

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE



Evaluación multitemporal de la evolución de la sequía mediante
NDDI y SPI en la cuenca Quebrada Seca, período 2000 a 2023

Tesis para optar el título profesional de
ingeniera forestal y medio ambiente

Autor: Bach. Maria Cristina Calle Tello

TUMBES – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE



Evaluación multitemporal de la evolución de la sequía mediante NDDI y SPI en la cuenca Quebrada Seca, período 2000 a 2023

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Carrillo Sarango, José Modesto (Presidente)


 [0000-0003-0841-3064](https://orcid.org/0000-0003-0841-3064)

Dr. Caucha Morales, Jhony (Secretario)


 [0000-0002-4786-9008](https://orcid.org/0000-0002-4786-9008)

Dr. Gines Tafur, Eber (Vocal)


 [0000-0003-0366-4438](https://orcid.org/0000-0003-0366-4438)

TUMBES – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE



Evaluación multitemporal de la evolución de la sequía mediante NDDI y SPI en la cuenca Quebrada Seca, período 2000 a 2023

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y forma.

Bach. Calle Tello, Maria Cristina (Autor).....

Dr. Gines Tafur, Eber (Asesor).....

 [0000-0003-0366-4438](https://orcid.org/0000-0003-0366-4438)

TUMBES – 2025

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARÍA ACADÉMICA**



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

En Tumbes, a los siete días, del mes de noviembre, del año dos mil veinticinco; siendo las nueve horas, con ceros minutos, en el aula 01 del Laboratorio de Mecánica de Suelos, de la Facultad de Ciencias Agrarias, se reunieron el Jurado calificador, designado con Resolución N°182-2023/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, de fecha 14 de octubre del año 2023, conformada por Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Presidente), Dr. Luis Jhony Caucha Morales (Secretario) y Dr. Eber Gines Tafur (Vocal), reconociendo en la misma resolución al Dr. Eber Gines Tafur como Asesor, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la Tesis titulada: "Evaluación Multitemporal de la Evolución de la Sequía Mediante NDDI y SPI en la Cuenca Quebrada Seca, Periodo 2000 a 2023", para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, presentado por la Bach. MARIA CRISTINA CALLE TELLO, concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte de la sustentante y después de la deliberación, el jurado según el Art. N°75 del Reglamento de Tesis para Pre Grado y Post Grado de la Universidad Nacional de Tumbes declara a la Bach. Maria Cristina Calle Tello aprobada, por unanimidad, con el calificativo Bueno, se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas a la tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda apta para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N°30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las diez horas, con ceros minutos, del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 07 de noviembre del año 2025

	
DR. JOSÉ MODESTO CARRILLO SARANGO DNI N° 00223850 CODIGO ORCID 0000-0003-0841-3064 Presidente	Dr. LUIS JHONY CAUCHA MORALES DNI N° 41378388 CODIGO ORCID 0000-0002-4786-9008 Secretario
	
DR. EBER GIBES TAFUR DNI N° 17542075 CODIGO ORCID 0000-0003-0366-4438 Vocal	Dr. EBER LEOPOLDO HERRERA PALACIOS DNI N° 42450218 CODIGO ORCID Secretario

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y (CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
Secretaría Académica

REPORTE DE TURNITIN



Página 1 de 52 - Portada

Identificador de la entrega trnoid::3117534691533

Tesis:

Evaluación multitemporal de la evolución de la sequía mediante NDDI y SPI en la cuenca Quebrada Seca, período 20...

Evaluación multitemporal de la evolución de la sequía mediante NDDI y SPI en la cuenca Quebrada Seca, período 2000 a 2023

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trnoid::3117534691533

Fecha de entrega
1 dic 2025, 5:38 GMT-5

Fecha de descarga
1 dic 2025, 5:46 GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_FINAL_Bach. Maria Cristina Calle Tello SUBSANADO_.docx

Tamaño del archivo
9.4 MB

47 páginas

8303 palabras

44.812 caracteres



Dr. Eber Gines Tafur
Código ORCID N.º 0000-0003-0366-4438



Página 1 de 52 - Portada

Identificador de la entrega trnoid::3117534691533

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas
- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 10%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de Integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.




Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Dr. Eber Gines Tafur

Código ORCID N.º 0000-0003-0366-4438

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 10%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.untumbes.edu.pe	<1%
2	Internet	ouci.dntb.gov.ua	<1%
3	Internet	renati.sunedu.gob.pe	<1%
4	Internet	link.springer.com	<1%
5	Internet	www.mdpi.com	<1%
6	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
7	Internet	www.nature.com	<1%
8	Internet	repositorio.iica.int	<1%
9	Trabajos del estudiante	Maastricht University on 2024-10-13	<1%
10	Internet	minerva.sic.ues.edu.sv	<1%
11	Trabajos del estudiante	University of Derby on 2015-08-28	<1%



Dr. Eber Gines Tafur
Código ORCID N.º 0000-0003-0366-4438

12	Internet	jes.ksu.edu.tr	<1%
13	Internet	www.gob.pe	<1%
14	Internet	apirepositorio.unh.edu.pe	<1%
15	Internet	ojs.edicionescervantes.com	<1%
16	Internet	www.scielo.sa.cr	<1%
17	Publicación	G. Kannan, A. Noorul Haq. "Analysis of interactions of criteria and sub-criteria for ...	<1%
18	Internet	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
19	Internet	www.fzp.czu.cz	<1%
20	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
21	Internet	jdcr.birjand.ac.ir	<1%
22	Internet	repositorio.unjbg.edu.pe	<1%
23	Internet	www.sustainabilityperformances.eu	<1%
24	Publicación	Vinit Kumar, Ajay Singh Rana, Manish Mehta, Gautam Rawat. "Manifestations of ...	<1%
25	Publicación	Tariq Abdullah, Jasia Bashir, Shakil Ahmad Romshoo. "Assessing glacier changes ...	<1%

Dr. Eber Gines Tafur
Código ORCID N.º 0000-0003-0366-4438

Identificador de la entrega: trnoid::3117:534691533

26	Trabajos del estudiante	University of Sheffield on 2023-09-07	<1%
27	Internet	harvest.usask.ca	<1%
28	Internet	assets.researchsquare.com	<1%
29	Internet	revistas.untumbes.edu.pe	<1%
30	Internet	maldita.es	<1%
31	Internet	revistas.lamolina.edu.pe	<1%
32	Internet	repositorio.inaigem.gob.pe	<1%
33	Trabajos del estudiante	North West University on 2025-03-13	<1%
34	Internet	pubs.usgs.gov	<1%
35	Internet	repositorio.chapingo.edu.mx	<1%
36	Trabajos del estudiante	Newbury Park High School on 2008-12-21	<1%
37	Internet	repositorio.unach.edu.pe	<1%
38	Publicación	Mamani Arpasi, Yesica Magnolia. "Evaluación del área y CO2 en bofedales y su rel..."	<1%

Dr. Eber Gines Tafur
Código ORCID N.º 0000-0003-0366-4438

Dedicatoria

Con amor a los seres que más
admiro, mi padre Juan Alberto
Calle Torres y mi madre Ymelda
Tello Leiva.

Agradecimiento

A Dios, por ser quien guía y cuida mis pasos.

A mi asesor por guiarme en esta investigación, a los profesores de la escuela de ingeniería forestal por la pasión que tienen al enseñar, y a todos lo que en algún momento me dieron unas palabras sabias.

INDICE GENERAL

RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	18
1. INTRODUCCIÓN.....	18
CAPÍTULO II.....	20
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.2. Bases teórico-científicas	24
2.2.1. Percepción remota o teledetección.....	24
2.2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	25
2.2.3. Índice de diferencia de agua normalizada (NDWI).....	26
2.2.4. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI)	26
2.2.5. Servicio geológico de los Estados Unidos - USGS.....	27
2.2.6. Satélite Landsat 7 ETM+.....	27
2.2.7. Satélite Landsat 8 OLI/TIRS.....	28
2.2.8. Índice estandarizado de precipitación (SPI).....	28
CAPÍTULO III.....	29
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. Tipo de investigación.....	29
3.2. Población, muestra y muestreo.....	29
3.2.1. Población.....	29
3.2.2. Muestra.....	29
3.2.2.1. Imágenes Landsat.....	29
3.2.2.2. Data histórica de precipitación	29
3.2.3. Muestreo	30
3.2.3.1. Imágenes satelitales	30
3.2.3.2. Data histórica de precipitación	31
3.3. Métodos e instrumentos de recolección de información	32
3.3.1. Ubicación geodésica y geopolítica del área de estudio.....	32
3.4. Materiales y equipos.....	33
3.4.1. Materiales	33
3.4.2. Softwares y equipos	33
3.5. Descripción de la Metodología.....	33

3.5.1.	Cálculo del NDDI.....	33
3.5.1.1.	Descarga de imágenes satelitales.....	33
3.5.1.2.	Ajuste de las imágenes Landsat RED, NIR y GREEN	34
3.5.1.3.	Corrección de GAPS.....	34
3.5.1.4.	Cálculo de NDDI.....	35
3.5.2.	Cálculo del SPI3	39
3.5.2.1.	Descarga de data histórica	39
CAPÍTULO IV	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	41
4.1.	RESULTADOS	41
4.1.1.	Cálculo del NDDI dentro de la Cuenca Quebrada Seca, período (2000 – 2023).....	41
4.1.2.	Zonas con mayor influencia de sequía según NDDI en la cuenca quebrada seca.....	42
4.1.3.	Cálculo del SPI3 período 2000-2023, Cuenca Quebrada Seca.....	44
4.2.	DISCUSIÓN.....	46
CAPÍTULO V	48
5.	CONCLUSIONES.....	48
CAPÍTULO VI	50
6.	RECOMENDACIONES.....	50
CAPÍTULO VII	51
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de sequía - NDDI	27
Tabla 2: Clasificación de los valores de SPI	28
Tabla 3: Imágenes satelitales empleadas	30
Tabla 4: Data histórica de precipitación empleada	31
Tabla 5: Ubicación geodésica de la cuenca	32
Tabla 6: Ubicación geopolítica	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Extensión de la cuenca Quebrada Seca	32
Figura 2: Recorte de imágenes satelitales	34
Figura 3: Corrección de Gaps	35
Figura 4: Cálculo de NDVI	35
Figura 5: Cálculo de NDWI	36
Figura 6: Cálculo de NDDI	37
Figura 7: Clasificación de NDDI	38
Figura 8: Áreas por cada clasificación	39
Figura 9: Información pluviométrica Sauce Grande	40
Figura 10: Porcentaje de área según NDDI	41
Figura 11: Evolución de la sequía y zonas de influencia.....	43
Figura 12: Valores del SPI3, 2000-2023	44

RESUMEN

La presente investigación se realizó con la finalidad de evaluar la presencia y evolución de la sequía mediante los índices NDDI y SPI 3, en la Cuenca Quebrada Seca, ubicada en el distrito de Canoas de Punta Sal, provincia de Contralmirante Villar, región de Tumbes, período del 2000 al 2023. El Índice Normalizado de Diferencia de Sequia (NDDI), y el Índice Estandarizado de Precipitación 3 meses (SPI3), fueron calculados para cada año del período estudiado. El NDDI se calculó usando técnicas de teledetección, las bandas RED, NIR y GREEN de Landsat 7 y 8, se corrigieron y procesaron en el software ArcGis, 10.8. Los valores obtenidos se clasificaron en “sequía muy baja, baja, media, alta y muy alta”, permitiendo identificar el área que abarco cada clasificación dentro de la cuenca. Según los resultados obtenidos, el NDDI en la mayoría de los años del período evaluado, muestra tendencias mayormente positivas para la sequía. En los años 2019 y 2022, el área que abarco la clasificación de sequía “muy alta” y “alta”, supero el 80% del total de la cuenca, lo que permitió identificar la evolución de la sequía y las zonas más afectadas de la cuenca. Para el SPI3, se evidencio que los años 2018 y 2020, tuvieron condiciones de sequía moderada. Sin embargo, los años 2019 y 2022, se encontraron dentro de la categoría “condiciones normales”, lo que difiere con los valores del NDDI, diferencia que se atribuye a la distancia de la ubicación entre la estación meteorológica y el área de estudio.

Palabras clave: Sequía, precipitación, teledetección, NDDI, NDWI, NDVI, SPI.

ABSTRACT

This research aimed to assess the presence and evolution of drought using the NDDI and SPI 3 indices in the Quebrada Seca Basin, located in the Canoas de Punta Sal district, Contralmirante Villar province, Tumbes region, from 2000 to 2023. The Normalized Drought Difference Index (NDDI) and the Standardized 3-month Precipitation Index (SPI3) were calculated for each year of the study period. The NDDI was calculated using remote sensing techniques, the RED, NIR and GREEN bands of Landsat 7 and 8, and was corrected and processed in ArcGis 10.8 software. The obtained values were classified into "very low, low, medium, high and very high drought", allowing the identification of the area covered by each classification within the basin. According to the results obtained, the NDDI showed predominantly positive drought trends in most years of the evaluated period. In 2019 and 2022, the area covered by the "very high" and "high" drought classification exceeded 80% of the total basin, which made it possible to identify the evolution of the drought and the most affected areas of the basin. For the SPI3, it was evident that the years 2018 and 2020 had moderate drought conditions. However, the years 2019 and 2022 were within the "normal conditions" category, which differs from the NDDI values, a difference attributed to the distance of the location between the meteorological station and the study area.

Keywords: Drought, precipitation, remote sensing, NDDI, NDWI, NDVI, S

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno que se ha ido intensificando con el tiempo, tanto como en área de envergadura, como en incremento de frecuencia y tiempo de duración, a consecuencia de la variabilidad de la temporada de lluvias estos últimos años.

En la región de tumbes, la información que se puede encontrar en base a evaluación y análisis de comportamiento de la sequía, es escasa. Lo que dificulta la adopción de medidas de prevención y mitigación, por ello, en esta tesis se busca brindar un aporte informativo del comportamiento y evolución de la sequía en el área de la cuenca quebrada seca, en función al cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice de Sequia de diferencia normalizada (NDDI), para futuros proyectos de investigación, planes de protección, conservación, gestión y/o reforestación.

En la región de Tumbes, existen estudios e investigaciones relacionadas con los índices de sequía diferencia normalizada- NDDI, índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI, índice de agua de diferencia normalizada NDWI. Los cuales se han desarrollado en áreas como RNTumbes (Campaña & Tafur, 2021), Parque Nacional Cerros de Amotape (Campos & Guerrero, 2017), Área de Conservación Angostura Faical (Roque, 2022), sin embargo, estudios en función a los índices mencionados son escasos cuando se trata de aplicarlos en otras áreas o cuencas de la región.

Los sistemas entorno GIS son muy útiles y económicos en el seguimiento de la evolución de la sequía y cobertura vegetal (Campaña & Tafur, 2021), La cuenca Quebrada seca tiene una extensión de 486.85 km², que abarca los 3 distritos de la provincia de Contralmirante Villar (Zorritos, Canoas de Punta Sal y Casitas), con presencia de centros poblados y ecosistemas sensibles cuya vulnerabilidad frente a sequias podría generar impactos irreversibles, al no existir planes de conservación. Los principales

impactos de la sequía repercuten en la disminución de la flora y fauna, incremento de desertificación (Bonet et al., 2022), que influye a su vez, en la disminución de disponibilidad de agua superficial y subterránea. Por lo que, se vio necesario dar un enfoque a más sectores de la región a fin de contribuir en la identificación y monitoreo del comportamiento de las sequías ocurridas durante los años 2000 al 2023, mediante la combinación de índices de data in situ (SPI) y de percepción remota (NDDI).

La realización de esta tesis contribuirá con información que ayude a la mejor toma de decisión en la ejecución de planes preventivos o de mitigación a las posibles consecuencias generadas por este fenómeno, ya que es un fenómeno que puede llegar a presentarse con mayor frecuencia en el tiempo, asimismo, se busca contribuir con el vacío de información que presenta el área de estudio.

Por ende, con la presente tesis se analizó e identificó la sequía, su comportamiento y evolución dentro de la cuenca, mediante la recopilación información correspondiente a los años 2000 a 2023, como fueron imágenes satelitales conformadas con las bandas RED, NIR y GREEN y con información histórica de precipitación de la estación SAUCE GRANDRE, ubicada en el Coto de Caza El Angolo, información que permitió cumplir con los objetivos de esta tesis, lo cuales fueron:

- a. Evaluar la evolución de la sequía en la cuenca Quebrada Seca mediante NDDI y SPI, durante los años 2000 al 2023.
- b. Calcular el SPI para determinar la presencia de sequía en la cuenca quebrada seca en los años 2000 al 2023.
- c. Calcular el NDDI para determinar la evolución de la sequía en la cuenca quebrada Seca en los 2000 al 2023.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Según la OMM (2023), uno de los factores que producen condiciones climatológicas extremas es el cambio climático, y una de estas condiciones incluyen a las sequías, las cuales están aumentando en frecuencia y en gravedad; las sequías son un período largo con ausencia de lluvias que pueden tener un impacto devastador en el equilibrio de los ecosistemas, la sociedad, la seguridad alimentaria, la generación de energía, salud, migración y otros. Sin embargo, también resalta que su aparición lenta, es adecuada para el monitoreo, ya que proporciona tiempo suficiente para observar y rastrear los cambios en los factores como precipitación, temperatura, estado de las aguas de un área determinada y tomar acciones antes de llegar a un punto crítico. El estudio de este fenómeno en la actualidad, comprende del cálculo de índices que se basan en mediciones in situ de estaciones meteorológicas o en información obtenida mediante sistemas de percepción remota (Salas et al., 2023).

En el año 2022 la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2023), identifico que más de la mitad de las cuencas hidrográficas del mundo, registraron un descenso en su caudal fluvial o se encontraban más secas de lo normal que años anteriores. (Berman et al., 2017), menciona que la sequía seguirá en aumento conforme el cambio climático, creciendo tanto en extensión geográfica, como durabilidad y frecuencia, cuyos impactos también son un riesgo en la salud de las personas. sin embargo, (Naumann et al., 2021), menciona que no se puede determinar la medida del riesgo ni el nivel de daño que la sequía representa a exactitud, pudiendo implicar desde pérdidas económicas a rompimiento de equilibrio en regiones

Identificar el inicio de una sequía o monitorear su comportamiento (gravedad, duración), en un espacio determinado, se está convirtiendo en una herramienta importante para la planificación de acciones de contingencia y control de los daños ante una crisis hídrica por sequía. Esta es una amenaza natural creciente en todo el mundo, ya que influye directamente en todas las fases del ciclo

hidrológico, convirtiéndose en una necesidad monitorear su comportamiento para evitar catástrofes en el futuro (Gallardo Cordova & Silva Castro, 2024), el crecimiento poblacional, la mayor demanda de agua y la degradación ambiental son factores que podrían agravar la situación (Masih et al., 2014; Prokurat, 2015).

En el mundo se han desarrollado diferentes estudios de sequía en base a dos tipos de índices, los basados en información recolectada in situ y los basados en información recolectada mediante percepción remota, así mismo, también se han observado investigaciones que evalúan la correlación de ambos tipos de índices, lo que permite una mejor comparación e interpretación de resultados.

Prokurat (2015), menciona que la sequía y escasez de agua, son una amenaza para los países asiáticos, donde el acceso al agua seguirá siendo un problema creciente, intensificado por el crecimiento demográfico. Otro estudio realizado en el continente, en base al análisis de sequía meteorológica, se llevó a cabo mediante el cálculo del índice de precipitación estandarizado SPI y el índice de evapotranspiración de precipitación SPEI, con períodos de toma de datos de 3 meses, para un período de 30 años, que va de los años de 1971 a 2000, donde se logró determinar que, a lo largo de ese período, Ankara la capital de Turquía, había sufrido seis eventos de sequías severas y dos extremas, asimismo observo que el índice destacado por la organización meteorológica mundial SPI, y el novedoso SPEI, clasificaron la sequía en umbrales de valores idénticos (Danandeh et al., 2020).

En Sri Lanka, una isla perteneciente a Asia del sur, se realizó una evaluación del estado de la sequía, a escala trimestral, semestral y anual, donde se tomaron datos de 54 estaciones meteorológicas desde los años de 1975 al 2017, en base al índice de precipitación estandarizado SPI, lográndose identificar 8 años, que presentaron porcentajes de sequía de valores entre el 52 y 31% a lo largo del año (Abeysingha & Rajapaksha, 2020)

Masih et al. (2014), realizó un análisis a nivel del continente africano, donde indica que las sequías se han vuelto más frecuentes y extremas a lo largo de todo el continente, especialmente en la parte norte y Sahel.

Toreti et al. (2024), determino mediante el Indicador Combinado de Sequia CDI y Observatorio Mundial de Sequía EDO, que las condiciones cálidas y secas de

la primavera verano del 2024, han vuelto a afectar muchas partes de Europa que no se habían recuperado de las sequías de años anteriores (2022-2023), sobre todo al Este y Sur del territorio. El observatorio Europeo de la Sequía (EDO), reveló que un 47% de la extensión del continente se encontraría en situación de riesgo (Clima, 2022).

En México, ante la creciente disminución de estaciones meteorológicas, Salas et al. (2023), realizó una investigación enfocada en técnicas de percepción remota, como solución a la falta de información in situ. La investigación se basa en el uso de imágenes multiespectrales Landsat para la cuantificación del índice de diferencia normalizado de sequía (NDDI), a fin de analizar y determinar la eficacia del índice NDDI, comparándolo con los datos del Monitor de Sequía Mexicano (MDM), para el monitoreo del fenómeno en los municipios centrales del golfo de México, logrando determinar que los meses con valores más altos de NDDI, son de Julio a Octubre, además de que los resultados del período evaluado de NDDI coinciden en un 46% con los datos del MDM, concluyendo que el NDDI es un índice que permite determinar el comportamiento de la sequía en zonas con precipitación reducida.

Campos (2014), comparo métodos estadísticos (DPP, SPI, RDT_{ST}), para monitorear el comportamiento o detectar el inicio de una sequía, donde determino que, el índice estandarizado de precipitación (SPI), fue uno los dos métodos con mejores resultados, ya que detecta la acritud de la lluvia tanto anual como en intervalos mensuales.

Los sistemas entorno GIS son muy útiles y económicos en el seguimiento de la evolución de la sequía y cobertura vegetal (Campaña & Tafur, 2021). Ante la creciente disminución de estaciones meteorológicas, Salas et al., (2023), muestra que el uso de herramientas de percepción remota, son una solución ante la falta de información in situ, resaltando al índice de diferencia normalizada de sequía NDDI, como un indicador poderoso para monitorear y cuantificar a las sequías.

Teniendo en cuenta estos estudios previos, que proporcionan un enfoque metodológico en el análisis, cálculo e interpretación de los resultados de los tipos de índices usados para la clasificación de sequía (in situ y de percepción remota),

se puede afirmar que la utilidad y precisión de estos índices incrementa cuando se realiza una investigación de correlación entre ambos tipos de índices.

2.2. Bases teórico-científicas

2.2.1. Percepción remota o teledetección

La percepción remota, también conocida como teledetección, es una técnica que permite recopilar información sobre la superficie terrestre utilizando sensores ubicados en satélites, aviones o drones para captar la energía que refleja el planeta, como la luz visible o el infrarrojo, que al ser procesada e interpretada dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite identificar y clasificar diferentes elementos en la superficie terrestre, desde la vegetación hasta las construcciones humanas. Esta tecnología nos proporciona imágenes y datos actualizados que son fundamentales para diversas áreas como la geografía, la agricultura, el medio ambiente y la gestión de desastres. Esta también es una técnica que ha demostrado ser valiosa, debido a su rentabilidad y eficacia (Andreucci & Argüero, 2022).

La teledetección se puede aplicar en diversos ámbitos, así como, evolución/degradación de la vegetación, (Moravec et al., 2021), degradación del suelo (Andreucci & Argüero, 2022), monitoreo de volcanes, la emisividad/transmisividad de calor por radiación y monitorio la temperatura de la superficie terrestre (Pocasangre et al., 2021), disponibilidad del recurso hídrico y predicción de sequías (Campaña & Tafur, 2021), etc.

Los datos geofísicos obtenidos mediante sensores remotos de monitoreo continuo y ubicuo constituyen una fuente de información fundamental para el desarrollo y la ejecución de investigaciones en diversas disciplinas científicas. Su importancia se ha incrementado en el contexto actual, marcado por la creciente variabilidad de los factores ambientales y sus implicancias.

El procesamiento de los datos espaciales recopilados por los sensores remotos de monitoreo continuo y ubicuo, o geoprocusamiento, se apoya principalmente en sistemas SIG (sistemas de información geográfica). Verma (2024) Considera que los SIG, son interdisciplinarios ya que su aplicación abarca más allá de la geografía, implican el estudio de un conjunto complejo de problemas en una variedad de disciplinas, cuya información puede ser primaria (obtenida por mediciones directas) o secundaria (sensores, cámaras). Siendo útiles para organizar, analizar, visualizar y compartir datos e información de diferentes

períodos históricos y en varias escalas de análisis. ESRI, empresa que desarrolla ArcGIS, es una de las más populares y desarrolladas en la creación de modelos y estructuración de base de datos geoespaciales porque no presenta tantas restricciones para la organización y almacenamiento de datos, gracias a su espacio de almacenamiento, lo que permite gestionar, automatizar grandes cantidades de datos y documentar metadatos relevantes, permitiendo a su vez, que los datos seas fáciles de catalogar, consultar e identificar a diferencia de otros sistemas. Los metadatos en datos espaciales ayudan a decidir si una base de datos espacial es apropiada para un fin específico y en datos de atributos, garantizan la identificación de los datos con su fuente dentro de una base de datos.

2.2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Liu et al. (2023), menciona que el índice de vegetación de diferencia normalizada - NDVI, se utiliza para representar la actividad de la vegetación, la productividad terrestre, y la resiliencia y recuperación de la vegetación ante eventos de estrés hídrico. La cobertura vegetal es un gran indicador del estado de la superficie terrestre, al estar dominada por el ciclo tierra-atmosfera, además resalta que la frecuencia e intensidad de los extremos hidrometeorológicos, donde se evidencia el déficit de precipitaciones y el incremento de la temperatura conllevan a que más áreas con vegetación estén bajo estrés hídrico.

El NDVI, es uno de los índices que más se utilizan para el monitoreo de la evolución y la densidad de la vegetación a gran escala (Ashok et al., 2021), se calcula a través de la relación entre la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano NIR y roja RED; y la suma de ellas (Kshetri, 2018).

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

2.2.3. Índice de diferencia de agua normalizada (NDWI)

El NDWI, se ha implementado para estudios de detección y control de sequía, ya que es un índice enfocado en el contenido de humedad de la vegetación y en la reflexión de agua en el suelo, lo que permite determinar el grado de humedad o sequedad, el valor del NDWI varía entre -1 y +1, dependiendo del resultado un valor más alto significa un alto contenido de agua en la planta y valores bajos indican un contenido bajo, por lo tanto, el NDWI disminuye durante los períodos de estrés hídrico (Shashikant et al., 2021). Se calcula a través de la relación entre la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano NIR y verde GREEN; y la suma de ellas (Kshetri, 2018).

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

2.2.4. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI)

Es un índice que combina los valores de los índices de NDVI y NDWI en base a imágenes satelitales (Herawati et al., 2024), el NDVI y NDWI, son ampliamente utilizados como indicadores de estrés hídrico tanto para la vegetación y la sequía (Shashikant et al., 2021). El NDDI es un indicador más sensible para el monitoreo y determinación de la intensidad de una sequía (Campaña, 2023), lo que lo transforma en una herramienta de alerta temprana ante la aparición de desastres como las sequias. El cálculo del índice estandarizado de sequía se obtiene aplicando la fórmula:

$$NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)} \quad \dots (3)$$

A diferencia del NDVI y NDWI, que un valor cercano a lo positivo significa mayor densidad de vegetación y humedad, un mayor valor de NDDI, significan condiciones más secas y una menor salud vegetal (Herawati et al., 2024).

Tabla 1: Clasificación de sequía - NDDI

Valor	Clasificación de sequía
< -2	Muy baja
-2 – 0.7	Baja
0.7 – 1.25	Media
1.25 - 3	Alta
> 3	Muy alta

(Herawati et al., 2024).

2.2.5. Servicio geológico de los Estados Unidos - USGS

Terando et al. (2020), menciona que una de las principales funciones del USGS, es proporcionar información científica y objetiva sobre los efectos del cambio climático, empleando modelos climáticos avanzados que permiten hacer proyecciones sobre los desafíos globales que se puedan presentar, a nivel regional o local, así mismo, a corto, mediano o largo plazo.

2.2.6. Satélite Landsat 7 ETM+

Lanzado a orbita el 15 de abril de 1999, implementado con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), sensor que se conforma por una banda pancromática de alta resolución (15 m) y un canal infrarrojo térmico de resolución espacial, versión mejorada de los instrumentos Thematic Mapper presentes en lo satélites Landsat 4 y 5. La línea de escaneo – SCL, del Landsat 7 falló, lo que dio como resultado, pérdida de datos, sin embargo, el equipo encargado de la validación de la USGS/NASA, calificó a los datos recopilados por el sensor del satélite Landsat 7, como confiables para las evaluaciones pertinentes (Ashok et al., 2021; Landsat-Missions).








2.2.7. Satélite Landsat 8 OLI/TIRS

Creado en conjunto por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), fue lanzado en febrero 11 del 2013, cuenta con dos sensores que proporcionan una resolución espacial de 30 metros para las bandas visible, NIR, SWIR. OLI, es un sensor conformado por un telescopio de 4 espejos para la captura de imágenes y una cuantificación de 12 bits, lo que significa una mayor sensibilidad a variaciones pequeñas en la reflectancia de la superficie terrestre. Los datos tomados por el Thermal Infrared Sensor (TIRS), complementan la información registrada por OLI, lo que da como resultado un producto corregido radiométricamente, geoméricamente y según el terreno (Neigh, s.f.).

2.2.8. Índice estandarizado de precipitación (SPI)

El índice estandarizado de precipitación se usa ampliamente en la mayoría de estudios para monitorear sequias meteorológicas en diferentes escalas de tiempo 1, 3, 6, 12 y 24 meses (Salimi et al., 2021). A pesar de que el SPI no considera variables como temperatura, evapotranspiración y humedad de suelo, varios estudios demuestran que los valores de la precipitación, son los principales para determinar el inicio, duración, intensidad y final de una sequía, teniendo resultados altamente relacionados con índices que si consideran otras variables, tales como el Índice de Severidad de Sequia de Palmer – PDSI (Vicente et al., 2010). Esto hace al SPI un índice simple pero muy confiable para el monitoreo y análisis de las sequias.

Tabla 2: Clasificación de los valores de SPI

SPI	Categoría de la Sequia	
$SPI > 2$	Extremadamente húmedas	
$1.5 < SPI \leq 2.0$	Muy húmedo	
$1.0 < SPI \leq 1.5$	Moderadamente húmedo	
$-1.0 \leq SPI \leq 1.0$	Condiciones normales	
$-1.5 \leq SPI < -1.0$	Moderadamente seco	
$-2.0 \leq SPI < -1.5$	Muy seco	
$SPI < -2.0$	Sequía extrema	

(Mundial, 2012)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de investigación.

El trabajo realizado es, según el fin que persigue, aplicada; según la técnica de contrastación, descriptivo y correlacional, cuyos resultados permitieron el comportamiento y evolución de la sequía durante el período del 2000 al 2023, en la zona noroeste del Perú, específicamente en el área de la Cuenca denominada Quebrada Seca, pudiendo ser información de provecho para la implementación de planes de prevención y reducción de daños, en presencia de sequía, así como para la optimización del manejo recurso hídrico, menguando el impacto de la escasez a sectores que dependen de este recurso dentro de la Cuenca.

3.2. Población, muestra y muestreo.

3.2.1. Población.

Se conforma por el área (486.85 km²), que abarca la extensión de la cuenca Quebrada Seca, ubicada en el distrito de Canoas de Punta Sal, de la provincia de Contralmirante Villar, región de Tumbes.

3.2.2. Muestra.

3.2.2.1. Imágenes Landsat

Comprende las imágenes de los satélites Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS, pertenecientes al área de la cuenca de estudio, obtenidas de la plataforma web Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS.

3.2.2.2. Data histórica de precipitación

Comprende la información pluviométrica mensual, registrada a lo largo de los años, por la estación meteorológica Sauce Grande, ubicada en las coordenadas Este 528 921, Norte 9 517 535, a 33 Km del Centroides de la Cuenca de estudio, la cual es administrada y operada por la administración del Coto de Caza el Angolo.

3.2.3. Muestreo

3.2.3.1. Imágenes satelitales

Se seleccionó a las imágenes satelitales de las bandas RED, NIR y GREEN, que comprendieron principalmente a los meses posteriores a las precipitaciones, para una mejor evaluación de la cobertura vegetal, durante el período de años 2000 – 2023, que se encontraron libres de nubosidad y en su mayoría libres de defectos de captura.

Tabla 3: Imágenes satelitales empleadas

AÑO	FECHA	ID	BANDAS
2000	18/07/2000	LE07_L1TP_011063_20000718_20200918_02_T1	B2,B3,B4
2001	31/03/2021	LE07_L1TP_011063_20010331_20200917_02_T1	B2,B3,B4
2002	8/07/2022	LE07_L1TP_011063_20020708_20200916_02_T1	B2,B3,B4
2003	6/04/2003	LE07_L1TP_011063_20030406_20200916_02_T1	B2,B3,B4
2004	14/08/2004	LE07_L1TP_011063_20040814_20200915_02_T1	B2,B3,B4
2005	29/05/2005	LE07_L1TP_011063_20050529_20200914_02_T1	B2,B3,B4
2006	3/07/2006	LE07_L1TP_011063_20060703_20200914_02_T1	B2,B3,B4
2007	6/07/2007	LE07_L1TP_011063_20070706_20200913_02_T1	B2,B3,B4
2008	8/07/2008	LE07_L1TP_011063_20080708_20200912_02_T1	B2,B3,B4
2009	8/05/2009	LE07_L1TP_011063_20090508_20200912_02_T1	B2,B3,B4
2010	28/06/2010	LE07_L1TP_011063_20100628_20200911_02_T1	B2,B3,B4
2011	11/03/2011	LE07_L1TP_011063_20110311_20200910_02_T1	B2,B3,B4
2012	19/07/2012	LE07_L1TP_011063_20120719_20200908_02_T1	B2,B3,B4
2013	3/05/2013	LE07_L1TP_011063_20130503_20200907_02_T1	B2,B3,B4
2014	9/07/2014	LE07_L1TP_011063_20140709_20200906_02_T1	B2,B3,B4
2015	13/08/2015	LE07_L1TP_011063_20150813_20200903_02_T1	B2,B3,B4
2016	11/05/2016	LE07_L1TP_011063_20160511_20200902_02_T1	B2,B3,B4
2017	10/08/2017	LC08_L1TP_011063_20170810_20200903_02_T1	B3,B4,B5
2018	21/08/2018	LE07_L1TP_011063_20180821_20200829_02_T1	B2,B3,B4
2019	10/04/2019	LC08_L1TP_011063_20190410_20200828_02_T1	B3,B4,B5
2020	07/06/2020	LE07_L1TP_011063_20200607_20200823_02_T1	B2,B3,B4
2021	10/06/2021	LE07_L1TP_011063_20210610_20210706_02_T1	B2,B3,B4
2022	18/07/2022	LE07_L1TP_011063_20220718_20220825_02_T1	B2,B3,B4
2023	11/07/2023	LE07_L1TP_011063_20230711_20230806_02_T1	B2,B3,B4

3.2.3.2. Data histórica de precipitación

Se consideró la información pluviométrica correspondiente a los 3 meses de mayor precipitación registrada por la estación meteorológica Sauce Grande. En el ámbito de zonas con lluvia estacional los periodos de acumulación de 3 meses son útiles para caracterizar la sequías, el SENAMHI monitoreó la sequía en base al SPI de tres meses, en departamentos como Tumbes, Piura, Cajamarca y otros, usando los meses de enero, febrero y marzo, ya que estos son los meses con mayor tasa de precipitación a lo largo del año. (Endara Huanca et al., 2019).

Tabla 4: Data histórica de precipitación empleada

Valores Precipitación - Estación Meteorológica Sauce Grande (mm/m²)			
Años	Enero	Febrero	Marzo
2000	19.40	59.87	58.03
2001	100.52	128.99	581.63
2002	0.23	111.73	434.52
2003	17.77	44.43	7.97
2004	4.97	52.99	33.93
2005	0.00	26.90	50.23
2006	59.03	186.13	172.37
2007	28.80	2.90	56.57
2008	88.07	281.25	257.53
2009	99.63	173.17	162.53
2010	62.63	172.97	160.98
2011	0.00	47.83	73.80
2012	19.23	349.23	161.63
2013	9.50	9.73	140.50
2014	5.40	16.27	21.20
2015	44.80	199.57	47.67
2016	21.77	190.90	248.53
2017	107.03	337.47	699.67
2018	0.00	6.87	0.00
2019	7.70	325.23	52.03
2020	0.00	27.82	7.93
2021	8.93	7.27	364.80
2022	9.90	0.00	67.47
2023	0.00	126.83	303.90

3.3. Métodos e instrumentos de recolección de información

3.3.1. Ubicación geodésica y geopolítica del área de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en la Cuenca Quebrada Seca, ubicada en la provincia de Contralmirante Villar, región de Tumbes, que comprende una extensión de 486.85 km², como se detalla a continuación.

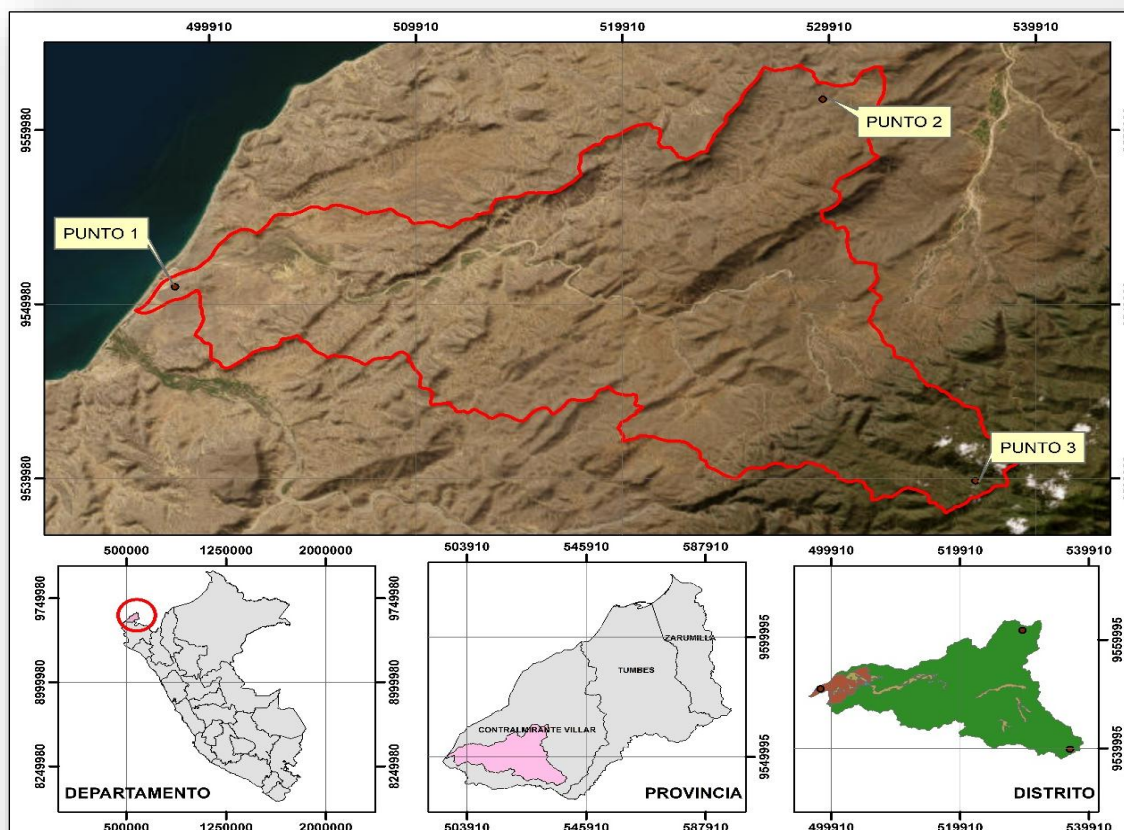


Figura 1: Extensión de la cuenca Quebrada Seca

Tabla 5: Ubicación geodésica de la cuenca

PUNTO	COORDENADAS (m)		DATUM	ZONA
	Norte	Este		
1	498258.36	9550976.44	WGS84	17 S
2	529609.53	9561751.79		
3	536998.35	9539841.89		
Centroide	520505.64	9550000		

Tabla 6: Ubicación geopolítica

Región	Tumbes
Provincia	Contralmirante villar
Distrito	Canoas de Punta Sal /Casitas/Zorritos
Centros Poblados	Quebrada Seca, Pajaritos, Cañaverl, Chicama, Carrizal, Canovitas y El Gigante.

3.4. Materiales y equipos.

3.4.1. Materiales

Se usaron Imágenes satelitales Landsat en formato TIF, de las bandas RED, NIR y GREEN, con resolución de 30 metros, de los satélites Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS, [USGS], correspondientes a los años 2000 al 2023. También se usó la data histórica de precipitación de la estación meteorológica Sauce Grande, [Coto de Caza El Angolo] y el Shapelife de la cuenca Quebrada Seca, obtenida de la plataforma GEOGSPERU.

3.4.2. Softwares y equipos

Se uso una laptop de procesador RYZEN 5, y los softwares de Google Earth pro para visualizar la ubicación del área de la cuenca, entorno GIS para obtener el resultado de NDDI, además del entorno estadístico, para calcular el SPI, y las herramientas de Microsoft Office: Word, Excel y PowerPoint, para redacción.

3.5. Descripción de la Metodología

3.5.1. Cálculo del NDDI.

3.5.1.1. Descarga de imágenes satelitales

Para realizar la descarga de las imágenes satelitales, primero fue necesario registrarse, y aceptar las condiciones de la plataforma Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (**USGS**), Earht Explorer. Donde se seleccionaron imágenes Landsat compuestas por las bandas RED, NIR y GREEN, de los satélites Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS (colección Landsat 2 Nivel-1), donde también se consideró también un porcentaje de nubes < al 20%, las cuales fueron necesarias para el cálculo de los índices que conforman el Índice de Sequia de Diferencia Normalizada (NDDI), como son el

Índice Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de diferencia Normalizada (NDWI).

3.5.1.2. Ajuste de las imágenes Landsat RED, NIR y GREEN

Se importaron las imágenes Landsat Bandas RED, NIR y GREEN, en formato TIF, descargadas de la plataforma Earth Explorer del USGS, al software GIS junto con el Shapelite del polígono de la cuenca, los cuales se proyectaron al sistema de coordenadas DATUM WGS 84, zona 17 S.

Posteriormente, se realizó un recorte de las imágenes satelitales, en base al área de estudio, mediante el uso de la herramienta *Spatial Analyst Tools*, donde se seleccionó la sub herramienta *Extract by Mask*, del software GIS.

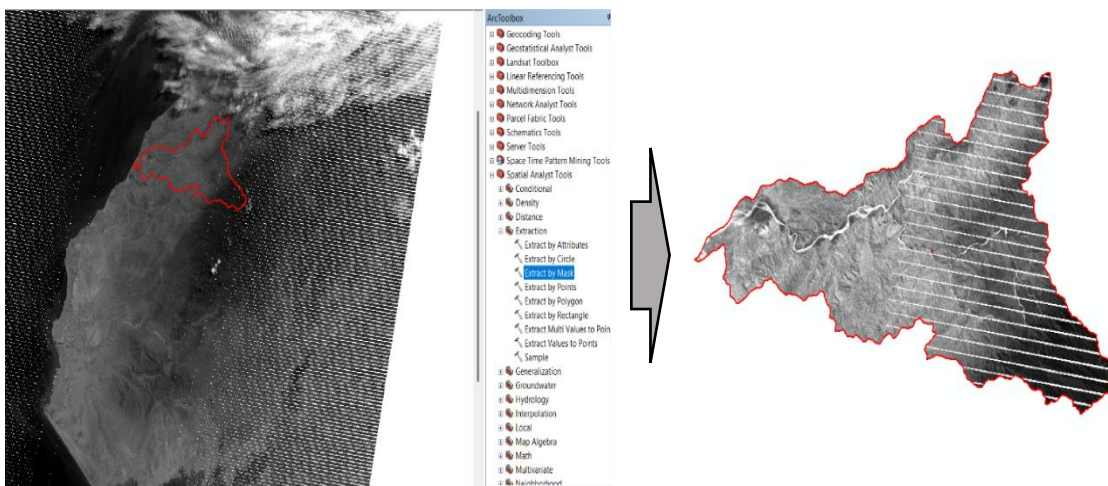


Figura 2: Recorte de imágenes satelitales

3.5.1.3. Corrección de GAPS

Algunas imágenes tomadas por el satélite Landsat 7 ETM+, presentaron unas franjas diagonales con ausencia de información denominadas GAPS. Las franjas GAPS se corrigieron en el software GIS, haciendo uso de la herramienta *Gapfill*, creada para la corrección de esas franjas GAPS.

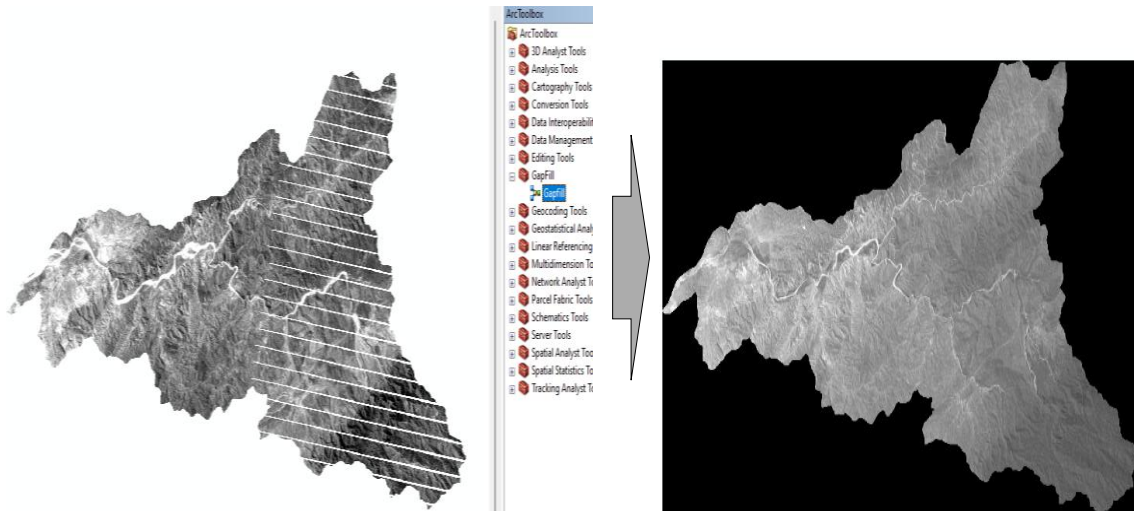


Figura 3: Corrección de Gaps

3.5.1.4. Cálculo de NDDI

a) Primero se realizó el cálculo de los índices de **NDVI** y **NDWI**, para lo que se efectuó la proyección de las imágenes Landsat bandas RED, NIR y GREEN, previamente corregidas, en el software Gis. Posteriormente se seleccionó la herramienta ubicada dentro de la opción Map Algebra, *Raster Calculator*, donde se formularon las ecuaciones (1 y 2), respectivamente.

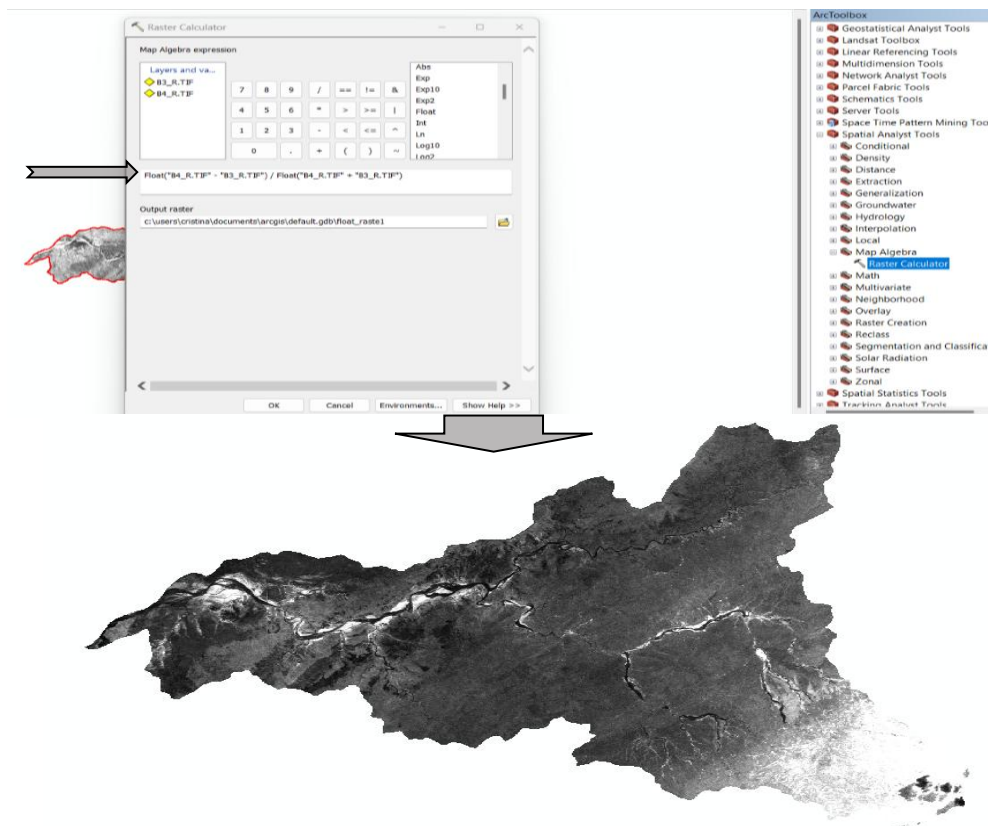


Figura 4: Cálculo de NDVI

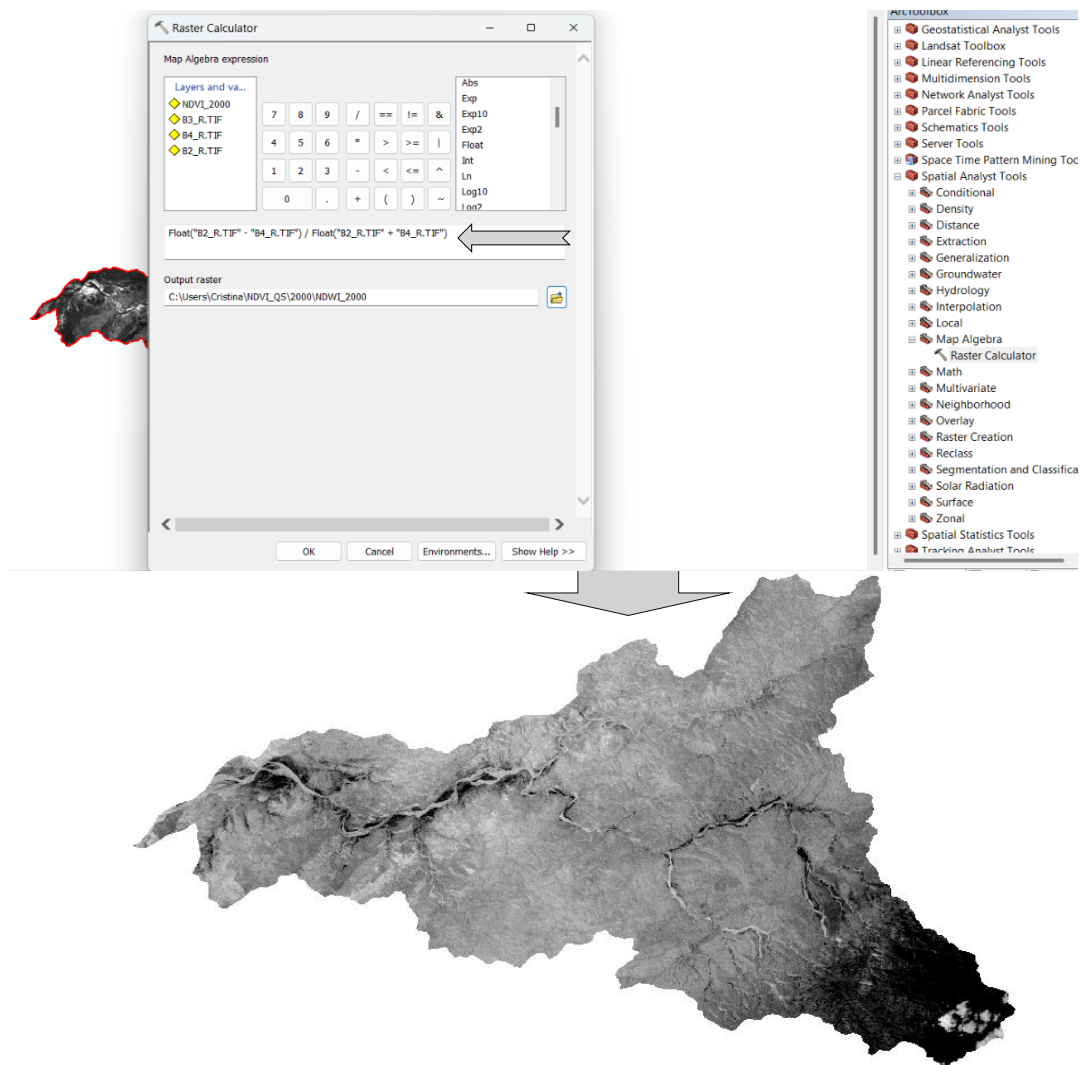


Figura 5: Cálculo de NDWI

b) Seguidamente, se procedió a realizar el cálculo del NDDI. Este índice tiene una mejor precisión para determinar condiciones de sequía, ya que reúne en su fórmula los valores de NDVI y NDWI, lo cual asegura un mejor análisis del desarrollo y comportamiento de la sequía al considerar la cobertura vegetal y distribución de la humedad. Al obtener los valores de los índices anteriores, se procedió a realizar el cálculo del NDDI, mediante el uso de la herramienta *Raster Calculator*, en el software GIS con la ecuación (3).

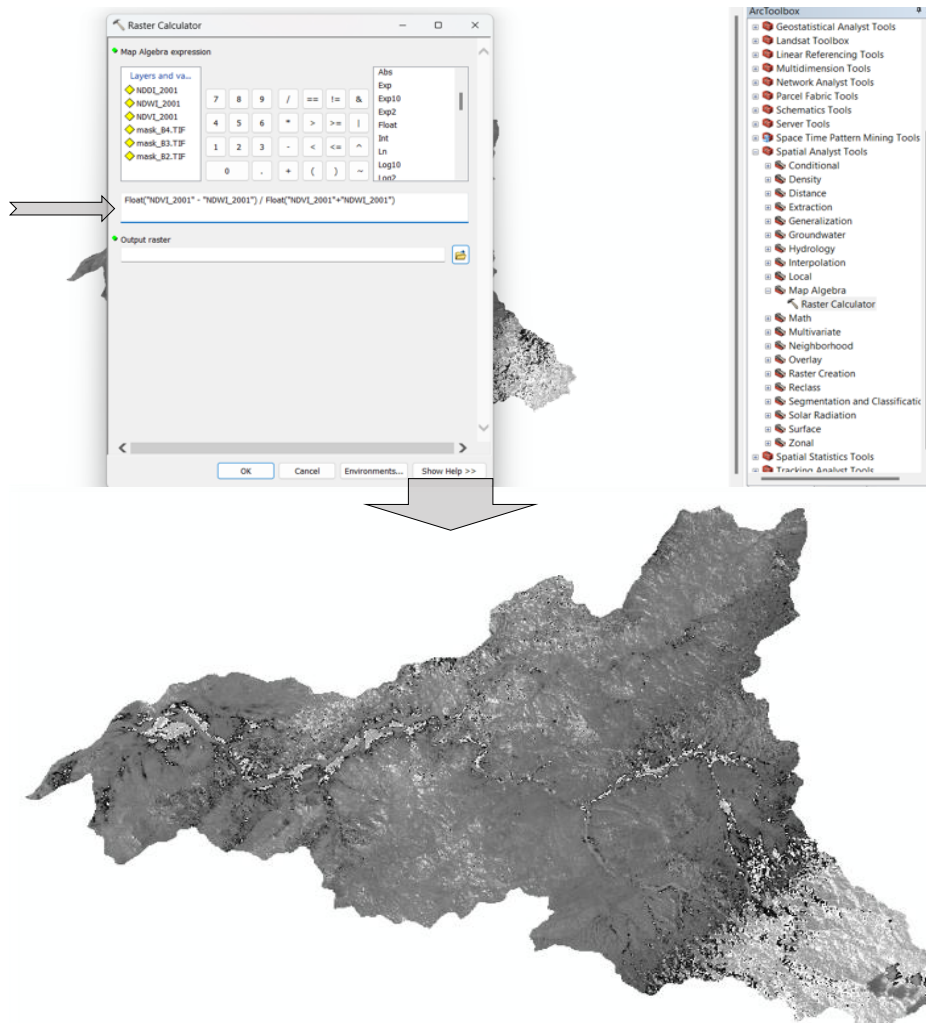


Figura 6: Cálculo de NDDI

- c) Finalmente se realizó el Cálculo de área abarcada por cada clasificación del NDDI. Donde primero se realizó la clasificación para cada uno de los valores obtenidos en el NDDI, se usó la herramienta "Reclassify" de "Spatial Analyst Tools", se colocó el ráster resultado del NDDI y se clasifico en base a los rangos que refieren al nivel de intensidad de la sequía.

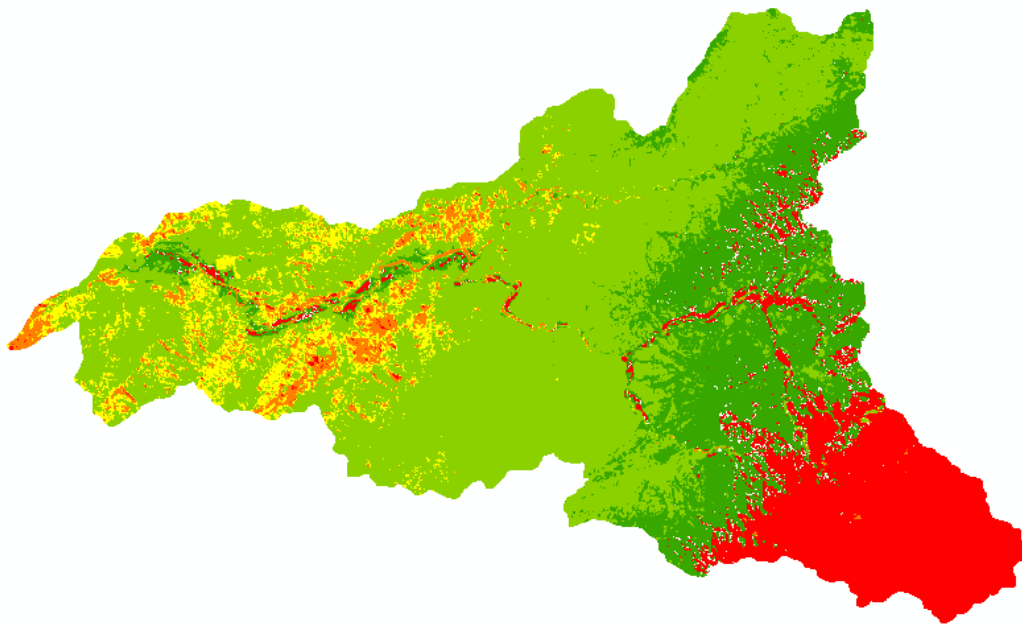
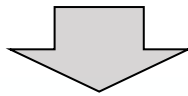
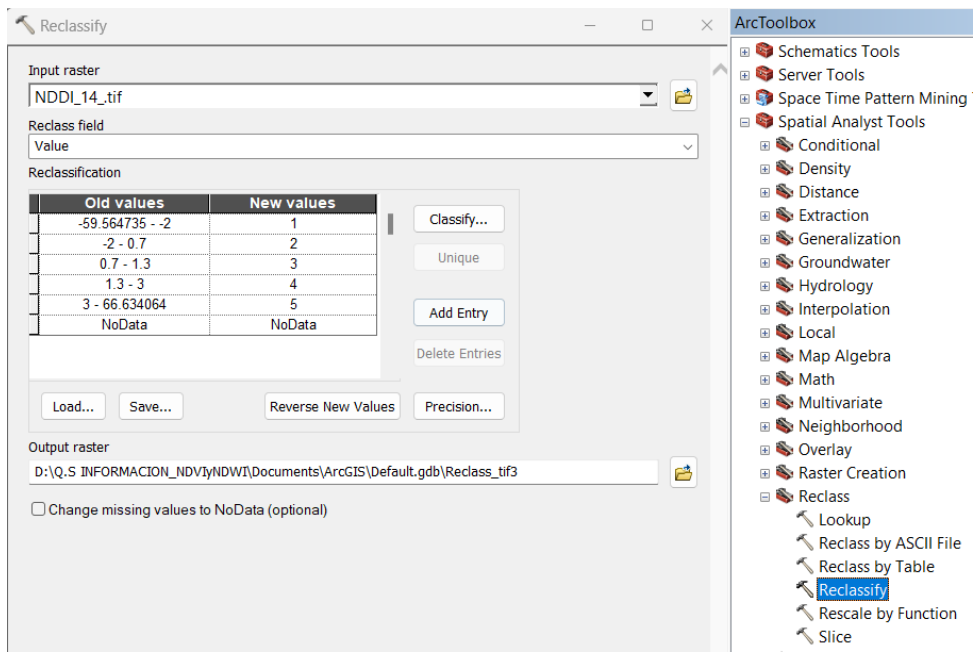


Figura 7: Clasificación de NDDI

Así mismo, el área abarcada por cada valor de clasificación, se obtuvo convirtiendo el ráster en polígono, con la herramienta “Raster to Polygon” de “Conversion Tools”, y haciendo el cálculo del área abarcada por cada categoría con “Geometric Calculator”.

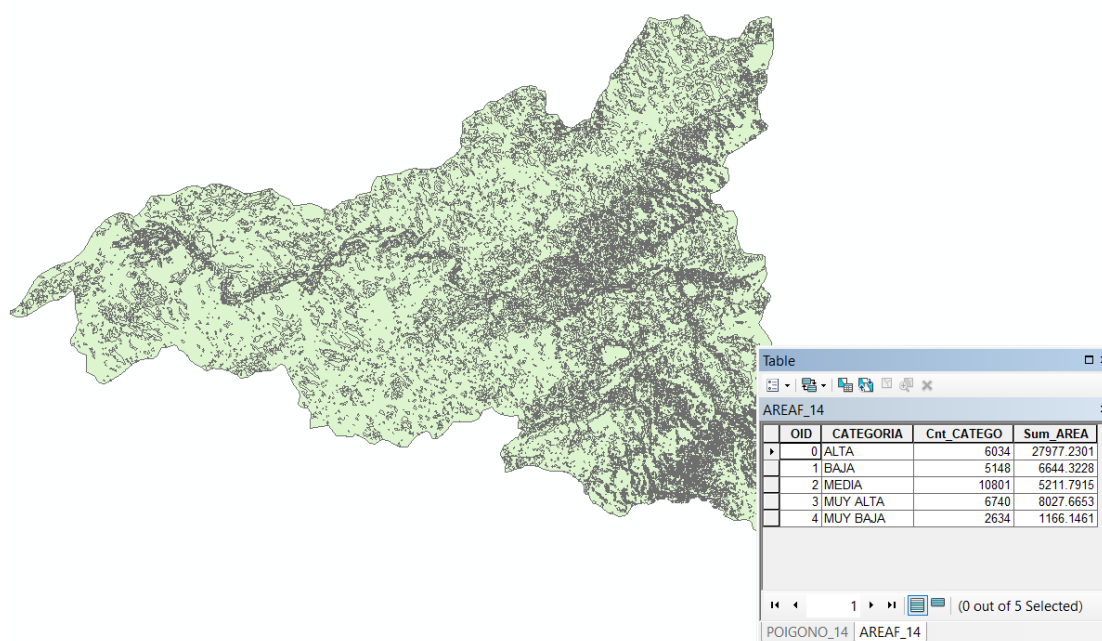


Figura 8: Áreas por cada clasificación

3.5.2. Cálculo del SPI3

3.5.2.1. Descarga de data histórica

Se utilizó la información de la estación meteorológica Sauce Grande, operada por la administración del Coto de Caza el Angolo. Se ubica a 33 Km de distancia del Centroides de la Cuenca de estudio, siendo la estación más cercana, La data pluviométrica usada pertenece a los tres meses que registraron mayor precipitación (enero, febrero y marzo), las cuales fueron procesadas en el programa Rstudio para la determinación del SPI3. Usar la precipitación de tres meses, dentro de la temporada de lluvias marcada, es útil para monitorear la precipitación y la sequía meteorológica, debido a que una ausencia de lluvias en temporada de húmeda indica sequía, y la ausencia de lluvias en temporada seca no.

RESUMEN DE LLUVIAS COTO DE CAZA EL ANGOLO (GRAFICO ADJUNTO)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
enero	19.40	100.52	0.23	17.77	4.97	0.00	59.03	28.80	88.07	99.63	62.63	0.00	19.23	9.50	5.40	44.80	21.77	107.03	0.00	7.70	0.00	8.93	9.90	0.00
febrero	59.87	128.99	111.73	44.43	52.99	26.90	186.13	2.90	281.25	173.17	172.97	47.83	349.23	9.73	16.27	199.57	190.90	337.47	6.87	325.23	27.82	7.27	0.00	126.83
marzo	58.03	581.63	434.52	7.97	33.93	50.23	172.37	56.57	257.53	162.53	160.98	73.80	161.63	140.50	21.20	47.67	248.53	699.67	0.00	52.03	7.93	364.80	67.47	303.90
abril	139.78	120.20	274.00	1.00	12.90	0.00	9.07	20.37	4.00	3.17	0.00	0.00	40.03	5.33	10.83	7.67	30.03	62.10	0.00	1.67	17.53	74.23	0.00	474.73
mayo	6.83	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	40.73	0.00	0.00	0.00	4.17	21.83	0.00	0.00	21.57	16.33	0.00	0.00	0.00	0.00	28.80
junio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
julio	0.00	0.00	0.00	0.00	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
octubre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
noviembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
diciembre	0.00	0.00	0.00	8.77	0.00	0.00	5.33	0.00	0.00	9.53	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	0.00	18.00	14.33	3.47	0.00	0.00	0.00
total	284	931	820	80	109	78	434	109	631	490	397	123	570	169	76	315	494	1228	41	401	57	455	77	934.3

RESUMEN DE LLUVIA COTO DE CAZA EL ANGOLO (mm anuales)

ANO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
LLUVIA	284	931	820	80	109	78	434	109	631	490	397	123	570	169	76	315	494	1228	41	401	57	455	77	934



Figura 9: Información pluviométrica Sauce Grande

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Cálculo del NDDI dentro de la Cuenca Quebrada Seca, período (2000 – 2023)

En la figura 10, se pueden observar los valores de la sequía según el NDDI, en el transcurso de los años del período evaluado.

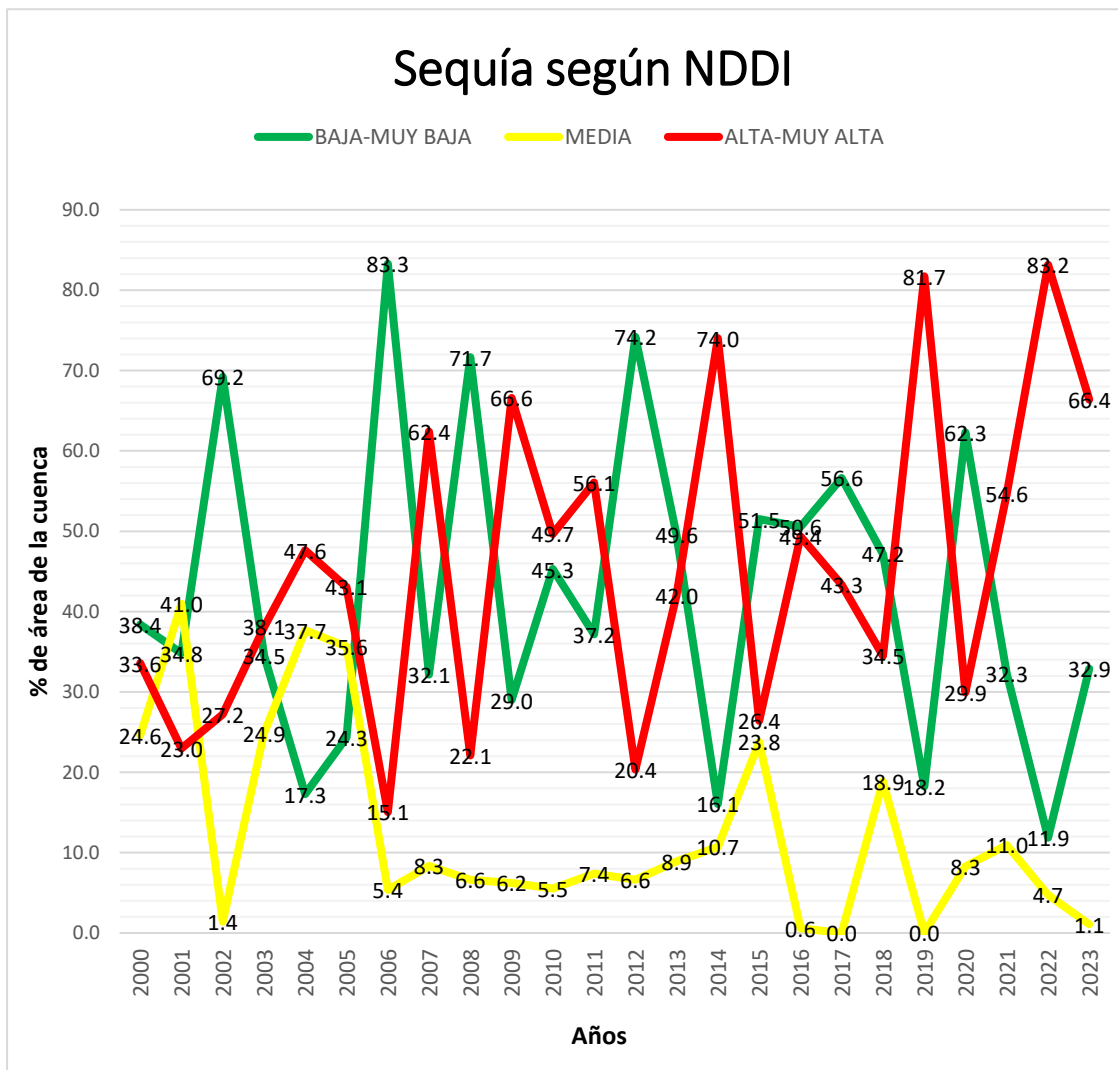


Figura 10: Porcentaje de área según NDDI

- i) Se evidenció que los años 2014, 2019 y 2022, fueron los años con mayores valores estrés hídrico. El NDDI con una clasificación de sequía “Alta y Muy Alta”, abarcaron aproximadamente 36004.90 ha, 39760.81 ha y 40459.82 ha, lo que represento el 74.0%, 81.7 % y el 83.2 % del área total de la cuenca respectivamente.
- ii) Por otro lado, los años 2006, 2008 y 2012, fueron los años que presentaron mayor cantidad de área con un NDDI con clasificación de sequía “Baja y Muy Baja”, abarcando, 40521.43 ha, 34863.33 ha y 36092.51 ha aproximadamente, lo que represento el 83.3%, 71.7% y 74.2% respectivamente.
- iii) Los valores de sequía media, se encontraron de manera habitual por debajo del 10% del área total de la cuenca, Durante 2016, 2017 y 2019, el área clasificada como sequía media fue inferior al 1% de la superficie total de la cuenca., que refiere a poco menos de 500 ha.
- iv) Haciendo uso de este índice estandarizado de sequía NDDI, se determinó la presencia de sequía dentro de la cuenca a lo largo de los años de análisis, lo cual fue un objetivo del presente trabajo, y se determinó la cantidad de área abarcada por esos valores.

4.1.2. Zonas con mayor influencia de sequía según NDDI en la cuenca quebrada seca.

Al clasificarse el NDDI, se pueden observar las zonas con mayor influencia de sequía para cada año del período evaluado. Las zonas naranjas y rojas de la cuenca, en la figura 11 y 12, representan una sequía alta y muy alta, la zona amarilla, representa una sequía media, y las zonas de color verde representan una sequía baja y muy baja.

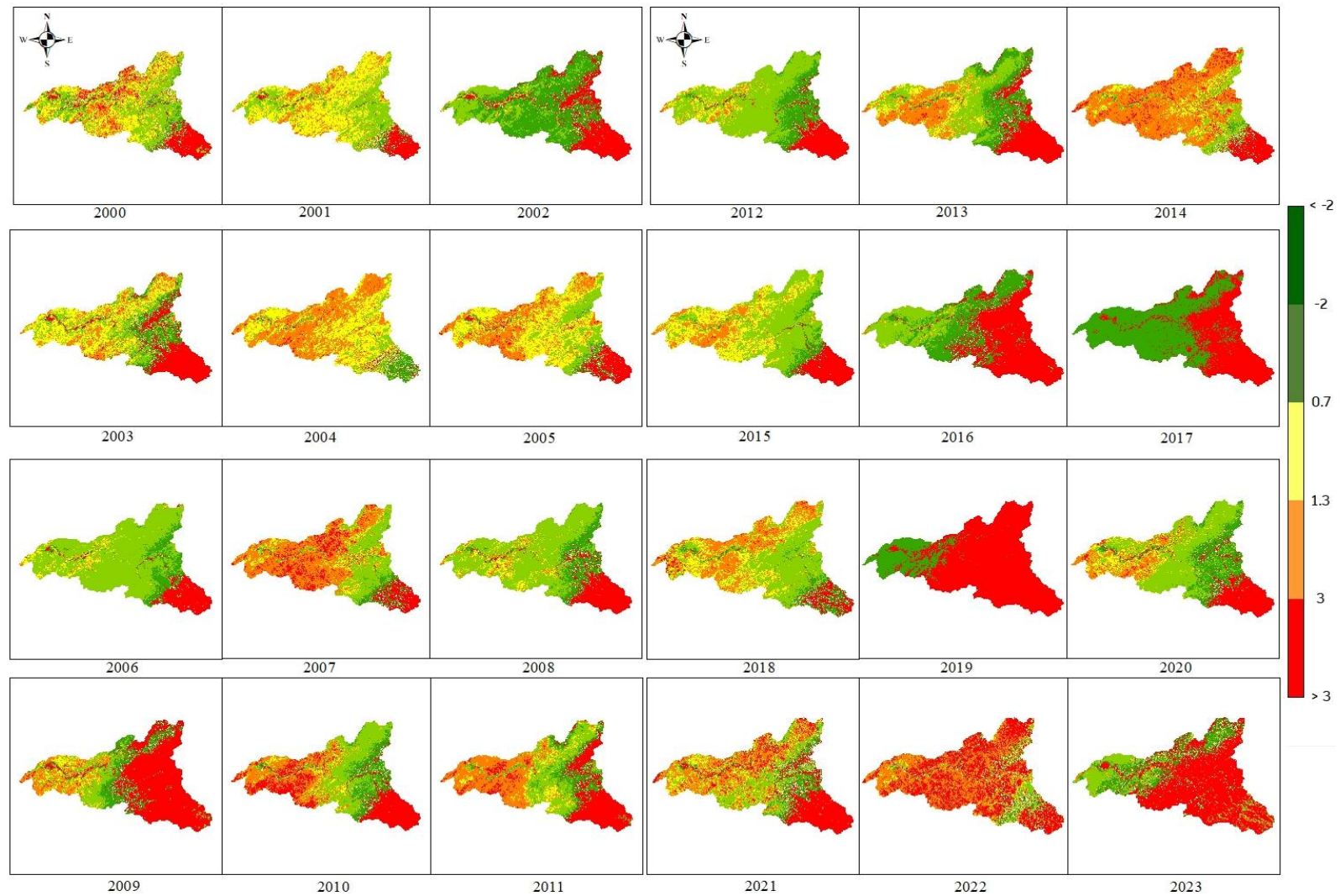


Figura 11: Evolución de la sequía y zonas de influencia

- i) Según la figura 11, las áreas de mayor influencia de sequía alta o muy alta, o donde se presenta en mayor medida el estrés hídrico, donde el NDDI, oscila entre los valores de 3 a mayores de 3, se ubican en la parte sur este de la cuenca.
- ii) Sin embargo, desde el 2018 se evidencia que el nivel de la sequía alta y muy alta, con un NDDI con valores desde 1.3 a mayores de 3, se ha extendido a casi toda el área de la cuenca. Estos resultados confirman la evolución de la sequía en la cuenca, lo cual fue un objetivo del presente trabajo y evidencian un aumento progresivo del estrés hídrico en las áreas más vulnerables

4.1.3. Cálculo del SPI3 período 2000-2023, Cuenca Quebrada Seca.

El cálculo del índice estandarizado de precipitación, se realizó en el programa Rstudio, se usó la data de enero a marzo, de la estación meteorológica Sauce Grande.

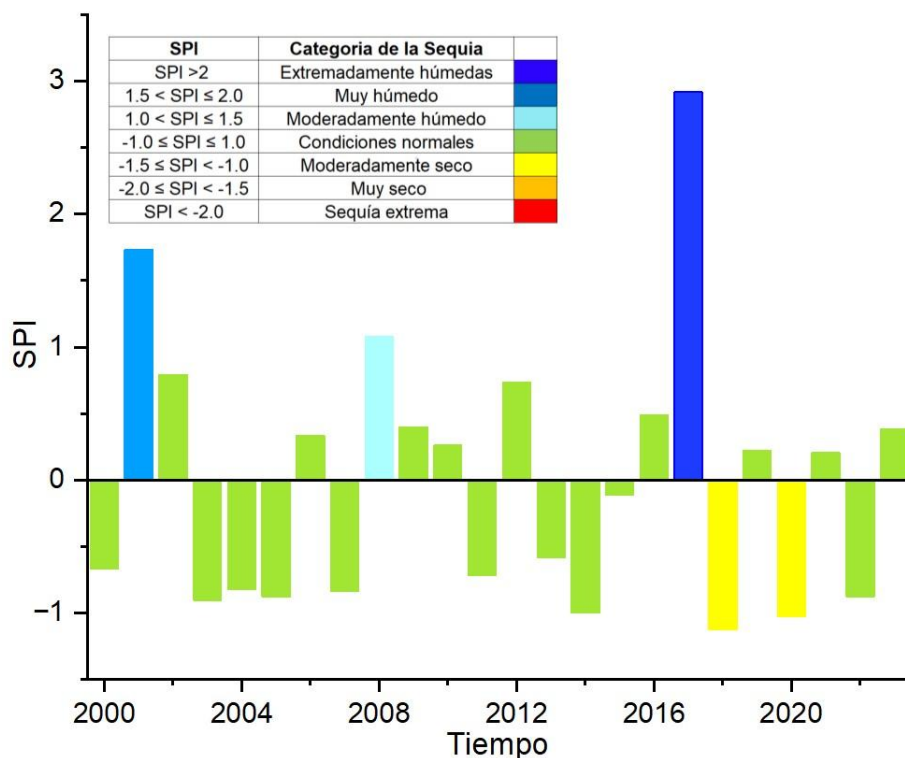


Figura 12: Valores del SPI3, 2000-2023

- i) Como se observa la figura 12, en el año 2017, fue un año extremadamente húmedo obteniendo un valor de SPI3 de 2.92
- ii) En el año 2001, se puede apreciar que fue un año significativamente más húmedo de lo normal, teniendo un valor de SPI3 1.71.
- iii) Por otro lado, los años 2018 y 2020, tuvieron condiciones de sequias moderada, con valores de SPI3 de -1.1 y -0.9 respectivamente.
- iv) Finalmente, la mayoría de años se encuentran dentro del rango de condiciones normales, porque sus valores de SPI3 se encontraron entre -1 y 1.

Según los valores del índice estandarizado de precipitación, solo hubo presencia de sequía moderada dos años del total de 23 años de estudio. Lo que indica que, si hubo presencia de sequía, lo cual fue el último objetivo de este trabajo, sin embargo, los valores fuera de los años 2018 y 2020, representan valores normales o húmedos. Lo cual evidencia una falta de correlación con los valores del NDDI.

4.2. DISCUSIÓN

En este estudio el objetivo principal fue estudiar la evolución de la sequía en los años del 2000 al 2023, y los objetivos específicos incluyeron el cálculo del NDDI y del SPI3 para determinar la presencia de la sequía en la cuenca quebrada seca. Para lo cual se planteó la hipótesis principal de que mediante el NDDI y el SPI se muestra que existe evolución de la sequía dentro Cuenca en el período del 2000 al 2023.

Los resultados de los índices calculados, revelaron la evolución y presencia de sequía en la cuenca durante el período de años estudiados. Específicamente, se encontró que, según el NDDI, los años con niveles más críticos en intensidad de sequía fueron 2014, 2019 y 2022, abarcando niveles de sequía Alta y Muy Alta (NDDI = 1.3 a >3) en más del 74% del área total de la cuenca; y según SPI3, los únicos años que presentaron sequia moderada fueron el 2018 y 2020, con valores de -1.1 y -0.9 respectivamente. Estos resultados apoyan directamente a la hipótesis principal de este trabajo, la cual es, que mediante el NDDI y el SPI se muestra que existe evolución de la sequía en la Cuenca Quebrada Seca en el período del 2000 al 2023. Indicando la presencia y cambio de intensidad e la sequía a través del tiempo.

Sin embargo, cabe mencionar que no existe correlación directa entre los resultados de los índices, debido a que los años críticos para el NDDI no son los mismos para el SPI, lo cual difiere con lo dicho por investigadores como (Campaña, 2023) y (Vicente et al., 2010), que mencionan correlación directa entre ambos índices, por lo que, en este trabajo esa falta de correlación entre los índices se atribuye a que el NDDI, fue calculado con imágenes específicas del área de estudio, y el SPI, fue calculado con valores de la estación meteorológica más cercana encontrada, la cual está ubicada a 33km del área de estudio y también se ubica dentro del departamento de Piura.

Por otro lado, los resultados de este trabajo son coherentes con estudios previos que han usado al NDDI y SPI para la identificación y evaluación de sequía, tales como los realizados por (Tavazohi & Nadoushan, 2018), en la cuenca de Zayandehroud en Irán, o el realizado por (Cheng et al., 2024) en el abanico aluvial del río Choushui, en Taiwan, resaltando que la teledetección o percepción

remota son tecnologías de alto nivel para la identificación y predicción de la sequía, siendo el NDDI, un índice nuevo y sensible, y el SPI un índice muy popular y confiable.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES.

- a) El estudio confirma científicamente la presencia y evolución de la sequía en la Cuenca Quebrada Seca durante el período 2000–2023. Mediante el análisis combinado de los índices NDDI y SPI3, se demostró que la cuenca ha experimentado múltiples episodios de sequía con intensidades variables, destacando años críticos como 2014, 2019 y 2022 con sequías de alta a muy alta intensidad, y otros como 2018 y 2020 con sequía moderada.

- b) El análisis del Índice de Diferencia de Sequía Normalizada (NDDI) reveló que la Cuenca Quebrada Seca experimentó períodos de sequía de alta intensidad y cobertura espacial significativa entre 2000 y 2023. Específicamente, los años **2014, 2019 y 2022** se destacaron por presentar los niveles más críticos, con más del 74% del área de la cuenca afectada por sequía Alta o Muy Alta (NDDI entre 1.3 y >3). Esto confirma que el NDDI es un indicador sensible para detectar la evolución y severidad de la sequía, al integrar la respuesta de la vegetación y las condiciones de humedad, lo que sugiere que los años mencionados fueron particularmente críticos en términos de estrés hídrico para los ecosistemas de la cuenca. Los años críticos identificados validan la hipótesis planteada sobre la evolución de la sequía en la cuenca, con picos de intensidad que requieren atención particular para la gestión de recursos naturales y agrícolas.

- c) En cuanto al Índice Estandarizado de Precipitación a 3 meses (SPI3), los resultados indicaron que la Cuenca Quebrada Seca experimentó sequía moderada en los años 2018 y 2020, con valores de -1.1 y -0.9 respectivamente. Aunque estos eventos no mostraron la misma extensión o intensidad que los detectados por el NDDI, confirman períodos de déficit de precipitación que contribuyeron a la sequía general. El SPI3, al enfocarse únicamente en la precipitación, complementa los hallazgos del NDDI y subraya la variabilidad de los

patrones de lluvia en la cuenca a lo largo del período de estudio. Estos resultados respaldan la hipótesis al mostrar que, incluso con un enfoque más limitado en la precipitación, la sequía ha sido una constante, manifestándose con diferentes grados de severidad y en distintos momentos, lo cual es crucial para la planificación de mitigación de impacto de desastres.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- i) Instalar y fortalecer la red de estaciones meteorológicas locales en las cuencas o distritos de la región de Tumbes, lo que permita lo que permitirá mejorar la calidad de los datos pluviométricos y su integración con índices satelitales como el NDDI.
- ii) Formular políticas públicas de gestión del recurso hídrico y adaptación al cambio climático, priorizando la conservación de ecosistemas frágiles y la planificación agrícola frente a sequías recurrentes.
- iii) Implementar sistemas de alerta temprana frente a la sequía, integrando teledetección, análisis estadístico y monitoreo in situ, para anticipar escenarios de riesgo hídrico y reducir impactos en los ecosistemas y comunidades
- iv) Promover estudios similares en otras cuencas de la región norte del Perú, generando una base de datos regional de sequías que sirva como soporte técnico para planes de contingencia y programas de reforestación y manejo sostenible del agua.

CAPÍTULO VII

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abeyasingha, N., & Rajapaksha, U. (2020). SPI-Based Spatiotemporal Drought over Sri Lanka. *Advances in meteorology*, 2020(1), 9753279.
- Andreucci, P., & Argüero, F. (2022). *Teledetección aplicada al agro* Universidad Nacional de La Plata].
- Ashok, A., Rani, H., & Jayakumar, K. (2021). Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society; Environment*, 23, 100547.
- Berman, J., Ebisu, K., Peng, R., Dominici, F., & Bell, M. (2017). Drought and the risk of hospital admissions and mortality in older adults in western USA from 2000 to 2013: a retrospective study. *The Lancet Planetary Health*, 1(1), e17-e25.
- Bonet, C., Guerrero, P., Pérez, L., La Rosa, Y., & Mola, B. (2022). Plan of Measures to Increase the Management of Water Use in Livestock Systems. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 31(1), 24-32.
- Campaña, J. (2023). Análisis multitemporal de la sequía y la deforestación y su influencia en la degradación de la Reserva Nacional de Tumbes-Perú.
- Campaña, J., & Tafur, E. (2021). Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986-2019. *Manglar*, 18(4), 389-395.
- Campos, A., & Guerrero, E. (2017). Evaluación de la evolución de la cobertura vegetal a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Cerros de Amotape y la Reserva Nacional de Tumbes en el periodo 2000–2015.
- Campos, D. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas. *Agrociencia*, 48(5), 463-476.
- Cheng, Y.-S., Lu, J.-R., & Yeh, H.-F. (2024). Multi-Index Drought Analysis in Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Environments*, 11(11), 233.
- Clima, M. (2022). *Así está siendo la sequía en Europa: afecta a 340 millones de personas y al 47% del territorio*. <https://maldita.es/clima/20220817/sequia-europa-afecta-340-millones-personas-mitad-territorio/>
- Danandeh, A., Sorman, A., Kahya, E., & Hesami, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254-268.
- Endara Huanca, S. M., Acuña, D., Vega-Jácome, F., Febre, C., Correa, K., & Avalos, G. (2019). Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981-2018).
- Gallardo Cordova, J., & Silva Castro, K. R. (2024). Frecuencia de sequías meteorológicas en la Provincia de Jaén entre 1993-2013, utilizando el índice de precipitación estandarizada.
- Herawati, A., Mujiyo, M., Nugroho, B., Istiqomah, N., Irmawati, V., Hasanah, K., Hardian, T., & Anggita, A. (2024). Drought potential index using Normalized Difference Drought Index (NDDI) method based on Geographical Information System (GIS) in Slogohimo, Wonogiri Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
- Kshetri, T. (2018). Ndvi, ndbi & ndwi calculation using landsat 7, 8. *GeoWorld*, 2, 32-34.
- Landsat-Missions. *Landsat 7 Extended Science Mission*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7-extended-science-mission>
- Liu, Q., Yao, F., Garcia, A., Zhang, J., Li, J., Ma, S., Li, S., & Peng, J. (2023). The response and sensitivity of global vegetation to water stress: A comparison of different satellite-based

- NDVI products. *International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation*, 120, 103341.
- Masih, I., Maskey, S., Mussá, F., & Trambauer, P. (2014). A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective. *Hydrology earth system sciences*, 18(9), 3635-3649.
- Moravec, D., Komárek, J., López, S., & Molina, I. (2021). Effect of atmospheric corrections on NDVI: Intercomparability of Landsat 8, Sentinel-2, and UAV sensors. *Remote Sensing*, 13(18), 3550.
- Mundial, O. M. (2012). *Guía del Usuario Sobre el Índice Normalizado De Precipitación* (Vol. OMM-1090). http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_es.html
- Naumann, G., Cammalleri, C., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2021). Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 11(6), 485-491.
- Neigh, C. (s.f.). *LANDSAT 8*. NASA Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
- OMM, O. M. M. (2023). *Estado de los recursos hídricos mundiales en 2022*.
- Pocasangre, C., Castillo, L., Martínez, C., García, A., Rivas, D., & Henríquez, R. (2021). Mapa de flujo de calor radiante de El Salvador utilizando teledetección satelital. *Revista Minerva: Revista Científica Multidisciplinaria de la Universidad de El Salvador*, 4(3), 34-52.
- Prokurat, S. (2015). Drought and water shortages in Asia as a threat and economic problem. *Journal of modern science*, 26(3), 235-250.
- Roque, R. (2022). Tendencia del NDVI en el Área de Conservación Regional Angostura Faical de Tumbes, Perú, 1999-2019. *Manglar*, 19(3), 233-237.
- Salas, F., Valdés, O., Palacios, O., Márquez, A., & Rodríguez, L. (2023). Methodological estimation to quantify drought intensity based on the NDDI index with Landsat 8 multispectral images in the central zone of the Gulf of Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1027483.
- Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11, 1-10.
- Shashikant, V., Mohamed, A., Wayayok, A., Kamal, M., Lee, Y., & Takeuchi, W. (2021). Utilizing TVDI and NDWI to classify severity of agricultural drought in Chuping, Malaysia. *Agronomy*, 11(6), 1243.
- Tavazohi, E., & Nadoushan, M. A. (2018). Assessment of drought in the Zayandehroud basin during 2000-2015 using NDDI and SPI indices. *Fresenius Environ*, 27(4), 2332-2340.
- Terando, A., Reidmiller, D., Hostetler, S. W., Littell, J. S., Beard Jr, T. D., Weiskopf, S. R., Belnap, J., & Plumlee, G. S. (2020). *Using information from global climate models to inform policymaking—The role of the US Geological Survey* (2331-1258).
- Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., , Acquafresca, L., Azas, K., Barbosa, P., de Jager, A., , Ficchi, A., Fioravanti, G., Grimaldi, S., Hrast , & Essenfelder, A., Magni, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Salamon, P., Santos Nunes, S., Volpi, D. (2024). Drought in Europe July 2024. *JCR Joint Research Centre*. <https://doi.org/10.2760/420832>
- Verma, R. (2024). Spatial Data Capture in GIS: A Review. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*.
- Vicente, S., Beguería, S., & López, J. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.