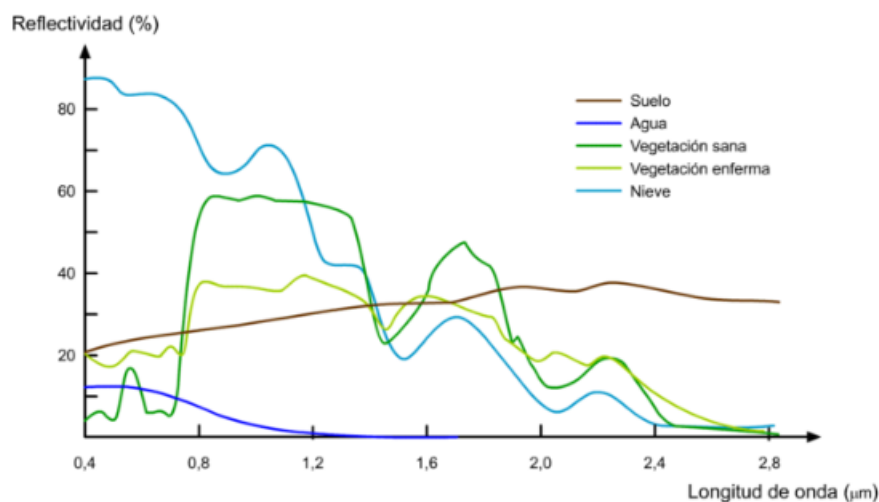
Fuente: Adaptado de Sun & Tunér, (2004)

2.2.4.2 Relación entre las características de la vegetación y la radiación electromagnética

El uso de datos de teledetección y los índices de vegetación son una de las alternativas más comunes para el estudio cuantitativo del funcionamiento de los ecosistemas (Cocero et al., 1998; Gaitán et al., 2015; Teillet et al., 1997). Esto se debe a que, a través de la interacción de la radiación electromagnética con la superficie de los cuerpos, se puede inferir la cantidad de energía absorbida, reflejada e irradiada

por los mismos. Los índices de vegetación se basan en la combinación de dos o más bandas espectrales vinculadas a las propiedades de la superficie, y han sido ampliamente utilizados en la monitorización de la cobertura vegetal, clasificación, y derivación biofísica de los patrones estructurales y radiométricos de la vegetación. En 1972, Pearson y Miller desarrollaron por primera vez el Índice ratio de vegetación (RVI) y el Índice de vegetación (VIN), que se utilizaban para el monitoreo de la cubierta vegetal. (Zeng et al., 2022) propone el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se utiliza para estimar las características funcionales de la vegetación activa. Además, existe el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), propuesto por (B. C. Gao, 1996), que utiliza la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta para representar el contenido de agua en la cubierta del suelo y la planta.

Figura 3. Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas.



Fuente: Adaptado de (Piazzese & Oñate, 2003)

2.2.4.3 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son una herramienta fundamental para el estudio de la Tierra, permitiendo la observación de la superficie terrestre a gran escala y desde

una perspectiva global. Según Tang et al., (2009), el sensoramiento remoto es la técnica que utiliza imágenes satelitales para adquirir información sobre la superficie terrestre y se basa en la captación de la radiación electromagnética que emite o refleja la superficie terrestre en distintas bandas espectrales.

La resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales es un punto fundamental teniendo en cuenta en la selección de las mismas para el estudio de la superficie terrestre. En este sentido, según Matasci et al., (2018) la resolución espacial se refiere a la distancia mínima entre dos objetos que pueden ser distinguidos en una imagen, mientras que la resolución temporal se refiere a la frecuencia con que se adquieren las imágenes.

Las imágenes satelitales se procesan y analizan mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes y teledetección. De acuerdo con Matasci et al., (2018) la teledetección es el proceso de adquisición de información a través del registro y análisis de la radiación electromagnética que refleja la superficie terrestre.

Las imágenes satelitales se han utilizado ampliamente en distintas áreas de investigación, como la ecología, la agricultura, la geología, entre otras. Por ejemplo, según Wagner et al., (2018) las imágenes satelitales son una herramienta útil para el monitoreo de la vegetación y la estimación de índices de vegetación, los cuales permiten evaluar la salud de la vegetación y su relación con los factores ambientales.

Además, las imágenes satelitales son una herramienta importante para la gestión del territorio y la planificación urbana. Blaschke et al., (2014) las imágenes satelitales permiten el análisis de los cambios en el uso del suelo y la evaluación de la dinámica urbana, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación urbana.

2.2.5 Monitoreo terrestre con datos satelitales MODIS

2.2.5.1 Sensor MODIS

En los años 80 se comenzaron a desarrollar proyectos con el objetivo de monitorear las coberturas globales de la Tierra. Uno de ellos fue el AVHRR (Sensor Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución), que se encontraba a bordo de los satélites de la serie NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). Aunque este sensor había sido originalmente diseñado para monitorear el clima a una resolución espacial de 1.1 km, sus datos permitieron la elaboración de un mapeo de la cobertura terrestre (García-Mora & Mas, 2011).

Posteriormente se desarrollaron sensores específicos para el monitoreo de la superficie terrestre con alta resolución temporal a partir de los resultados del AVHRR. El proyecto EOS de la NASA, que consta de tres plataformas: EOS-AM (Terra), EOS-PM (Aqua) y EOS-CHEM (Aura), fue lanzado para el estudio de la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos. El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es uno de los más importantes dentro del proyecto EOS y está a bordo de los satélites Terra y Aqua debido a sus características espaciales y espectrales (Rizzi & Rudorff, 2007). Este sensor fue diseñado por un equipo interdisciplinario durante 10 años bajo la supervisión de científicos que establecieron requisitos para la captura, calibración y procesamiento de los datos (Xiong et al., 2009).

El sensor MODIS se encuentra instalado en dos satélites: Aqua (EOS-PM), que fue lanzado en mayo de 2002 y Terra (EOS-AM), que fue lanzado en diciembre de 1999. Estos satélites orbitan en una órbita helio sincrónica y cuasi-polar a una altitud promedio de 705 y 708 km, respectivamente, con una inclinación de 98° y 98.2°, respectivamente. La órbita del satélite Terra es de norte a sur, cruzando el ecuador a

las 10:30 am en su órbita descendente, mientras que la órbita del satélite Aqua es de sur a norte, pasando sobre el ecuador a las 1:30 pm (García-Mora & Mas, 2011).

2.2.5.2 Niveles de procesamiento

Tabla 1. Niveles de procesamiento de productos MODIS

Nivel	Descripción
Nivel 0	Datos brutos sin procesamiento, solo eliminados los artefactos de comunicación.
Nivel L1	Datos de geolocalización en coordenadas geodésicas, información sobre elevación del terreno, máscaras de tierra y agua, ángulo de elevación, azimut y cenit del satélite y del sol.
Nivel 1A	Productos que contienen información de niveles de radiancia en las 36 bandas, integrado con datos para la calibración radiométrica, corrección geométricas y parámetros de georreferenciación.
Nivel 1B	Imágenes corregidas radiométricamente y calibradas a unidades físicas, presentan las radiancias calibradas y geolocalizadas para cada una de las 36 bandas generadas a partir de los productos del nivel 1A, además de información para estimar la calidad, el error y datos de calibración de los productos.
Nivel L2G	Productos cuyos datos tienen información de variables geofísicas que son proyectadas en una malla uniforme.
Nivel L2	Productos que presentan información de variables geofísicas generados a partir del producto nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos.
Nivel 3	Productos generados a partir de variables geofísicas mapeadas, se hacen compuestos de 1, 8, 16 y 30 días en algunos casos se re muestrean las bandas originales a una resolución espacial menor.
Nivel 4	Productos generados por la integración de datos MODIS con los modelos para estimar variables geofísicas, se utilizan productos nivel L2 y datos auxiliares.

Fuente: Adaptado de Mas (2011)

Los productos MODIS se dividen en ocho niveles según su grado de procesamiento, desde los datos brutos sin procesamiento hasta los productos generados por la integración de datos MODIS con modelos para estimar variables geofísicas. El nivel 1B es uno de los más importantes, ya que las imágenes que ofrece han sido corregidas radiométricamente y calibradas a unidades físicas, además de incluir información sobre la calidad, el error y los datos de calibración de los productos

(García-Mora & Mas, 2011). Por otro lado, los productos de nivel 3 son generados a partir de variables geofísicas mapeadas y se hacen compuestos de 1, 8, 16 y 30 días, en algunos casos se re muestrean las bandas originales a una resolución espacial menor (García-Mora & Mas, 2011). La combinación de estos niveles de procesamiento de los productos MODIS permite obtener información relevante para el monitoreo y estudio de la superficie terrestre.

2.2.5.3 Productos MODLAND

El sensor MODIS proporciona información para elaborar diferentes productos, enfocados en el estudio de los océanos (MOcean), atmósfera (MODIS Atmosphere), criósfera y las coberturas terrestres (MODLAND). Los productos MODLAND se identifican por la palabra MOD si vienen de la plataforma Terra, MYD si vienen de la plataforma Aqua, y MCD si son una combinación de ambas plataformas. Esta información se puede clasificar en tres grupos principales, según (Justice et al., 2002).

Variables relacionadas con el balance de energía:

a. Variables relacionadas con el balance de energía:

- Reflectividad de la superficie (MOD09/MYD09).
- Coberturas de nieve (MOD10/MYD10).
- Emisividad y temperatura de la superficie de la tierra (MOD11/MYD11).
- Albedo y función de la distribución de la reflectividad bidireccional (MOD43).

b. Variables biofísicas relacionadas con la vegetación:

- Índices de vegetación (MOD13/MYD13).
- Índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y la fracción de radiación activa fotosintética (FPAR, MOD15).
- Producción primaria (MOD17).

c. Características de la cobertura terrestre:

- Coberturas del suelo (MOD12/MYD12).
- Focos de calor e incendios (MOD14/MYD14).
- Conversión de cobertura vegetal y fracción de vegetación (MOD44).
- Áreas quemadas (MCD45).

2.2.5.4 Productos MOD09

Los productos MOD09 son productos de Nivel 3 que proporcionan información sobre la reflectividad de las cubiertas terrestres en las primeras siete bandas. Estos productos corrigen los efectos atmosféricos que se pueden producir debido a los gases, nubes cirrus y aerosoles MOD09GQ, MOD09GA y MOD09CMG son productos diarios a una resolución de 250 m, 500/1000 m y 0.05°, respectivamente. Mientras que MOD09A1 y MOD09Q1 son compuestos de 8 días a una resolución espacial de 8 días, respectivamente (Liu & Liu, 2013).

2.3 Marco conceptual

Sequía: Es una condición temporal en la que la disponibilidad de agua se encuentra por debajo del promedio esperado en una región determinada, en términos de cantidad y calidad. Esta falta de agua puede afectar a los sistemas naturales y humanos, incluyendo la agricultura, la industria, la salud humana y la biodiversidad

Cuenca hidrográfica: Es una región geográfica definida por una red de drenaje de arroyos y ríos que convergen en un punto común a lo largo de una línea de descarga (H. Gao et al., 2010).

Sensoramiento remoto: Se refiere a la técnica de obtener información sobre un objeto o área sin estar físicamente en contacto con él, utilizando dispositivos o sensores en el espacio o en la atmósfera para recopilar datos. Estos sensores pueden ser satélites, aviones, drones u otros sistemas que recolectan información sobre las

características del objeto o área en cuestión, como la humedad, la reflectividad o la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda (Svoboda et al., 2012).

Producto pisco: Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO), es una base de datos meteorológicos grillada a escala diaria y mensual de largo periodo de registro (1981-2016). Contiene datos de precipitación (Huerta et al., 2022).

R (lenguaje de programación): Es un lenguaje de programación de código abierto y software libre diseñado específicamente para análisis estadístico y gráfico. Fue desarrollado por Ross Ihaka y Robert Gentleman en la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda, en 1993. R es utilizado por científicos de datos, analistas de negocios y estadísticos para realizar análisis de datos, modelado estadístico, visualización de datos y desarrollo de aplicaciones.

Modis: (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor remoto de teledetección que se encuentra a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA. Este sensor puede adquirir datos de radiación reflejada y emitida por la superficie terrestre en 36 bandas espectrales, que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico, lo que permite la detección y caracterización de varios parámetros atmosféricos y terrestres, como la cobertura vegetal, la humedad del suelo, la nieve y el hielo, entre otros.

Clima: Se refiere a las condiciones meteorológicas promedio en una región durante un período prolongado de tiempo, que incluye la temperatura, la humedad, la precipitación, el viento y otras variables atmosféricas. Estas condiciones climáticas pueden afectar el ecosistema, la agricultura, la salud humana y muchas otras áreas de la sociedad.

Balance de energía: El balance de energía se refiere a la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre y la cantidad de energía que es reflejada, absorbida y emitida por la misma. La medición y análisis del balance de energía a través de imágenes satelitales permite estimar el estado hídrico de una región y monitorear la presencia de sequías a partir de la comparación de los valores de energía registrados en distintas fechas.

Cobertura terrestre: Se refiere a la distribución y composición de diferentes tipos de superficies terrestres, como la vegetación, el agua, el suelo desnudo, las áreas urbanas, entre otros. El monitoreo de la cobertura terrestre es importante para la comprensión y gestión de los recursos naturales y la planificación del uso del suelo. El sensoramiento remoto, y en particular el uso de imágenes satelitales, es una herramienta útil para el monitoreo de la cobertura terrestre a nivel regional y global. Las imágenes satelitales permiten obtener información sobre la distribución espacial y cambios en la cobertura terrestre a lo largo del tiempo.

Gestión del recurso hídrico: Se refiere al conjunto de acciones y medidas que se llevan a cabo para garantizar la disponibilidad y el uso sostenible del agua. Esto incluye la gestión y planificación de la demanda y la oferta de agua, la distribución equitativa del recurso, la conservación y protección de la calidad del agua, así como la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico. El sensoramiento remoto ha sido una herramienta útil, permitiendo el monitoreo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, la detección de cambios en los patrones de uso del agua y la identificación de zonas de riesgo de sequía y desertificación.

Simulaciones hidrológicas: Son modelos matemáticos que se utilizan para estimar el comportamiento de los sistemas hidrológicos, como ríos, lagos, acuíferos y otros

cuerpos de agua, con el objetivo de predecir el impacto de diversos escenarios de uso del agua, cambio climático y eventos extremos como sequías e inundaciones. Estos modelos utilizan información de entrada como la precipitación, la temperatura, la cobertura terrestre y otros datos relevantes para simular el ciclo hidrológico, incluyendo la escorrentía, la evaporación, la infiltración y la recarga del acuífero. Las simulaciones hidrológicas son una herramienta importante para la gestión del recurso hídrico, ya que permiten a los gestores de agua tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos, la planificación y el diseño de infraestructura hidráulica y la adaptación al cambio climático.

Cambio climático: Se refiere a la alteración del clima de la Tierra debido a actividades humanas que emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes en la atmósfera. Esto puede tener consecuencias graves en los patrones climáticos, la biodiversidad, los ecosistemas, la producción de alimentos y la seguridad humana en general (Woodward et al., 2014).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

El uso de sensoramiento remoto (MODIS) y (PISCO) permite evaluar y caracterizar de forma precisa las sequías, en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.

3.1.2 Hipótesis específicas

1. El uso de sensoramiento remoto MODIS y PISCO permite caracterizar espacial y temporal las sequias en la cuenca del rio Pampas del año 2002 al 2022.
2. Mediante el uso de sensoramiento remoto MODIS y PISCO se puede evaluar la variabilidad temporal de la vegetación y la precipitación en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.
3. Se determina el impacto ocasionado aplicando los índices de sequía, empleando datos de sensoramiento remoto MODIS y PISCO en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.
4. Existe una correlación significativa entre la precipitación y las condiciones de la vegetación durante los años de sequía extrema en la cuenca del río Pampas del año 2002 al 2022.

3.2 Método

El estudio tiene un enfoque cuantitativo. Debido a que se pretende recoger y analizar datos numéricos (Valderrama, 2002), en su mayoría de sensores remotos (reflectividad MODIS, precipitación PISCO y elevación SRTM), con el objetivo de caracterizar las sequías en la cuenca del río Pampas. Asimismo, se utilizó otra fuente de datos que proporcionen información de límites de cuencas hidrográficas y departamentales. La descripción a detalle de los datos y las fuentes de donde éstas se obtendrán se describen el ítem 3.8 Técnica e instrumento.

3.3 Tipo de investigación

El presente estudio es de tipo descriptivo y analítico (Fernandes et al., 2003). Descriptivo porque se pretende caracterizar las sequías en la región del río Pampas, y analítico porque se evalúa la relación entre varias variables como la precipitación y las condiciones de la vegetación.

Las variables independientes en este estudio son la precipitación y las condiciones vegetativas (NDVI). La variable dependiente son la condición de sequías que se pueden caracterizar a partir de la precipitación y el NDVI, como el índice de Condición de Precipitación (PCI) y el índice de Condición de Vegetación (VCI).

3.4 Nivel o alcance de investigación

El presente estudio es de alcance correlacional, en este alcance se plantean hipótesis correlacionales, se relacionan dos variables, este alcance se encarga de medir la relación entre dos variables, puede ser un indicio para una investigación futura, no hay diferencia en los resultados si el orden de las variables cambia. Según Ríos (2017).

3.5 Diseño de investigación

El diseño no experimental se divide tomando en cuenta el tiempo durante se recolectarán estos datos (Fernandes et al., 2003).

Corte transversal: Aunque se está analizando datos a lo largo del tiempo, el estudio también puede considerarse de corte transversal porque se está comparando y analizando diferentes variables (precipitación, vegetación) en un mismo periodo.

Corte longitudinal: ya que se pretende observar los cambios y las tendencias a lo largo de un periodo de tiempo específico (2002-2022)

3.6 Operacionalización de variables

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	
<p>(Variable Dependiente)</p> <p>Sequía</p> <p>Período prolongado de tiempo en el cual se produce una falta de significativa de agua con un impacto importante en sectores como la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas (Beguería et al., 2010).</p> <p>(Variable independiente) 1</p> <p>Condiciones vegetativas MODIS</p> <p>Conjunto de datos de NDVI que derivan de la información de reflectividad MODIS (MOD09A1) para todo el Perú, con una resolución espacial de 500 m y temporal de cada 8 días, con la que se pueden generar datos mensuales.</p> <p>(Variable independiente) 2</p> <p>Condiciones de precipitación PISCO</p> <p>Conjunto de datos de precipitación grillada disponible para todo el territorio peruano, que abarca desde 1981 hasta la actualidad, con una resolución espacial de 0.1° y temporal de diaria y mensual (Aybar et al., 2020).</p>	<p>Condiciones de vegetación:</p> <p>El ambiente seco puede afectar negativamente el crecimiento de la vegetación, lo que lo convierte en un indicador importante del nivel de estrés hídrico en la región.</p> <p>Fuente: Zhou et al. (2017).</p>	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Adimensional	
		Índice de Condición de Vegetación (VCI)	<p>Categorización (VCI)</p> <p>0.0-0.1: Sequía Extrema</p> <p>0.1-0.2: Sequía Severa</p> <p>0.2-0.3: Sequía Moderada</p> <p>0.3-0.4: Sequía Leve</p> <p>0.4 - 0.6: No es Sequía</p> <p>0.6-0.7: Humedad Leve</p> <p>0.7-0.8: Humedad Moderada</p> <p>0.8 - 0.9: Humedad Severa</p> <p>0.9 - 1.0: Humedad Extrema</p>	
		<p>Condiciones de precipitación:</p> <p>Reducciones de los niveles de lluvias por debajo de los promedios históricos son los principales desencadenadores y agravantes de los eventos de sequías. Fuente: Abdulkadir (2017).</p>	Precipitación	Milímetros (mm)
			Índice de Condición de Precipitación (PCI)	<p>Categorización (PCI)</p> <p>0.0-0.1: Sequía Extrema</p> <p>0.1-0.2: Sequía Severa</p> <p>0.2-0.3: Sequía Moderada</p> <p>0.3-0.4: Sequía Leve</p> <p>0.4 - 0.6: No es Sequía</p> <p>0.6-0.7: Humedad Leve</p> <p>0.7-0.8: Humedad Moderada</p> <p>0.8 - 0.9: Humedad Severa</p> <p>0.9 - 1.0: Humedad Extrema</p>

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Población, muestra y muestreo

3.7.1 Población

En este estudio son todas las condiciones de sequía que se pudieron caracterizar con datos de precipitación PISCO y de condiciones de vegetación NDVI, en la cuenca del río Pampas durante el período completo de 2002 a 2022. Esto abarcó todas las observaciones de sequía registradas en ese período y en esa región geográfica.

3.7.2 Muestra

En este caso, dado que se analizó todas las condiciones de sequía durante el período completo y en el área específica de la cuenca del río Pampas, la muestra sería igual a la población, pues no se tomó un subconjunto específico de datos, sino con todos los datos disponibles.

3.7.3 Muestreo

No se aplica un muestreo en el sentido tradicional, ya que se está analizando todos los datos PISCO y MODIS disponibles en la cuenca del río Pampas durante el periodo 2002-2022.

3.8 Técnica e instrumentos

3.8.1 Datos

Para analizar las condiciones vegetativas (NDVI), se utilizarán datos de sensoramiento remoto obtenidos a partir de la reflectividad proporcionada por el producto MOD09A1. La evaluación de la precipitación se basará en datos provenientes de la fuente PISCO. Además, se incorporarán datos vectoriales que representan las cuencas hidrográficas y los límites políticos de la región. Asimismo, se empleó el modelo de elevación digital SRTM para el análisis altitudinal. Estos

diversos conjuntos de datos fueron fundamentales para el análisis de los resultados. A continuación, se detallan las diferentes fuentes de datos mencionadas.

3.8.1.1 Reflectividad de superficie del satélite terra MOD09A1

Tabla 3. Conjunto de datos satelitales MOD09A1

Conjunto de datos científicos	Unidad	Tipo de Dato	Rango de valores	Valor de relleno	Factor de escala
sur_refl_b01: 500m Reflectividad de superficie_Banda1(620- 670 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b02: 500m Reflectividad de superficie_Banda2(841- 876 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b03: 500m Reflectividad de superficie_Banda3(459- 479 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b04: 500m Reflectividad de superficie_Banda4(545- 565 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b05: 500m Reflectividad de superficie_Banda5(1230- 1250 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b06: 500m Reflectividad de superficie_Banda6(1628- 1652 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_b07: 500m Reflectividad de superficie_Banda7(2105- 2155 nm)	Reflectividad	16 bit	-16100	-28672	0.0001
sur_refl_state_500m Banda de Calidad de Estado	Campo de bits	16 bit	NA	65535	NA

Fuente: Adaptado de Vermote Eric (2020)

En este estudio se empleó el conjunto de datos LMOD09A1 del satélite Terra versión 6.1, el cual corresponde a productos de nivel 3 que se derivan de variables geofísicas mapeadas (Vermote Eric, 2020) El producto LMOD09A1 brinda información sobre la reflectividad de la superficie terrestre en 7 bandas, junto con un conjunto de datos que contiene bandas para el control de calidad del producto (Tabla 3). Estos datos son compuestos de 8 días a una resolución espacial de 500 m, donde cada pixel representa la mejor observación de L2G durante este periodo. Esta selección se realiza considerando la alta cobertura de observación, un bajo ángulo de visión, la

presencia de nubes o sombras, así como la cantidad de aerosoles en la atmósfera (Vermote Eric, 2020).

La banda de calidad de estado (state QA) contiene información sobre las características del pixel que no están relacionadas con la banda o la resolución del producto. Cada pixel de esta banda contiene datos ambientales de clasificación, como tierra, océanos, nubes, aerosoles, nieve o fuego. Por lo tanto, los datos en esta banda reflejan las características del pixel en lugar de la calidad de los datos de reflectividad de la superficie. La información en la capa de calidad de estado se codifica en un sistema binario de 16 bits por pixel y proporciona información sobre diferentes aspectos a diferentes niveles de detalle (Vermote Eric, 2020).

3.8.1.2 Precipitación PISCOv2.1

Se trata de un conjunto de datos de precipitación grillada disponible para todo el territorio peruano, desde 1981 a la actualidad ofrece datos, en el sitio web: (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/>), tiene una resolución espacial de 0.1° y temporal que nos da datos diarios y mensuales, para generar estos datos se utilizó un algoritmo de fusión basado en métodos de interpolación geoestadística y determinista de tres clases de fuentes de lluvia diferentes. La primera fuente de datos empleada fue información de precipitación de pluviómetros de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI, la cual fue sometida a un proceso de control de calidad para eliminar errores graves, tales como datos inconsistentes, valores extremos y patrones asimétricos. Además, se completaron los datos en zonas donde la escasez de pluviómetros era alta. La segunda fuente de datos consistió en estimaciones de lluvia diaria y mensual a partir del satélite CHIRP (Climate Hazards Group Infrared Precipitation). Sin embargo, debido a que este satélite presenta sobreestimaciones en la costa del Perú y no representa adecuadamente la lluvia en

la transición entre los Andes y la Amazonía como consecuencia de los factores orográficos, se modificó a CHIRPM a partir de la climatología y de precipitación basados en la combinación de datos de pluviómetros. Por último, se utilizó el radar TRMM 2A25y como la fuente de datos más adecuada para describir la variabilidad espacial y patrones estacionales de la precipitación, incluyendo la precipitación orográfica al este de los Andes (Aybar et al., 2020).

3.8.1.3 Modelo de elevación digital (DEM) del shuttle radar topography misión (SRTM)

SRTM es un modelo digital de elevación generado por la Misión Topográfica Shuttle Radar, llevada a cabo por la NASA, la Agencia Espacial Italiana (ASI), la Agencia Espacial Alemana (DLR) y la National Imagery and Mapping Agency (NIMA). Este producto proporciona información detallada sobre la altitud de la superficie terrestre con una resolución espacial de 90m. Los datos de radar capturados durante la misión son procesados para generar modelos digitales de elevación que representan la topografía en una cuadrícula tridimensional. Ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, como la cartografía, la planificación urbana y la gestión de recursos naturales, el DEM SRTM está disponible para descarga gratuita a través del sitio web EarthExplorer (usgs.gov) de la Sociedad Geológica de Estados Unidos (USGS), lo que lo convierte en una herramienta accesible para científicos, profesionales y entusiastas de los SIG en todo el mundo (Farr et al., 2007; Meza, 2020)

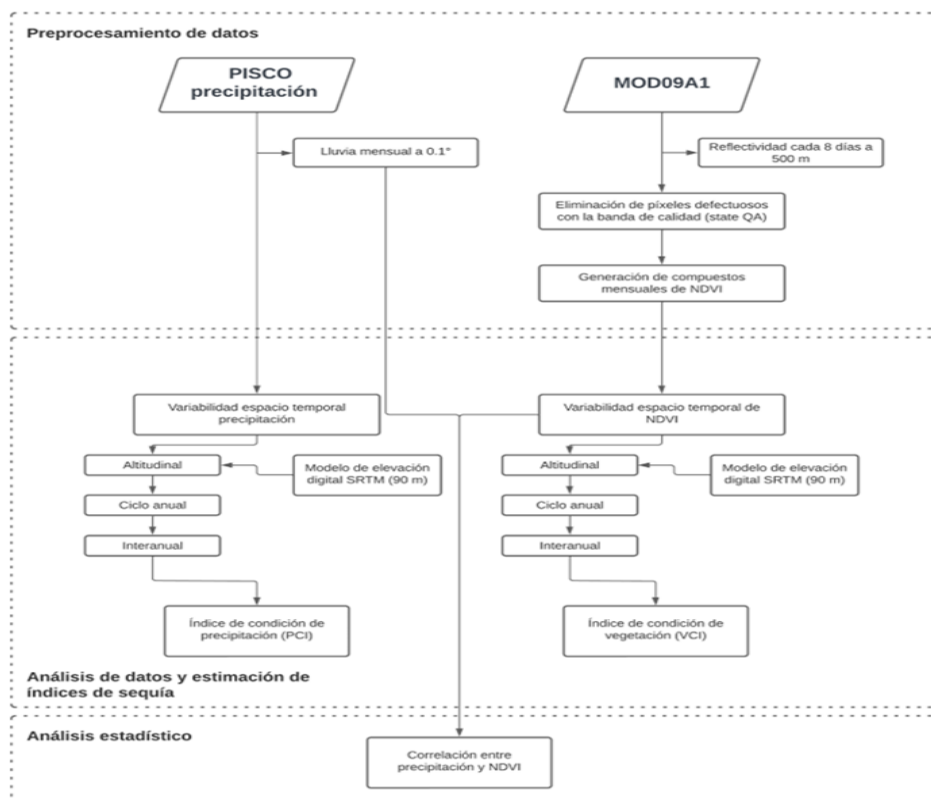
3.8.1.4 Cuenca hidrográfica y límites políticos

El geo servidor del Ministerio del Ambiente en Perú en el sitio web: (<http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>) brinda acceso a diversos datos vectoriales en formato shapefile provenientes de diferentes

instituciones del Estado. Estos datos son de libre acceso y permiten realizar análisis espaciales para diversos fines. En el presente estudio, se emplearán los datos de Cuencas Hidrográficas y de Límite Departamental (ANA, 2009; IGN, 2022).

3.8.2 Metodología

Figura 4. Esquema metodológico del estudio de la caracterización de sequías en la cuenca del río Pampas.



Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio, se seguirán las siguientes etapas metodológicas: en primer lugar, se realizará el preprocesamiento de los datos, seguido de una evaluación espacial y temporal de las variables. Posteriormente, se estimarán los índices de sequías. Finalmente se llevará a cabo un análisis de la relación entre las variables estudiada. A continuación, se muestra el flujograma de la metodología mencionada y luego se describe de manera detallada cada una de las etapas indicadas.

3.8.2.1 Preparación de datos

a) Datos de reflectividad MOD09A1

Para el cálculo del Índice de condición de vegetación (VCI), que se describe más adelante, será necesario contar con los datos de NDVI. Estos datos se pueden calcular a partir de las bandas de reflectividad 1 (roja) y 2 (infrarrojo cercano - NIR) que proporciona el producto MOD09A1 (Khaldi et al., 2022). Se descargarán en total 966 imágenes por cada banda utilizada que corresponden al periodo 2002 y 2022, teniendo en cuenta que se generan imágenes cada 8 días (46 imágenes por año).

A pesar de que los productos de reflectividad MOD09A1 son compuestos de 8 días, es posible que algunos píxeles presenten valores erróneos debido a diversos factores como la presencia de nubes, aerosoles, sombras o incluso presentar errores debido a un mal funcionamiento del sensor. Estos problemas afectan directamente el registro radiométrico de los (Khaldi et al., 2022).

Siguiendo lo indicado en Ccanchi Espinoza, (2021); Khaldi et al., (2022), para poder reducir los efectos de las fuentes de error y cuerpos de agua, ya que solo se quiere información de la vegetación, se utilizará la banda sur_refl_state_500m Banda de Calidad de Estado para poder filtrar estos píxeles que podrían alterar nuestros resultados. En la Tabla 4, se destacan en negrita los filtros que se utilizarán para garantizar la calidad de los datos de los píxeles (estado de nubes, cantidad de aerosol, nube cirrus detectada, algoritmo interno de nubes, MOD35nieve/hielo, sombras de nubes, tierra/agua y máscara de nieve interna).

Tabla 4: Características del control de calidad (*sur_refl_state_500m* Banda de Calidad de Estado).

Bit N°	Nombre del Parámetro	Comb. Bit	Estado de la Reflectividad de la Superficie-500m/ Estado de la data QA
0-1	Estado de la Nube	0	Limpio
		1	Nublado
		10	Mixto
2	Sombras de Nubes	11	Se asume limpio
		1	Si
		0	No
3-5	Suelo / Agua	0	Océano poco profundo
		1	Tierra
		10	Costas Oceánicas y Costas de Lagos
		11	Sombra de aguas Continentales
		100	Agua Efímera
		101	Aguas Interiores Profundas
		110	Continental / Océano Moderado
6-7	Cantidad de Aerosol	111	Océano Profundo
		0	Climatología
		01	Bajo
		10	Promedio
8-9	CIRRUS Detectado	11	Alto
		0	Ninguno
		1	Pequeño-menos
10	Logaritmo interno para detectar nubes	10	Promedio
		11	Alto
		0	Sin Nubes
11	Logaritmo interno para detectar incendios	1	Fuego
		0	Sin Fuego
12	MOD35 nieve/hielo	1	Si
		0	No
13	Pixel adyacente a la nube	1	Si
		0	No
14	Corrección de BRDF realizada	1	Si
		0	No
15	Máscara interna de nieve	1	Nieve
		0	Sin Nieve

Fuente: Adaptado de Vermote Eric (2020)

3.8.2.2 Análisis temporal de los datos

Se generarán compuestos mensuales de NDVI y precipitación para el periodo comprendido entre 2002 y 2022. Estos compuestos permitieron analizar la estacionalidad de estas variables y observar el comportamiento promedio mensual en la cuenca del río Pampas. Además, se creó series temporales específicas para investigar el comportamiento de estas variables durante años caracterizados por sequías extremas en diferentes regiones a nivel nacional.

A partir de cortes longitudinales basados en el modelo de elevación digital de la cuenca, se evaluará el contraste altitudinal del promedio interanual de las condiciones de vegetación y la precipitación.

3.8.2.3 Estimación de los índices de sequía

Teniendo los NDVI y precipitación se desarrollarán dos índices de sequía con el objetivo de caracterizar la magnitud en área de las condiciones secas y/o húmedas durante los años de sequía extrema. se detalla esto:

3.8.2.3.1 Índice de condición de vegetación (VCI)

Condiciones de sequía pueden provocar un debilitamiento del desarrollo de la vegetación, este estado puede ser cuantificado gracias al NDVI con valores bajos. En contraste a esto, valores altos de NDVI pueden indicar que las condiciones vegetativas son óptimas. Kogan (1995b) desarrolló el Índice de Condición de Vegetación (VCI) con el fin de detectar las variaciones locales en la salud y vigor de la vegetación. Este índice se basa en el análisis de la señal del NDVI en un periodo específico, contrastándola con las condiciones de vegetación a largo plazo. El VCI se calcula con la siguiente fórmula:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Donde:

VCI: Índice de condición de vegetación.

NDVI: Promedio interanual del periodo analizado.

NDVI_{min}: NDVI donde cada pixel representa el valor mínimo de la serie interanual del periodo analizado.

NDVI_{max}: NDVI donde cada pixel representa el valor máximo de la serie interanual del periodo analizado

Los valores para estimar las condiciones de sequedad o humedad de la vegetación se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Categorización de sequías con el VCI.

VCI	Clase
0.0 - 0.1	Sequía Extrema
0.1 - 0.2	Sequía Severa
0.2 - 0.3	Sequía Moderada
0.3 - 0.4	Sequía Leve
0.4 - 0.5	No es Sequía
0.6 - 0.7	Humedad Leve
0.7 - 0.8	Humedad Moderada
0.8 - 0.9	Humedad Severa
0.9 - 1.0	Humedad Extrema

Fuente: Gutierrez Cori (2018)

3.8.2.3.2 Índice de condición de precipitación (PCI)

La disminución de los niveles de lluvia por debajo de los promedios históricos es la causa principal que desencadena y agrava los eventos de sequía (Abdulkadir, 2017). Gracias a que los datos de precipitación mensual PISCO tienen un formato grillado (píxeles) es posible generar un índice de sequía PCI, parecido al VCI y TCI. Su fórmula es la siguiente:

$$PCI = \frac{PISCO - PISCO_{min}}{PISCO_{max} - PISCO_{min}}$$

donde:

PCI: Índice de condición de vegetación.

PISCO: PISCO promedio interanual del periodo analizado.

PISCOmin: PISCO donde cada pixel representa el valor mínimo de la serie interanual del periodo analizado.

PISCOmax: PISCO donde cada pixel representa el valor máximo de la serie interanual del periodo analizado.

Tabla 6. Categorización de sequías con el PCI.

PCI	Clase
0.0 - 0.1	Sequía Extrema
0.1 - 0.2	Sequía Severa
0.2 - 0.3	Sequía Moderada
0.3 - 0.4	Sequía Leve
0.4 - 0.5	No es Sequía
0.6 - 0.7	Humedad Leve
0.7 - 0.8	Humedad Moderada
0.8 - 0.9	Humedad Severa
0.9 - 1.0	Humedad Extrema

Fuente: Gutierrez Cori (2018)

3.9 Consideraciones éticas

3.9.1 Uso de datos

Se cuenta con los permisos necesarios para usar los datos de sensoramiento remoto, muchos de estos son de dominio público y se cita adecuadamente los datos procedentes de terceros.

3.9.2 Precisión y honestidad

Todos los hallazgos se presentan con precisión y honestidad. No se exagera ni minimiza los resultados, además se reconoce las limitaciones de tu estudio.

3.9.3 Procesamiento estadístico

Se utilizó el análisis estadístico de correlación tipo Pearson para determinar la asociación entre las variables NDVI y precipitación. Este método permite medir la relación lineal y dirección entre variables continuas mediante el coeficiente de correlación "r", que varía de -1 a 1. Un valor de 1 indica una asociación perfecta donde ambas variables aumentan proporcionalmente, mientras que -1 indica una correlación negativa perfecta donde una variable aumenta y la otra disminuye proporcionalmente. Un valor de 0 indica ausencia de correlación lineal (Lalinde et al., 2018). La significancia estadística se evalúa mediante pruebas de hipótesis, como el valor p. Un valor p menor que 0.05, también utilizado en estudios sobre sequías como en Espinoza et al. (2016), indica una correlación estadísticamente significativa.

Asimismo, se empleará el análisis estadístico diagrama de cajas, o boxplot, para la evaluación temporal de las variables NDVI y precipitación en periodos donde se desarrollaron sequías extremas a nivel nacional, con comparación con los otros años. El diagrama de cajas es una herramienta gráfica utilizada para visualizar la distribución y resumir las características principales de un conjunto de datos. Proporciona información sobre la ubicación central, la dispersión, la simetría y los valores atípicos de los datos (Kelmansky, 2009).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los productos NDVI y precipitación, procedentes del sensor MODIS a bordo del satélite Terra y la precipitación estimada por el sensor a bordo del satélite TRMM, Para la evaluación de los índices se usaron los datos in-situ.

4.1.1 Análisis de datos de vegetación y precipitación

Dado que hay diversos conjuntos de datos de teledetección utilizados en esta investigación y existe una diferencia espacial y temporal entre las variables de condiciones de vegetación (NDVI) y precipitación, fue necesario examinar y presentar la información de forma independiente para comprender el comportamiento de estas variables en la cuenca del río Pampas. Este análisis se llevó a cabo en tres etapas, que incluyeron el contraste de las variables en relación a la altitud.

4.1.1.1 Análisis altitudinal de las variables

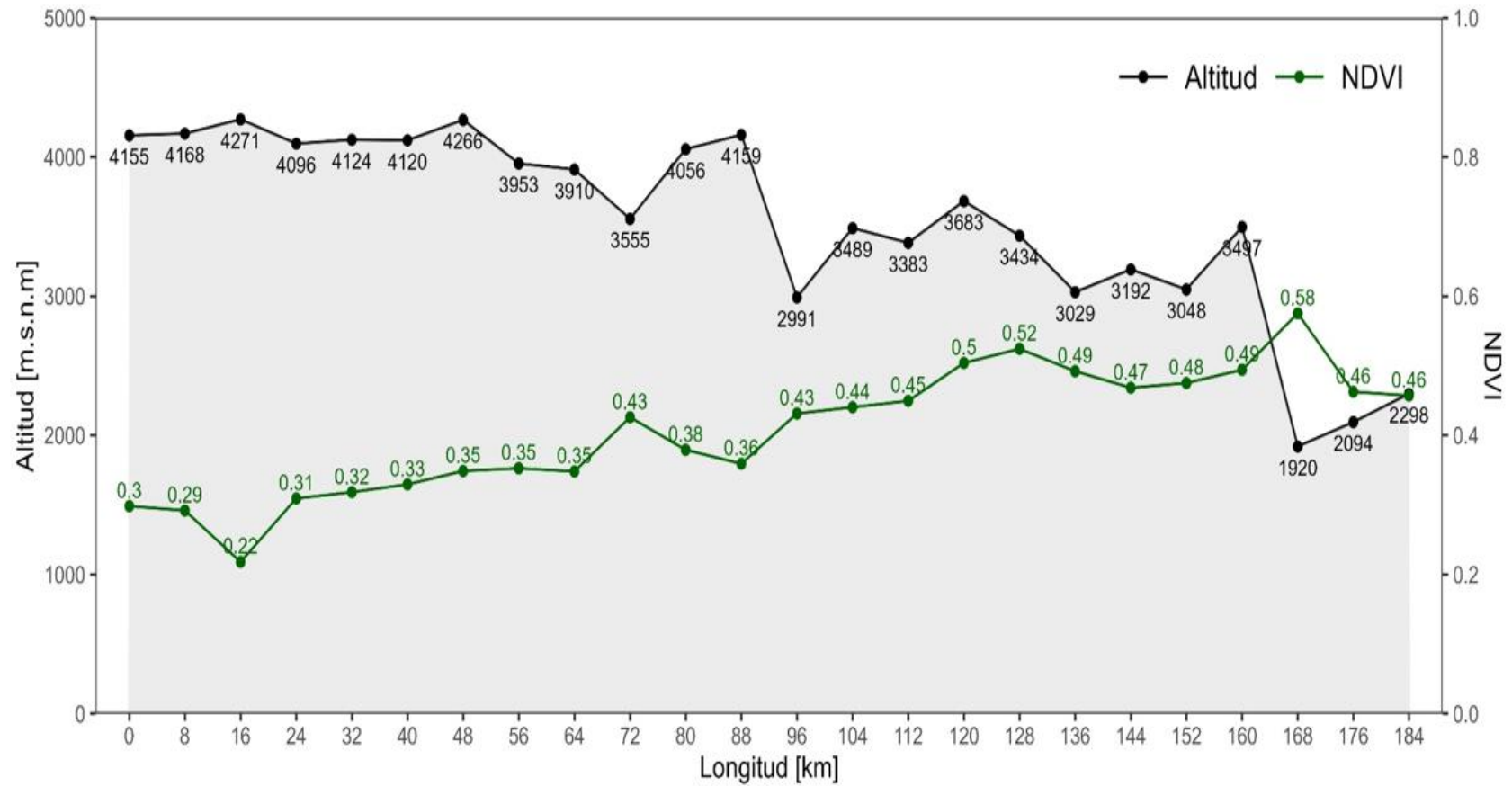
Se generó un perfil transversal diagonal en los puntos cardinales 74.7 °W y 14 °S, hasta 73.2 °W y 13.4 °S, con el objetivo de conocer la variabilidad y el comportamiento de la vegetación y la precipitación respecto a la gradiente altitudinal de la cuenca del río Pampas. Para ello se utilizó el modelo digital de elevación del

SRTM a 90 metros con un re muestreo a 0.1° y el promedio anual del NDVI y precipitación.

4.1.1.1.1 NDVI y el gradiente altitudinal

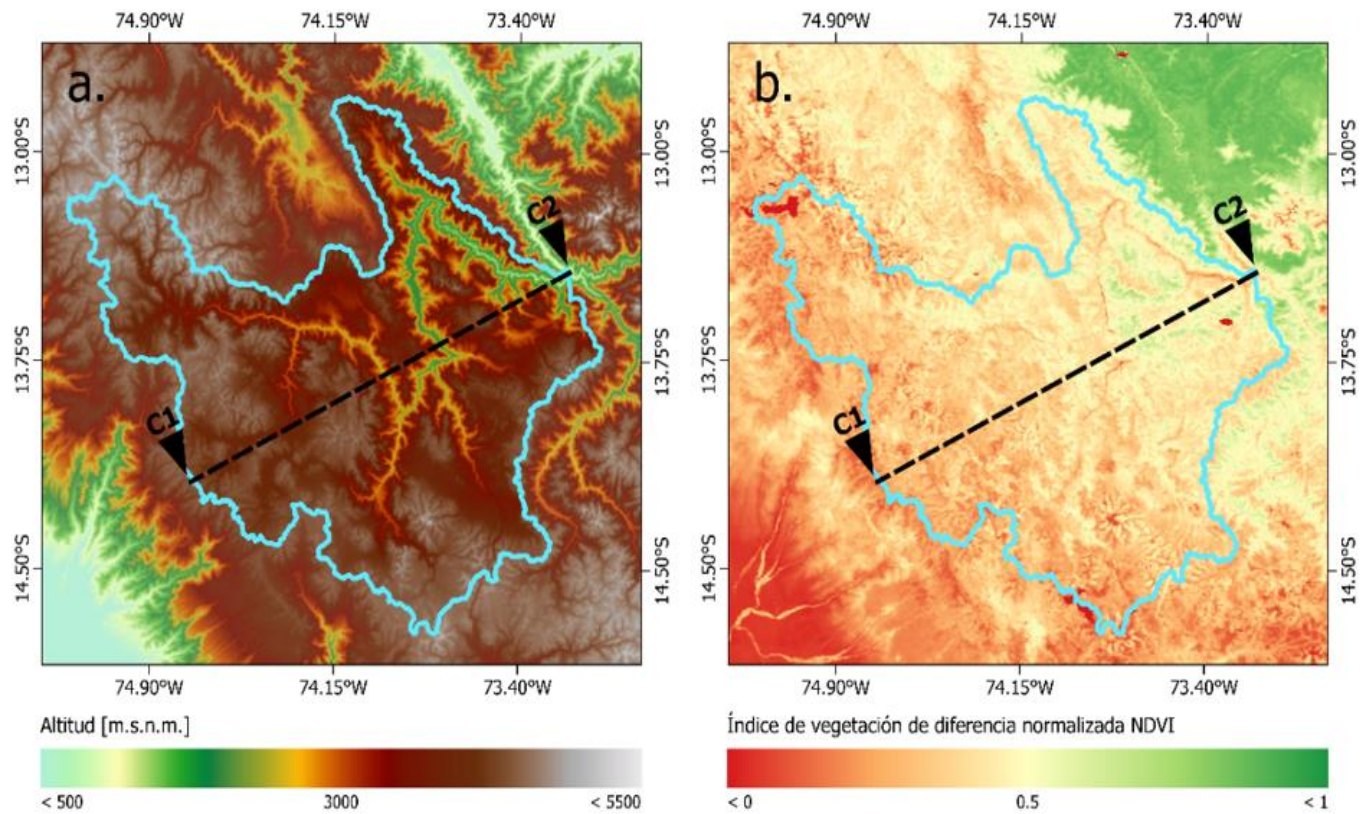
En la gradiente altitudinal desde los 1 000 m a 4 100 m, encontrando así que a medida que se incrementa en altitud, los valores de NDVI disminuyen. Por lo tanto, los valores más elevados de NDVI se concentran en altitudes por debajo de los 4 100 m y valores bajos de NDVI se concentran en altitudes por encima de los 1 000m (figura5).

Figura 5. Comportamiento y variabilidad de NDVI promedio anual de los años 2002 al 2022, respecto al gradiente altitudinal. En A se muestra el contraste altitud-NDVI en diferentes secciones transversales.



En la sección C1-C2 a lo largo de la gradiente altitudinal, en la parte final se muestra un punto de caída abrupta en la altitud, lo que a desembocadura del río pampas en el río Apurímac. Se puede observar un claro contraste entre la altitud y la vegetación dado que a medida que se incrementa la altitud, las condiciones de la vegetación tienden a disminuir (Figura 6).

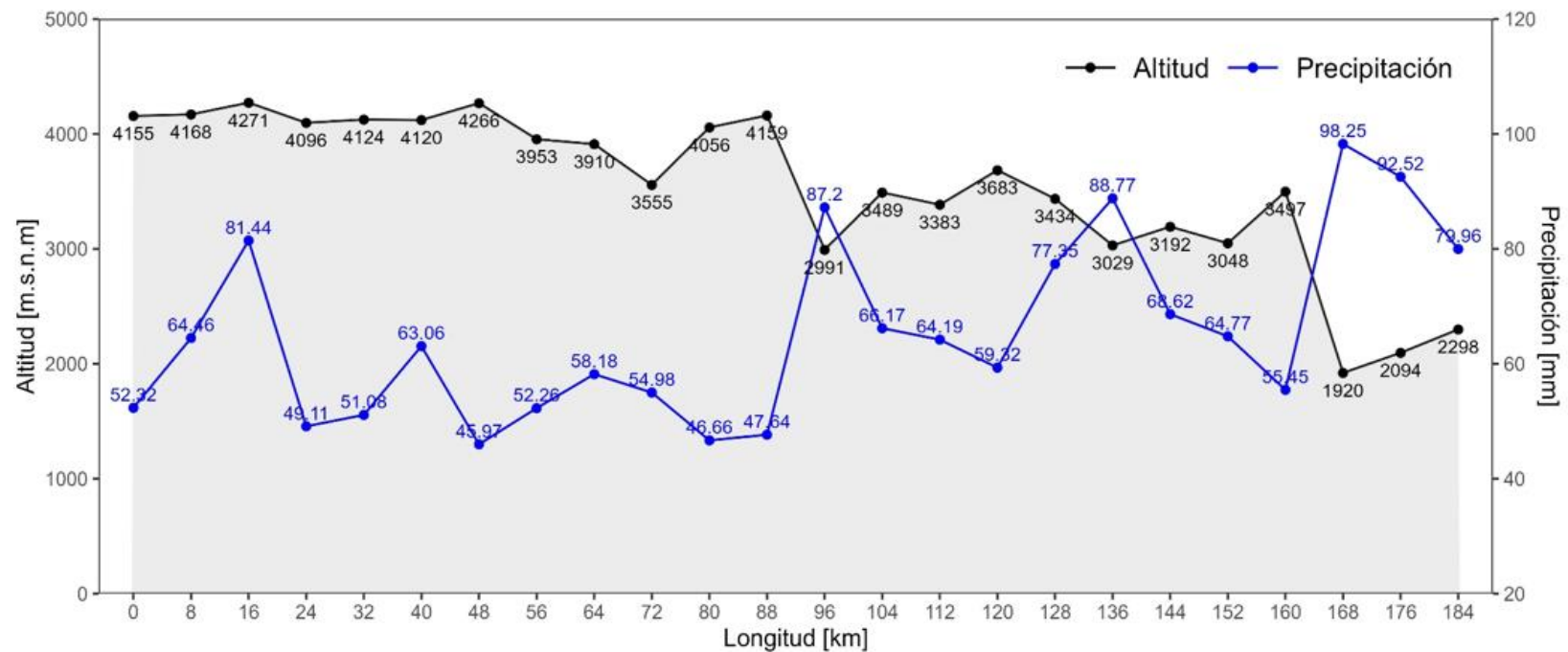
Figura 6. Representación espacial respecto al gradiente altitudinal promedio anual de los años 2002 al 2022 en: (a) se muestra el modelo digital de elevación, en (b) del NDVI promedio anual muestra la distribución espacial de NDVI.



4.1.1.1.2 Precipitación y el gradiente altitudinal

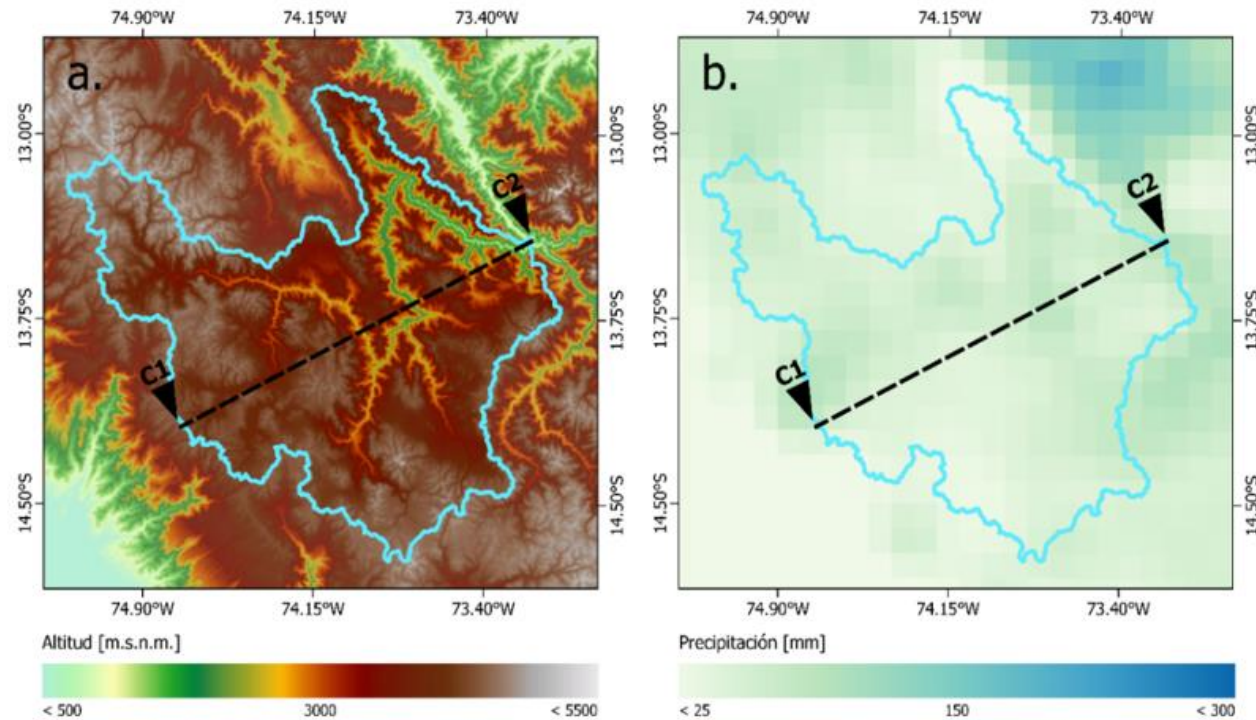
Obteniéndose valores que van desde los 44mm hasta los 100mm, además se observa que a medida que la elevación disminuye la precipitación aumenta, los valores más elevados de precipitación se concentran en altitudes por debajo de los 4 200m y valores bajos de precipitación se concentran en altitudes por encima de los 1 100m, siendo más visible este cambio en la desembocadura del río Pampas en el río Apurímac (Figura7).

Figura 7. Comportamiento y variabilidad de precipitación promedio anual de los años 2002 al 2022 respecto al gradiente altitudinal, se muestran el contraste altitud – precipitación en diferentes secciones transversales.



En la sección yC1-C2 a lo largo de la gradiente altitudinal, en la parte final se muestra un punto de caída abrupta en la altitud, lo que corresponde a la desembocadura del río Pampas en el río Apurímac. Se puede observar un claro contraste entre la altitud y la precipitación dado que a medida que se incrementa la altitud, las condiciones de precipitación tienden a disminuir (Figura 8).

Figura 8. Representación espacial de la precipitación respecto al gradiente altitudinal promedio anual de los años 2002 al 2022 en: (a) se muestra el modelo digital de elevación, en (b) se muestra la distribución espacial de precipitación promedio anual.



4.1.2 Análisis del ciclo anual de la vegetación y precipitación en la cuenca del río Pampas

Se llevó a cabo un análisis de series temporales para cada una de las variables utilizadas. Los datos consistieron en información mensual de NDVI y precipitación proporcionada por el producto PISCO del SENAMHI.

Este análisis permitió examinar la variabilidad estacional de los datos durante los meses de avenidas (períodos de aguas altas) que abarcan desde diciembre hasta abril, así como los meses de estiaje (períodos de aguas bajas), de junio a octubre.

4.1.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada mensualmente (NDVI)

El patrón temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mensual en la cuenca del río Pampas refleja un comportamiento estacional bien marcado. Durante los meses de agosto a octubre, se observan los valores mínimos de NDVI, mientras que los valores más altos se concentran principalmente en los meses de febrero a abril (Figura 9).





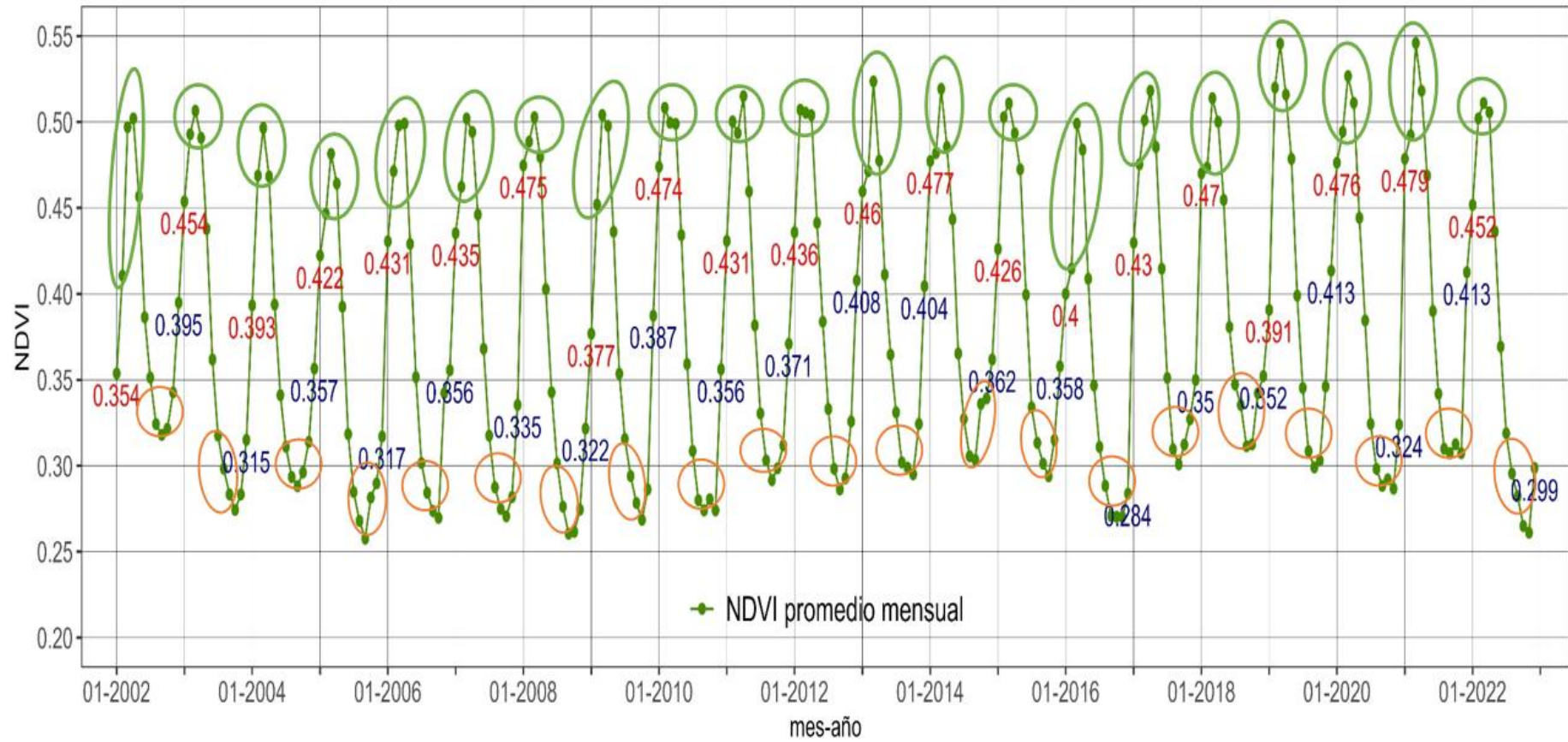
	Agosto – setiembre – octubre (ASO)	se refleja valores por debajo de los 0.35 y por encima de los 0.25 de NDVI.
	Febrero – marzo – abril (FMA)	se refleja valores por debajo de los 0.55 y por encima de los 0.40 de NDVI.
	Enero de cada año entre el 2002 al 2022	Teniendo valores entre los 0.354 mínimo y 0.479 máximo.
	diciembre de cada año entre el 2002 al 2022	Teniendo valores entre los 0.284 mínimo y 0.413 máximo.

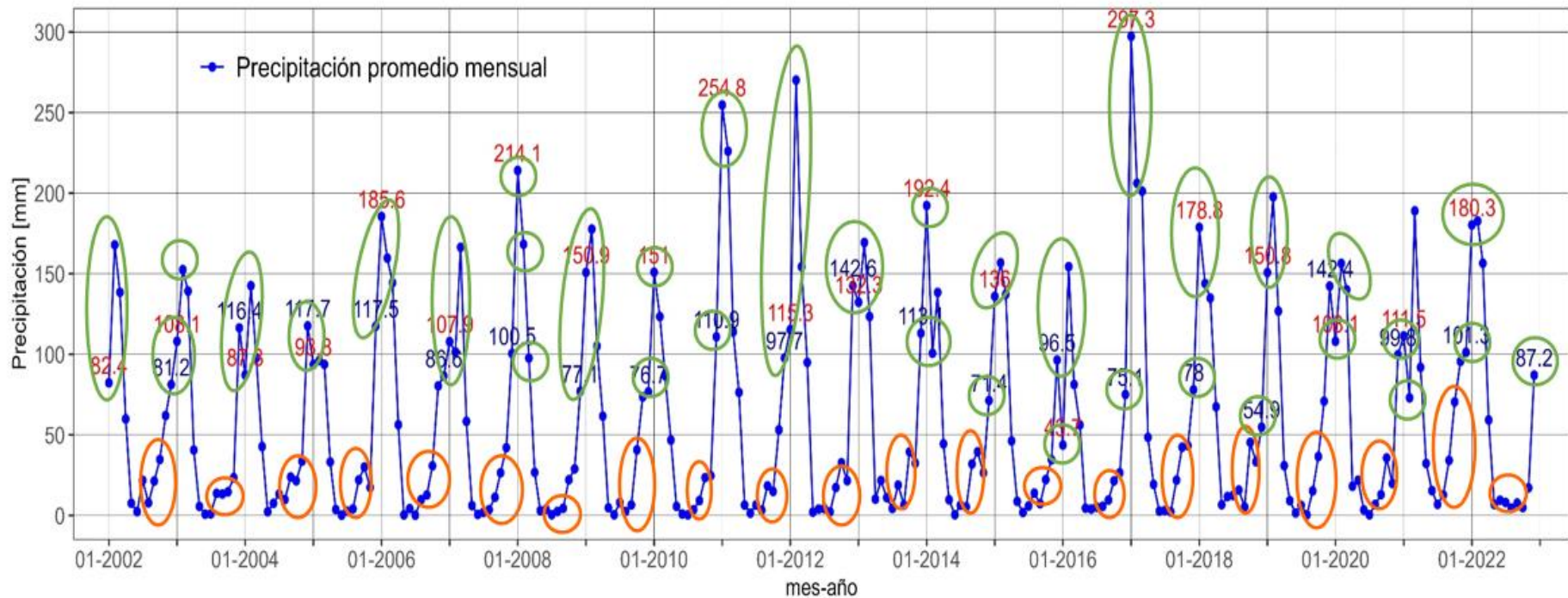
Figura 9. Series de valores históricos mensuales de NDVI obtenidos por el producto MODIS para toda la cuenca del río Pampas.



4.1.2.2 Precipitación Mensual – PISCO

Los datos de precipitación proporcionados por el producto PISCO revelan patrones estacionales en las lluvias en toda la cuenca del río Pampas, lo que permite distinguir entre periodos secos y húmedos. Se observa que las mayores precipitaciones se concentran durante los meses de diciembre a febrero, mientras que las menores precipitaciones ocurren durante los meses de junio a agosto (Figura 10).

Figura 10. Series de valores históricos de lluvia obtenidos por el producto PISCO del SENAMHI (B) para toda la cuenca del río Pampas.

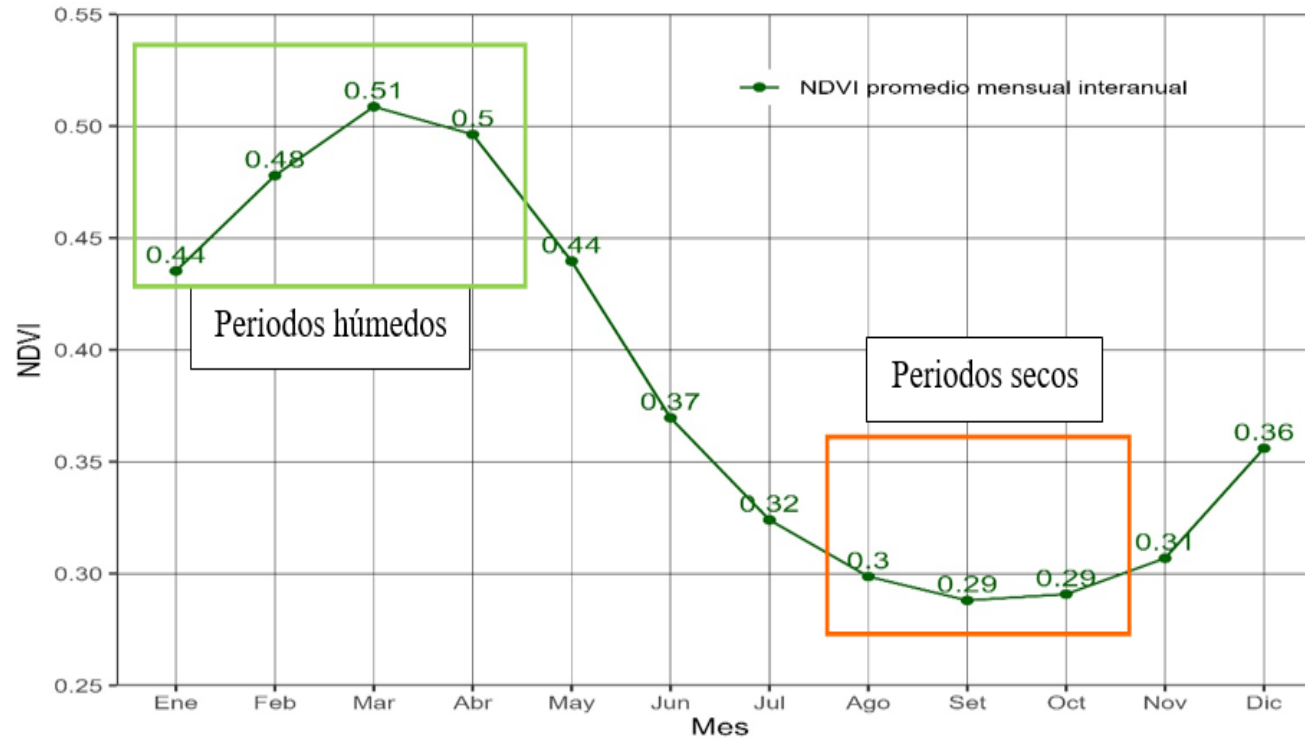


○	Junio – julio – agosto (JJA)	se refleja valores por debajo de los 80 y por encima de los 0.0 de precipitación.
○	diciembre – enero – febrero (DEF)	se refleja valores por debajo de los 297.3 y por encima de los 43.7 de precipitación.
—	Enero de cada año entre el 2002 al 2022	Teniendo valores entre los 43.7 mínimo y 297.3 máximo.
—	diciembre de cada año entre el 2002 al 2022	Teniendo valores entre los 54.9 mínimo y 0.0 máximo.

Con el objetivo de comprender mejor el comportamiento del ciclo anual y los regímenes de precipitación y la vegetación en toda la cuenca del río Pampas, se obtuvo los valores promedio mensuales a lo largo de los años para el NDVI y precipitación. Se utilizó información recopilada durante el periodo de estudio que abarcó desde 2002 hasta 2022.

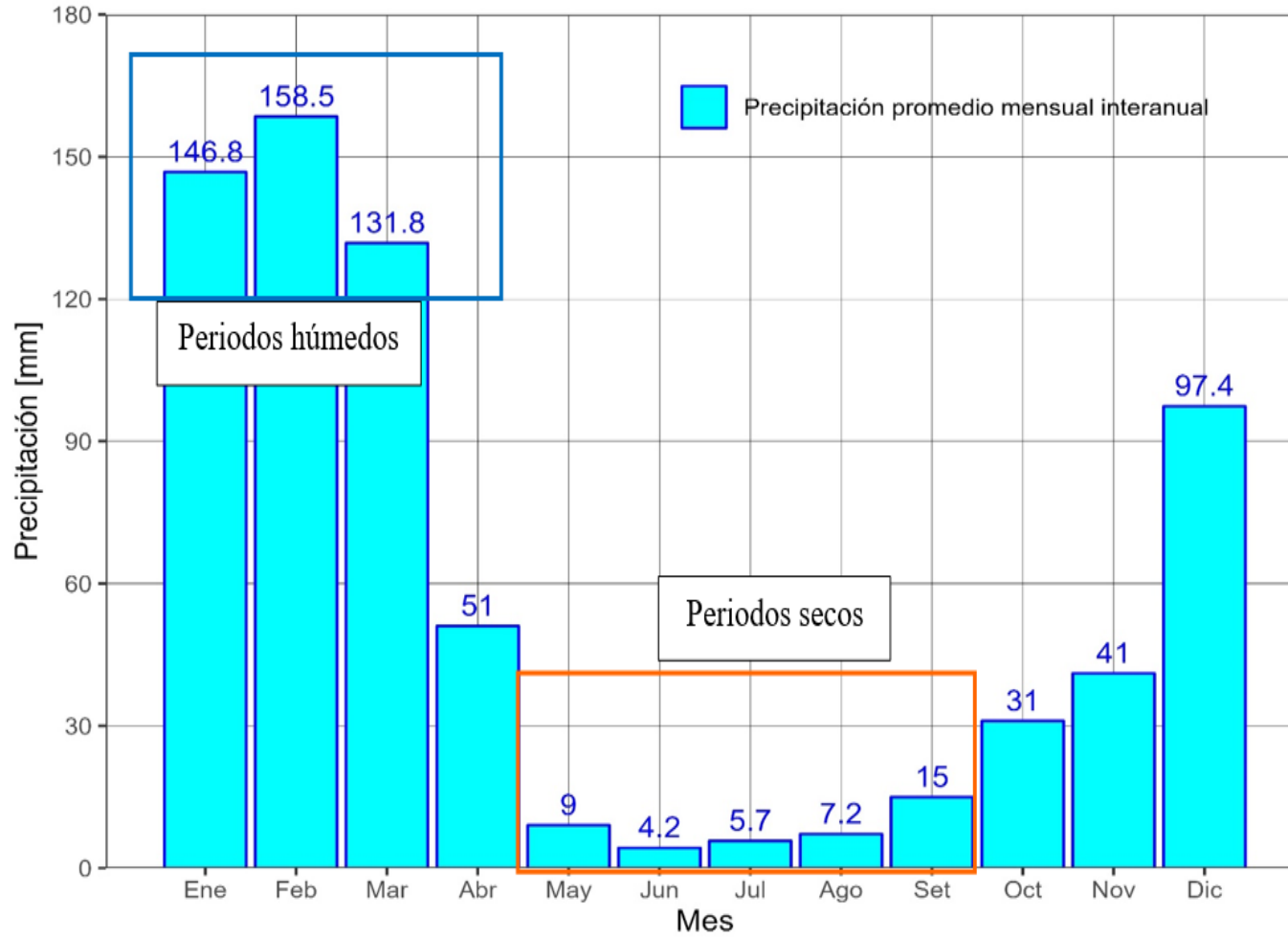
La vegetación exhibe una clara variación estacional, con una distinción evidente entre los periodos secos y húmedos (Figura 11). Se observan valores elevados de NDVI durante los meses de enero a abril (EFMA) y valores bajos durante los meses de agosto a octubre (ASO).

Figura 11. Regímenes anuales de condición de vegetación para toda la cuenca del río Pampas de enero (1) a diciembre (12) promedio anual de los años 2002 al 2022.



En cuanto a la precipitación, se evidencia un constante entre los periodos secos y húmedos, con una clara variación estacional (Figura 12). Se observa precipitaciones intensas durante los meses de enero y marzo (EFM) y precipitaciones bajas durante los meses de mayo a setiembre (MJJAS).

Figura 12. Regímenes anuales de condición de precipitación para toda la cuenca del río Pampas de enero (1) a diciembre (12) promedio anual de los años 2002 al 2022.



Estos resultados proporcionan una visión integral del comportamiento del ciclo anual y los regímenes de las variables analizadas en la cuenca del río Pampas.

4.1.3 Variabilidad interanual de la vegetación y precipitación

Con el propósito de comprender el comportamiento y la variabilidad interanual de la vegetación y precipitación en la cuenca del río Pampas, se calcularon los promedios anuales de NDVI y los totales anuales de precipitación. Para facilitar la identificación y comprensión de las fluctuaciones interanuales en estas variables, se presenta la información dividida en dos periodos: de enero a agosto y de septiembre a diciembre. Este análisis se basó en datos recopilados desde 2002 hasta 2022.

Esto se realizó debido a que algunos eventos como sequías o anomalías climáticas pueden ser más evidentes en determinados periodos del año.

Las figuras 13 y 14 muestran la variabilidad interanual de las condiciones de vegetación y las figura 15 y 16 de condiciones de precipitación, respectivamente, en la cuenca del río Pampas durante el periodo de 2002 a 2022.

Durante los meses de enero a agosto, los años 2005 y 2016 presentaron condiciones de sequía, evidenciadas por una clara disminución en las condiciones de vegetación y una reducción en las precipitaciones. Por otro lado, durante los meses de septiembre a diciembre, los años 2008, 2016 y 2022 también mostraron condiciones de sequía, con una disminución notable en las condiciones de vegetación y una disminución en las precipitaciones.

Por su parte, no hay registros de sequía extrema a nivel nacional para el año 2008 lo cual probablemente indique que se trate de un evento local ocurrido puntalmente en la cuenca del río Pampas.

Figura 13. Variabilidad interanual de las condiciones de vegetación para los meses de enero a agosto.

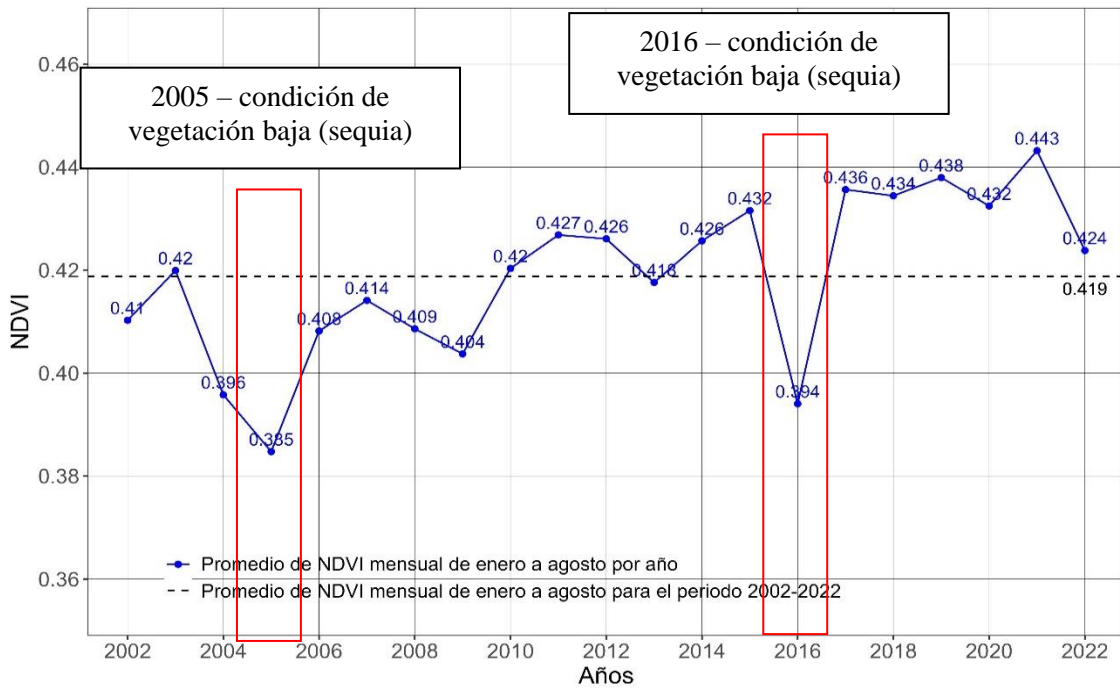


Figura 14. Variabilidad interanual de las condiciones de vegetación para los meses de septiembre a diciembre

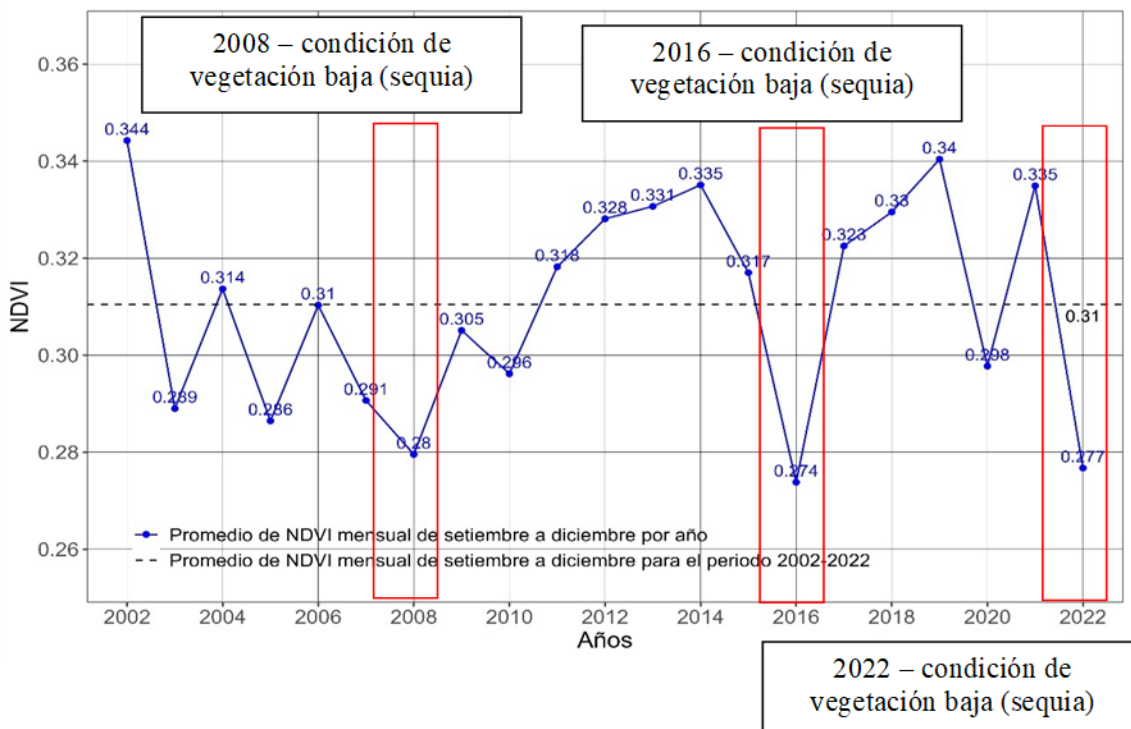


Figura 15. Variabilidad interanual de las condiciones de la precipitación total para los meses de enero a agosto.

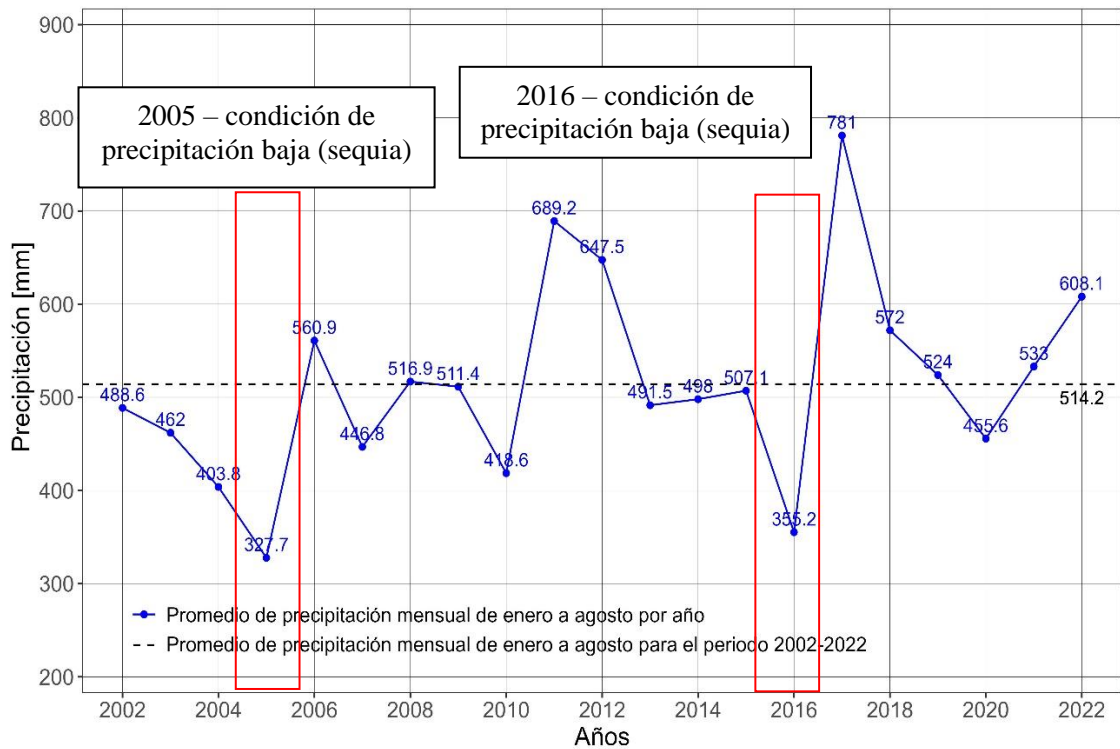
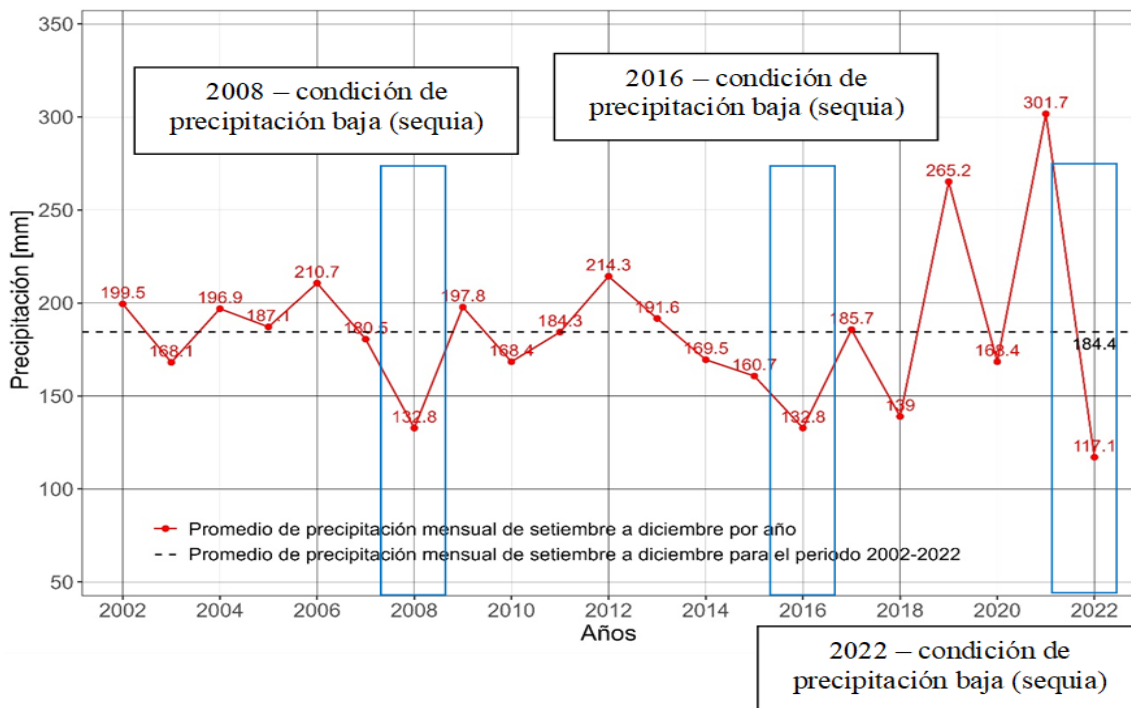


Figura 16. Variabilidad interanual de las condiciones de la precipitación total para los meses de setiembre a diciembre.

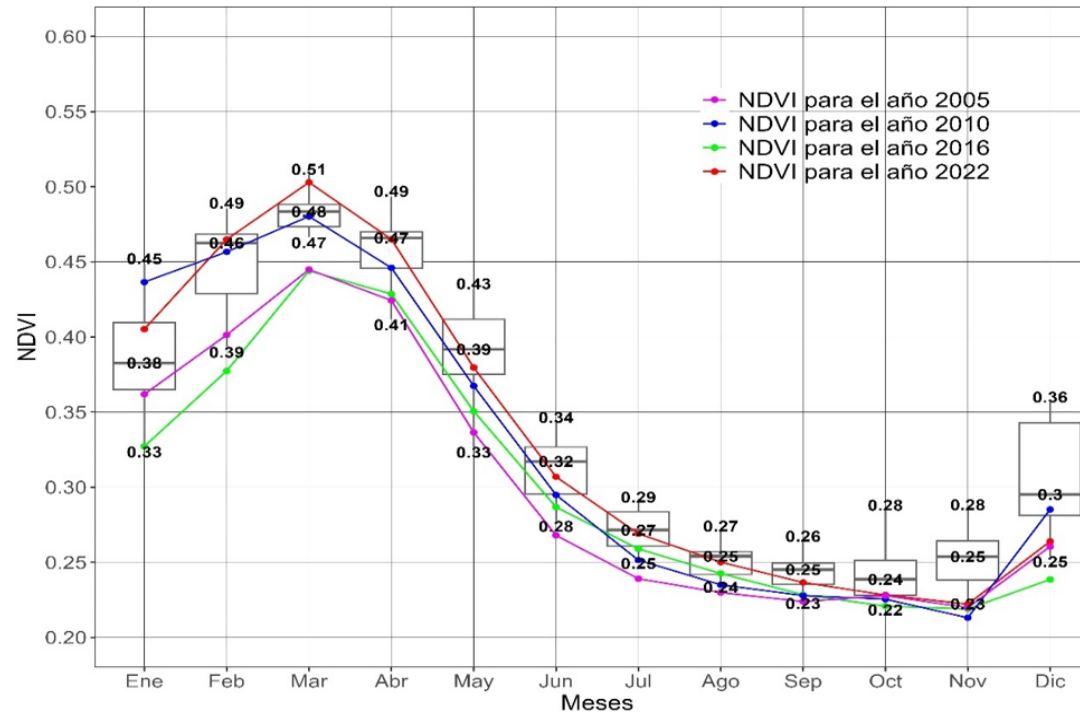


4.1.4 Análisis de los años de sequías extremas

Al analizar en mayor detalle las variables en relación a los años de sequías extremas (2005, 2010, 2016 y 2022) que abarcan el periodo de enero a diciembre, la Figura 17 muestra el comportamiento de las condiciones de vegetación durante estos años.

Durante los años 2005 y 2016, se observaron predominantemente condiciones secas, con valores de NDVI por debajo del primer cuartil, que se mantuvieron a lo largo de todo el año. Por otro lado, en los años 2010 y 2022, estas condiciones secas se intensificaron principalmente durante los meses de septiembre a noviembre. Se evidencia entonces que las sequías en los años 2005 y 2016 tuvieron un impacto severo a lo largo de todo el año. En cambio, en los años 2010 y 2022, los impactos severos no se extendieron durante todo el año, sino que se concentraron principalmente durante la estación seca de la vegetación, que abarca los meses de septiembre a octubre, e incluso se prolongaron hasta noviembre.

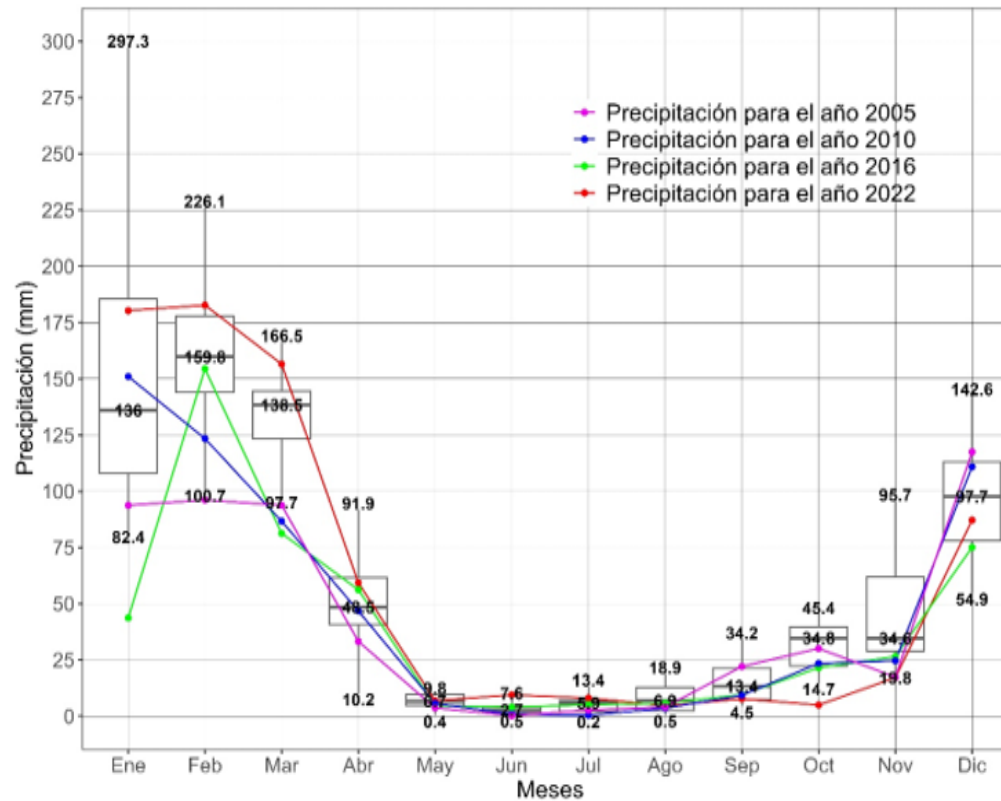
Figura 17. Valores de NDVI por debajo del primer cuartil durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022 desde enero (1) a diciembre (12).



La figura 18 muestra una disminución en las precipitaciones durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022. Estos años registraron niveles relativamente bajos de precipitación en comparación con otros años, aunque la tendencia no es muy clara y puede variar a lo largo de los diferentes meses del año. El déficit de lluvias comienza en enero para los años 2005 y 2016, en febrero para el año

2010 y en octubre para el año 2022. Cabe destacar que el comportamiento de las lluvias durante los años 2005 y 2016 ha sido estudiado en INVESTIGACIONES anteriores, como el realizado por el Grupo de Trabajo de Sequía del SENAMHI (2019).

Figura 18. Valores de precipitación por debajo del primer cuartil durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022 desde enero (1) a diciembre (12) ampliamente.



4.1.5 Patrones espaciales de sequías mediante índices de sensoramiento remoto (SR)

Con el fin de identificar patrones espaciales de sequías, se han desarrollado y calculado dos índices: el Índice de Condición de Vegetación (VCI) basado en las condiciones de vegetación y el Índice de Condición de Precipitación (PCI) basado en la precipitación (consultar sección 3.8.2.3.2 de la Metodología para más detalles). Estos índices han sido estandarizados en una escala de 0 a 1, donde valores más cercanos a 0 indican sequías extremas y valores más cercanos a 1 indican condiciones húmedas (Tabla 5 y Tabla 6). Esta estandarización permite una comparación directa entre los diferentes indicadores. Al igual que en el análisis de la variabilidad interanual de la vegetación y precipitación, la información se presenta en dos periodos: uno para los meses de enero a agosto y otro para los meses de septiembre a diciembre.

Tabla 5: Categorización de sequías con el VCI.

VCI	Clase
0.0 - 0.1	Sequía Extrema
0.1 - 0.2	Sequía Severa
0.2 - 0.3	Sequía Moderada
0.3 - 0.4	Sequía Leve
0.4 - 0.5	No es Sequía
0.6 - 0.7	Humedad Leve
0.7 - 0.8	Humedad Moderada
0.8 - 0.9	Humedad Severa
0.9 - 1.0	Humedad Extrema

Fuente: Gutierrez Cori (2018)

Tabla 6. Categorización de sequías con el PCI.

PCI	Clase
0.0 - 0.1	Sequía Extrema
0.1 - 0.2	Sequía Severa
0.2 - 0.3	Sequía Moderada
0.3 - 0.4	Sequía Leve
0.4 - 0.5	No es Sequía
0.6 - 0.7	Humedad Leve
0.7 - 0.8	Humedad Moderada
0.8 - 0.9	Humedad Severa
0.9 - 1.0	Humedad Extrema

Fuente: Gutierrez Cori (2018)

4.1.5.1 Condiciones de vegetación y las sequías

El análisis del Índice de Vegetación revela claramente la presencia de sequías severas en la cuenca del río Pampas durante el año 2005, específicamente en los meses de enero a agosto. Más del 50 por ciento del área total de la cuenca del río Pampas experimentó condiciones de sequías extremas y sequías severas durante este periodo. Por otro lado, en los años 2016 y 2022, las sequías extremas y severas ocurrieron en los meses de septiembre a diciembre, afectando también a más del 50 por ciento del área total de la cuenca del río Pampas. Estos hallazgos destacan la gravedad de las sequías en diferentes momentos y resaltan la extensión de las áreas afectadas por sequías extremas y severas en la cuenca del río Pampas (Figura 19).

4.1.5.2 Condiciones de precipitación y las sequías

La variabilidad interanual del Índice de Condición de Precipitación muestra una distribución espacialmente homogénea en términos del porcentaje de área en la cuenca del río Pampas (Figura 16). Durante los meses de enero a agosto, más del 80 por ciento de la superficie de la cuenca del río Pampas experimentó condiciones de sequías extremas y severas para los años 2005 y 2016. Asimismo, durante los meses

de septiembre a diciembre, se observaron sequías extremas y severas en más del 70 por ciento del área de la cuenca del río Pampas en los años 2008, 2016 y 2022.

Tanto el VCI y el PCI destacan claramente que los años 2005, 2016 y 2022 fueron años de sequías extremas y severas en la cuenca del río Pampas, considerando los porcentajes de área afectada en términos vegetación y precipitación.

Figura 19. Variaciones interanuales del índice de condición de vegetación (VCI) para el periodo 2002 – 2022 respecto al porcentaje de área en condiciones de sequía y condiciones húmedas para los meses de enero a agosto (a) y setiembre a diciembre (b).

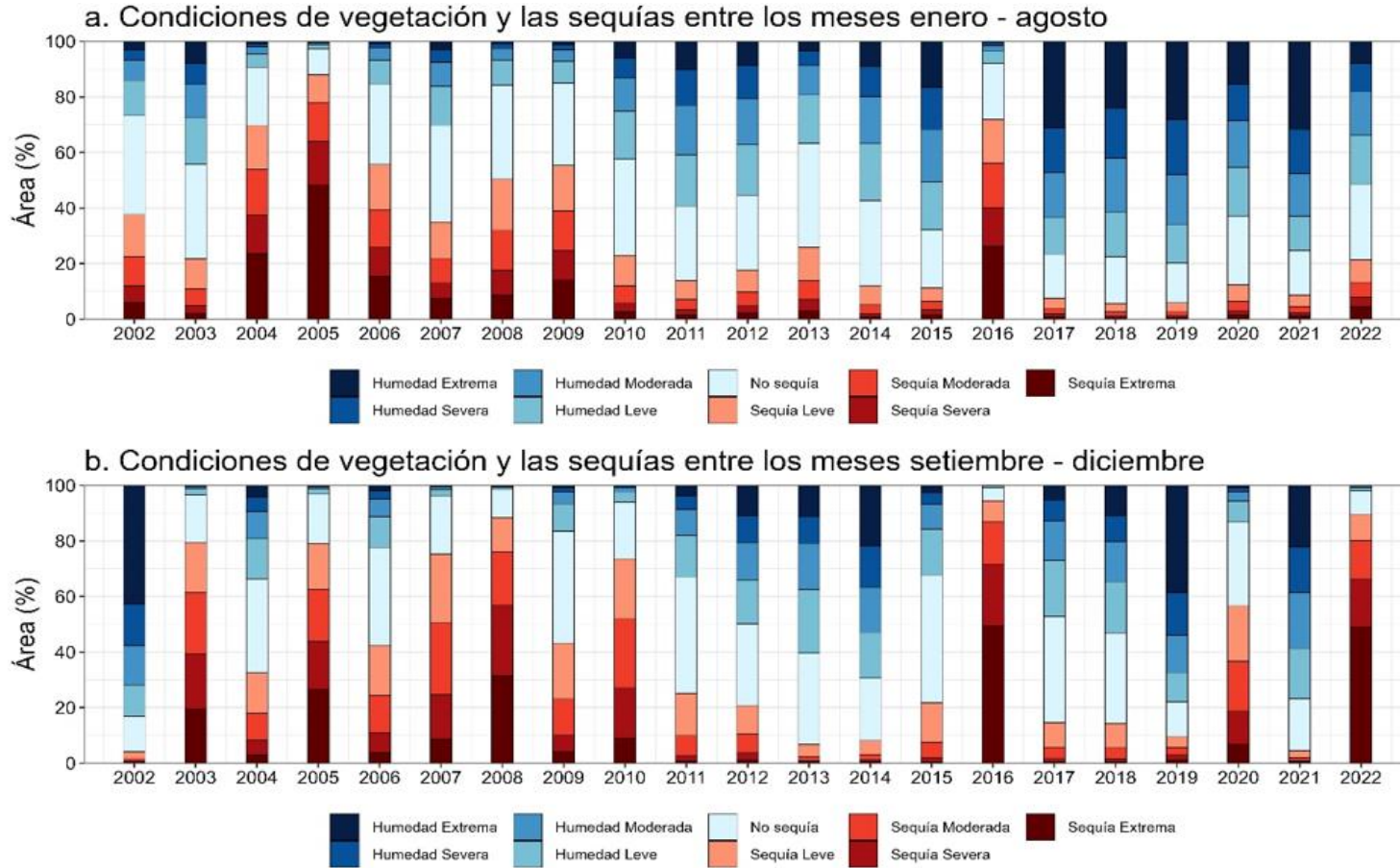
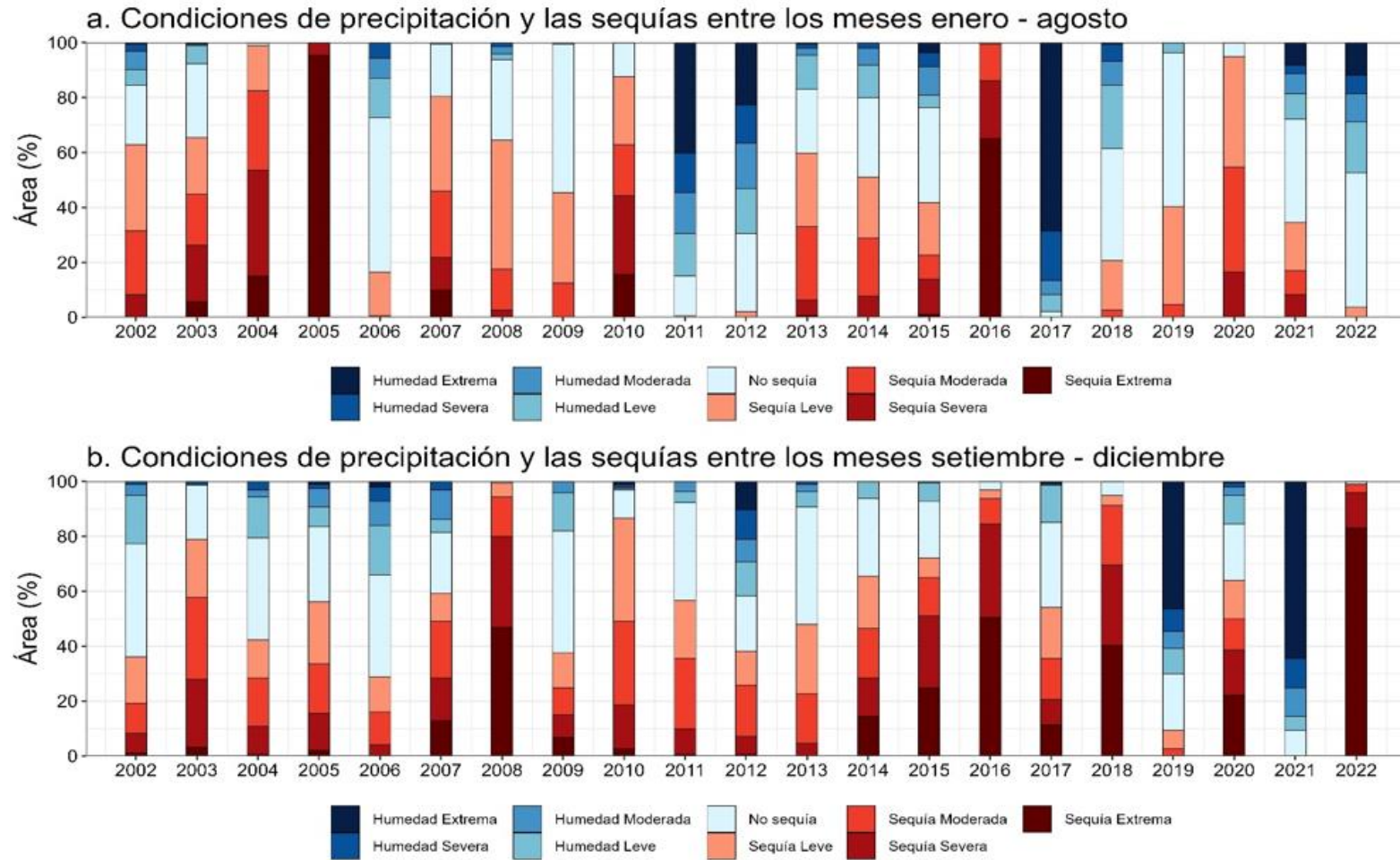


Figura 20. Variaciones interanuales del índice de condición de precipitación (PCI) para el periodo 2002 al 2022 respecto al porcentaje de área en condiciones de sequías y condiciones húmedas para los meses de enero a agosto (a) y setiembre a diciembre (b).



4.2 Discusión de Resultados

El desarrollo de la gradiente altitudinal con las variables analizadas es coherente con lo mencionado en diferentes estudios. El NDVI tiende a presentar valores más bajos a medida en que la altitud es mayor, lo que puede deberse al tipo de vegetación que se presenta en los Andes. MINAM (2015) describe la predominancia de los pastizales en zonas de alta montaña, lo que se asocia a valores de NDVI menores que los de vegetación arbustiva y leñosa, que por lo general se encuentran en elevaciones menores, con un NDVI más alto (Ccanchi Espinoza, 2021). Villar & Oliveira, (2010) muestra gráficamente la relación existente entre la altitud y precipitación, encontrándose una tendencia a presentar mayores niveles de lluvia para cotas menores en regiones de los Andes occidentales, donde está ubicada la cuenca del río Pampas.

La estacionalidad de lluvias caracterizada con el producto PISCO sobre la cuenca del río Pampas proporciona resultados muy similares a los regímenes presentados por Atúncar Zevallos (2020), quien utilizó datos de estaciones meteorológicas, registrando la precipitación máxima en el mes de febrero y la mínima entre junio y julio. Por lo que en este estudio se consideró la temporada de lluvias entre diciembre-abril, la temporada de estiaje entre mayo-agosto, y el inicio de la temporada de lluvias entre setiembre y noviembre, estacionalidad propia de los Andes del Perú Zubieta Barragán et al. (2021). El NDVI muestra un desarrollo de la vegetación con una marcada estacionalidad, propio de las condiciones de precipitación, donde se puede diferenciar claramente los meses secos de los húmedos, resultado muy parecido en estudios realizados sobre cuencas andinas Gutiérrez Cori (2018).

En el año 2005 se desarrolló una sequía extrema sobre diferentes regiones de la cuenca amazónica, el cual se debió principalmente al déficit en el transporte de humedad a causa del aumento de temperatura de la superficie en el Atlántico norte (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2008). Esta sequía tuvo alcance sobre regiones andinas al sur del Perú, incluyendo la superficie de la cuenca del río Pampas, entre enero y agosto (Espinoza et al., 2011). Esto explicaría los valores de precipitación por debajo del promedio durante esta temporada del año, lo que generó que la vegetación no se desarrolle con normalidad, presentando valores de NDVI menores a lo normal del 0.419 (figura 13). Los bajos valores de NDVI que se observaron durante el año 2008, y que se manifestaron en la parte inicial del periodo húmedo, podría estar asociado a la cantidad de lluvia registrada para esta temporada, lo que coincide con lo registrado por Atúncar Zevallos (2020), quien describe que espacialmente estos déficits hídricos se presentaron en la parte alta y baja de la cuenca principalmente entre agosto y noviembre, con valores de severidad que pueden categorizarse como sequías con una intensidad moderada (Organización Meteorológica Mundial, 2012). En el año 2016, las condiciones de déficit de humedad que se presentaron durante casi todo el año tuvieron su origen desde octubre del 2015 (Endara Huanca, 2016), lo que se relacionó al desarrollo de un evento El Niño fuerte en el Pacífico central (2015-2016) y una persistencia de las condiciones cálidas en el Atlántico norte (Erfanian et al., 2017). Esto respondería al por qué los valores de la precipitación entre enero y diciembre de este año se encontraron muy por debajo del promedio de los 0.305 (figura 14), junto a un gran decaimiento del NDVI para este periodo agosto a octubre (ASO). Recientemente, para el año 2022, el NDVI y la precipitación muestran valores extremos que indican condiciones muy bajas de humedad a un 50% (figura 19a). Esto se explicaría por el retraso del periodo de lluvias en la Sierra sur del Perú que se

manifestó a causa del desarrollo de un evento La Niña en el Pacífico central durante la primavera del 2022 y una configuración desfavorable de la Alta de Bolivia que inhibió la humedad que viene desde las regiones amazónicas a los Andes peruanos durante el verano 2022-2023 (SENAMHI, 2023).

El déficit de lluvias en el año 2005 había sido previamente clasificado como la sequía más significativa del siglo en la cuenca andino-amazónica (Marengo et al., 2008). Erfanian et al., (2017) y Yang et al., (2018) manifestaron que la sequía del 2016 fue un evento tan severo que trajo consecuencias eco hidrológicas sin precedentes desde 1901. La sequía más reciente que ocurrió en el 2022 es considerada como los episodios más secos de los últimos 58 años en la sierra sur oriental para los meses octubre -noviembre (SENAMHI, 2023). Las condiciones críticas de sequedad que se pudieron caracterizar espacialmente y temporalmente con los índices VCI y PCI en gran parte de su superficie de la cuenca del río Pampas durante los años 2005, 2016 y 2020, alcanzando niveles de sequía extrema y sequía severa con valores del 30% a 50%, son consistentes con lo mencionado en los estudios descritos, describiendo de esta forma el alcance que tuvieron las sequías más importantes de la región sobre la cuenca del río Pampas.

Se ha encontrado que la cantidad de lluvia acumulada entre enero y agosto del (figura 20a), no influyen como tal de forma consistente en los valores de NDVI entre julio y septiembre, por lo que intentar encontrar un indicador del estrés hídrico en relación a la vegetación de esta forma no es la más adecuada, tal como lo sugiere Gutiérrez Cori (2018), quien menciona que para esta temporada pueden existir procesos y mecanismos más complejos que condicionan el desarrollo de la vegetación, como la disponibilidad y retención de agua en el subsuelo o la evapotranspiración (mecanismos fisiológicos de la vegetación ante situaciones de

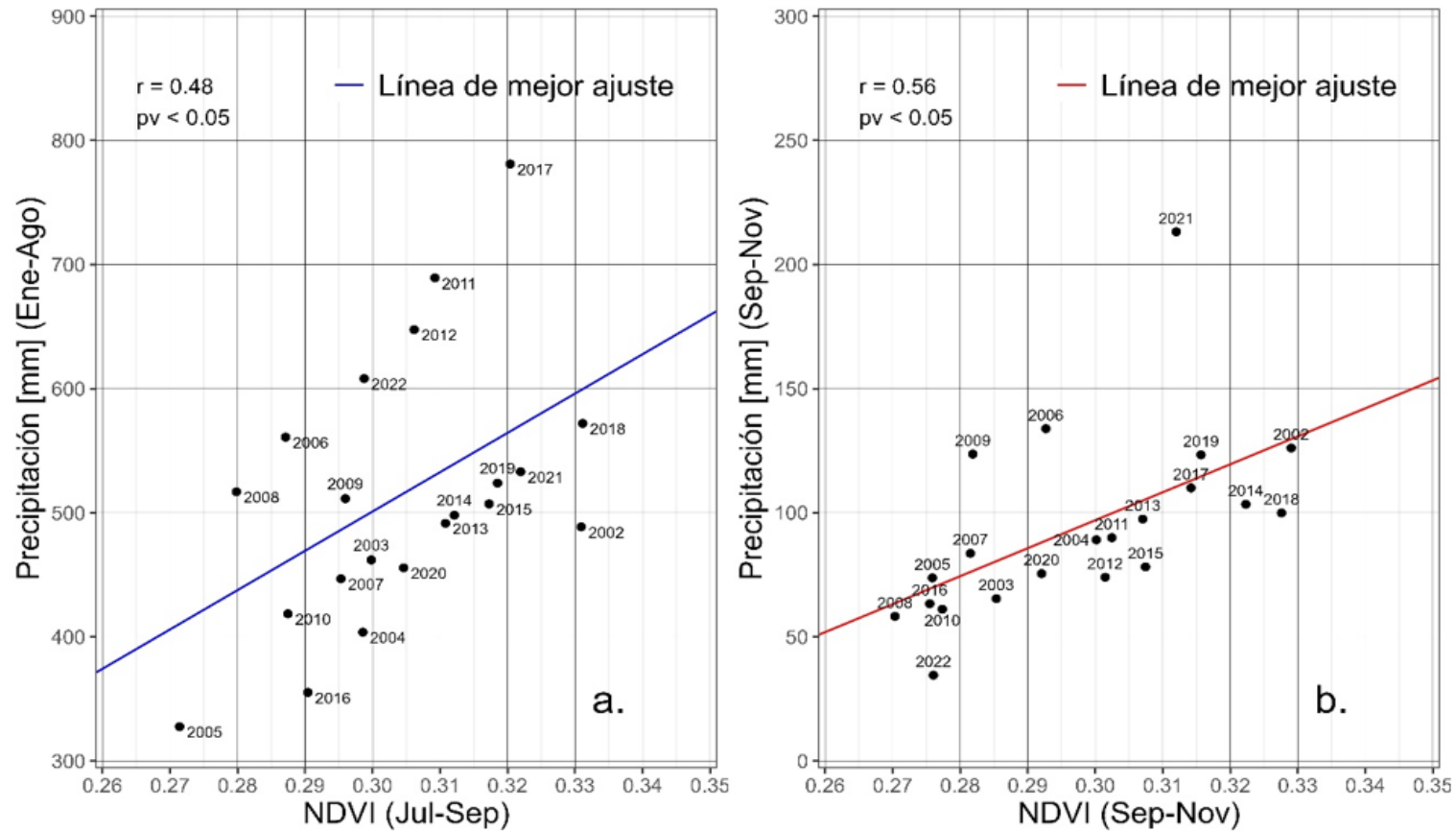
estrés hídrica) en regiones andinas y amazónicas. Por otro lado, sí se evidencia una mejor asociación de la precipitación acumulada con las condiciones vegetativas entre septiembre y noviembre. Esto podría ser el resultado de la importancia que tiene el desarrollo normal de la temporada inicial del periodo de lluvias para obtener la suficiente humedad en el suelo que permita el adecuado desarrollo de la vegetación. En contraste a esto, las bajas condiciones de vegetación serían el resultado de las sequías provocadas por el retraso de las lluvias, lo que puede desencadenar un retardo en las fechas de siembra, escaso desarrollo de los cultivos y pérdida de las siembras en zonas donde solamente se riega por secano (SENAMHI, 2023).

4.3 Prueba de hipótesis

4.3.1 Relación entre la lluvia acumulada y la vegetación

De igual forma se relacionó la cantidad de lluvia durante los periodos de julio a septiembre y septiembre a noviembre con promedios anuales estimados con el producto PISCO de SENAMHI y las condiciones de vegetación para toda la cuenca del río Pampas durante el periodo 2002 a 2022. Se encontró que la cantidad de lluvia no necesariamente explicaría ni sería determinante en las condiciones de vegetación en la cuenca del río Pampas para los meses de julio a septiembre, tal como se observa en la (Figura 21a). La relación en este caso es positiva con un coeficiente de correlación de 0.48 lo cual indica una correlación moderada entre las variables lo que podría indicar que cuando una variable aumenta la otra variable también tiende a aumentar, sin embargo, la relación no es perfecta y hay cierta variabilidad en los datos. Por su parte para los meses de septiembre a noviembre se encontró un coeficiente de correlación de 0.56 lo que indica que hay una relación moderada entre las variables y estadísticamente significativa (Figura 21).

Figura 21. Diagrama de dispersión entre la precipitación periodo enero a agosto (a) y periodo septiembre a noviembre (b) y las condiciones de vegetación (NDVI) entre setiembre y noviembre, para toda la cuenca del río Pampas, periodo 2002 al 2022.



Conclusiones

El análisis de datos de vegetación (MODIS) u precipitación (PISCO) en la cuenca del río Pampas revela patrones significativos tanto en términos de variabilidad temporal como altitudinal.

Además, el análisis del ciclo anual una marcada variación estacional tanto en el NDVI como en la precipitación, con valores máximos concentrados durante los meses de diciembre a abril (~ 0.5 y $\sim 150\text{mm}$, respectivamente) y valores mínimos durante los meses de mayo hasta agosto (~ 0.27 y $< 10\text{mm}$, respectivamente), lo que corresponde a la temporada de lluvia y estiaje, respectivamente. Estos hallazgos ofrecen una comprensión completa de la dinámica de la vegetación y la en la cuenca del río Pampas a lo largo de los años estudiados.

El estudio de la variabilidad interanual de la vegetación y la precipitación en la cuenca del río Pampas revela la presencia de condiciones de sequías durante los años 2005, 2010, 2016 y 2022. Sin embargo, estos eventos no impactaron temporalmente de manera uniforme; que en otros se manifestó principalmente al inicio de la temporada de lluvias, con retazos importantes en las precipitaciones. Estos periodos se caracterizaron por una marcada disminución, lo que posiblemente intensifico la precipitación sobre los recursos hídricos, especialmente en sectores como la agricultura.

El análisis de las condiciones de sequía en la cuenca del río Pampas revela la gravedad y la extensión de este fenómeno en diferentes períodos. Tanto la aplicación del Índice de Condición de Vegetación (VCI) como el Índice de Condición de Precipitación (PCI) subrayan la presencia de sequías extremas y severas en años clave, como 2005, 2016 y 2022. El VCI indica que el 2005 fue el año donde el déficit de lluvias tuvo el mayor alcance espacial del periodo analizado entre enero y agosto,

impactando aproximadamente el 90% del área de la cuenca del río Pampas. Asimismo, durante los años 2016 y 2022, el VCI indica que las sequías impactaron en más del 80% de toda la extensión de la cuenca entre setiembre y diciembre. Con un patrón similar, el PCI caracterizó que en el 2005 toda la cuenca manifestó condiciones de déficit de precipitaciones, con más del 90% en un nivel extremo entre enero y agosto. En los años 2016 y 2022, entre setiembre y diciembre, se desarrollaron condiciones de sequía en niveles severos y extremos en más del 50% de su extensión. La homogeneidad en la distribución espacial de estas condiciones de sequía resalta su impacto generalizado en toda la región.

La investigación evidencia que la cantidad de lluvia acumulada entre enero y agosto no proporciona un indicador consistente del estrés hídrico en relación con la vegetación entre julio y septiembre ($r = 0.48$; $pv < 0.05$) en la cuenca del río Pampas. Esto sugiere la presencia de procesos y mecanismos más complejos que condicionan el desarrollo de la vegetación durante esta temporada, como la disponibilidad y retención de agua en el subsuelo o la evapotranspiración. Por otro lado, se destaca una mejor asociación entre la precipitación acumulada y las condiciones vegetativas entre septiembre y noviembre ($r = 0.56$; $pv < 0.05$), lo que subraya la importancia del desarrollo normal del período inicial de lluvias para el adecuado crecimiento de la vegetación.

Recomendaciones

Dado que se ha identificado una variabilidad altitudinal y estacional en las variables estudiadas, se recomienda un monitoreo continuo y sistemático de la cuenca del río Pampas. Esto permitirá anticipar posibles eventos extremos y adaptarse adecuadamente a los cambios.

Aunque el sensor MODIS ha proporcionado datos valiosos para esta investigación, se recomienda considerar la incorporación de otros sensores satelitales para obtener una visión más completa y detallada de la región. La combinación de diferentes fuentes de datos podría mejorar la precisión y resolución de los análisis.

Ante la evidencia de impactos en la agricultura debido a las sequías y cambios en la estacionalidad de las lluvias, se recomienda diseñar y ejecutar planes de adaptación agrícola. Estos planes podrían incluir técnicas de riego más eficientes, selección de cultivos más resistentes a la sequía y programas de capacitación para agricultores.

Sería beneficioso promover más INVESTIGACIONES en la región andina que exploren los mecanismos y procesos complejos que afectan el desarrollo de la vegetación, como la disponibilidad y retención de agua en el subsuelo o la evapotranspiración.

Finalmente, en relación al producto PISCO proporcionado por SENAMHI se recomienda expandir su uso y optimizarlo, dado que ha demostrado ser una herramienta valiosa para caracterizar la estacionalidad de lluvias en la cuenca del río Pampas. Esto podría incluir la capacitación de técnicos y tomadores de decisiones sobre cómo interpretar y aplicar efectivamente la información derivada de PISCO. Además, sería útil explorar la posibilidad de desarrollar herramientas y aplicaciones

específicas basadas en PISCO para monitorear y gestionar recursos hídricos en tiempo real.

Aspectos administrativos

Recursos

- Software y herramientas: Herramientas de procesamiento de imágenes satelitales, software de análisis estadístico, software GIS para el mapeo y análisis espacial.
- Datos: Conjunto de datos de sensoramiento remoto de MODIS, datos de precipitación PISCO, estudios y publicaciones relacionadas para comparación y referencia.
- Equipamiento: Computadora con capacidad de procesamiento adecuado, acceso a data satelital o plataforma para obtener datos de MODIS.
- Humanos: Especialistas en sensoramiento remoto.

Cronograma de actividades

Tabla 7. Cronograma de actividades.

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
<i>Revisión de la literatura</i>	X	X				
<i>Recopilación de datos</i>		X	X			
<i>Procesamiento de imágenes</i>			X	X		
<i>Análisis preliminar</i>				X	X	
<i>Redacción de resultados y discusión</i>					X	X
<i>Revisión y ajustes</i>						X
<i>Presentación</i>						X

Fuente: elaboración propia

Presupuesto y financiamiento

Presupuesto

Tabla 8. Presupuesto (materiales, equipos y otros).

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	UNIDAD	CANTIDAD	P.U. (S/)	PARCIAL (S/)
Equipos, software y servicios técnicos				3,200.00
Internet	h	200.00	1.00	200.00
Laptop	und	1.00	3,000.00	3,000.00
Transporte y salidas de campo	est			500.00
Materiales y suministros				230.20
Papel bond	millar	2.00	30.00	60.00
Folder manila	und	6.00	0.70	4.20
Resaltador	und	2.00	2.00	4.00
Lapicero tinta seca	und	2.00	1.00	2.00
Empastado	und	2.00	80.00	160.00
Servicios de terceros				1,300.00
Curso de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG)	curso	1.00	700.00	700.00
Curso de lenguaje de programación R	curso	1.00	600.00	600.00
Material bibliográfico y fotocopias				950.00
Textos	und	10.00	80.00	800.00
impresiones	und	5.00	300.00	150.000
Varios e imprevistos	est	1.00	300.00	300.00
Presupuesto total (S/)				6,480.20

Fuente: elaboración propia

Financiamiento

La presente investigación será autorizada por los propios investigadores.

Bibliografía

- ANA. (2009). Unidades hidrográficas del Perú. *Autoridad Nacional Del Agua*.
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/101>
- ANA. (2012). *Evaluación de los Efectos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos del Río Pampas*.
- Atúncar Zevallos, G. A. (2020). *Análisis espacio-temporal de sequías históricas en la cuenca del río Pampas durante el periodo 1981--2016*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785.
https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411/SUPPL_FILE/THSJ_A_1649411_S M5028.DOCX
- Bais, F. M. (2017). *Caracterización de sequías hidrológicas en cuencas de la Patagonia de la República Argentina* [B.S. thesis]. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Matemáticas.
- Blaschke, T., Feizizadeh, B., & Hölbling, D. (2014). Object-based image analysis and digital terrain analysis for locating landslides in the Urmia Lake basin, Iran. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(12), 4806–4817. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2350036>
- Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition* - James B. Campbell, Randolph H. Wynne - Google Libros.
https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=NkLmDjSS8TsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Introduction+to+remote+sensing&ots=s2MmA8nE&sig=wc_SKsOWwkPGIEWj

qdifQN9hGw&redir_esc=y#v=onepage&q=Introduction%20to%20remote%20sensing
&f=false

Ccanchi Espinoza, Y. J. (2021). *Evaluación de sequías y del riesgo potencial a la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas altoandinos mediante uso de sensores remotos* [Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/5195>

Cerón, W. L., Escobar, Y. C., & Baquero Montoya, O. L. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geograficos*, 76(279), 557–578.
<https://doi.org/10.3989/estgeogr.201520>

Cocero, D., Riaño, D., & Cliuvieco, E. (1998). estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos de peligro de incendios. 7, 59–72.

Cuba, O. C., & Surco, R. G. C. (2022). Estimación Temporal y Espacial de las Sequías e Inundaciones Meteorológicas con índice China-Z en la Intercuenca Alto Apurímac, Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1), 57–67. <https://doi.org/10.1590/0102-7786370013>

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., & Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 245–253. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2012.09.010>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M.,

Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys*, 45, 2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Febre, C. (2017). *Causa de sequías severas en el sur del Perú*.

Fernández, J. Á. (2003). Descripción analítica en estudios cuantitativos. *Revista Digital Del Cedex*, 137, 143.

Gaitán, J. J., Donaldo Bran, D. E., & Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *Agriscientia*, 32(2), 83–93. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2015000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=en

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Gao, H., Tang, Q. H., Ferguson, C. R., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (2010). Estimating the water budget of major US river basins via remote sensing. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.483488>, 31(14), 3955–3978. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.483488>

García-Mora, T. J., & Mas, J.-F. (2011). Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 83–94. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Gomis-Cebolla, J., Jimenez, J. C., & Sobrino, J. A. (2018). LST retrieval algorithm adapted to the Amazon evergreen forests using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 401–411. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.10.015>
- Goward, S. N., Tucker, C. J., & Dye, D. G. (1985). North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high-resolution radiometer. *Vegetatio*, 64(1), 3–14. <https://doi.org/10.1007/BF00033449/METRICS>
- Gutierrez Cori, O. E. (2018). *Estimación de índices de sequía mediante sensoramiento remoto integrando MODIS y TRMM en la cuenca andino-amazónica, Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hao, Z., & Singh, V. P. (2018). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668–678.
- Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Felipe-Obando, O. (2022). High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp_h). *Data in Brief*, 45. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2022.108570>
- IGN. (2022). *Limites Departamentales | Plataforma Nacional de Datos Abiertos*. Instituto Geográfico Nacional.
<https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/limites-departamentales>
- Jiao, W., Wang, L., & McCabe, M. F. (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112313.
- Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., & Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products. *Remote*

Sensing of Environment, 83(1–2), 244–262. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)

Kelmansky, P. J., (2019). Graphic too, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337.

Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167–1180.

Khaldi, R., Alcaraz-Segura, D., Guirado, E., Benhammou, Y., El Afia, A., Herrera, F., & Tabik, S. (2022). TimeSpec4LULC: a global multispectral time series database for training LULC mapping models with machine learning. *Earth System Science Data*, 14(3), 1377–1411. <https://doi.org/10.5194/ESSD-14-1377-2022>

Kogan, F. N. (1995a). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)

Liu, R., & Liu, Y. (2013). Generation of new cloud masks from MODIS land surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 133, 21–37. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.01.019>

Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/215>

Matasci, G., Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Hobart, G. W., & Zald, H. S. J. (2018). Large-area mapping of Canadian boreal forest cover, height, biomass and other structural attributes using Landsat composites and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, 209, 90–106. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.12.020>

- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., & others. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- Merchant, J. W. (2000). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(4), 311–311. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=15230406&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA68540517&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>
- Meza, J. C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Geográfica Digital*, 17(33), 44–60. <https://doi.org/10.30972/GEO.17334015>
- Ortiz Vásquez, R. O. (2017). *Caracterización de sequías en la cuenca Puyango-Tumbes en base a los índices de flujo base y precipitación estandarizada*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Pan, Y., Zhu, Y., Lü, H., Yagci, A. L., Fu, X., Liu, E., ... & Liu, R. (2023). Accuracy of agricultural drought indices and analysis of agricultural drought characteristics in China between 2000 and 2019. *Agricultural Water Management*, 283, 108305.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Pardo, D. S., del Castillo, P., & de Estudios Sociales, C. P. (2013). Informe Nacional del Perú. *Las Condiciones de Sequía y Estrategias de Gestión En El Perú*. Autoridad Nacional Del Agua. https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/571/mod_page/content/88/PERU_2_2.pdf

- Piazzese, J., & Oñate, E. (2003). *Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo-ambiental desde imágenes satelitales*.
https://www.scipedia.com/public/Piazzese_Oñate_2003a
- Rizzi, R., & Rudorff, B. F. T. (2007). Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agronômico para estimar a produtividade de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(1), 73–80. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000100010>
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J. W. , Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA. *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A*.
- Salas, F. J., & Chuvieco, E. (1995). *Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles*.
- Shuai, G., & Basso, B. (2022). Subfield maize yield prediction improves when in-season crop water deficit is included in remote sensing imagery-based models. *Remote Sensing of Environment*, 272, 112938. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.112938>
- Silva Laurentino, M. L. (2014). *Aplicación de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos-España*.
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/6649/TFM-L187.pdf?sequence=1>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50–57. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2015.01.012>

- Sun, G., & Tunér, J. (2004). Low-level laser therapy in dentistry. *Dental Clinics of North America*, 48(4), 1061–1076. <https://doi.org/10.1016/J.CDEN.2004.05.004>
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). *Standardized precipitation index: user guide*.
- Tang, Q., Gao, H., Lu, H., & Lettenmaier, D. P. (2009). Remote sensing: hydrology. *Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0309133309346650*, 33(4), 490–509. <https://doi.org/10.1177/0309133309346650>
- Teillet, P. M., Staenz, K., & Williams, D. J. (1997). Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 139–149. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00248-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00248-9)
- Tello LLamoja, C., & Quevedo, K. (2021). *Caracterización de la sequía agrícola para los cultivos de papa y quinua en el departamento de Puno, Perú*.
- Tucker, C. J. (1979a). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Tucker, C. J. (1979b). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *INVESTIGACIONES Geográficas (España)*, 26, 59–80.
- Velazco Alarcón, C., Trebejo Varillas, V., Quispe Sanabria, J., & Pérez Dias, N. (2011). *Caracterización agroclimática de la región Apurímac*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-14.pdf>

Vermote Eric. (2020). *LP DAAC - MOD09A1*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.061>

Wagner, F. H., Ferreira, M. P., Sanchez, A., Hirye, M. C. M., Zortea, M., Gloor, E., Phillips, O. L., de Souza Filho, C. R., Shimabukuro, Y. E., & Aragão, L. E. O. C. (2018). Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *145*, 362–377. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2018.09.013>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, *10*(3), 111–120.

Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., & Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, *21*, 763–774.

Woodward, A., Smith, K. R., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D. D., Honda, Y., Liu, Q., Olwoch, J., Revich, B., Sauerborn, R., Chafe, Z., Confalonieri, U., & Haines, A. (2014). Climate change and health: On the latest IPCC report. *The Lancet*, *383*(9924), 1185–1189. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60576-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60576-6)

Xiong, X., Wenny, B. N., Wu, A., Barnes, W. L., & Salomonson, V. V. (2009). Aqua MODIS thermal emissive band on-Orbit calibration, characterization, and performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *47*(3), 803–814. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2005109>

Zeng, Y., Hao, D., Huete, A., Dechant, B., Berry, J., Chen, J. M., Joiner, J., Frankenberg, C., Bond-Lamberty, B., Ryu, Y., Xiao, J., Asrar, G. R., & Chen, M. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews*

Earth & Environment 2022 3:7, 3(7), 477–493. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00298-5>

Zhengming, W. (2020). *LP DAAC - MYD11A2*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A2.061>

Zhu, Z., Zhou, Y., Seto, K. C., Stokes, E. C., Deng, C., Pickett, S. T. A., & Taubenböck, H.

(2019). Understanding an urbanizing planet: Strategic directions for remote sensing.

Remote Sensing of Environment, 228, 164–182.

<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.04.020>

Zubieta Barragán, R., Molina-Carpio, J., Laqui, W., Sulca Jota, J. C., & Ilbay, M. (2021).

Impactos del cambio climático en diferentes tipos de sequías en la cuenca del Titicaca.

https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/5336/Zubieta_et_al_20

[21_Boletin-Cientifico-El-Niño-Vol.8-Nº7.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/5336/Zubieta_et_al_2021_Boletin-Cientifico-El-Niño-Vol.8-Nº7.pdf?sequence=3&isAllowed=y)