

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA
NORMALIZADA EN LA CUENCA DEL CANAL DEL DIQUE
RESPECTO A CONDICIONES DE VARIABILIDAD HIDROLÓGICA,
TOPOGRÁFICA Y DE USO DE SUELO.**

ING. LEYDIS LUCÍA VILLADIEGO ROJAS



**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS
BARRANQUILLA - COLOMBIA
2023**

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA
NORMALIZADA EN LA CUENCA DEL CANAL DEL DIQUE
RESPECTO A CONDICIONES DE VARIABILIDAD HIDROLÓGICA,
TOPOGRÁFICA Y DE USO DE SUELO.**

ING. LEYDIS LUCÍA VILLADIEGO ROJAS

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS
HÍDRICOS**

DIRECTOR: ING. HUMBERTO ÁVILA, PhD



**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA - COLOMBIA**

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

BARRANQUILLA, 2023

Por mí, por ti, por ustedes.

Para mí, para ti, para ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2 JUSTIFICACIÓN	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 ALCANCE	15
1.5 LIMITACIONES	15
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1 MARCO TEORICO DE REFERENCIA	16
2.1.1 Teledetección	16
2.1.2 Imágenes satelitales MODIS	17
2.1.3 Índice de vegetación de diferencia normalizada	19
2.1.4 Usos del Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI	21
2.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA	22
2.2.1 Cartografía	22
2.2.2 Hidrografía	24
2.2.3 Geomorfología	26
2.2.4 Clima	27
2.2.5 Actividades económicas	27
2.3 INVESTIGACIONES ANTECEDENTES	28
2.3.1 Estadística general	28
2.3.2 Estado del arte	30
3 METODOLOGÍA	35
3.1 DELIMITACIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA	36
3.2 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	37
3.3 ANALISIS PLUVIOMÉTRICO	37

3.4	DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES.....	37
3.5	CÁLCULO DEL NDVI.....	38
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	38
4.1.1	Delimitación de cuenca.....	38
4.1.2	Selección de estaciones IDEAM.....	40
4.1.3	Procesamiento de información pluviométrica	42
4.2	CÁLCULO DE NDVI.....	50
4.3	CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI Y PRECIPITACIÓN.....	62
4.3.1	NDVI vs Precipitación total mensual.....	63
4.3.2	NDVI vs Precipitación antecedente	64
4.3.3	Evaluación de otras variables hidrológicas	66
4.4	ANÁLISIS DE CONDICIONES TOPOGRÁFICAS	68
4.5	EVALUACIÓN DE USO DE SUELO	78
4.5.1	Cambio de uso de suelo para condición antecedente húmeda.	78
4.5.2	Cambio de uso de suelo para condición antecedente seca.....	81
4.6	MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	84
4.6.1	Instrumentalización de la cuenca.....	84
4.6.2	Mapeo de la cobertura vegetal con imágenes satelitales	85
4.6.3	Relocalización de zonas de explotación agrícola	85
4.6.4	Implementación de distritos de riego	85
4.6.5	Reforestación y control del uso de suelo	86
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1	CONCLUSIONES.....	87
5.1.1	Conclusiones generales	87
5.1.1	Correlación de NDVI y variables hidrológicas.....	87
5.1.2	Relación de NDVI con condiciones topográficas y cambio del uso del suelo	88
5.2	RECOMENDACIONES	89
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema básico de teledetección activa.	16
Figura 2-2. Esquema básico de teledetección pasiva.	17
Figura 2-3. Reflejo de banda del infrarrojo cercano.	20
Figura 2-4. Salud de la vegetación en función del NDVI.	21
Figura 2-5. Mapa cartográfico del Canal del Dique.	23
Figura 2-6. Sistema cenagoso del Canal del Dique.	24
Figura 2-7. Temporadas secas y lluviosas en la cuenca del Canal del Dique.	27
Figura 2-8. Publicaciones científicas asociadas a NDVI 1985-2021.	28
Figura 2-9. Publicaciones científicas asociadas a NDVI por países.	29
Figura 2-10. Publicaciones asociadas NDVI por temáticas de estudio.	30
Figura 3-1. Metodología general.	35
Figura 3-2. Metodología específica.	36
Figura 4-1. Cuenca hidrográfica del Canal del Dique.	38
Figura 4-2. Imagen satelital de cuenca hidrográfica del Canal del Dique.	39
Figura 4-3. Estaciones pluviométricas seleccionadas dentro de la cuenca del Canal del Dique.	41
Figura 4-4. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Loma Grande.	43
Figura 4-5. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Casa de Bombas.	43
Figura 4-6. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Normal Manatí.	44
Figura 4-7. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Sabanalarga.	44
Figura 4-8. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM San Pedrito.	45
Figura 4-9. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Usiacurí.	45
Figura 4-10. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Arjona.	46
Figura 4-11. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Casa de Piedra.	46
Figura 4-12. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Rocha.	47
Figura 4-13. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Gamero.	47
Figura 4-14. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM San Cayetano.	48

Figura 4-15. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Palo Alto.....	48
Figura 4-16. Imágenes MOD13Q1 de marzo de 2000 para la cuenca del Canal del Dique.....	51
Figura 4-17. Imagen consolidada MOD13Q1 de marzo de 2000 para la cuenca del Canal del Dique.....	52
Figura 4-18. Ráster con valores de NDVI para marzo de 2000 en la cuenca del Canal del Dique.....	53
Figura 4-19. NDVI calculado para 03/2000 (a), 08/2000 (b), 08/2001 (c), 11/2001 (d), 04/2002 (e) y 09/2002 (f).....	54
Figura 4-20. NDVI calculado para 01/2003 (a), 06/2003 (b), 02/2004 (c), 08/2004 (d), 05/2005 (e) y 09/2005 (f).....	55
Figura 4-21. NDVI calculado para 02/2006 (a), 10/2006 (b), 03/2007 (c), 11/2007 (d), 01/2008 (e) y 05/2008 (f).....	56
Figura 4-22. NDVI calculado para 11/2008 (a), 02/2009 (b), 10/2009 (c), 03/2010 (d), 10/2010 (e) y 12/2010 (f).....	57
Figura 4-23. NDVI calculado para 02/2011 (a), 06/2011 (b), 10/2011 (c), 02/2012 (d), 06/2012 (e) y 11/2012 (f).....	58
Figura 4-24. NDVI calculado para 02/2013 (a), 11/2013 (b), 03/2014 (c), 11/2014 (d), 02/2015 (e) y 11/2015 (f).....	59
Figura 4-25. NDVI calculado para 03/2016 (a), 11/2016 (b), 03/2017 (c), 11/2017 (d), 02/2018 (e) y 11/2018 (f).....	60
Figura 4-26. NDVI calculado para 03/2019 (a), 10/2019 (b), 04/2020 (c), 11/2020 (d), 03/2021 (e) y 09/2021 (f).....	61
Figura 4-27. NDVI calculado para 06/2022 (a) y 10/2022 (b).....	62
Figura 4-28. Polígonos de Thiessen para estaciones en la cuenca del Canal del Dique.....	63
Figura 4-29. Correlación entre precipitación mensual y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.....	64
Figura 4-30. Correlación entre precipitación antecedente y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.....	66
Figura 4-31. Correlación entre temperatura media mensual y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.....	67
Figura 4-32. Correlación entre humedad máxima y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.....	68
Figura 4-33. DEM de la cuenca y estaciones evaluadas.....	69
Figura 4-34. Comparación de la variación de NDVI entre la zona de la cuenca de mayor elevación del terreno y zona de menor elevación.....	71
Figura 4-35. Variación del NDVI promedio respecto a las elevaciones del terreno.....	72

Figura 4-36. Cobertura de NDVI para la cuenca en condición seca de marzo del 2016.	73
Figura 4-37. NDVI calculado para 02/2004 (a), 10/2006 (b), 11/2008 (c), 03/2010 (d).	74
Figura 4-38. NDVI calculado para 06/2012 (a), 11/2014 (b), 03/2016 (c), 11/2018 (d).	75
Figura 4-39. NDVI calculado para 04/2020 (a) y 10/2022 (b).	76
Figura 4-40. Variación del NDVI promedio respecto a las elevaciones del terreno (sin presencia de cuerpos de agua).	77
Figura 4-41. NDVI en condición antecedente húmeda para agosto de 2000 (izquierda) y septiembre de 2021 (derecha).	79
Figura 4-42. Disminución del NDVI promedio en condición antecedente húmeda entre 2000 y 2021.	79
Figura 4-43. Zonas de disminución mayor o igual a 0.2 del NDVI bajo condición antecedente húmeda entre agosto de 2000 y septiembre de 2021.	80
Figura 4-44. NDVI en condición antecedente seca para abril de 2002 (izquierda) y abril de 2020 (derecha).	81
Figura 4-45. Disminución del NDVI promedio en condición antecedente seca entre 2002 y 2020.	82
Figura 4-46. Zonas de disminución mayor o igual a 0.2 del NDVI bajo condición antecedente seca entre abril de 2002 y septiembre de 2021.	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Bandas espectrales del sensor MODIS.....	18
Tabla 2-2. Bandas espectrales del sensor MODIS.....	18
Tabla 2-3. Sistema de ciénagas y caños del Canal del Dique.....	25
Tabla 4-1. Caracterización morfométrica de la cuenca.	39
Tabla 4-2. Registro de estaciones IDEAM seleccionadas.....	42
Tabla 4-3. Fechas para evaluación del NDVI.....	49
Tabla 4-4. Elevaciones medias por sectores en la cuenca del Canal del Dique. ...	70
Tabla 4-5. Variación de NDVI promedio entre mapas con y sin presencia de cuerpos de agua.	77

RESUMEN

La presente investigación evaluó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para la cuenca del Canal del Dique en función de las condiciones hidrológicas del sector, la topografía y los cambios de uso de suelo en la cuenca.

En la investigación se utilizaron imágenes MOD13Q1 para el cálculo del NDVI en la cuenca del Canal del Dique. La cuenca fue delimitada a partir de una imagen ASTER Level 1T. Se escogieron 50 fechas de análisis entre los años 2000 y 2022 teniendo en cuenta meses lluviosos, secos, de condición antecedente seca y de condición antecedente húmeda. La información meteorológica se obtuvo de los registros históricos de 12 estaciones IDEAM que fueron seleccionadas a partir de la disponibilidad de información y de la distribución espacial a lo largo de la cuenca.

Los resultados del análisis muestran una correlación positiva y fuerte entre el NDVI y la precipitación total mensual en la cuenca; sin embargo, el mejor ajuste y correlación se alcanzó entre el NDVI y la precipitación antecedente. En cuanto a la topografía, se observa que la parte alta de la cuenca responde de mejor manera en cuanto a la cobertura vegetal ante cambios en las condiciones climáticas. Sectores de mayor elevación logran mantener valores medios y altos de NDVI aún en condición antecedente seca. Los cambios de uso de suelo entre los años 2000 y 2022 han generado una disminución general de la cobertura de vegetación densa a lo largo de la cuenca, tanto en temporadas lluviosas como en tiempos de sequía.

Finalmente se propusieron medidas o estrategias de mitigación que pueden ser implementadas en la cuenca del Canal del Dique para afrontar temporadas de sequía y que permitan mantener una buena cobertura vegetal.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de producción agrícola se encuentran estrechamente ligados a las condiciones climatológicas, razón por la cual, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es la influencia que ha tenido el cambio climático, particularmente el régimen hidrológico, en el sector de la agricultura y la ganadería.

El sector agropecuario en Colombia representa un eslabón fundamental para la economía del país, sin embargo, es un sector de alta vulnerabilidad y poca adaptación ante los recientes cambios climatológicos. Aumentos en la temperatura, cambios en los regímenes de precipitaciones, reducen la producción de cosechas y aumentan la probabilidad de fracaso de los proyectos ganaderos.

Ante la necesidad de adaptación al cambio climático, se hace fundamental tener un amplio conocimiento de las condiciones hidrológicas de un territorio, sus variaciones y su potencial impacto en la producción agrícola. Para ello, una de las herramientas más comunes que se aplica en zonas rurales, es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice permite tener un conocimiento de la salud de la vegetación a partir de su verdor; así como también permite determinar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación; por lo que a través de él se puede obtener información fundamental para proyecciones de producción agrícola, gestión del territorio, formulación de planes de producción, entre otros.

Se han realizado análisis en los últimos años con el propósito de determinar el tipo de cobertura, conocer la variación temporal, y/o para establecer el estado de salud de cultivos en específicos (Relevo Luna et al., 2020); siendo el NDVI el más utilizado para describir la cobertura y el crecimiento de la vegetación superficial y para realizar análisis de las características y distribución de la vegetación a nivel regional (M. Lin et al., 2022).

La presente investigación evalúa los resultados de NDVI en la cuenca del Canal del Dique, con relación a las variaciones de tipo hidrológico, topográfico y de usos del suelo dentro del área de la cuenca hidrográfica. El análisis se enfoca en una ventana de tiempo entre el año 2000 y 2022, y busca correlacionar el régimen de precipitaciones con el índice de vegetación en la cuenca, para posteriormente evaluar como inciden otras variables como la topografía y el uso de suelo en el resultado numérico del NDVI.

La cuenca del Canal del Dique es un área de gran importancia, no solo por el cuerpo de agua como tal, sino por los servicios ecosistémicos que brinda a los 19 municipios que la conforma (Observatorio. Fondo de agua de Cartagena, 2016) y a la región del caribe colombiano en general; que se ha visto afectada históricamente

por eventos de inundaciones y periodos de sequías que afectan la cobertura vegetal del terreno. Los cambios en cobertura vegetal del suelo afectan actividades económicas en la región (ganadería, agricultura) (Agencia Nacional de Infraestructura ANI, 2022) y obliga a analizar la respuesta de la cuenca ante los cambios que se generan por la ocurrencia de dichos eventos.

Los registros de investigaciones sobre el cambio del índice de vegetación frente a variación de precipitación, condición topográfica y uso de suelo en la zona de estudio son escasos, por lo que se requiere hacer el análisis del NDVI para que se convierta en una herramienta de respaldo para la toma de decisiones ante el evidente cambio climático.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), en Colombia hay un total de 26.5 millones de hectáreas con vocación agropecuaria, de las cuales 2 millones están en cuerpos de agua. El sector agropecuario en Colombia representa una participación del 6.6% del PIB; además, conforme la Gran Encuesta Integrada de Hogares, para el 2016 de los 22 millones de colombianos ocupados, el 16.1% pertenecen al sector agropecuario. (Unidad de Planeación Rural Agropecuaria UPRA, 2022).

Resulta de gran importancia conocer los cambios que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica, que puedan llegar a impactar de forma negativa los procesos productivos dentro de ella (Nelson et al., 2009). Cambios en el uso de suelo ante el crecimiento poblacional, el incremento de áreas impermeables en cascos urbanos, el aumento de zonas de pastoreo y de explotación agropecuaria en zonas que anteriormente eran bosques y vegetación densa; son de gran relevancia para analizar cómo ha variado la respuesta hidrológica de una cuenca con el transcurso del tiempo.

Sumado a los cambios internos a la cuenca se encuentran las variaciones de las condiciones hidrológicas del sector ante el cambio climático. Prolongación de las temporadas de lluvia y de sequía, y aumento de las temperaturas en cuencas tropicales, repercuten en los procesos internos de las cuencas y generan cambios en las condiciones hidrológicas de las cuencas (Nicholson et al., 1990). Estas condiciones van cambiando con el tiempo, haciendo que sea fundamental no solo la instrumentalización dentro de la cuenca sino la evaluación constante de los procesos internos (infiltraciones, escorrentías, cambios de uso de suelo, cambios en la vegetación, entre otros).

El cambio climático representa una amenaza en el manejo de cuencas, el cual debe estar constantemente actualizándose. Ante esta situación se hace evidente la falta de información dentro de la cuenca del Canal del Dique; a pesar de ser una cuenca de gran actividad agrícola (Coneo Mendoza et al., 2014), cuyo territorio ha sido históricamente afectado por eventos extremos de inundaciones y sequías y con poca capacidad de adaptación al cambio climático (Agencia Nacional de Infraestructura ANI, 2022). Por tal motivo, resulta de gran importancia contar con herramientas que ayuden a predecir los cambios en cuanto a la respuesta de la cuenca ante posibles variaciones de las condiciones climáticas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La cuenca que drena hacia el Canal del Dique ha presentado eventos de inundaciones extremas y de sequías prolongadas. Es una cuenca que combina centros urbanos con zonas rurales donde se desarrollan actividades propias a su vocación agropecuaria que pueden verse afectadas por los posibles cambios de la cobertura vegetal por la incidencia del cambio climático (Aguilera, 2006)

La cuenca del Canal del Dique abarca los departamentos de Atlántico, Bolívar y Sucre y cubre un área de 4529 Km². Las principales actividades económicas que se desarrollan en la cuenca son de tipo agropecuarias y acuícolas. Este tipo de actividades económicas se ven beneficiadas por tener un conocimiento actualizado de la cobertura vegetal de la cuenca, a partir de la cual se puede organizar de forma más eficientes las actividades de producción, los sistemas de riego y las medidas de contingencia para épocas de sequía.

Una manera de abordar el escenario descrito anteriormente es mediante una evaluación del NDVI, en la cuenca, para distintas condiciones meteorológicas, topográficas y de uso de suelo, que permita plantear estrategias y medidas de mitigación para que la cuenca responda de mejor manera y tenga capacidad de adaptación ante el cambio climático.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) con respecto a condiciones de variabilidad hidrológica, topográfica y de uso de suelo para proponer estrategias de mitigación ante los efectos en la cuenca del Canal del Dique.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la correlación del NDVI y la precipitación total mensual.
- Analizar cambios del NDVI ante variaciones en la elevación del terreno.
- Identificar variaciones del NDVI frente a diferentes usos de suelo dentro de la cuenca.
- Proponer estrategias de mitigación para mejorar la cobertura vegetal de la cuenca.

1.4 ALCANCE

- El estudio se realizará en la cuenca hidrográfica del Canal del Dique abarcando territorio de los departamentos del Atlántico, Bolívar y Sucre.
- Se utilizarán los registros de lluvias de 12 estaciones IDEAM dentro del área de estudio.
- El cálculo del NDVI se realizará a partir de imágenes satelitales tipo MODIS de descarga gratuita.
- La evaluación se realizó para un periodo de 23 años comprendido entre el 2000 y 2022, evaluando como mínimo 2 escenarios por año.

1.5 LIMITACIONES

- Se trabajó con información disponible de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas dado que contienen los registros más completos en la zona de estudio, sin embargo, algunas estaciones no cuentan con registros de precipitación completos en ciertos años.
- No se realizaron trabajos de campo, como levantamientos topográficos, estudios de suelos o visitas a predios.
- La información topográfica, de uso de suelo y de actividades económicas desarrolladas en la cuenca se obtuvo de fuentes secundarias.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MARCO TEORICO DE REFERENCIA

En este aparte se presentan los fundamentos teóricos de los conceptos principales y las metodologías utilizadas en el desarrollo de la investigación.

Se hace un énfasis principal en el cálculo del NDVI, debido a que es el índice analizado en la cuenca de estudio.

2.1.1 Teledetección

La teledetección es la técnica que permite obtener información de la superficie de la tierra a partir del uso de sensores instalados en plataformas espaciales; de esta forma es posible reconocer a distancia las características y los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre.

La interacción que hay entre el sensor y el objeto se conoce como flujo energético, esta forma de radiación se puede dar por emisión, reflexión o emisión-reflexión. (Chuvieco Salinero, 2006)

La teledetección puede ser de tipo activa o pasiva. En el primer caso el sensor del satélite funciona como la propia fuente de emisión. El sensor emite una señal hacia el objeto y luego recibe de este una respuesta. Generalmente se transmiten microondas ya que son inmunes a las condiciones meteorológicas (EOS Data Analytics, 2021). Dado que la teledetección activa es independiente de las condiciones atmosféricas, es ampliamente aplicado en la agricultura, topografía y oceanografía, entre otros.



Figura 2-1. Esquema básico de teledetección activa.
Fuente: Earth Observing System (EOS Data Analytics, 2021)

En cuanto a la teledetección pasiva, la diferencia radica en que los sensores no emiten señales propias hacia el objeto terrestre, sino que depende de la energía solar que refleja del objeto. En la teledetección pasiva se hace uso de sensores multiespectrales que miden la información recibida en múltiples bandas combinadas. Estas bandas incluyen las del espectro visible, infrarrojo, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico.



Figura 2-2. Esquema básico de teledetección pasiva.
Fuente: Earth Observing System (EOS Data Analytics, 2021)

2.1.2 Imágenes satelitales MODIS

Las imágenes del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) son ampliamente utilizadas para análisis de cobertura vegetal en la superficie terrestre. La información obtenida por estos sensores se encuentra dentro de los que se conoce como el sistema de observación de la tierra, EOS (Earth Observing System), de la NASA. El EOS, consiste en una red de satélites coordinados que monitorean las condiciones climáticas, oceanográficas, terrestres y atmosféricas de la tierra. (National Aeronautics and Space Administration NASA, 2023b)

Las plataformas Terra y Aqua hacen parte del EOS, y son los satélites donde se encuentran los sensores MODIS.

El satélite Terra fue lanzado en el año 1999 y se ubica a una altitud de 708 km con inclinación de 98.5° (National Aeronautics and Space Administration NASA, 2023a). Contiene los sensores ASTER, CERES, MISR, MODIS y MOPITT. Este satélite se encuentra orientado a aplicaciones de tipo terrestre.

Por otro lado, el satélite AQUA se orienta a aplicaciones de carácter oceanográfico. Fue lanzado en el año 2002 y se ubica a una altitud de 705 km. El satélite AQUA contiene los sensores AIRS, AMSR-E, AMSU, CERES, HSB y MODIS.

El sensor MODIS monitorea la superficie completa de la tierra cada 1 o 2 días, generando productos con resolución espacial de 250 m, 500 m y 1000 m. Sus datos colectados ayudan a comprender de mejor manera los procesos y dinámicas que surgen de la interacción tierra, océano y atmósfera. El sensor pesa 228.7 kg y tiene un ángulo visión de 110° y cuenta con 36 bandas en su capacidad espectral (Ver Tabla 2-1). Las especificaciones generales del sensor MODIS se presentan en la

Tabla 2-2.

Tabla 2-1. Bandas espectrales del sensor MODIS.

Número de bandas	Ámbito de aplicación	Longitud de onda (nm)
1-7	Terrestre	620-2155
8-16	Oceánica	405-877
17-19	Atmosférica	890-965
20-36	Infrarrojo térmico	3660-14385

Fuente: (Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 2020)

Tabla 2-2. Bandas espectrales del sensor MODIS.

Órbita	Cruza el ecuador sentido N-S a las 10:30 a.m. (Terra) y sentido S-N a la 1:30 p.m. (Aqua)
Altitud	708 km (Terra) y 705 km (Aqua)
Ciclo	16 días
Dimensión de escaneo	2230 km por 10 km
Peso	228.7 kg
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
Tasa de transferencia de datos	10.6 Mbps
Campo de visión	110°
Número de bandas	36
Estado	Operacional

Fuente: (Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 2020)

2.1.3 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), permite monitorear espacial y temporalmente los cambios en la vegetación, a través de las propiedades de reflexión diferencial de la vegetación porciones visible e infrarrojo del espectro (Salinas-Zavala et al., 2017)

El método de cálculo del índice es de los más usado debido a que se ha estandarizado y puede aplicarse ampliamente a muchos datos de detección remota. Desde 1981 es posible obtener la información desde sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), mejorando la calidad a partir de 1982 con los satélites LANDSAT; y a partir del año 2000 se puede obtener la información desde la plataforma MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Reid et al., 2018).

La ecuación de cálculo del NDVI, documentada y predeterminada, se describe a continuación:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NIR = valores de píxel de la banda infrarroja cercana (Near InfraRed)

R = Valores de píxel de la banda roja

(Guzmán Arévalo, 2021)

Los resultados del índice representan el verdor, a través de valores que se encuentran en el rango de -1,0 a 1,0. Esto teniendo en cuenta que las hojas verdes suelen presentar una mejor reflexión en el rango de longitudes de onda cercanas al infrarrojo que en el rango de longitudes de onda visibles; por lo tanto, se asocia este color a una condición de vegetación saludable (con alto contenido de clorofila) que refleja más luz de infrarrojo cercano y verde, pero absorbe más luz roja y azul.

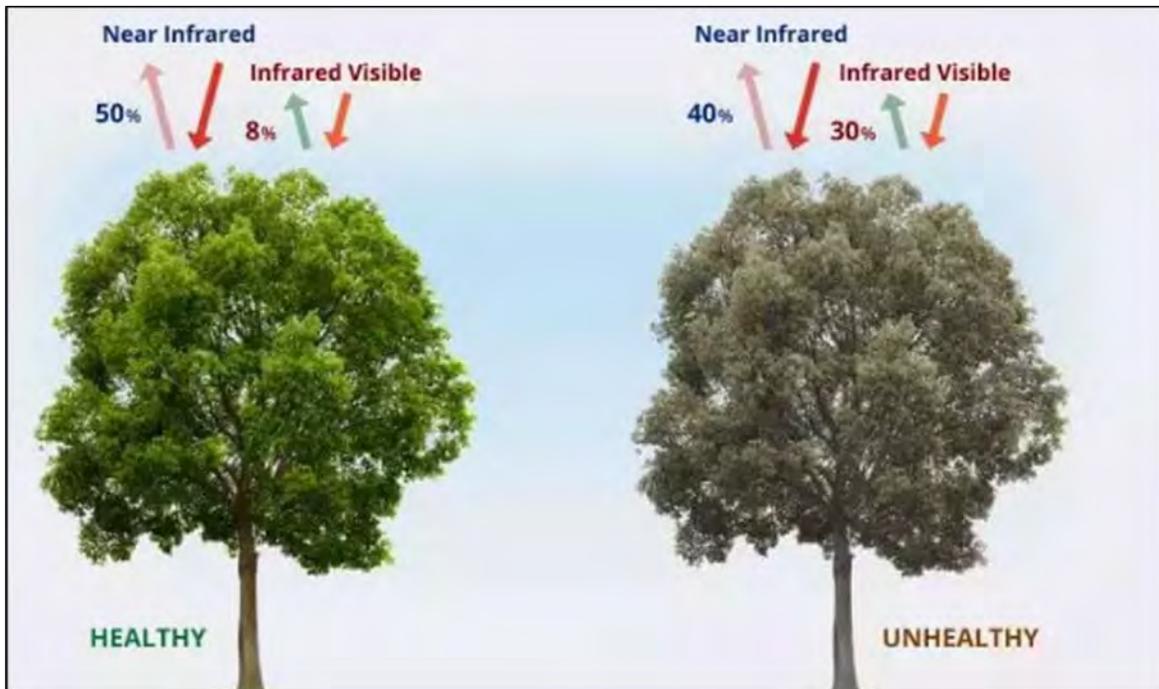


Figura 2-3. Reflejo de banda del infrarrojo cercano.
Fuente: Earth Observing System (EOS Data Analytics, 2022)

La escala de valores toma significado acorde a la siguiente descripción:

- Valores negativos corresponden a nubes, agua y nieve
- Valores negativos cercanos a cero representan rocas y suelos descubiertos.
- Valores positivos cercanos a cero (por debajo de 0,1) se asocian a áreas sin rocas, arenas.
- Valores moderados (0,2 a 0,3) están asociados a terrenos con vegetación enferma, arbustos y prados.
- Valores altos (0,6 a 0,8) indican bosques de zonas templadas y tropicales.

(ESRI, 2021)

En otros casos, particularmente para fines agrícolas, es común clasificar el estado o salud de la vegetación por tercios en la escala de 0-1, siendo los valores negativos de NDVI correspondiente a objetos inanimados o vegetación muerta.

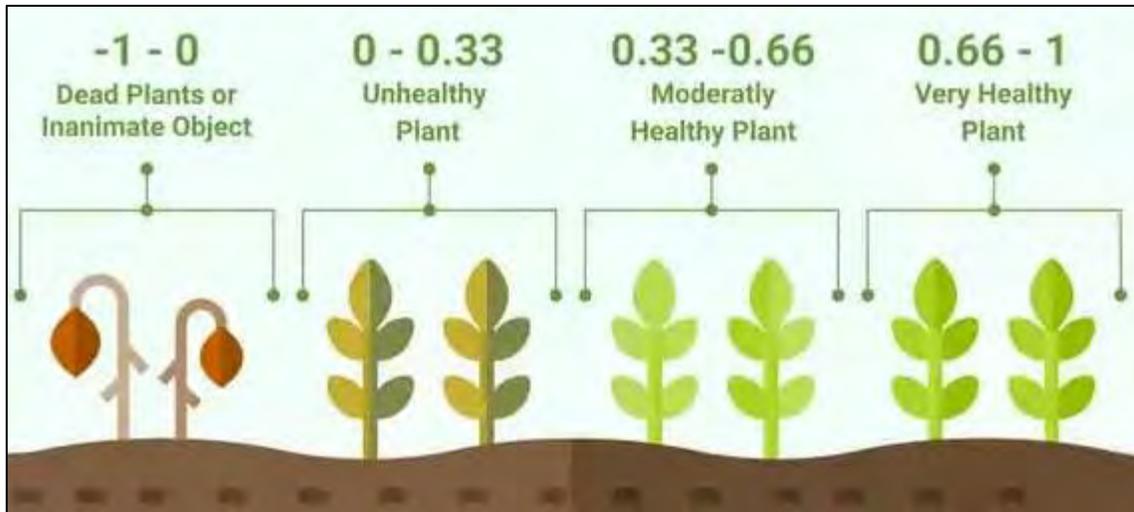


Figura 2-4. Salud de la vegetación en función del NDVI.
Fuente: Earth Observing System (EOS Data Analytics, 2019)

2.1.4 Usos del Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI

La facilidad del cálculo del NDVI, ha permitido hacer uso de este índice en distintas áreas de conocimiento y en muy variados temas de investigación. Es ampliamente utilizado en la agricultura, silvicultura y estudios de monitoreos ambientales de ecosistemas.

Dentro de las aplicaciones prácticas del NDVI, la de uso más común es para el monitoreo de la dinámica vegetal, donde se analiza el área foliar, la salud de los cultivos, tasas de crecimiento y cobertura (Alatorre et al., 2014; Q. Wang et al., 2005)

En la ingeniería forestal se aplica el NDVI para identificar procesos de deforestación y fragmentación de hábitats (Hlavka & Strong, 1992), así como para evaluar zonas de estrés por uso de pesticidas, plagas y factores antrópicos. Se puede aplicar a gran escala para detectar cambios en la estructura de los bosques (cambios en vegetación densa), cobertura de dosel y biomasa (Kumar et al., 2010).

Estudios recientes hacen uso del NDVI como herramienta para la evaluación de tendencias de cambios de uso de suelo y sequías debido al cambio climático. Las tendencias espacio-temporales del NDVI en respuesta del cambio climático sirven como herramienta para la toma de decisiones contra la vulnerabilidad global ante los extensos periodos de sequías y cambios extremos de temperaturas (Hussien et al., 2023). También es aplicado para orientar medidas de ahorro de agua en zonas de estrés hídrico (Z. Wang et al., 2023).

2.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA

La cuenca de estudio corresponde a la del sistema del Canal del Dique, el cual se ubica al norte de Colombia y fluye en un recorrido de aproximadamente 115 km desde la bifurcación del río Magdalena en el municipio de Calamar (Bolívar) hasta su desembocadura en la bahía de Cartagena a la altura de Pasacaballos.

Se trata de un canal artificial construido en el siglo XVI, excavado y sin recubrimiento, para conectar el transporte fluvial desde Cartagena hacia el río Magdalena. El canal inicialmente fue concebido como la unión de distintas ciénagas con el río, y luego encauzado por la construcción de un dique, cuya finalidad es obviar el transporte terrestre para conectar el tráfico entre el río como arteria fluvial y los puertos de distintos municipios de Bolívar (Aguilera, 2006).

2.2.1 Cartografía

El Canal del Dique cuenta con 50 curvas en su trazado y tiene un ancho promedio de 65 m en sus 115 Km de extensión. El canal atraviesa por tres departamentos, Atlántico, Bolívar y Sucre, a lo largo de su recorrido en un total de 19 municipios distribuidos de la siguiente manera:

- Atlántico: 7
- Bolívar: 11
- Sucre: 1

Si bien el departamento de Bolívar es el que tiene mayor presencia en número de municipios en la cuenca del Canal del Dique, estos apenas corresponden a un 12% del área total del departamento; mientras que los 7 municipios del Atlántico cubren el 33% del área departamental. El municipio de San Onofre, único de Sucre que hace parte de la cuenca, cubre un 10% del área total del departamento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

La cuenca del Canal del Dique se extiende hasta alcanzar la zona costera en las bahías de Barbacoas, Cartagena, Islas del Rosario y San Bernardo. La Figura 2-5 presenta el mapa cartográfico del área de influencia del Canal del Dique.



Figura 2-5. Mapa cartográfico del Canal del Dique.
Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)

2.2.2 Hidrografía

El Canal del Dique conecta un complejo de ciénagas con el río Magdalena (aguas arriba) y el Mar Caribe (aguas abajo). Estas ciénagas abarcan un área total 2980 Km² y un volumen de almacenamiento estimado de 12.000.000 m³ (Aguilera, 2006). La siguiente figura presenta el sistema de ciénagas a lo largo del recorrido del Canal del Dique.

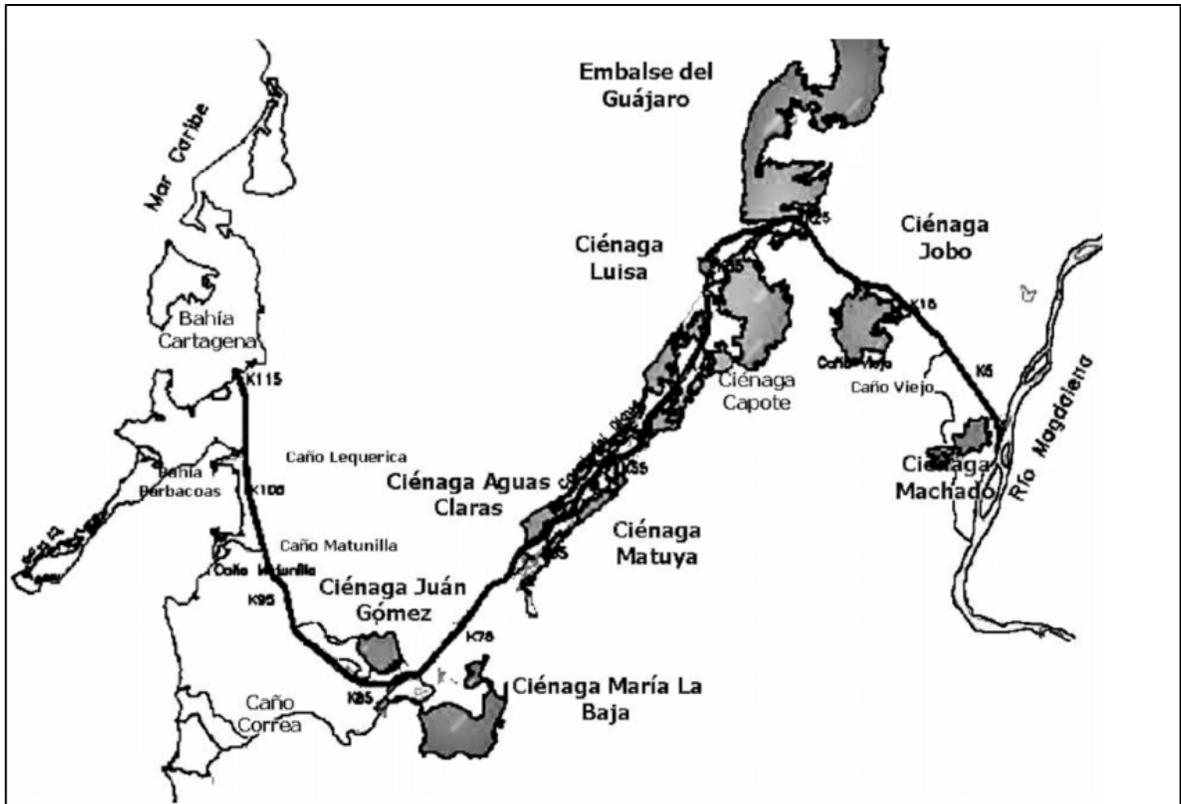


Figura 2-6. Sistema cenagoso del Canal del Dique
Fuente: (Pinilla Agudelo et al., 2010).

El canal cuenca con una profundidad media de 3 m en temporada seca y 7 m a 10 m en época de lluvia (Pinilla A & Duarte C, 2006) y desemboca en un sistema deltaico en la Bahía de Cartagena en Pasacaballos. En su recorrido cuenca con tres efluentes laterales hacia los caños Correa, Matunilla y Lequerica, los cuales fluyen hacia la bahía de Barbacoas (Mogollón Vélez, 2013)

El alineamiento del Canal del Dique suele subdividirse en tres sectores:

- Alto Canal del Dique: Calamar (K0) – Soplaviento (K33)
- Medio Canal del Dique: Soplaviento (K33) – Caño Correo (K82)
- Bajo Canal del Dique: Caño Correo (K82) – Bahía de Cartagena (K115)

Cabe recordar que el sistema Canal del Dique es fluvio-marino que conecta un total de 38 ciénagas y embalses (ver Tabla 2-3).

Tabla 2-3. Sistema de ciénagas y caños del Canal del Dique.

Municipio	Ciénaga	Caño
Arjona	Honda	Hondito
	Orinoco	Cartagena y Los Palos
	Biojó	Los Palos
	Baya Arjona	Baya
	Escuadra	
	Corcovada	Sangre Toro
	Palotal	Gobierno, Arjona
	Florechitas	Guacamaya
	Tornero	
	Palotalito	
	Juan Gómez	
	Bohórquez	Bohórquez
	Tambo	
	Aguas Claras	
	Atascosa	
	Ceiba	
	Luisa	
Remediapobre		
Hoyo mono	Matuya, Mahates	
Matuya		
Mahates	Zarzal	
	Muerta	
	Filipina	
	Tupe	
	Capote	
	Coneya	
	Morán	
	Salado	
	Farfán	
	Junco	Ñelé
	Jobo	Matuya
Machado		

Municipio	Ciénaga	Caño
San Cristobal	Laguna Rabón	Grande, Correa
María La Baja	María La Baja Carabalí Embalse Matuya	Grande, Correa Ñelé Matuya
Repelón, Manatí, Sabanalarga y Luruaco.	Embalse El Guájaro	

Fuente: (Aguilera, 2006)

2.2.3 Geomorfología

La geomorfología de la subregión del Canal del Dique se puede clasificar en cuatro grandes grupos:

- Zonas de erosión
- Sistemas de colinas
- Zonas fluvio deltaicas
- Zonas Litorales

En las zonas de erosión se identifican las regiones de Turbaco (160 msnm -200 msnm) y Turbana-Arjona (75 msnm – 100 msnm). En el sistema de colinas se encuentran las unidades de Turbana, San Onofre, Puerto Badel-Rocha, Barú, Tierra Bomba, cerro de Leticia y cerro Loma El Siglo en Mamonal.

La mayor parte del sistema del Canal del Dique es de tipo litoral y deltaico, donde se incluyen

- Planicie de Antigua Ballestas
- Depósito de Piedemonte
- Zona deltaica y litoral (mar caribe, humedales, caños y ciénagas)
- Sistema de caños y canales
- Canales naturales y artificiales
- Sistema de humedales continentales y costeros
- Bajos inundables
- Zonas de mangle

(Ordoñez et al., 2013)

2.2.4 Clima

El sistema del Canal del Dique se encuentra dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y cuenta con una época seca con vientos fuertes de diciembre a abril y una temporada lluviosa en los meses de agosto a noviembre (Posada Posada & Henao Pineda, 2008). Las variaciones en los niveles de marea, los vientos extremos, precipitaciones extremas y las prolongadas sequías, con los factores climáticos de mayor impacto en la zona (CARDIQUE et al., 2007)

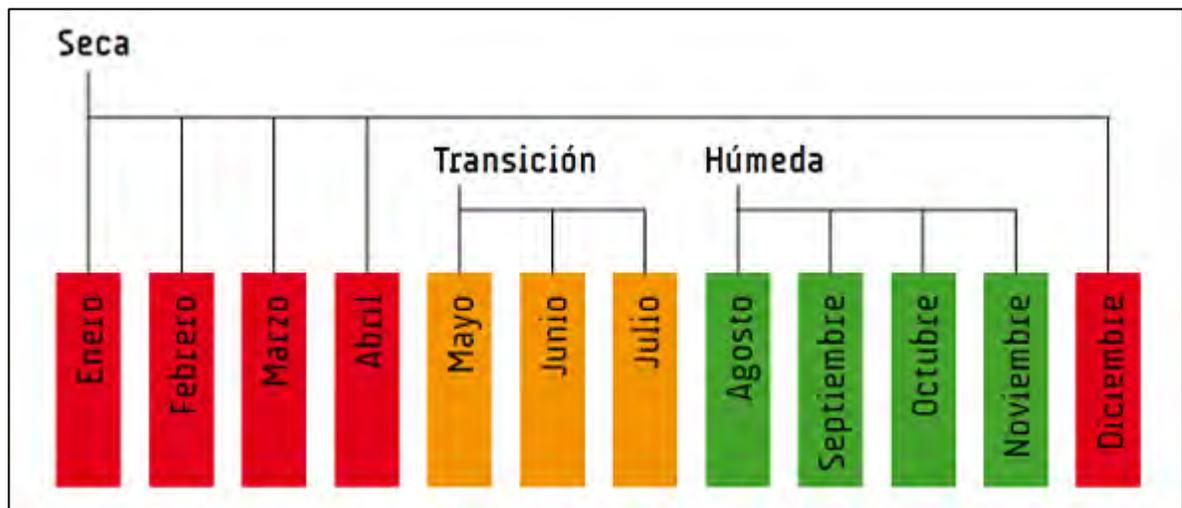


Figura 2-7. Temporadas secas y lluviosas en la cuenca del Canal del Dique
Fuente: (Posada Posada & Henao Pineda, 2008)

La temperatura media en la cuenca es de 28.3 °C, siendo el sector de Turbana el de mayor temperatura media (34°C) y el municipio de Piojó el lugar que registra temperaturas medias más bajas (26°C).

2.2.5 Actividades económicas

La economía de la subregión del Canal del Dique gira entorno a las actividades agropecuarias y acuícolas. La actividad de ganadería bovina doble propósito es la que mayor producción genera en la zona, mientras que el sector de la agricultura y la pesca son las que representan mayor vinculación de mano de obra en la población (Aguilera, 2006).

El uso de tierra está mayormente destinado a las actividades pecuarias; por ejemplo, en los departamentos de Atlántico y Bolívar al año 2011 el 78% y 80% de las hectáreas productivas, respectivamente, estaban dedicadas a la ganadería (Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2020)

En cuanto a la actividad pesquera que se presenta en el sistema del Canal del Dique, se presenta en casi todos los municipios de la zona. Siendo mayormente de tipo de artesanal, la pesca es el sustento de muchas familias de la región. Esta actividad incluye no sólo a los pescadores sino a los acopiadores y comerciantes. También se destaca el cultivo de camarón como otra de las principales actividades acuícolas

La agricultura se lleva a cabo en una pequeña parte de la tierra en comparación con las actividades pecuarias. Se estima que al 2011 había en total 77317 hectáreas de siembra en la zona de influencia del Canal del Dique. Los productos de mayor representación en la actividad agrícola de la zona son el maíz (35.5%), yuca (18.8%) y palma (12.2%) (Aguilera, 2006).

2.3 INVESTIGACIONES ANTECEDENTES

En este numeral se presenta una compilación de las investigaciones y trabajos que han abordado la temática del índice de vegetación NDVI y que sirven como referentes para esta investigación.

2.3.1 Estadística general

El cálculo y análisis del NDVI está sustentado en publicaciones científicas que datan de 1985, con un aumento exponencial en las posteriores décadas.

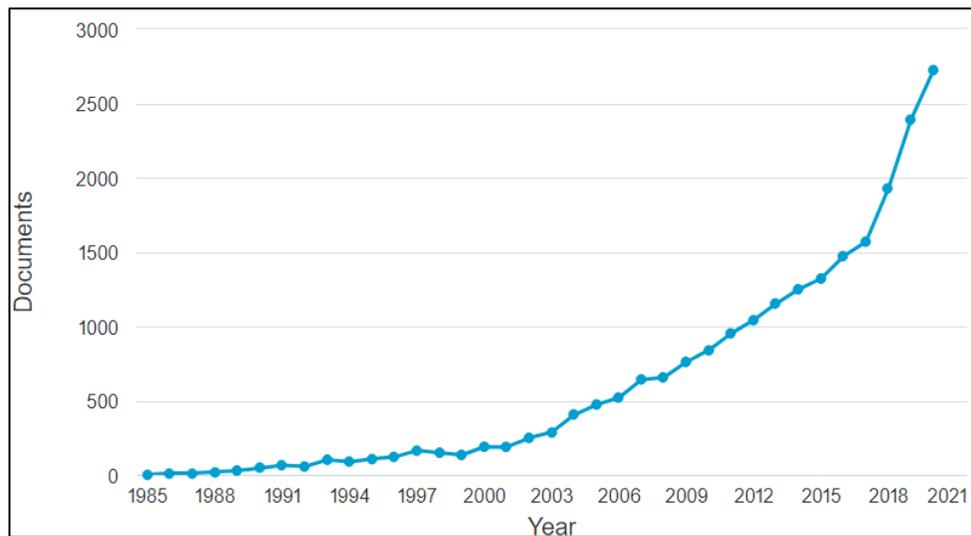


Figura 2-8. Publicaciones científicas asociadas a NDVI 1985-2021
Fuente: Base de datos SCOPUS, 2022

A nivel de países que estudian y publican del tema, China representa la mayor producción, seguida de Estados Unidos e India.

A nivel de Latinoamérica, solo Brasil presenta cifras significativas a nivel de publicaciones asociadas.

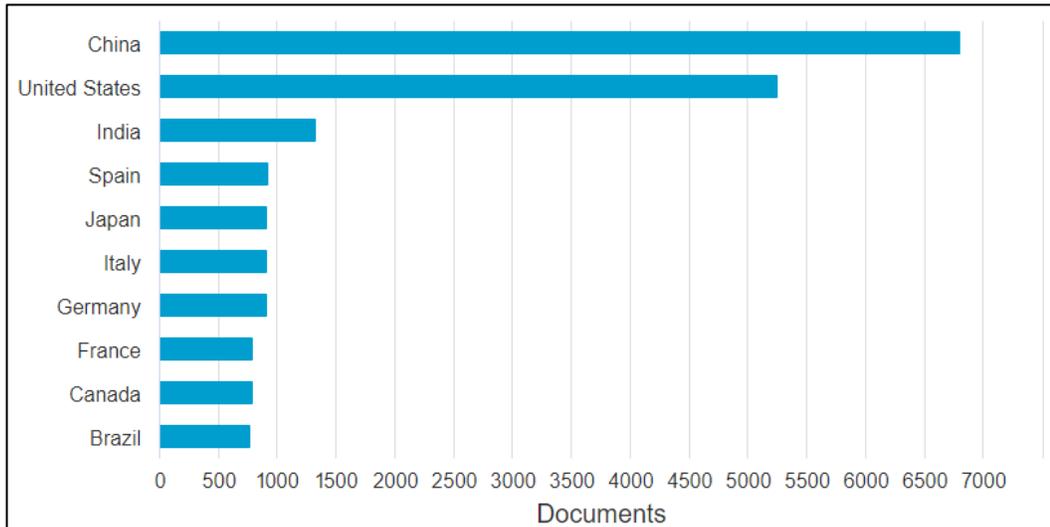


Figura 2-9. Publicaciones científicas asociadas a NDVI por países.
Fuente: Base de datos SCOPUS, 2022

Dado que el NDVI puede ser calculado para analizar distintos tópicos, los resultados estadísticos fueron agrupados en términos de las temáticas relacionadas a la investigación. El 52% (categoría “Otros”) estaban enfocados en análisis de NDVI para estudios de enfermedades, para generación de cartografía y/o para automatización de proceso de cálculo; el 24% correspondía a temas relacionados a cambio de uso del suelo (cobertura vegetal y actividades económicas), el 20% asociados al análisis del NDVI en términos de la precipitación y cambio climático, y en una menor proporción, solo el 4%, eran publicaciones relacionadas a características y cambios en el terreno.

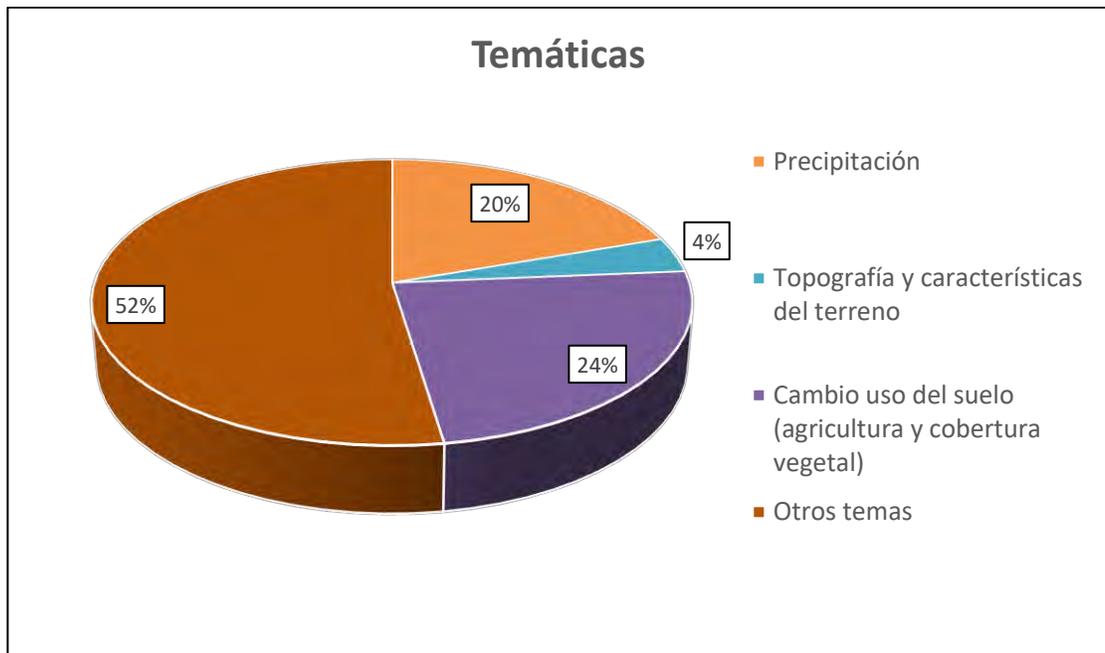


Figura 2-10. Publicaciones asociadas NDVI por temáticas de estudio.
Fuente: Elaboración propias a partir de datos de SCOPUS, 2022

En Colombia, las publicaciones científicas asociadas al tema son significativamente menores en comparación con otros países. 39 publicaciones se encuentran asociadas al país, de las cuales 11 publicaciones corresponden a temáticas no relacionadas a la investigación; sin embargo, otras fuentes como el POMCA de la cuenca del Canal del Dique, información de estudios de las corporaciones regionales ambientales, estudios y publicaciones de centros de conservación e investigación, tesis de distintas instituciones educativas de nivel superior, reportes de convenios, entre otros; son documentos que se usaron como referencia.

2.3.2 Estado del arte

La cuenca del Canal del Dique se encuentra ordenada a través del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca POMCA del año 2007, el cual fue actualizado con vigencia en el periodo 2017-2027

A través del ordenamiento de una cuenca, es posible conocer las características de componentes asociados a la cuenca. Las condiciones hidrográficas y climatológicas descritas en los documentos POMCA, asociada con el componente social, necesaria en los procesos su elaboración, permite tener un panorama claro de la zona de estudio (CARDIQUE et al., 2007; Consorcio Canal del Dique, 2018).

Con respecto al NDVI y las variables asociadas a la investigación; en 1993 Schultz y Halpert (Schultz & Halpert, 1993) calculan las relaciones entre el NDVI y la precipitación, obteniendo que se observa una respuesta favorable de la vegetación ante los eventos de lluvias; siempre y cuando no sean lluvias repentinas, ni tampoco lluvias excesivas; en estas dos últimas condiciones se observó un retraso en la vegetación. Sin embargo, en zonas con presencia de cuerpos de agua, la precipitación es el factor dominante que influye en la distribución espacial del NDVI, (Sun et al., 2022)

El NDVI no solo se analiza desde la presencia de lluvia; sino también desde la ausencia de la misma asociada a zonas áridas (Sohoulande Djebou et al., 2015) y periodos de sequías (H. Wang et al., 2015). En ambas condiciones la vegetación se ve impactada e influenciada de forma negativa con una tendencia de disminución en el NDVI.

Otras variables hidrológicas como la temperatura y brillo solar son comúnmente relacionadas con el comportamiento del NDVI. Un estudio acerca de las dinámicas entre la cobertura terrestre, la temperatura y el NDVI fue explícito al exponer que entre estas dos últimas variables existe una alta correlación negativa (Nse et al., 2020), es decir que a mayor temperatura menor será el valor de NDVI. Resultados muy similares ya habían sido mostrados por Li y Becker tres décadas atrás (Li & Becker, 1990).

Por otra parte, es de vital importancia comprender la relación entre el NDVI y los factores topográficos. En un estudio de correlación, entre el NDVI y las características y atributos de la superficie del terreno, realizado por Zhong-Ze Zhan (Zhan et al., 2012) se encontró que los valores de NDVI aumentaron con la elevación topográfica; especialmente en zonas de baja altitud. Estos hallazgos fueron ratificados en distintos estudios posteriores, tal como se muestra en el trabajo realizado por Xiong y Wang en 2022 donde se encontró que la elevación era el factor topográfico más importante que determinaba la distribución espacial del NDVI (Xiong & Wang, 2022) y Ullah en 2023 en el que confirma que el NDVI aumenta con un aumento en la elevación (Ullah et al., 2023).

Este tipo de tendencias también son mostradas en el estudio realizado por Salinas-zavala (Salinas-Zavala et al., 2017) en el que se estudió la tendencia espacio temporal del NDVI en un periodo de 15 años (2001-2015) en la zona sur de la península de Baja California; encontrando que, en las zonas de mayor densidad de actividades antropogénicas como asentamientos, y zonas de desarrollo turístico, el índice presenta tendencia negativa; mientras que los valores más cercanos a uno

(1) están asociados con las áreas de mayor cobertura vegetal localizadas hacia las zonas altas de su sistema orográfico y en zonas protegidas.

El reverdecimiento de la vegetación, a través del NDVI, es altamente estudiado a través de la interacción de distintas variables y no solamente desde el efecto que cada una de ellas pueda generar, de forma particular, en el comportamiento del índice. Estudios como el de Liu (Liu et al., 2019), analiza de forma conjunta la variación del NDVI en función de la interacción de la precipitación, temperatura, evapotranspiración y altura topográfica; con esto logra plantear que en regiones de latitud alta con aumento de temperaturas y con tasa de calentamiento mayor (en función de la elevación), el índice demuestra valores asociados a mayor reverdecimiento. Sin embargo, resaltan que con el aumento de la elevación la disponibilidad de agua disminuye y esto puede restringir y contrarrestar el efecto positivo encontrado entre el aumento de la temperatura y el reverdecimiento de la vegetación, dando como resultado una tasa decreciente de reverdecimiento de la vegetación a medida que aumenta la elevación.

En este estudio el uso simultáneo de datos de observación climática, del periodo comprendido entre los años 2000 y 2012, hizo posible destacar la significativa influencia que tiene la precipitación en los cambios de la vegetación en ecosistemas que se calientan rápidamente por la dependencia de la elevación.

Los efectos de cambio climático global no pueden dejarse a un lado al contextualizar el comportamiento del NDVI.

En zonas con alta biodiversidad, es necesario caracterizar la correlación entre la dinámica del NDVI, para distintos tipos de vegetación, y los índices bioclimáticos (cálculos basados en temperatura, precipitación y evapotranspiración de referencia).

En un estudio realizado en el Cuerno de África (Ghebregabher et al., 2020), los resultados muestran que el NDVI es proporcional a la precipitación e inversamente proporcional a la temperatura, realizando este análisis bajo la premisa de que la precipitación disminuyó de manera insignificante mientras que la temperatura aumentó significativamente durante las últimas 3 décadas.

Si la variabilidad climática se asocia al tipo de cobertura vegetal; se encontró que el NDVI de pastizales, sabanas y matorrales es más sensible al cambio climático que el NDVI de bosques y tierras arboladas. El valor promedio de NDVI de cada cubierta vegetal aumentó gradualmente de 1982 a 1998 y luego disminuyó lentamente de 1998 a 2013 debido a la variación de las precipitaciones.

Un análisis similar se realizó en la cuenca del río Abbay en Etiopia (Hussien et al., 2023). En este estudio se analizaron las tendencias espaciotemporales y la relación del NDVI y los datos de variables climáticas recopilados entre 1994 y 2020.

Los resultados demuestran que el NDVI se correlacionó fuertemente con las variables climáticas de lluvia, temperatura, evapotranspiración potencial y humedad del suelo; pero aclarando que dichas variables tienen efectos distintos en el crecimiento de la vegetación.

Durante la época de lluvias, el NDVI mostró una importante tendencia creciente; mientras que, durante la estación seca, el NDVI tuvo respuestas diferentes en función del tipo de cobertura; lo anterior fundamentado en que el índice mostró una tendencia significativamente creciente en las áreas boscosas y de matorrales, mientras que mostró una tendencia decreciente en las áreas agrícolas, de pastizales y con escasa vegetación.

El hallazgo más importante de este estudio es una alta correlación negativa, durante la temporada de lluvias, entre el NDVI y la precipitación en áreas caracterizadas por gran altitud, pendientes pronunciadas, precipitaciones anuales elevadas y prácticas agrícolas intensas. Esta correlación negativa podría atribuirse a condiciones climáticas nubladas y lluviosas que disminuyen la temperatura y la radiación solar, lo que a su vez limita la fotosíntesis en áreas de gran altitud.

Los hallazgos mencionados anteriormente, toman significativa relevancia al relacionarlo con estudios realizados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por su nombre en inglés); órgano que, desde su creación en 1988, a través de informes y reportes especiales, expone los riesgos e impactos asociados al cambio climático, así como también las medidas de adaptación y mitigación ante dichos impactos (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2023).

En Colombia, las investigaciones relacionadas con el cálculo del NDVI se ha realizado para abordar temas puntuales. En el 2018 Dobbs desarrolló mapas del NDVI para analizar el impacto de los procesos de urbanización sobre los ecosistemas en la ciudad de Bogotá (Dobbs et al., 2018).

Continuando con la aplicación del NDVI para analizar los cambios de uso de suelo, Musse llevó a cabo un enfoque cuantitativo haciendo uso del NDVI como un indicador biofísico para evaluar la calidad ambiental del entorno urbano en la ciudad de Cali; demostrando valores elevados de NDVI en las comunas de la ciudad con menos área construida (Musse et al., 2018).

En el año 2022 investigadores de la Universidad Javeriana de Bogotá evaluaron los patrones temporales de cambios de uso de suelo en zonas rurales, tomando como caso de estudio el municipio de Chaguaní en el departamento de Cundinamarca. Mediante análisis de valores de NDVI extraídos de imágenes Landsat 8 OLI TIRS se evidenció un aumento de suelo desnudo entre los años 2013 y 2014, indicando la disminución de zonas cultivables e impactando los procesos de producción de alimentos en el municipio (González et al., 2022).

En cuanto a aplicaciones del NDVI para investigaciones en el Caribe colombiano, estas incluyen no solo la evaluación de cambios de uso de suelo, sino otros fenómenos terrestres. Por ejemplo, en el año 2017 la investigación desarrollada por Hoyos hizo uso del NDVI como una de las variables aplicadas al análisis temporal y espacial de incendios forestales en el Caribe colombiano entre los años 2003 y 2015 (Hoyos et al., 2017).

Otro uso práctico del NDVI fue el aplicado por Millán en el año 2021, quien haciendo uso de 48 imágenes Landsat 8-OLI generó mapas de NDVI, a partir de los cuales se realizó la construcción cartográfica de humedales costeros en el Caribe colombiano (Millán et al., 2021). Los mapas también permitieron tipificar los humedales con base en su cobertura y temporalidad (humedales permanentes y temporales)

Finalmente, el NDVI fue aplicado por Torres-Bejarano para evaluar una posible relación entre la cobertura del suelo y la calidad del agua en el Embalse del Guájaro. Se tomaron muestras de agua en tres campañas de mediciones (2013, 2015 y 2016) y se encontró una correlación significativa entre el NDVI del sector con los parámetros de calidad del agua (temperatura, DBO, pH, NO₃ y PO₄) (Torres-Bejarano et al., 2022). La investigación concluyó que hay una relación entre valores bajos de NDVI, asociados a zonas urbanas y suelos desnudos, y la baja calidad del agua; esto puede deberse a las distintas actividades agropecuarias en la zona.

3 METODOLOGÍA

La presente investigación hizo uso de información secundaria para el cálculo y posterior análisis del NDVI en la cuenca de estudio. Inicialmente se delimitó la cuenca correspondiente al Canal del Dique, posteriormente se realizó el análisis de registros pluviométricos para las estaciones seleccionadas dentro de la cuenca.

Con base en los registros de lluvia, se determinaron las fechas de análisis para las cuales se descargaron imágenes satelitales, de las que se extrajo posteriormente el valor de NDVI. La metodología aplicada a la presente investigación se dividió en 05 actividades principales, descritas a continuación.

1. Delimitación de cuenca hidrográfica
2. Identificación de estaciones pluviométricas
3. Análisis pluviométrico
4. Descarga de imágenes satelitales
5. Cálculo del NDVI

La Figura 3-1 y Figura 3-2 corresponden al flujograma de metodología general y flujograma de metodología específica, respectivamente.

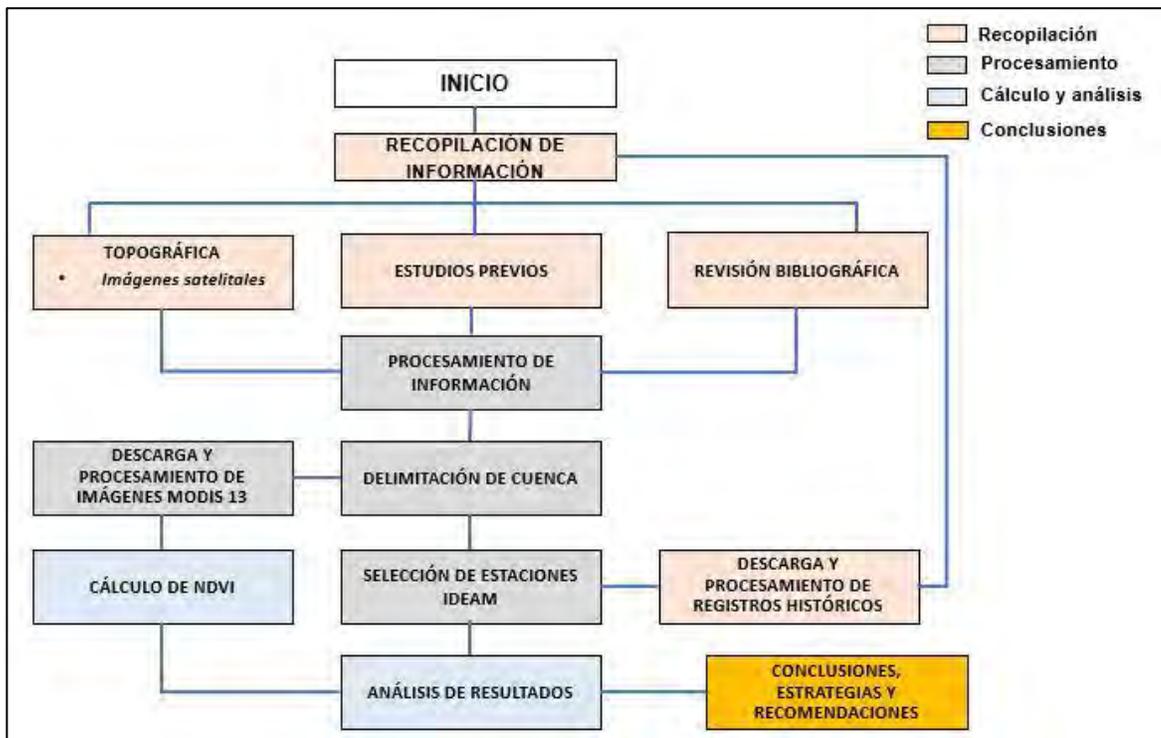


Figura 3-1. Metodología general
Fuente: Elaboración propia.

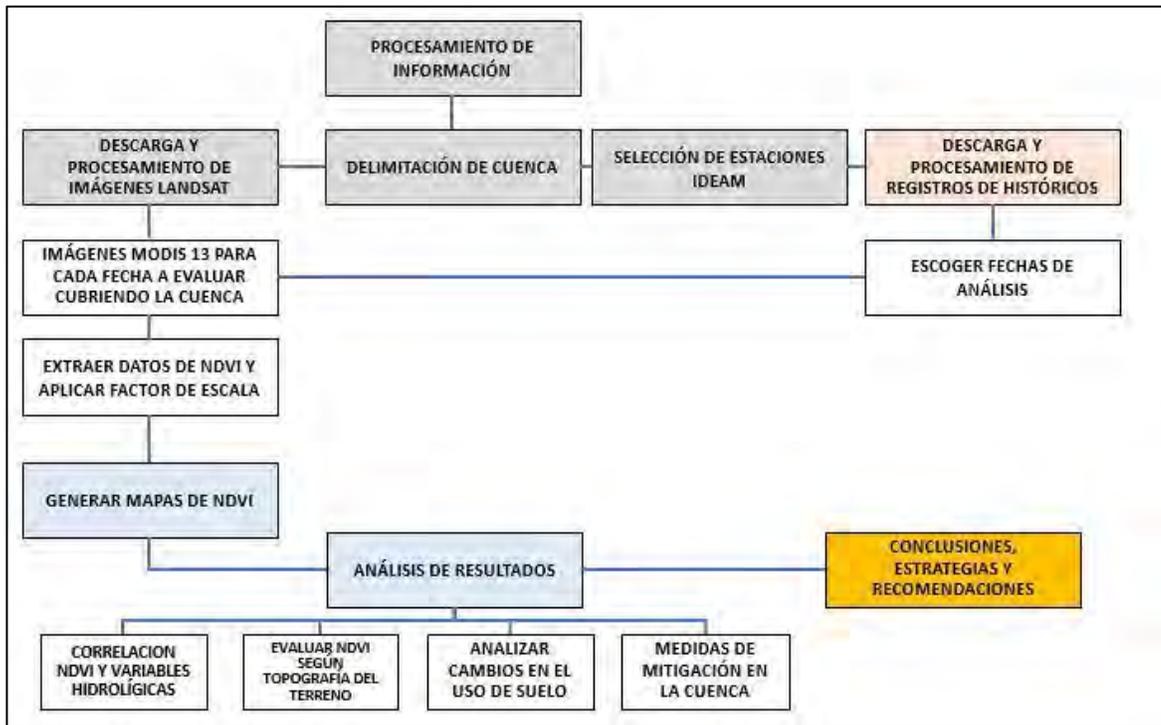


Figura 3-2. Metodología específica.

Fuente: Elaboración propia.

Conocido el valor del NDVI, fue posible realizar correlaciones estadísticas de este con los valores de las diferentes variables meteorológicas (precipitación, temperatura y humedad); así como también se pudo analizar los cambios del NDVI con respecto a las características de elevación del terreno de la cuenca; y los cambios del uso del suelo en el periodo de tiempo analizado.

3.1 DELIMITACIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca de análisis seleccionada corresponde a la del Canal del Dique, la cual abarca municipios de los departamentos del sur del Atlántico, Bolívar y parte de Sucre.

Se escogió esta zona de estudio dado que corresponde a un área de interés que contiene usos de suelo residencial, zonas rurales, actividades económicas como ganadería, agricultura y piscicultura, e históricamente ha sido una zona muy afectada por los cambios en regímenes de precipitaciones con eventos extremos tanto de lluvias como de sequías.

La delimitación de la cuenca hidrográfica se realizó con base en información de elevaciones del terreno obtenida a partir de imágenes satelitales tipo ASTER.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

Para el análisis hidrológico se hizo uso de la información disponible obtenida de la red de estaciones hidrometeorológicas de propiedad del IDEAM. Se escogieron estaciones pluviométricas con registros históricos de precipitaciones disponibles para descarga libre entre los años 2000 y 2022. Para la selección de las estaciones se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Disponibilidad de información
- Estaciones activas y suspendidas
- Distribución espacial de las estaciones dentro de la cuenca de estudio
- Estaciones ubicadas en diferentes condiciones topográficas
- Estaciones en diferentes zonas de uso de suelo

3.3 ANALISIS PLUVIOMÉTRICO

El análisis pluviométrico llevado a cabo para la investigación consistió en la descarga y procesamiento de datos de precipitaciones totales mensuales a nivel multianual a partir de los registros de estaciones IDEAM seleccionadas entre el año 2000 y 2022.

Con base en el comportamiento o régimen de precipitaciones de cada estación, se seleccionaron fechas de análisis para cada año, asegurando que en la evaluación se tuvieran en cuenta los siguientes escenarios:

- Meses secos
- Meses lluviosos
- Meses lluviosos de condición antecedente seca
- Meses lluviosos de condición antecedente húmeda.
- Meses secos de condición antecedente seca
- Meses secos de condición antecedente húmeda.

3.4 DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES

Teniendo en cuenta el área de la cuenca delimitada y las fechas seleccionadas para el cálculo y la evaluación del NDVI, se descargaron las imágenes satelitales del sensor MODIS13Q1, correspondientes al satélite de observación terrestre Terra.

3.5 CÁLCULO DEL NDVI

Con base en la información contenida en las imágenes satelitales MODIS13Q1 se hizo el respectivo procesamiento para extraer los valores de NDVI dentro de la cuenca del Canal del Dique en cada una de las fechas de análisis.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El análisis hidrológico consistió en la delimitación de la cuenca hidrográfica, selección de estaciones IDEAM, descarga de datos pluviométricos y posterior procesamiento de los registros de precipitaciones totales mensuales.

4.1.1 Delimitación de cuenca

A partir de una imagen satelital tipo ASTER Level 1T, la cual contiene información de elevaciones del terreno con resolución espacial de hasta 15 m, se delimitó la cuenca hidrográfica para el Canal del Dique (Ver Figura 4-1 y Figura 4-2).

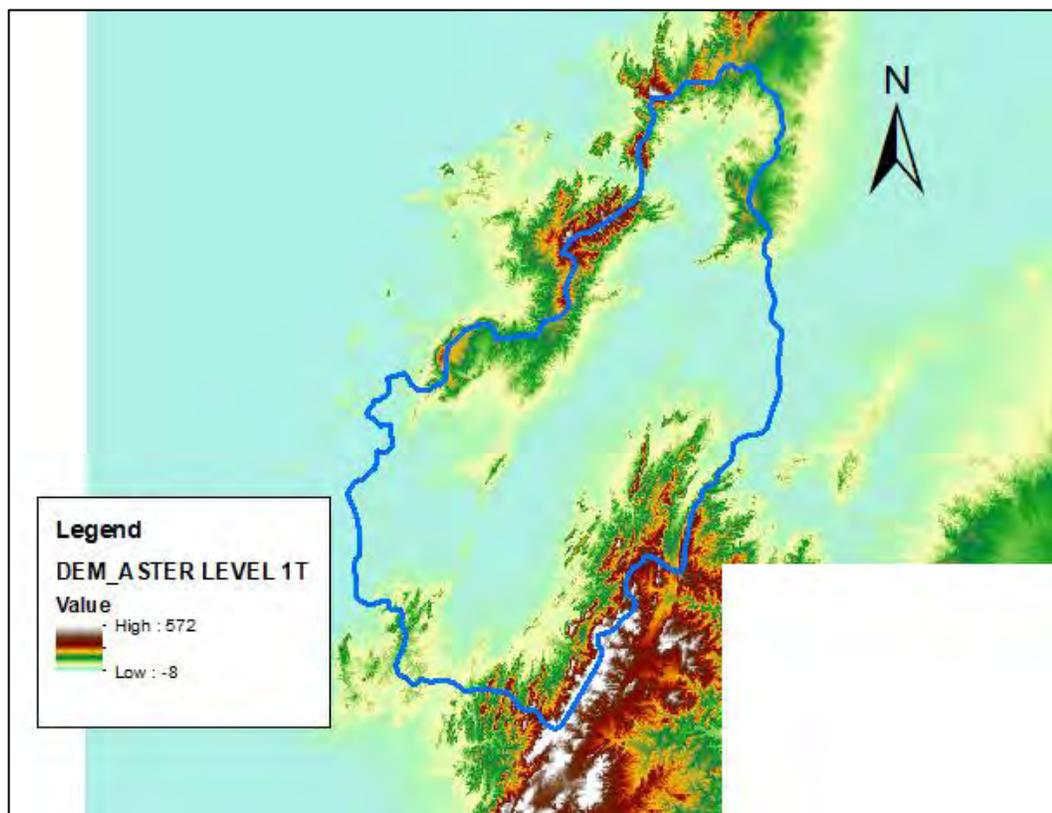


Figura 4-1. Cuenca hidrográfica del Canal del Dique
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-2. Imagen satelital de cuenca hidrográfica del Canal del Dique
 Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla presenta las características morfométricas de la cuenca delimitada para el Canal del Dique.

Tabla 4-1. Caracterización morfométrica de la cuenca.

Caracterización de cuenca	
Área (Km ²)	4529
Perímetro (km)	358
Longitud de cuenca (Km)	67.79
Ancho de cuenca (Km)	66.81
Factor de forma, Kf	0.99
Coefficiente de compacidad, Kc	1.50
Elevación máxima (msnm)	572
Elevación mínima (msnm)	0

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Selección de estaciones IDEAM

La cuenca del Canal del Dique se extiende a lo largo de 4529 Km² cubriendo territorio de los departamentos del Atlántico, Bolívar y Sucre. Para seleccionar las estaciones IDEAM en esta investigación se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- La mayor disponibilidad de registros pluviométricos de precipitación total mensual entre los años 2000 y 2022
- Que la estación pluviométrica se encuentre en estado activo de toma de datos.
- La ubicación geográfica del total de estaciones de tal forma que su distribución espacial cubra el área de estudio de la cuenca del Canal del Dique.
- Que las estaciones seleccionadas se encuentren ubicadas en diferentes condiciones topográficas, como, por ejemplo: diferentes elevaciones, próximas a cuerpos de agua, zonas montañosas, zonas inundables.
- Estaciones en diferentes zonas de uso de suelo. Cercanas a cascos urbanos y en zonas rurales.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, se analizaron las estaciones pluviométricas disponibles en la red de estaciones meteorológicas del IDEAM, localizadas dentro del área de la cuenca del Canal del Dique.

Luego de la evaluación de las estaciones se identificaron en total 12 estaciones pluviométricas que cumplen con los criterios de selección.

La Figura 4-3 presenta la localización de las estaciones seleccionadas dentro de la cuenca de estudio, mientras que en la Tabla 4-2 se puede observar en mayor detalle las coordenadas, ubicación geográfica y número de registros disponibles para precipitación total mensual.

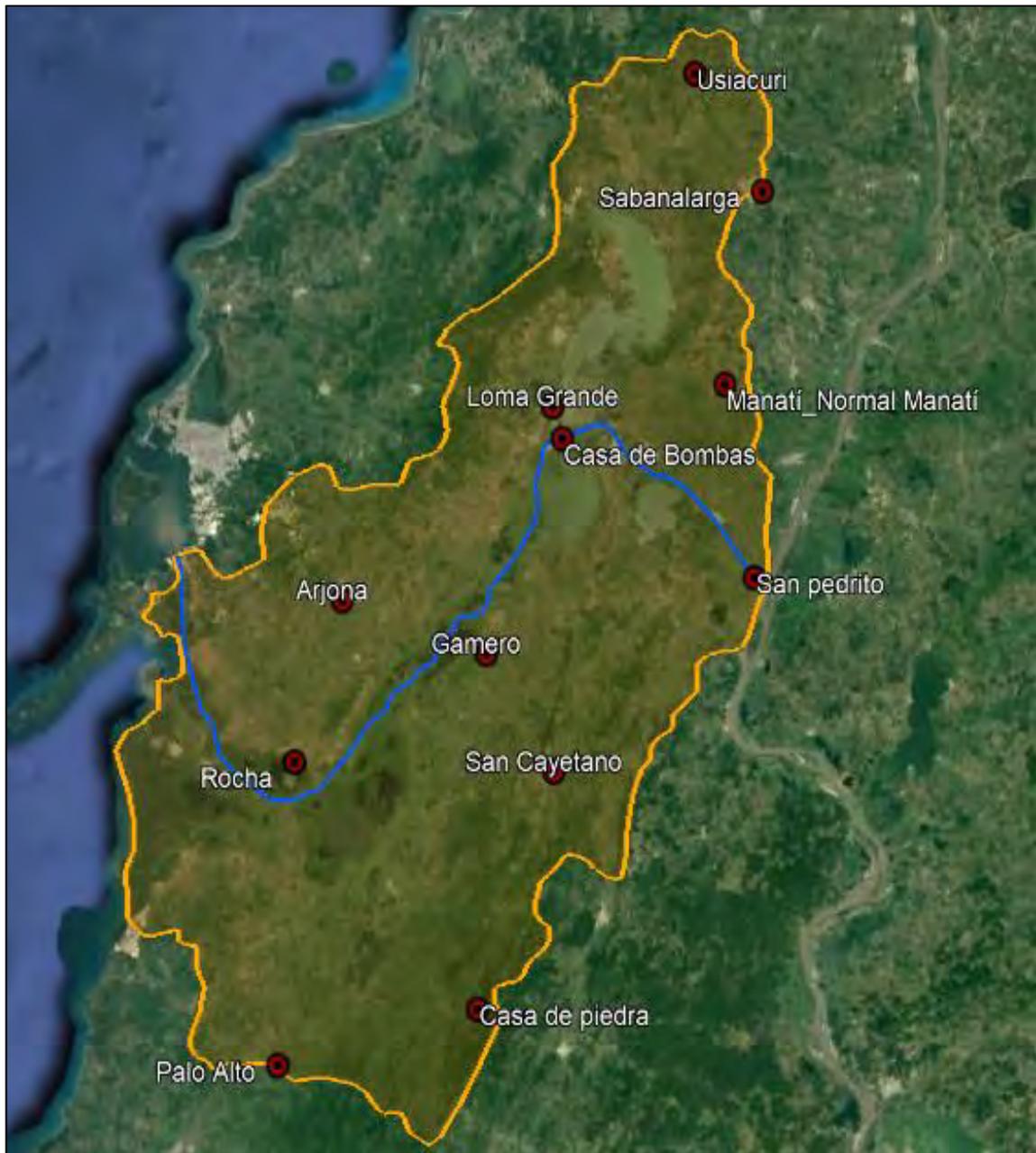


Figura 4-3. Estaciones pluviométricas seleccionadas dentro de la cuenca del Canal del Dique

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-2. Registro de estaciones IDEAM seleccionadas.

Estación	Departamento	Municipio	Latitud	Longitud	Registros de precipitación total mensual entre 2000 y 2022
Loma Grande	Atlántico	Repelón	10.430	-75.130	264
Casa de Bombas	Atlántico	Repelón	10.400	-75.120	271
Normal Manatí	Atlántico	Manatí	10.450	-74.950	259
Sabanalarga	Atlántico	Sabanalarga	10.630	-74.910	216
San Pedrito	Atlántico	Suán	10.270	-74.920	273
Usiacurí	Atlántico	Usiacurí	10.740	-74.980	259
Arjona	Bolívar	Arjona	10.250	-75.350	261
Casa de Piedra	Bolívar	San Jacinto	9.870	-75.210	255
Gamero	Bolívar	Mahates	10.200	-75.200	264
Rocha	Bolívar	Arjona	10.100	-75.400	271
San Cayetano	Bolívar	San Juan	10.090	-75.130	268
Palo Alto	Sucre	San Onofre	9.818	-75.418	272

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Procesamiento de información pluviométrica

De las 12 estaciones seleccionadas se descargaron los datos correspondientes a precipitación total mensual a nivel multianual entre el 2000 y el 2022. Se procesaron los registros de precipitaciones y se graficaron anualmente, con el propósito de seleccionar las fechas para evaluación del NDVI.

Las siguientes figuras presentan los datos procesados de registros de precipitación total mensual para cada una de las estaciones evaluadas.

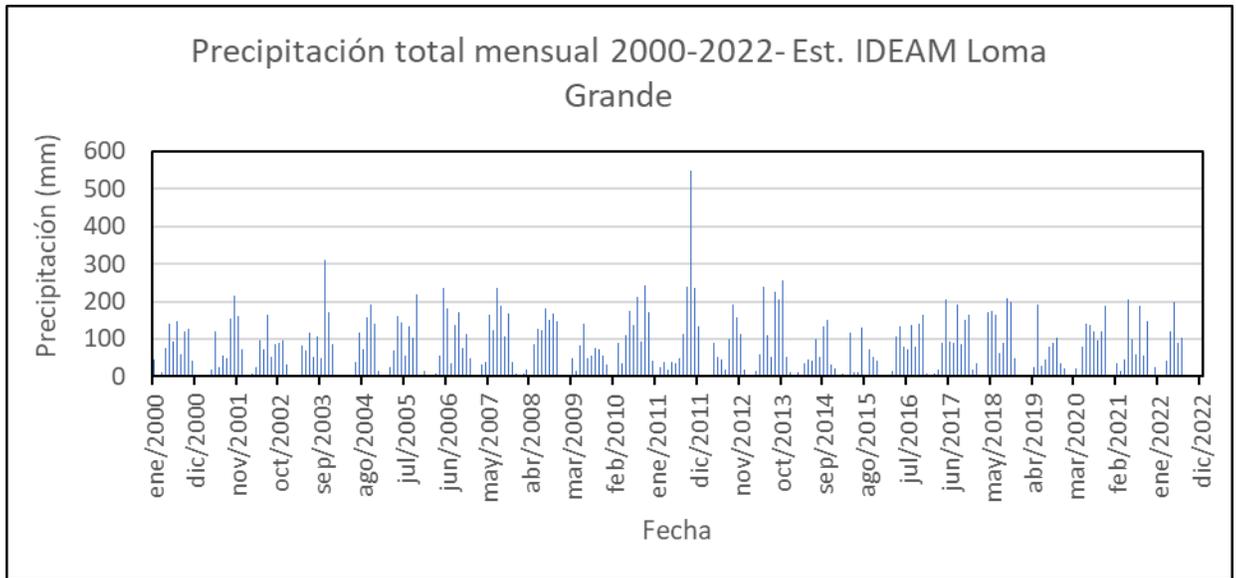


Figura 4-4. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Loma Grande.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

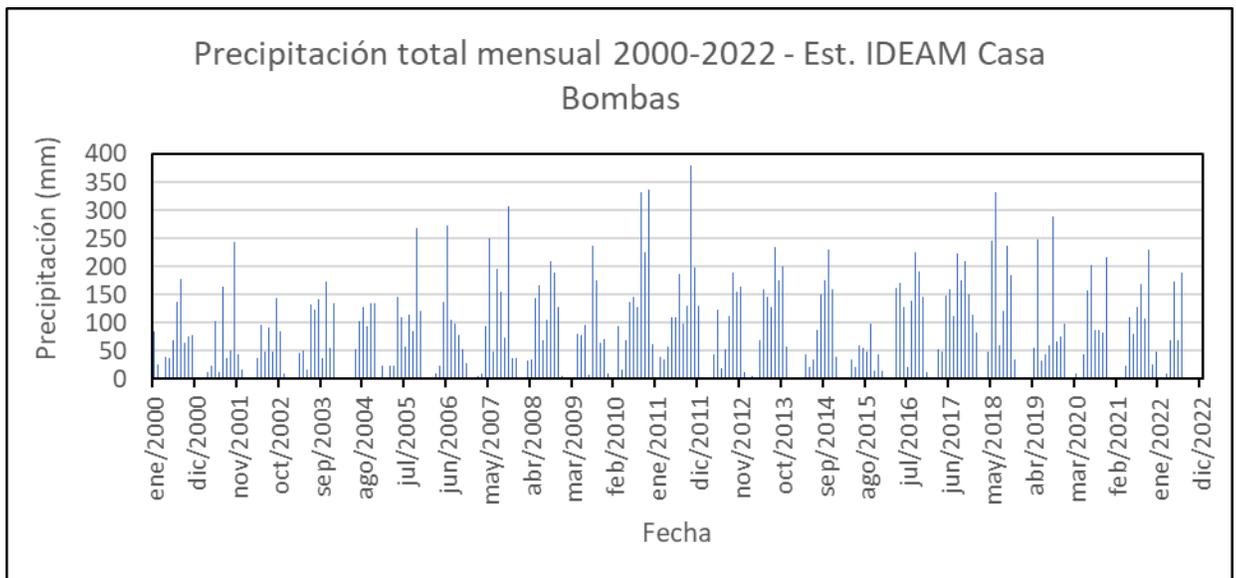


Figura 4-5. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Casa de Bombas.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

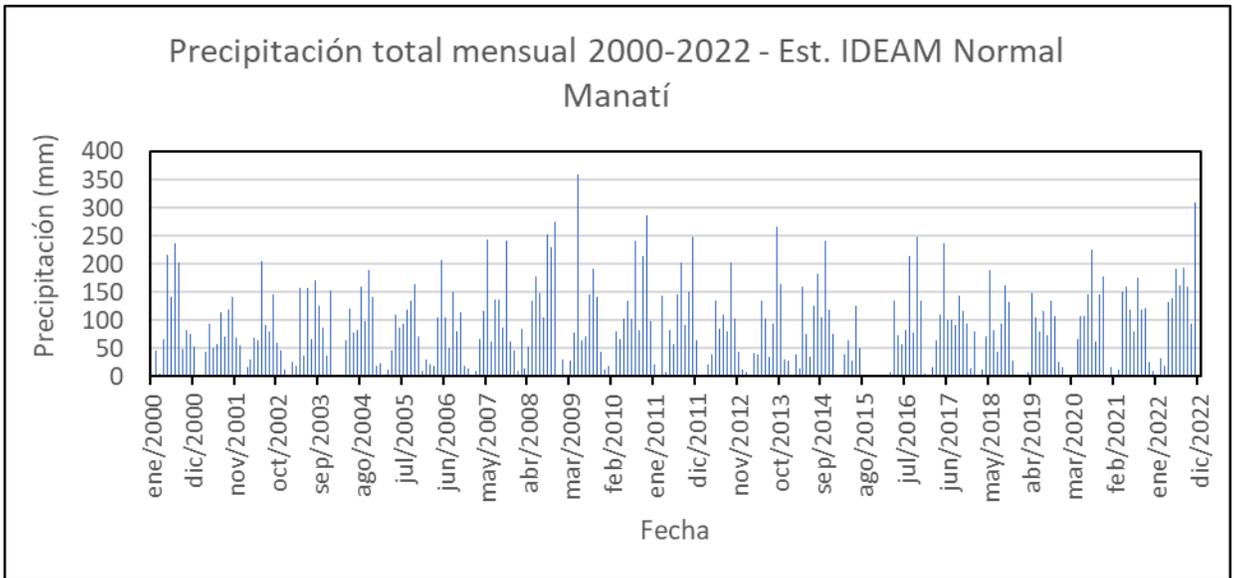


Figura 4-6. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Normal Manatí.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

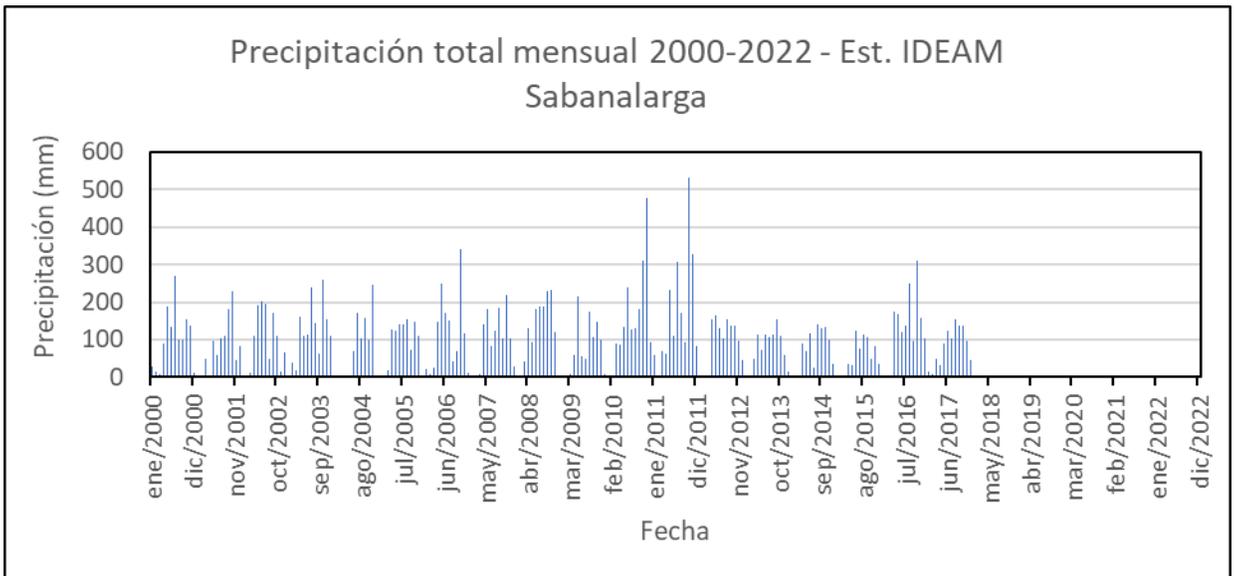


Figura 4-7. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Sabanalarga.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

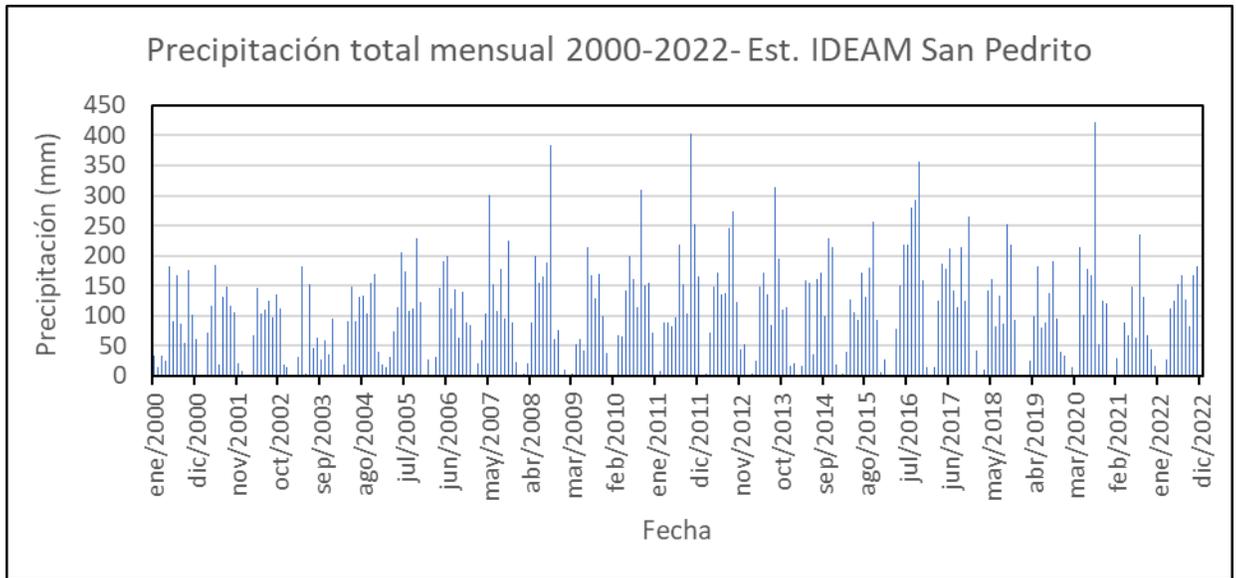


Figura 4-8. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM San Pedro.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

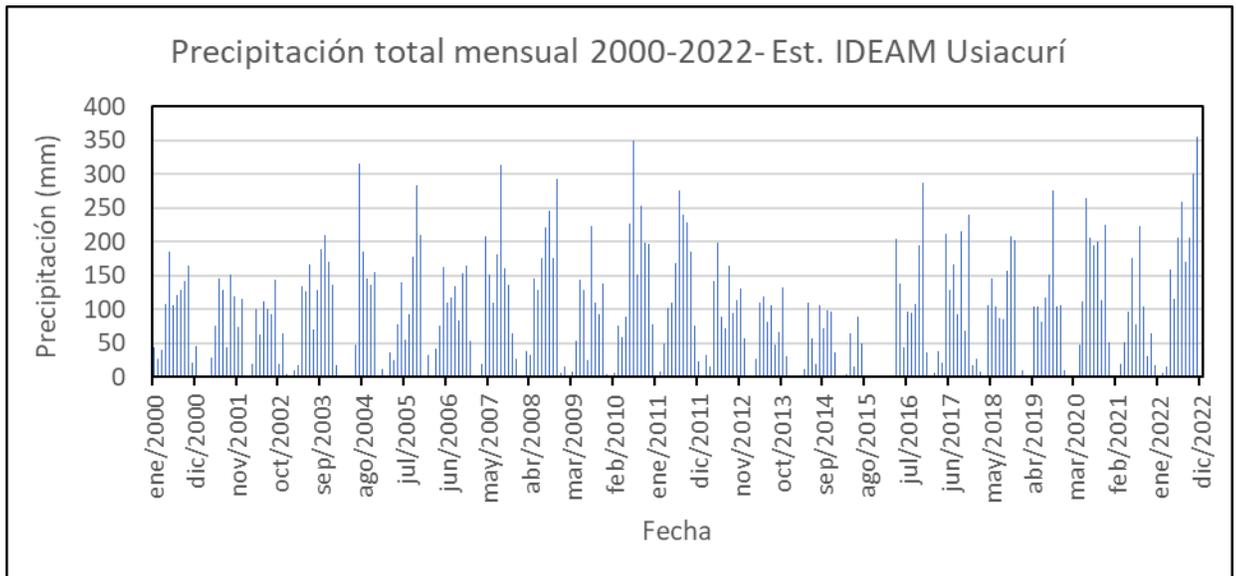


Figura 4-9. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Usiacurí.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

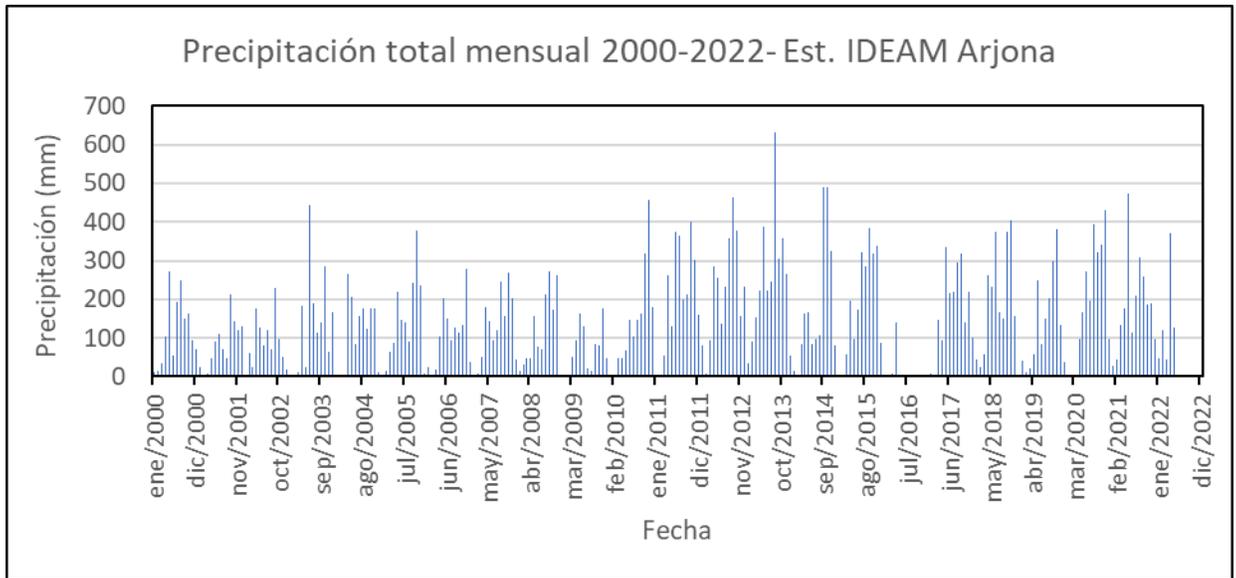


Figura 4-10. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Arjona.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

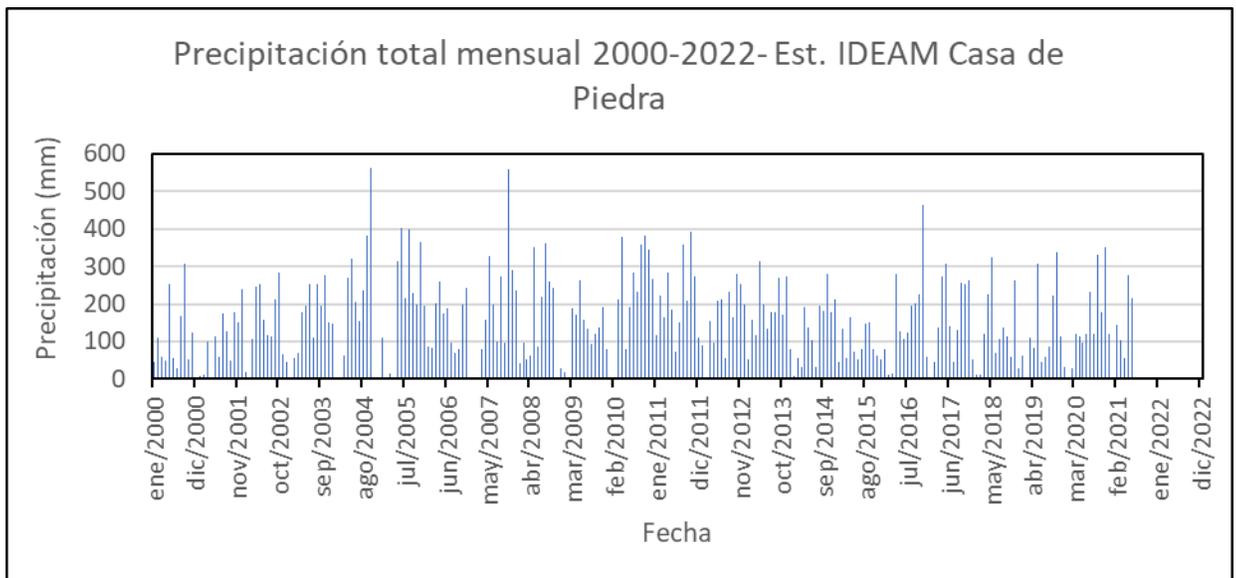


Figura 4-11. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Casa de Piedra.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

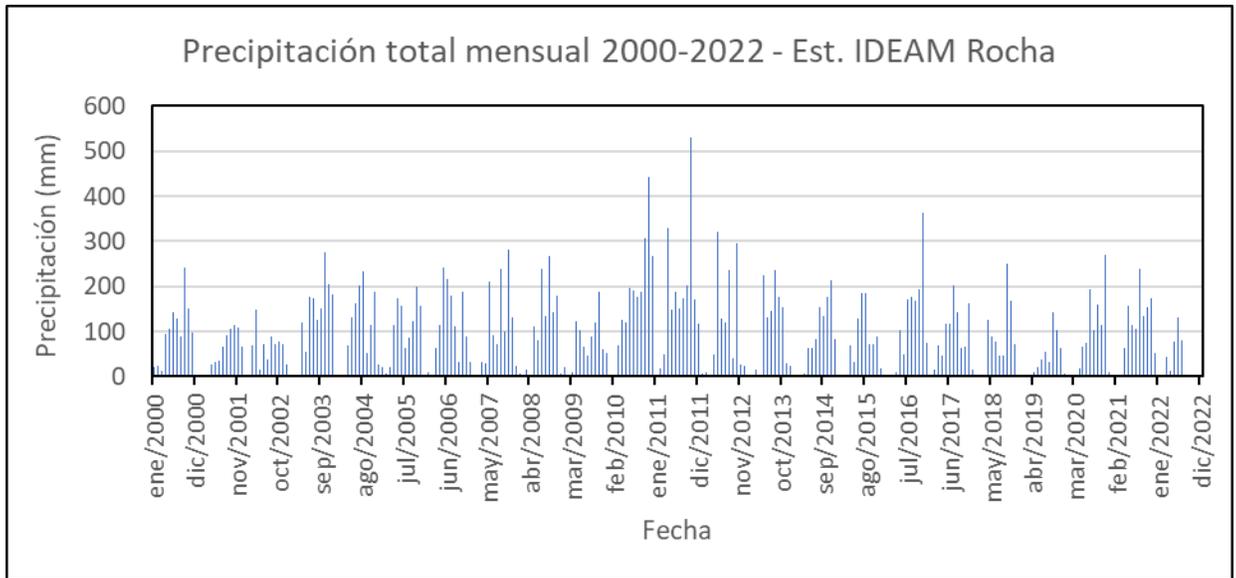


Figura 4-12. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Rocha.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

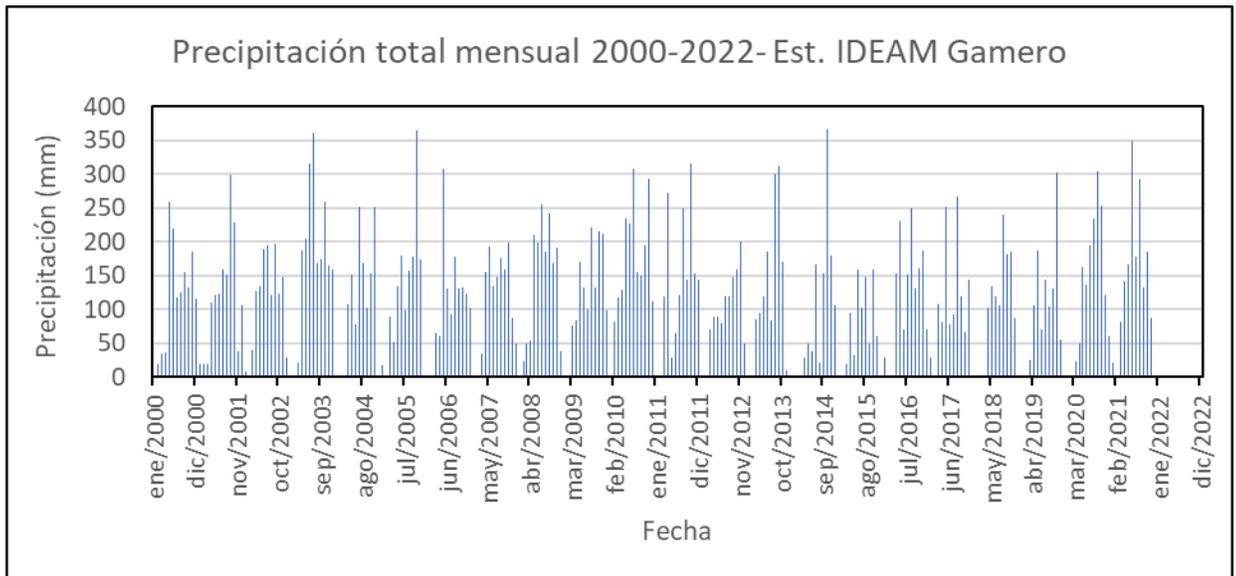


Figura 4-13. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Gamero.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

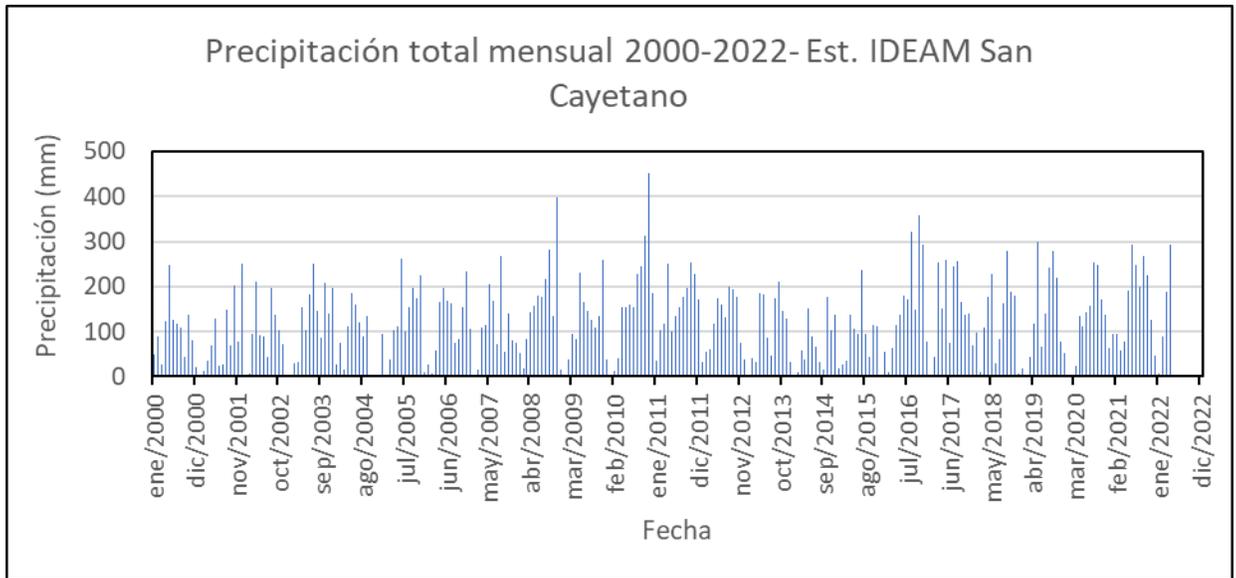


Figura 4-14. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM San Cayetano.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

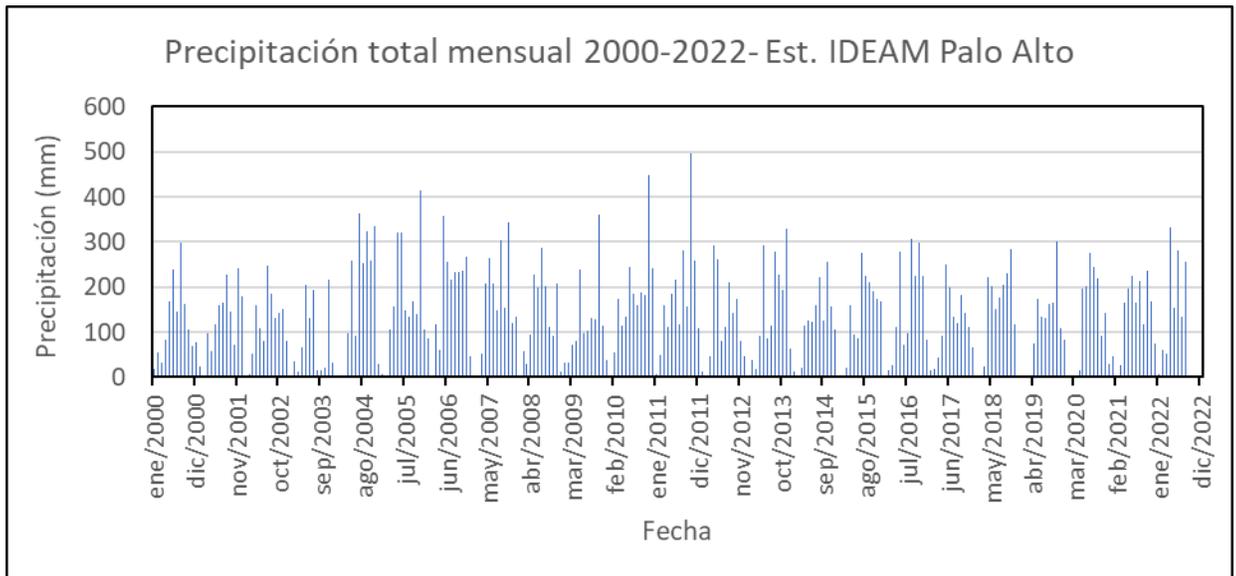


Figura 4-15. Precipitación total mensual entre 2000 y 2022. Estación IDEAM Palo Alto.

Fuente: Elaboración propia con registros IDEAM.

Una vez procesada la información de registros pluviométricos de precipitación total mensual, se seleccionaron en total 50 fechas de análisis para el cálculo del NDVI en la cuenca de estudio. Las fechas seleccionadas corresponden a meses que representan distintas condiciones hidrológicas en la cuenca, de tal forma que la evaluación del NDVI tuviera en cuenta fechas de meses secos, meses lluviosos, meses de condición antecedente seca y meses de condición antecedente húmeda.

Teniendo en cuenta el evento de inundación presentado en la zona de influencia directa de Canal del Dique en el año 2010; se tiene un especial interés en los años 2010, 2011 y 2012 con el fin de observar a respuesta de la cuenca, asociado a los cambios del NDVI antes, durante y después del evento de inundación.

Tabla 4-3. Fechas para evaluación del NDVI.

Fechas seleccionadas	
1 mar-00	26 jun-11
2 ago-00	27 oct-11
3 ago-01	28 feb-12
4 nov-01	29 jun-12
5 abr-02	30 nov-12
6 sep-02	31 feb-13
7 ene-03	32 nov-13
8 jun-03	33 mar-14
9 feb-04	34 nov-14
10 ago-04	35 feb-15
11 ene-05	36 nov-15
12 sep-05	37 mar-16
13 feb-06	38 nov-16
14 oct-06	39 mar-17
15 mar-07	40 nov-17
16 nov-07	41 feb-18
17 ene-08	42 nov-18
18 may-08	43 mar-19
19 nov-08	44 oct-19
20 feb-09	45 abr-20
21 oct-09	46 nov-20
22 mar-10	47 mar-21
23 oct-10	48 sep-21
24 dic-10	49 jun-22
25 feb-11	50 oct-22

Fuente: Elaboración propia

4.2 CÁLCULO DE NDVI

Para el cálculo de los índices de vegetación del terreno se hace uso de imágenes satelitales cuyas bandas espectrales contiene información de la banda visible del rojo y la banda del infrarrojo cercano. Estas bandas permiten aplicar la ecuación del cálculo del NDVI descrita en el numeral 2.1 Marco Teórico de Referencia.

En esta oportunidad se hizo uso de imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de descarga libre del satélite Terra. Se descargaron imágenes tipo MOD13Q1 con resolución espacial de 250 m. El satélite captura imágenes aéreas diarias en un periodo de 16 días; a partir de las cuales se puede escoger el mejor valor de pixel disponible tomando criterios como nubosidad y ángulo de visión. La ventaja que presenta las imágenes MOD13Q1 es que proveen dos capas primarias de información referente a la vegetación, como lo son el NDVI y el EVI (Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 2020) Por lo tanto, el uso de imágenes MODIS ya contiene la información requerida de NDVI y no es necesario el cálculo de los valores haciendo uso de la banda 1 (rojo visible) y banda 2 (infrarrojo cercano). Cabe resaltar que esta es la nomenclatura propia de este satélite.

Los productos MOD13Q1 versión 6, utilizados en esta investigación, contienen 12 bandas espectrales, siendo la banda 0 la correspondiente al NDVI. Esta banda presenta un valor de escala de 0.0001, por lo que fue necesario multiplicar cada imagen por el factor de escala para obtener los valores reales de NDVI en cada pixel.

Se presenta como ejemplo el cálculo del NDVI de la cuenca para la fecha correspondiente a marzo del año 2000 haciendo uso de la herramienta ArcMap. Inicialmente se cargaron las imágenes MOD13Q1, seleccionando la banda 0 que equivale a la información escalada de NDVI.

Dada la extensión de la cuenca del Canal del Dique, fue necesario descargar 2 imágenes para cada fecha de análisis y posteriormente unir las para su posterior procesamiento (Ver Figura 4-16 y Figura 4-20).

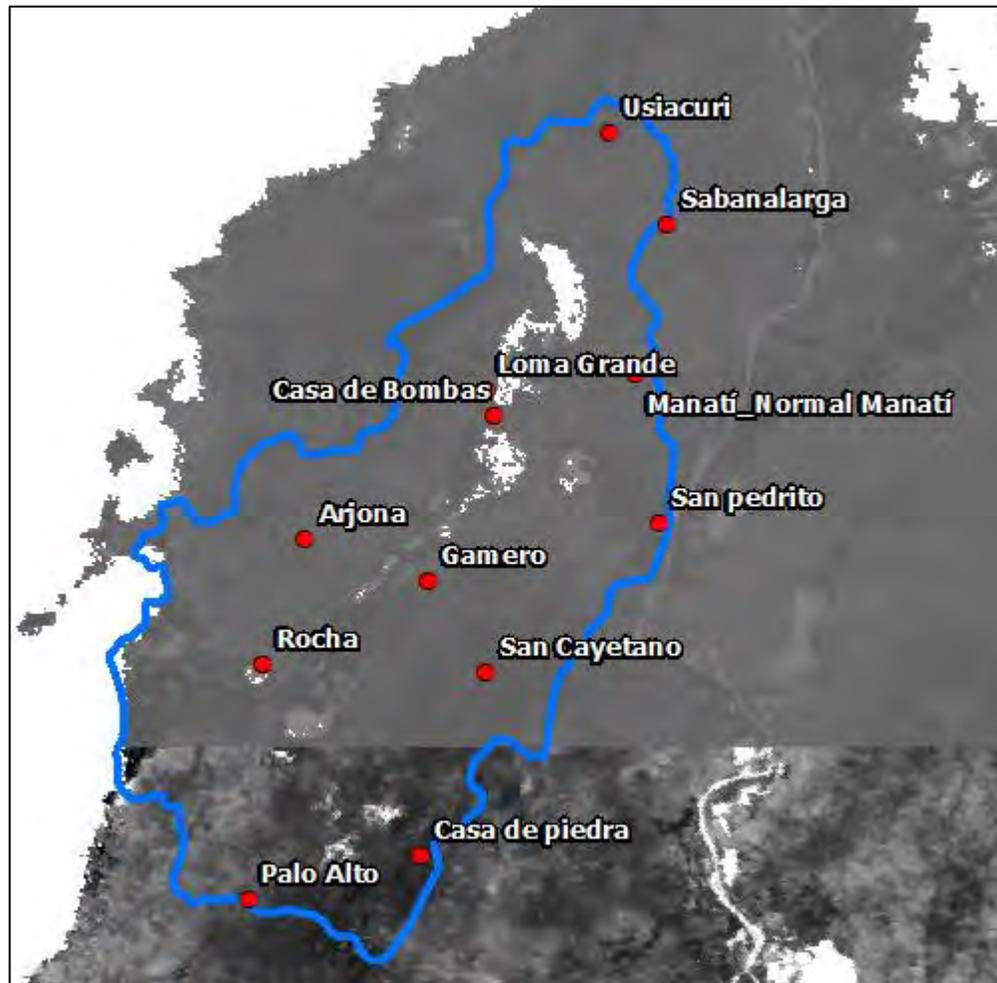


Figura 4-16. Imágenes MOD13Q1 de marzo de 2000 para la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia con imágenes MODIS.

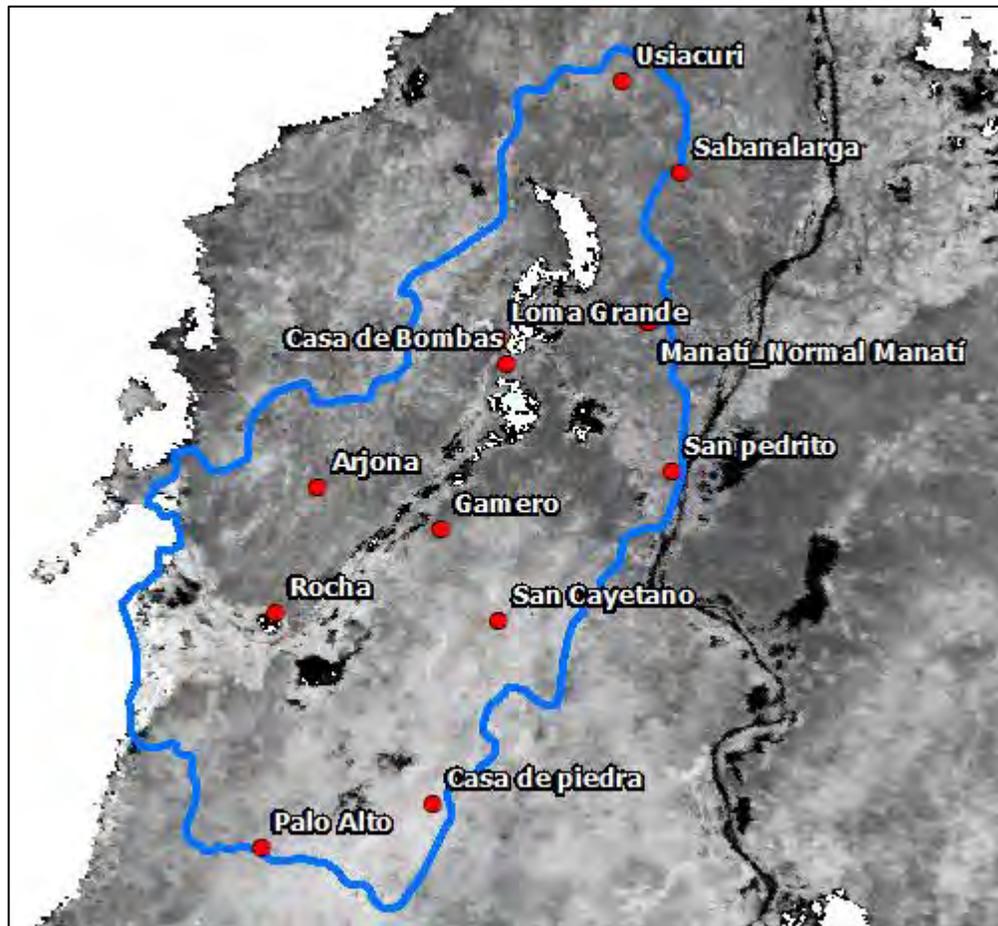


Figura 4-17. Imagen consolidada MOD13Q1 de marzo de 2000 para la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia con imágenes MODIS.

Mediante calculadora de ráster de ArcMap se multiplicó el valor de cada celda del ráster consolidado por el factor de escala (0.0001) para los valores de NDVI de la imagen MODIS13Q1. El ráster resultante (Figura 4-18) corresponde a los valores finales de NDVI para la fecha de la imagen MODIS13Q1.

Este proceso se repitió para cada una de las 50 fechas de análisis, los resultados se observan desde la Figura 4-19 hasta la Figura 4-27. En las cuales se conserva la misma escala de colores de NDVI utilizada en la Figura 4-18

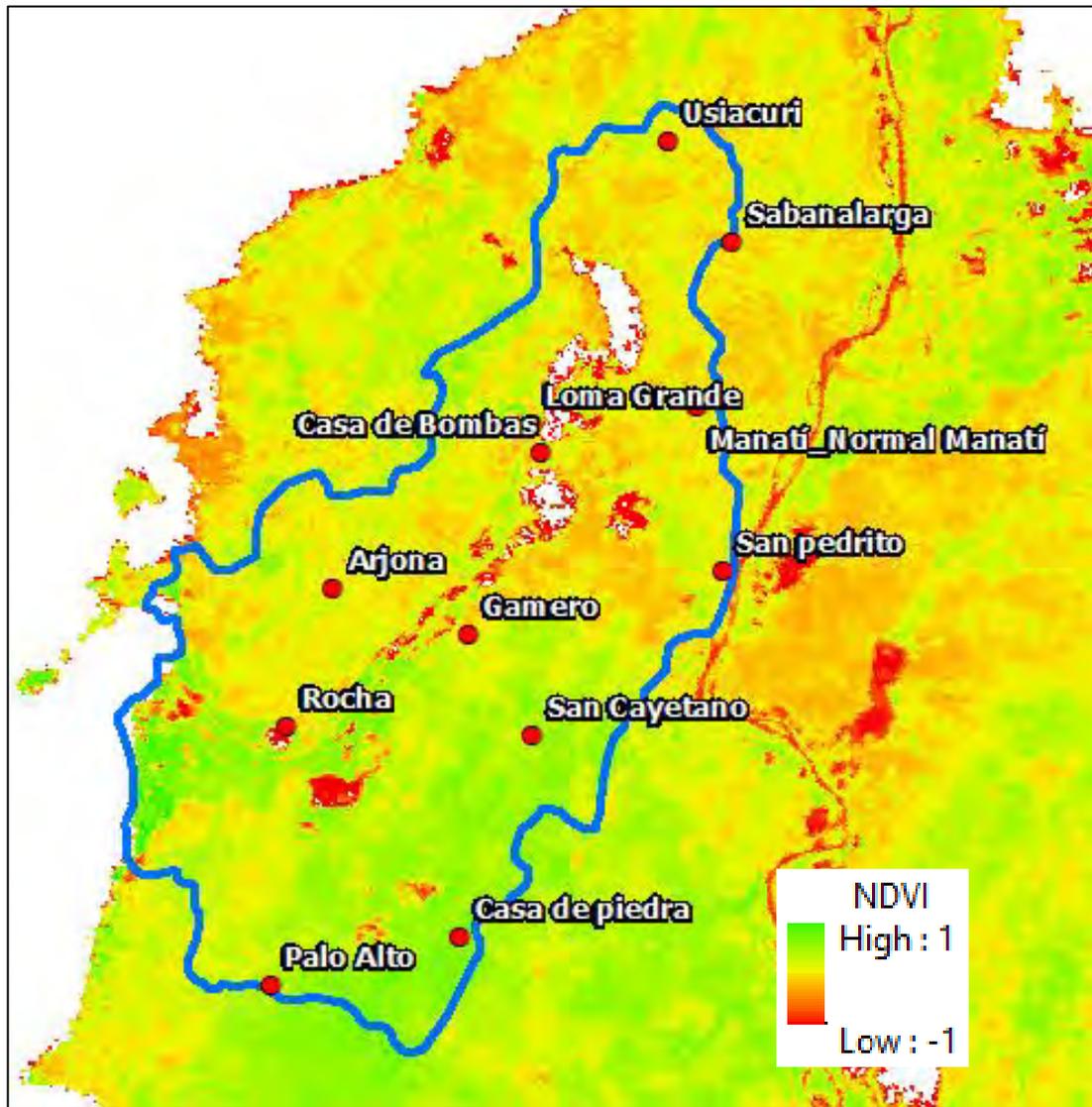


Figura 4-18. Ráster con valores de NDVI para marzo de 2000 en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia con imágenes MODIS.

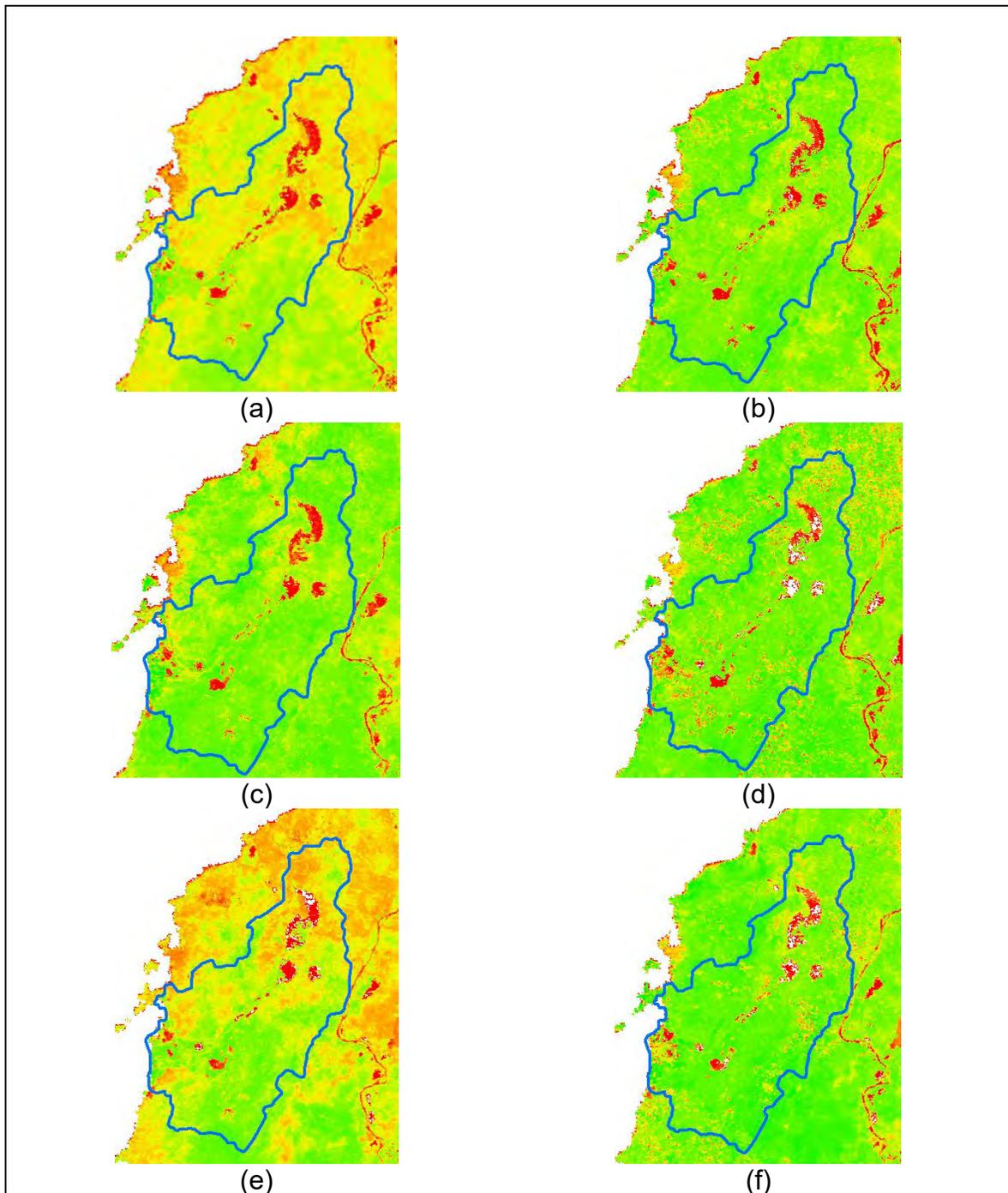


Figura 4-19. NDVI calculado para 03/2000 (a), 08/2000 (b), 08/2001 (c), 11/2001 (d), 04/2002 (e) y 09/2002 (f).
Fuente: Elaboración propia.

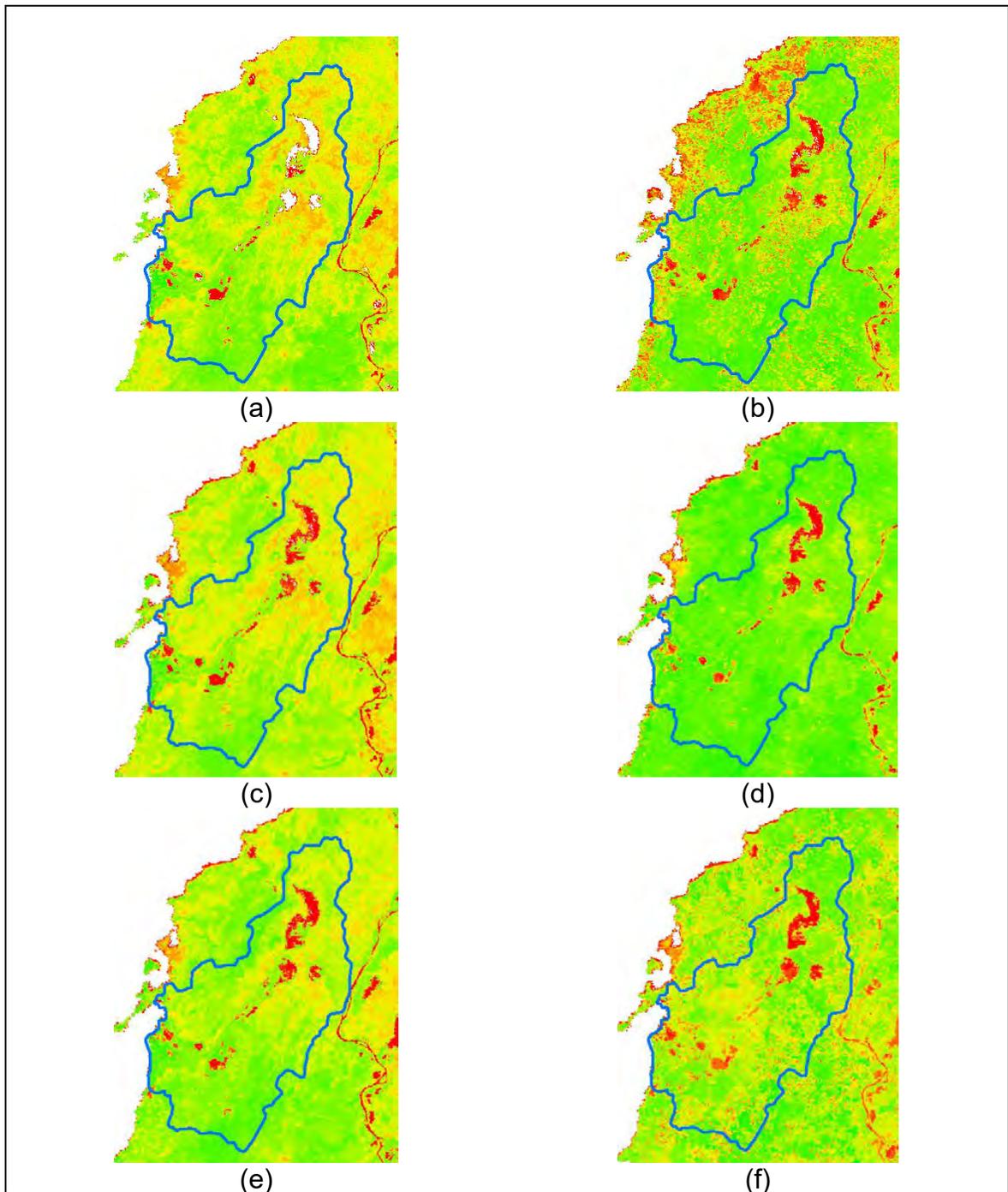


Figura 4-20. NDVI calculado para 01/2003 (a), 06/2003 (b), 02/2004 (c), 08/2004 (d), 05/2005 (e) y 09/2005 (f).
Fuente: Elaboración propia.

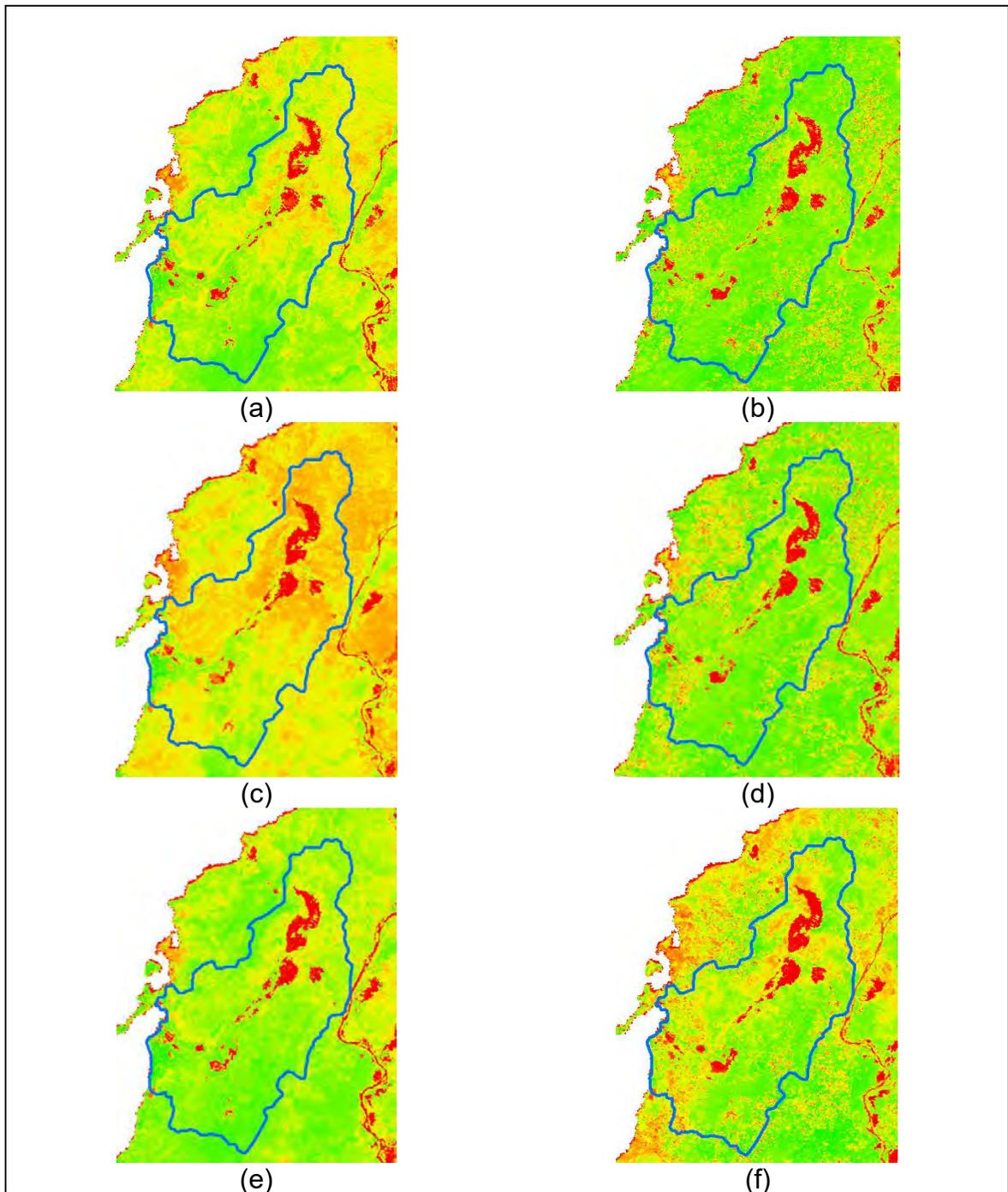


Figura 4-21. NDVI calculado para 02/2006 (a), 10/2006 (b), 03/2007 (c), 11/2007 (d), 01/2008 (e) y 05/2008 (f).
Fuente: Elaboración propia.

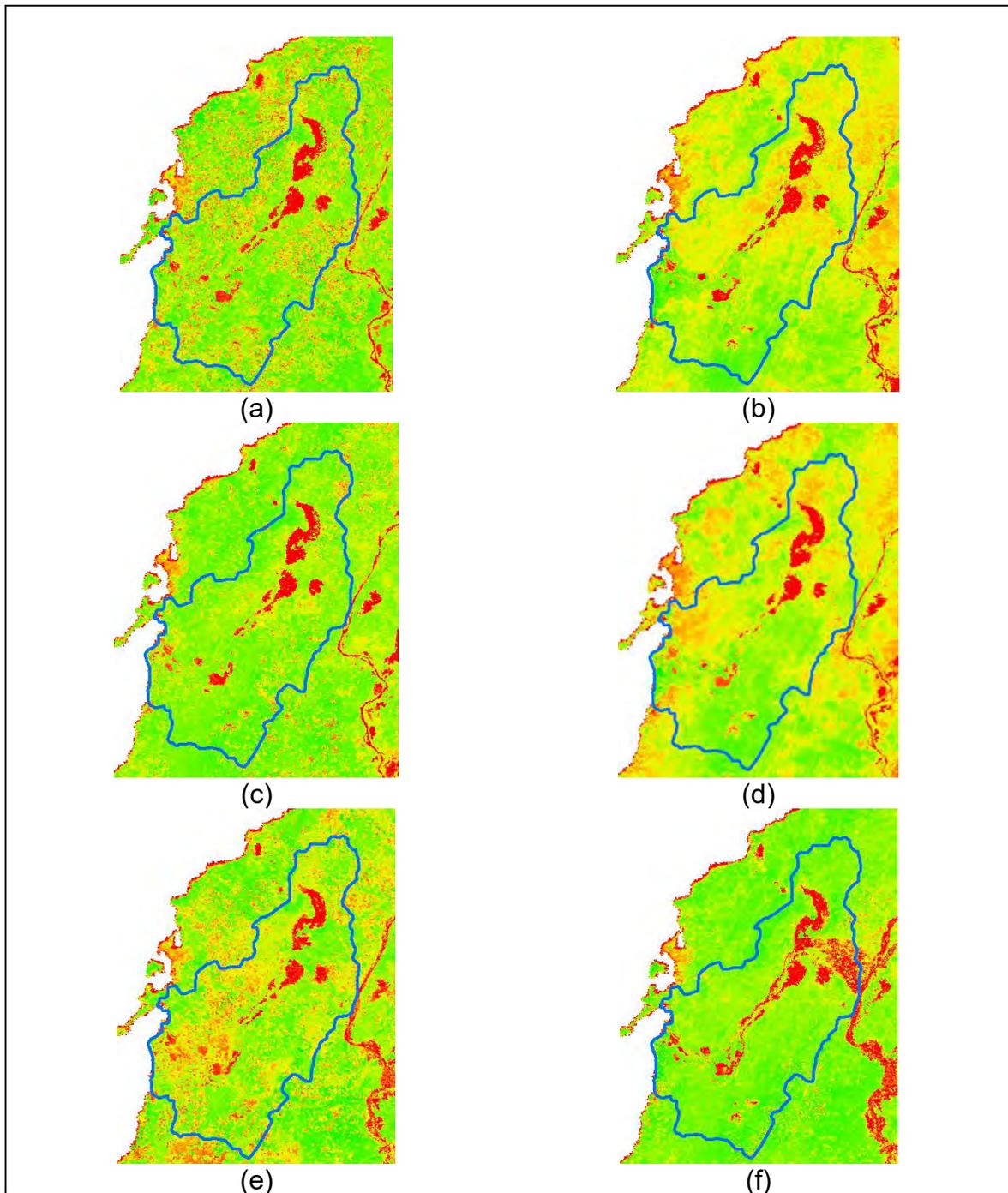


Figura 4-22. NDVI calculado para 11/2008 (a), 02/2009 (b), 10/2009 (c), 03/2010 (d), 10/2010 (e) y 12/2010 (f).
Fuente: Elaboración propia.

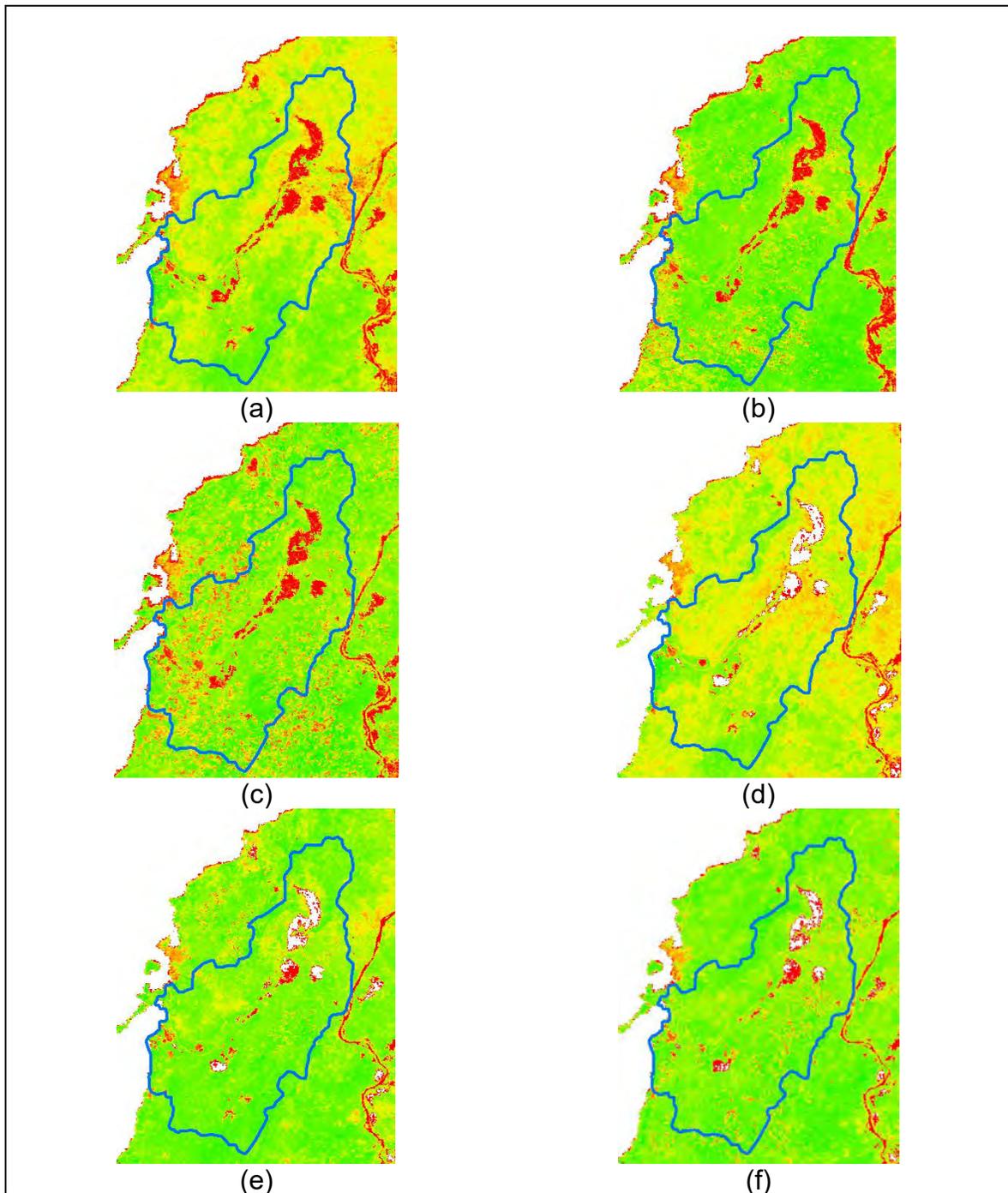


Figura 4-23. NDVI calculado para 02/2011 (a), 06/2011 (b), 10/2011 (c), 02/2012 (d), 06/2012 (e) y 11/2012 (f).
Fuente: Elaboración propia.

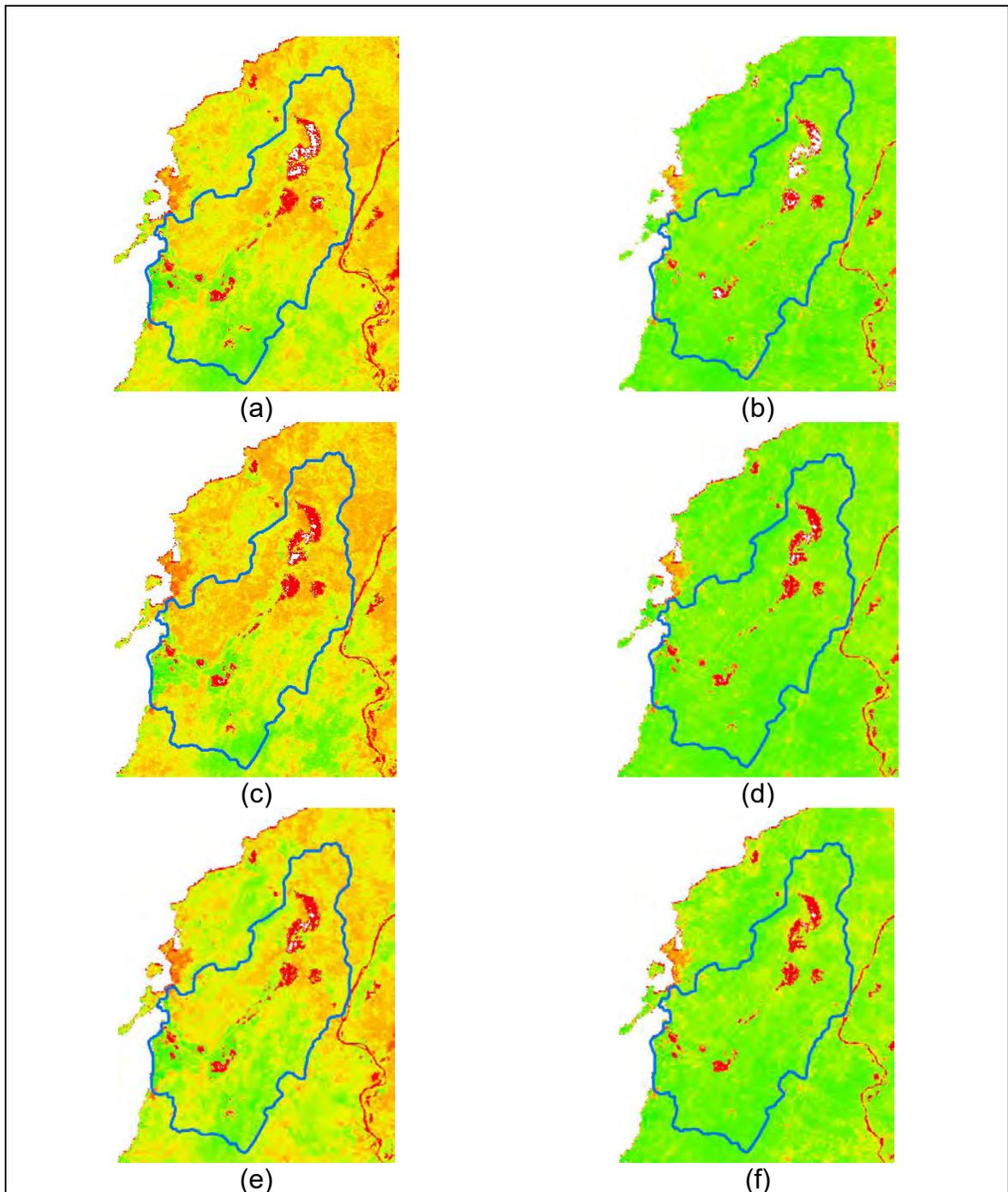


Figura 4-24. NDVI calculado para 02/2013 (a), 11/2013 (b), 03/2014 (c), 11/2014 (d), 02/2015 (e) y 11/2015 (f).
Fuente: Elaboración propia.

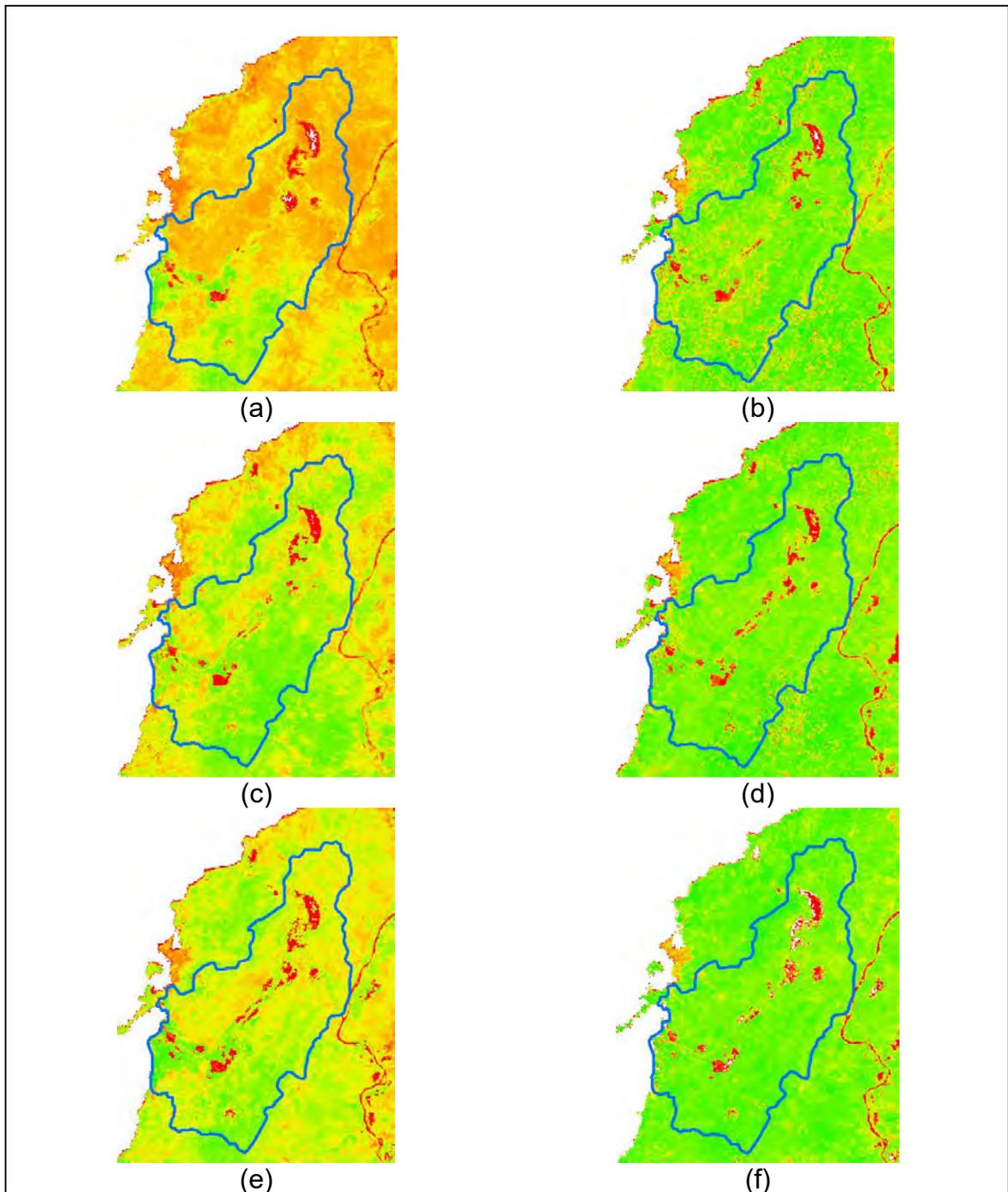


Figura 4-25. NDVI calculado para 03/2016 (a), 11/2016 (b), 03/2017 (c), 11/2017 (d), 02/2018 (e) y 11/2018 (f).
Fuente: Elaboración propia.

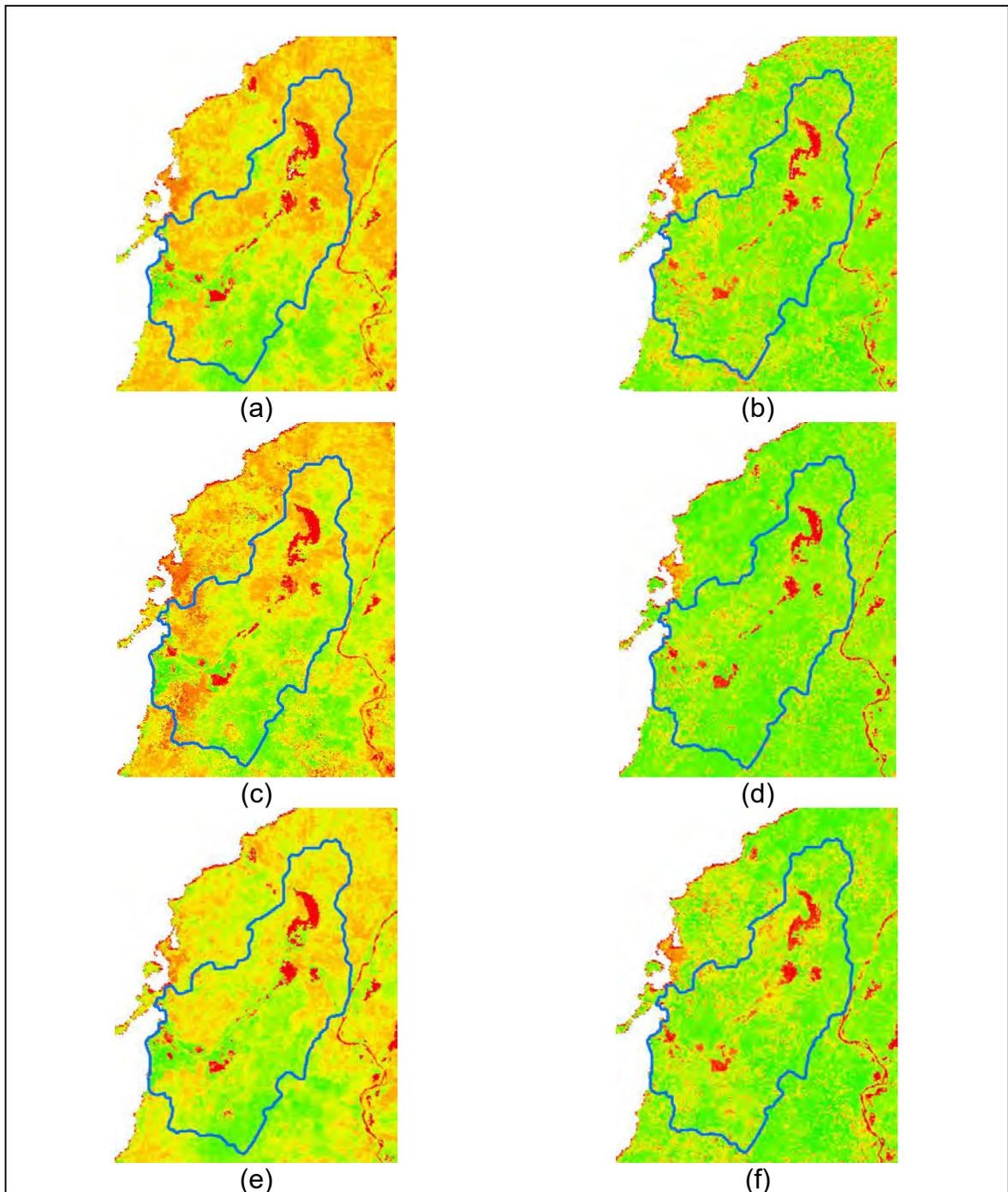


Figura 4-26. NDVI calculado para 03/2019 (a), 10/2019 (b), 04/2020 (c), 11/2020 (d), 03/2021 (e) y 09/2021 (f).
Fuente: Elaboración propia.

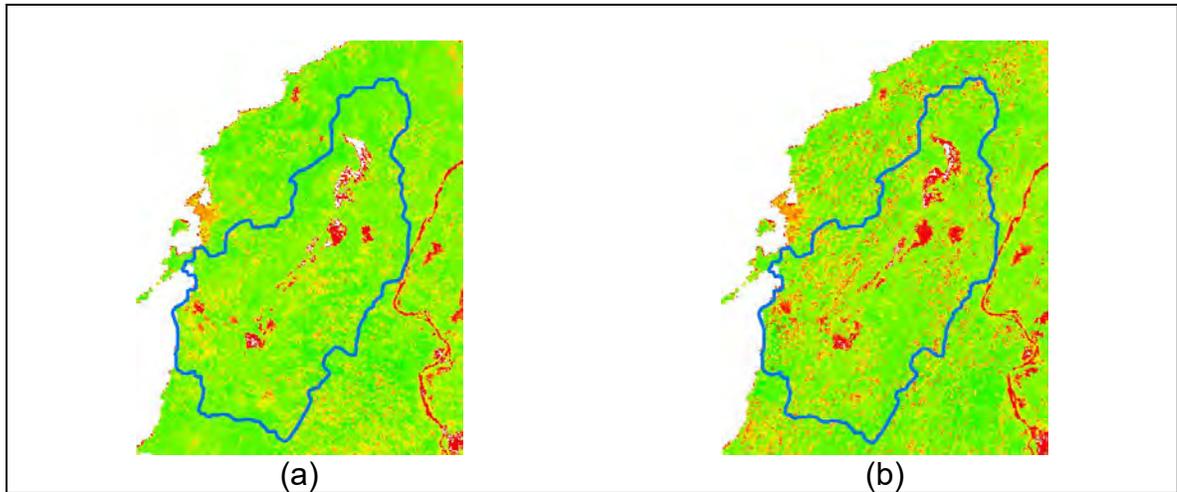


Figura 4-27. NDVI calculado para 06/2022 (a) y 10/2022 (b)
Fuente: Elaboración propia.

4.3 CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI Y PRECIPITACIÓN

Para poder determinar el valor de NDVI correspondiente a cada una de las 12 estaciones evaluadas, se calcularon los polígonos de Thiessen a partir de la ubicación de cada estación dentro de la cuenca del Canal del Dique (ver Figura 4-28).

Para generar los polígonos de Thiessen se utilizó el promedio de precipitación total anual; de tal manera que el polígono asociado a cada estación permitiera generar un valor de NDVI promedio para el polígono, y no un valor puntual en la estación.

La correlación entre el NDVI y los factores climáticos se realizó mediante el análisis estadístico de correlación lineal de Pearson (r), por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal entre dos variables, el cual presenta un rango que oscila entre 1 y -1. indicando si la vegetación y los factores climáticos están correlacionados de forma positiva o negativa, respectivamente (Ghebregabher et al., 2020); el valor de significación de los resultados P-value se determinó para afirmar que existe una relación lineal significativa, cuando el nivel crítico P fuera menor que el nivel de significancia establecido en 5%.

El coeficiente de determinación R^2 también fue calculado.

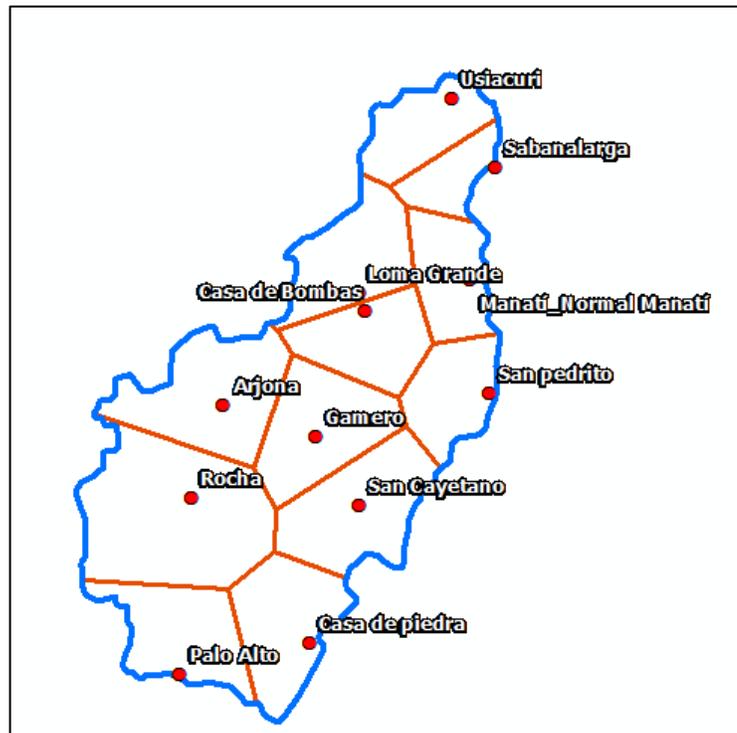


Figura 4-28. Polígonos de Thiessen para estaciones en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia.

Con los polígonos de Thiessen definidos, se extrajeron los datos correspondientes al NDVI promedio en cada polígono para cada una de las 50 fechas de análisis y se procedió a realizar la correlación con los datos de precipitación total mensual obtenidos del análisis hidrológico.

4.3.1 NDVI vs Precipitación total mensual

Inicialmente se determinó la correlación entre la precipitación total mensual para cada una de las 50 fechas analizadas en las 12 estaciones IDEAM seleccionada, para un total de 578 datos de NDVI y precipitación total mensual (ver Figura 4-29).

A partir de la correlación y ajuste lineal de los datos se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.73, con un valor de significancia menor a 5% ($P < 0.01$) indicando una correlación positiva y fuerte entre el NDVI y la precipitación total mensual registrada por cada una de las estaciones. Esto es de esperarse dado que la cobertura vegetal de la cuenca varía en función del ciclo hidrológico; meses lluviosos propician el crecimiento de las plantas (Levia & Germer, 2015). La precipitación directa es la principal fuente de agua en un ecosistema forestal, ya que

aumentan la densidad del follaje y por ende propicia la intercepción e infiltración del agua (Liang et al., 2009; Siles et al., 2010)

Sin embargo, el coeficiente de determinación (R^2) de 0.54 sugiere que el 54% del NDVI (variable dependiente) puede ser determinado o predicho por la precipitación total mensual en algún punto de la cuenca.

Lo anterior se debe a la alta dispersión observada en los datos correspondientes a los meses donde la precipitación total fue muy baja o nula. Por ejemplo, meses con una precipitación total mensual entre 0 y 20 mm de lluvia, muestran un rango de NDVI de 0.40, con valores que oscilan entre 0.33 y 0.73.

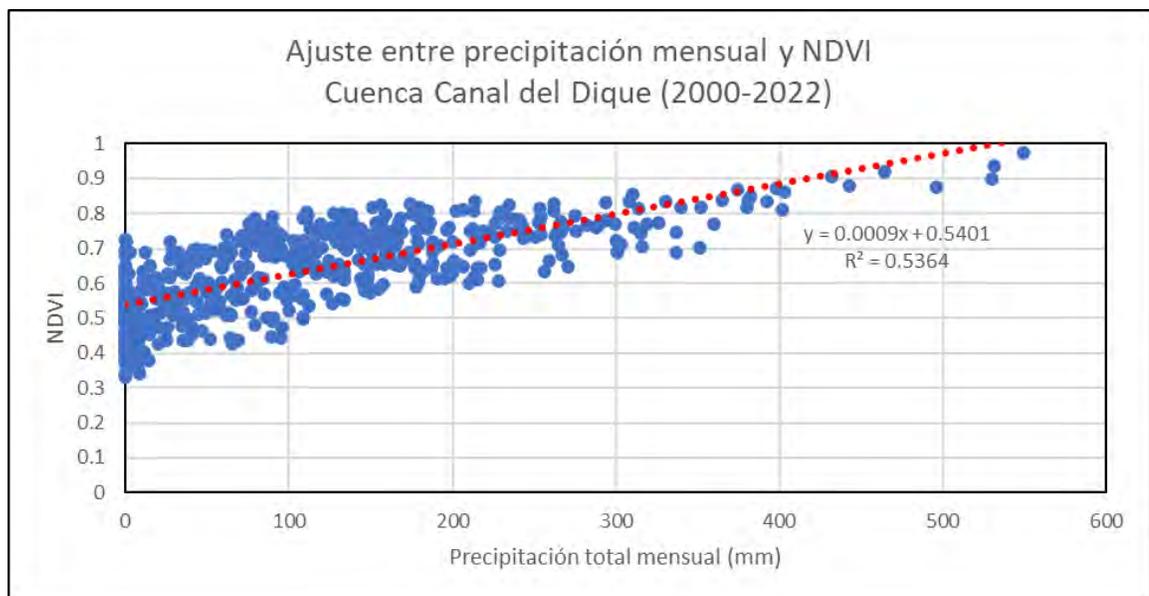


Figura 4-29. Correlación entre precipitación mensual y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 NDVI vs Precipitación antecedente

Dada la alta dispersión en los datos al comparar los valores de NDVI con la precipitación total mensual, se realizó la comparación teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente de la cuenca.

Teniendo en cuenta que el NDVI estaría en función de la cantidad de precipitación que ha recibido la cuenca, no en una fecha específica sino desde un tiempo antecedente, se procedió a comparar los valores obtenidos de NDVI con la sumatoria de datos de precipitación en los últimos 3 meses; se escoge este periodo

de tiempo teniendo en cuenta el comportamiento mensual de la lluvia en cada una de las estaciones, en el que de forma general cada 3 meses había un cambio significativo; así mismo se considera que es un tiempo prudente de respuesta de la cuenca en término de cobertura vegetal avalado en otros estudios (De la Casa & Ovando, 2006). De esta forma se espera que un terreno donde no se hayan presentado mayores precipitaciones en los últimos 3 meses debería presentar niveles bajos de NDVI; mientras que, si la cuenca viene recibiendo altas precipitaciones desde los 3 meses anteriores a la fecha de análisis, entonces este comportamiento se debe ver reflejado en valor más altos de NDVI.

Se procedió a correlacionar los 578 datos de NDVI para las distintas estaciones en cada fecha de análisis, con los valores de precipitación antecedente; tomando la precipitación antecedente como la sumatoria de precipitación total mensual desde 3 meses anteriores a la fecha de análisis de NDVI (ver Figura 4-30).

La relación entre valores de NDVI y precipitación antecedente, presenta un mejor ajuste en comparación con la precipitación total mensual. Se observa menos dispersión en los datos para valores menores a 20 mm de precipitación.

A partir de la correlación y ajuste lineal de los datos se obtuvo un coeficiente de correlación (r) de 0.85, indicando una correlación positiva y muy fuerte entre el NDVI y la precipitación antecedente. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.72 sugiere que el 72% del NDVI (variable dependiente) puede ser determinado o predicho por la precipitación antecedente a 3 meses.

La fuerte correlación entre el NDVI y la precipitación en la cuenca del Canal del Dique presenta valores similares de ajuste (R) en otras investigaciones. Ghebregabher (Ghebregabher et al., 2020) correlacionó datos de NDVI obtenidos igualmente de imágenes MODIS con registros de precipitación anual, obteniendo un coeficiente de correlación de Pearson de $r=0.75$, indicando igualmente una fuerte correlación entre ambas variables.

Este comportamiento indica que la respuesta de la cobertura vegetal no es inmediata al iniciar o finalizar una temporada lluviosa, sino que guarda una memoria de sus condiciones antecedentes (M. C. Wang et al., 2004) (De la Casa & Ovando, 2006).

Hao (Hao et al., 2012) evaluó la respuesta de la cobertura vegetal para la cuenca alta del río Amarillo en China con imágenes MODIS para diferentes escenarios. Obteniendo resultados de correlación muy fuerte (valores de r entre 0.815 y 0.951) entre el NDVI y la precipitación antecedente anual y mensual.

No necesariamente al presentar un mes con altos registros de precipitación la cobertura vegetal vaya a reflejar de forma inmediata un NDVI con un valor alto cercano a 1.0. Existe un tiempo de respuesta en la capa vegetal, asociado a las condiciones de humedad que guarda el suelo y la cantidad de agua que han logrado absorber las plantas en meses anteriores. (Ding et al., 2007).

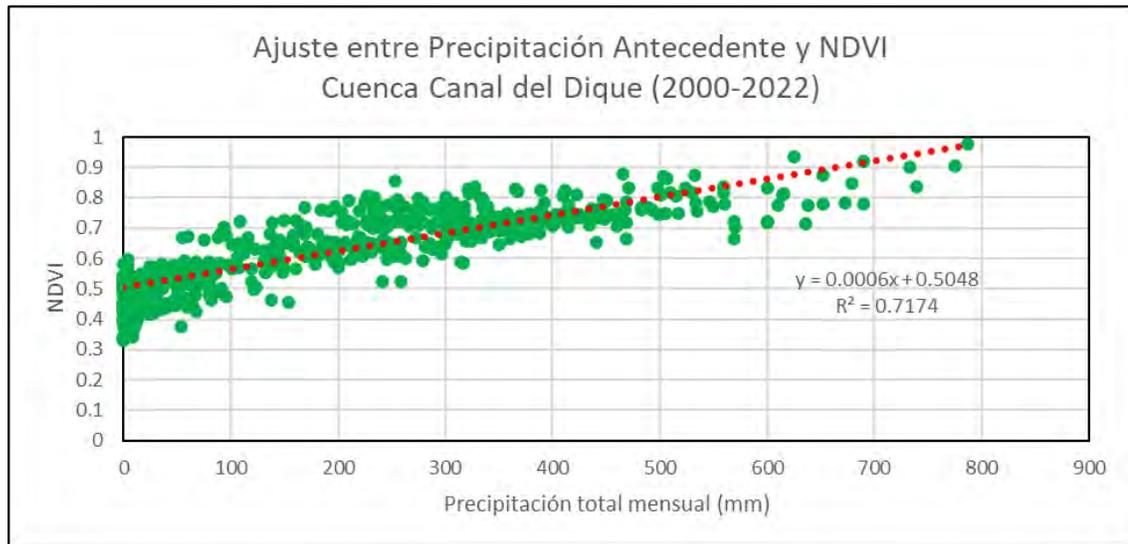


Figura 4-30. Correlación entre precipitación antecedente y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Evaluación de otras variables hidrológicas

Se buscó evaluar la relación entre el NDVI y otras variables hidrológicas en la cuenca del Canal del Dique. Sin embargo, la información disponible es muy escasa para las estaciones seleccionadas, siendo estas las de mayor número de registros en la cuenca.

Tan solo se encuentra disponible información de registros históricos de temperatura media mensual y de humedad máxima para las estaciones Manatí (Atlántico), Loma Grande (Atlántico), Arjona (Bolívar) y Palo Alto (Sucre). Se obtuvieron 166 registros de temperaturas y 134 registros de humedad máxima.

Al evaluar una posible relación entre el NDVI como respuesta a la temperatura, se observa una correlación negativa entre ambas variables, sin embargo, el coeficiente de correlación de Pearson de -0.51 sugiere que dicha correlación es débil, al menos para los registros de temperatura en la cuenca del Canal del Dique (ver Figura 4-31).

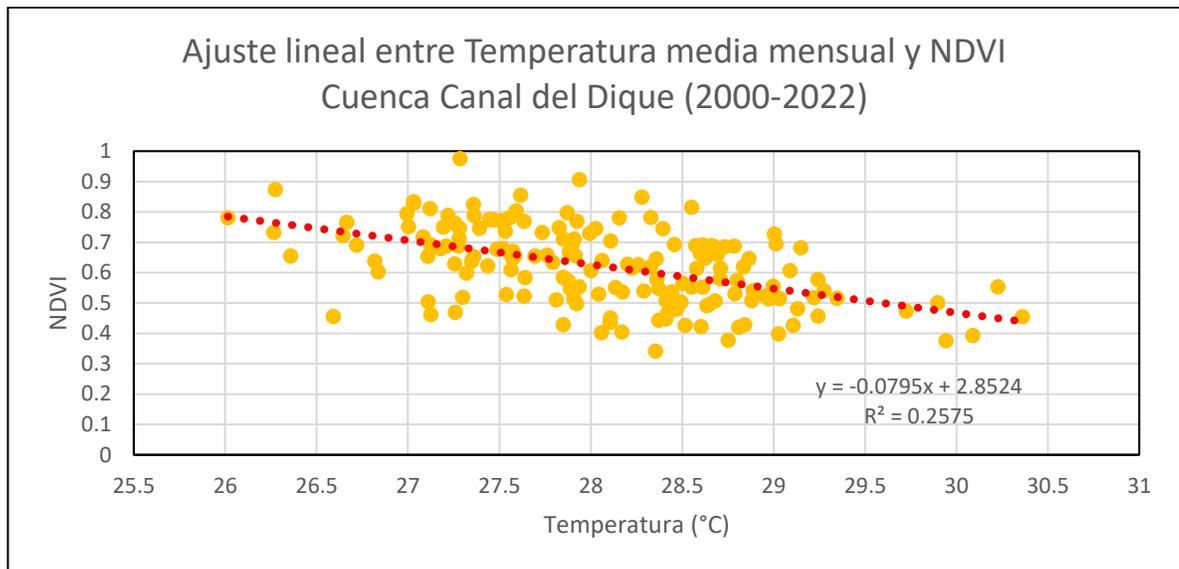


Figura 4-31. Correlación entre temperatura media mensual y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia.

La correlación negativa es consecuente con resultados de otras investigaciones consultadas. Ghebrezgabher (Ghebrezgabher et al., 2020) y Sharma (Sharma et al., 2022), mostraron en sus evaluaciones del NDVI en el este de África y en la India, respectivamente, que los valores de NDVI disminuyen tanto en los meses con muy altas temperaturas y muy bajas temperaturas; mientras que condiciones de temperaturas medias presentan mejores condiciones de cobertura vegetal con NDVI más alto. No obstante, este análisis trasladado a la cuenca del Canal del Dique no aplicaría, ya que se está evaluando una zona con muy poca variación en temperaturas, entre 32.9°C y 23.1°C (Aguilera, 2006). Al ser una cuenca de clima seco tropical semi-árido con temperatura y humedad constantemente altas, no se presentan registros extremos que permitan identificar una clara diferencia en el comportamiento del NDVI respecto a cambios en estas variables.

Si bien con los registros de temperatura al menos se observa una correlación negativa leve, para los datos de humedad en la cuenca del Canal del Dique no es posible establecer una correlación con el NDVI (ver Figura 4-32).

Bari (Bari et al., 2021), sugiere una correlación positiva leve entre el NDVI y la humedad del aire en Bangladesh con un $r=0.46$. Sin embargo, se debe tener en cuenta el amplio rango de valores de humedad, los cuales van desde 45% hasta el 79%. Los valores constantemente altos de humedad en el aire en la cuenca del

Canal del Dique no permiten una correlación entre este parámetro y el NDVI con un P-Value superior a 0.05

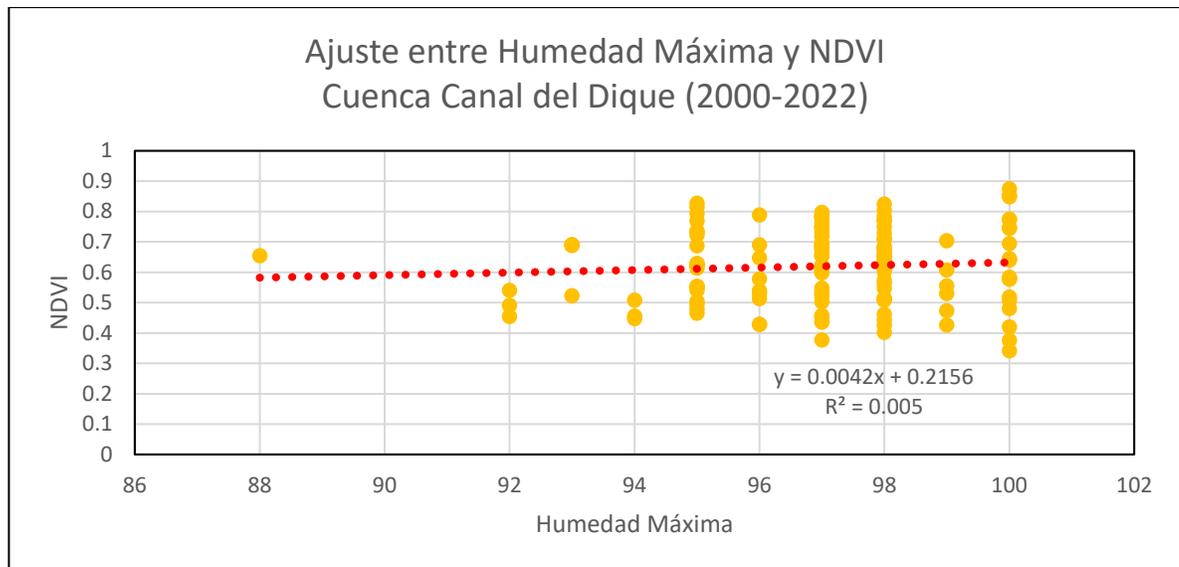


Figura 4-32. Correlación entre humedad máxima y NDVI en la cuenca del Canal del Dique.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 ANÁLISIS DE CONDICIONES TOPOGRÁFICAS

Las condiciones topográficas de una cuenca inciden en la actividad vegetal de la misma. Los contrastes topográficos (diferencias de alturas y pendientes) propician la formación de microambientes e incrementan la densidad y complejidad vegetal (García-Ruiz, 1988).

La topografía del terreno vista a gran escala en una cuenca es una condición constante en el tiempo a escala humana, por lo que conocer cómo influye en la actividad vegetal puede conducir a una mejor gestión del territorio (Lasanta et al., 2004)

Se procedió a analizar la influencia de la topografía en los valores de NDVI para la cuenca del Canal del Dique. Para esto se realizó un DEM de la cuenca a partir de imagen ASTER Level 1T (ver Figura 4-33).

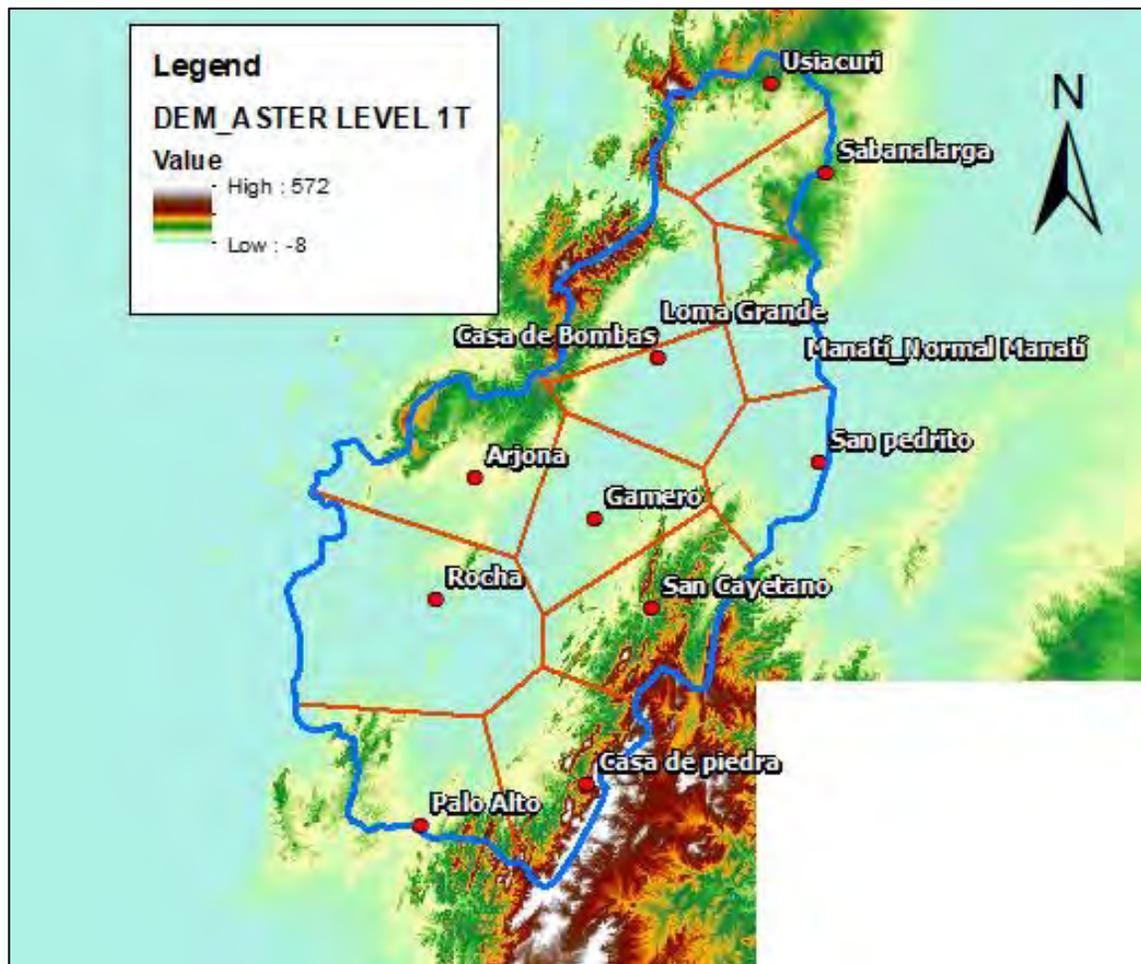


Figura 4-33. DEM de la cuenca y estaciones evaluadas.
Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la elevación media asociada al polígono de cada estación (ver Tabla 4-4) y se comparó con el comportamiento de la cobertura vegetal a través del tiempo, desde marzo del 2000 hasta octubre del 2022. La región de la cuenca del Canal del Dique que presenta una topografía con mayores elevaciones corresponde al polígono asociado a la estación Casa de Piedra en Bolívar, con una elevación media de 189 m.s.n.m. La zona de la cuenca con menor elevación media es el sector de la estación Casa de Bombas en el departamento del Atlántico, cercana al Embalse del Guájaró.

Tabla 4-4. Elevaciones medias por sectores en la cuenca del Canal del Dique.

Estación	Departamento	Municipio	Elevación media (m.s.n.m)
Casa de Piedra	Bolívar	San Jacinto	189
San Cayetano	Bolívar	San Juan	133
Sabanalarga	Atlántico	Sabanalarga	105
Usiacurí	Atlántico	Usiacurí	97
Palo Alto	Sucre	San Onofre	68
Arjona	Bolívar	Arjona	52
Loma Grande	Atlántico	Repelón	46
Gamero	Bolívar	Mahates	26
Rocha	Bolívar	Arjona	10
San Pedrito	Atlántico	Suán	9
Normal Manatí	Atlántico	Manatí	9
Casa de Bombas	Atlántico	Repelón	7

Fuente: Elaboración propia.

Otras investigaciones que buscaron evaluar la variación del NDVI en referencia a factor topográficos del terreno encontraron que existe una correlación positiva y significativa entre la elevación respecto al nivel medio del mar y el NDVI en zonas de bosques y matorrales (Lasanta et al., 2004). Por ejemplo, Zhan (Zhan et al., 2012) investigó sobre la relación entre el NDVI y factores del terreno tomando como caso de estudio la zona rural de la región Chongqing en China. Sus resultados mostraron que el NDVI aumenta su valor ante elevaciones de terreno mayores, especialmente en zonas de altitud elevada.

Resultados similares se obtuvieron para la cuenca del Canal del Dique al comparar las variaciones del NDVI para la zona de mayor elevación (Casa de Piedra) y la de menor elevación (Casa de Bombas) en cada una de las 50 fechas analizadas (ver Figura 4-34).

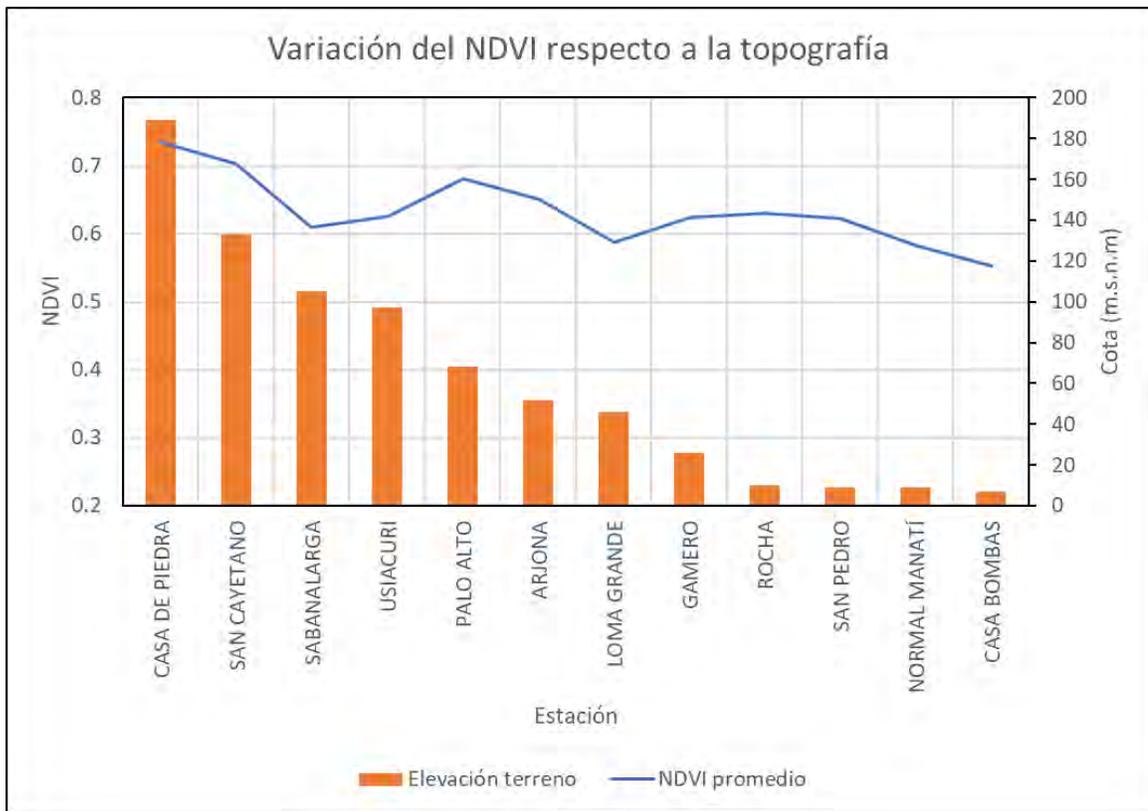


Figura 4-35. Variación del NDVI promedio respecto a las elevaciones del terreno.
 Fuente: Elaboración propia.

De manera general se observa que los valores promedios de NDVI disminuyen conforme la elevación del terreno es menor dentro de la cuenca del Canal del Dique. Esto indica que sectores de la cuenca con altas elevaciones responden de mejor manera en cuanto a la cobertura vegetal ante cambios en las condiciones climáticas en la cuenca del Canal del Dique.

La Figura 4-36 presenta a manera de ejemplo la cobertura de NDVI en la cuenca para la fecha correspondiente a marzo de 2016, la cual corresponde a una condición antecedente seca. A consecuencia de las bajas precipitaciones la cuenca presenta de forma general valores bajos de NDVI; sin embargo, se resalta el sector correspondiente a la estación Casa de Piedra, que al ser un terreno elevado mantiene una buena cobertura vegetal, con valores promedio de NDVI de 0.65, a pesar de ser una temporada seca. Situación similar se observa en las demás fechas de condición seca (ver Figura 4-19 hasta la Figura 4-27).

Por lo anterior se puede afirmar que, en la cuenca del Canal del Dique, las zonas de mayor elevación de terreno mantienen unos valores más altos de NDVI, incluso en condición antecedente seca.

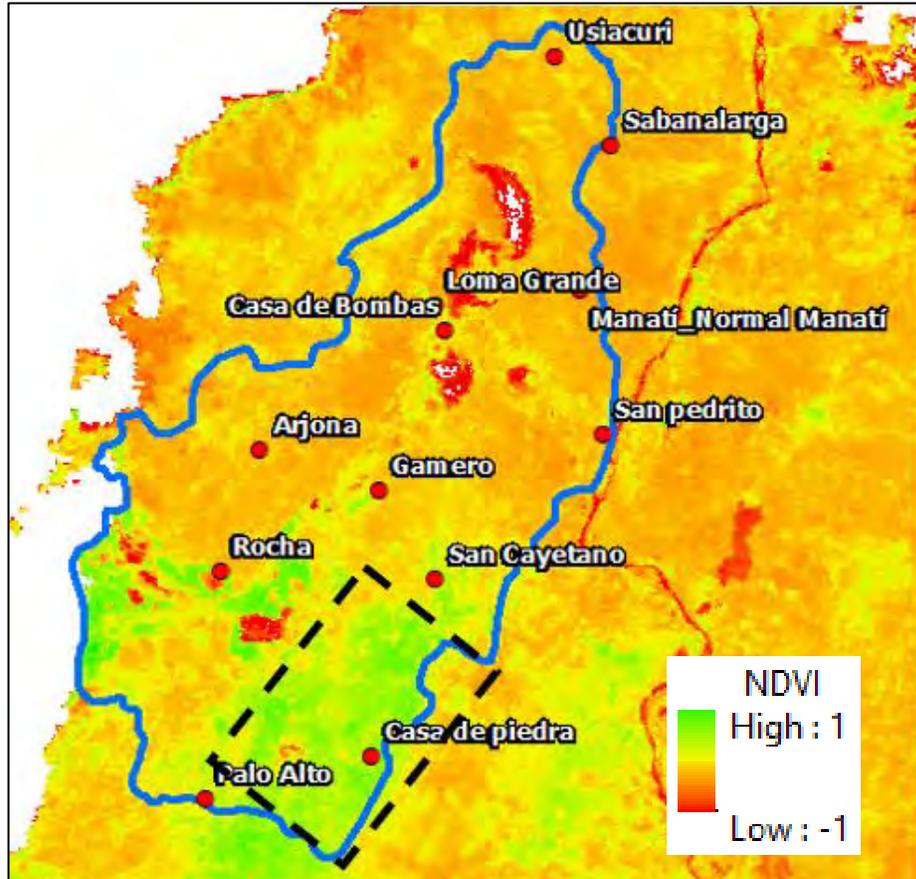


Figura 4-36. Cobertura de NDVI para la cuenca en condición seca de marzo del 2016.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del NDVI respecto a las condiciones de elevación del terreno también se realizó teniendo en cuenta posibles afectaciones que pueda tener la presencia de cuerpos de agua en el valor medio del NDVI para cada estación. Para esto se procedió a sustraer las áreas correspondientes a cuerpos de agua mayores (embalses y ciénagas) de los rasters de NDVI calculados. Posteriormente se volvieron a determinar los valores de NDVI para cada estación sin la presencia de agua y se evaluó nuevamente la variación respecto a la elevación del terreno. Este ejercicio se realizó a manera de ejemplo para diez fechas seleccionadas entre los años 2004 y 2022 (Ver Figura 4-37, Figura 4-38 y Figura 4-39). Las siguientes figuras presentan la misma escala de colores de NDVI utilizada en la Figura 4-36

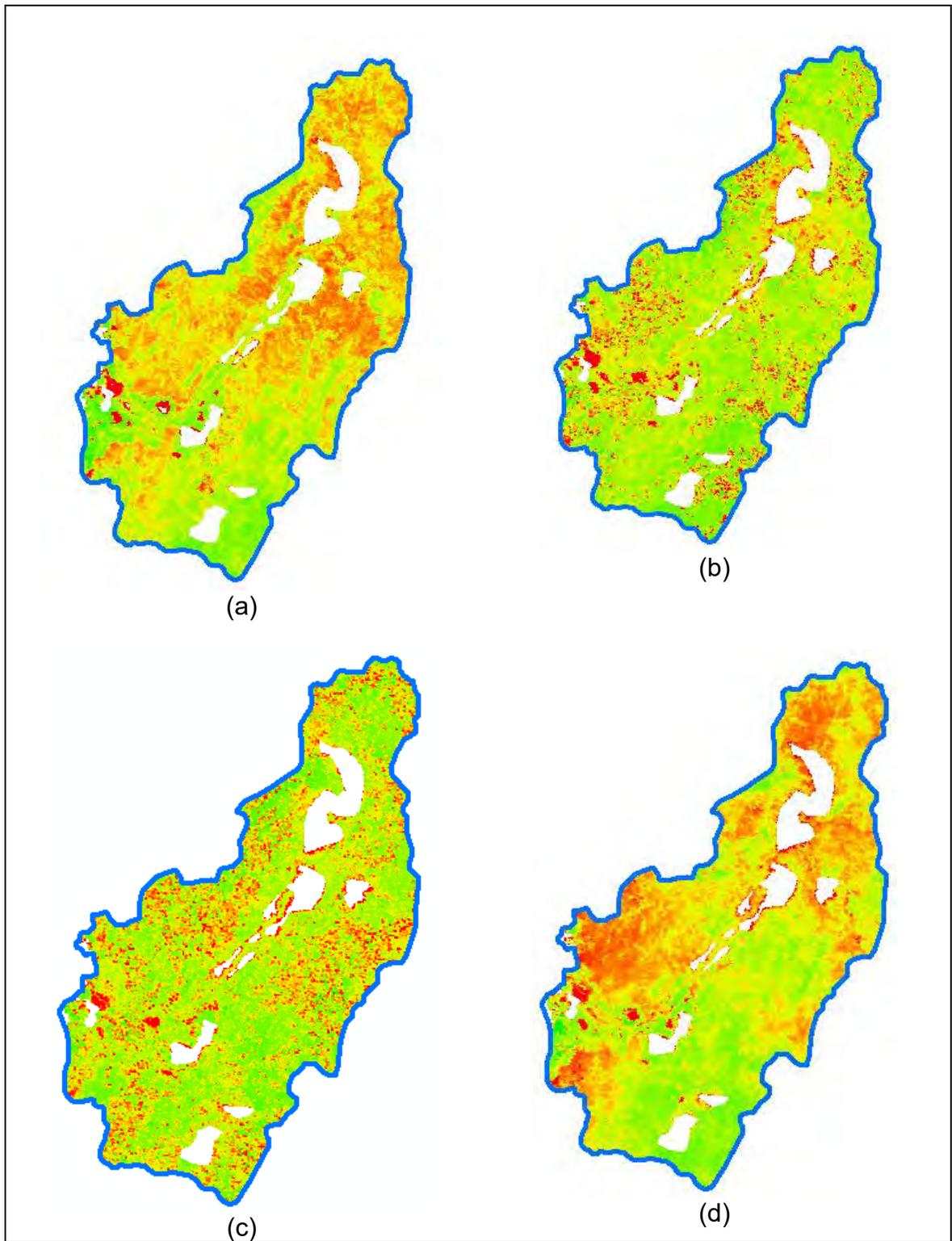


Figura 4-37. NDVI calculado para 02/2004 (a), 10/2006 (b), 11/2008 (c), 03/2010 (d).

Fuente: Elaboración propia.

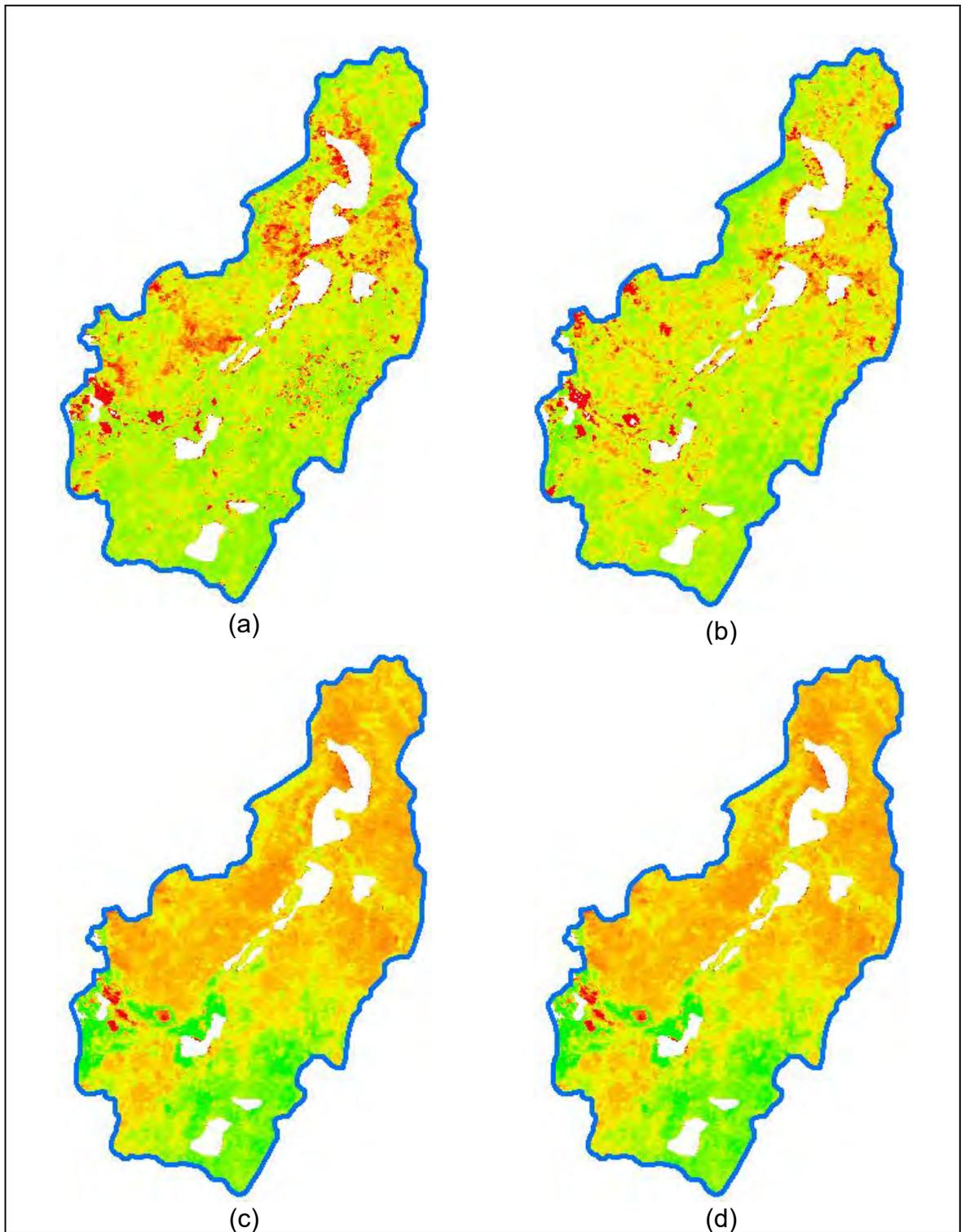


Figura 4-38. NDVI calculado para 06/2012 (a), 11/2014 (b), 03/2016 (c), 11/2018 (d).

Fuente: Elaboración propia.

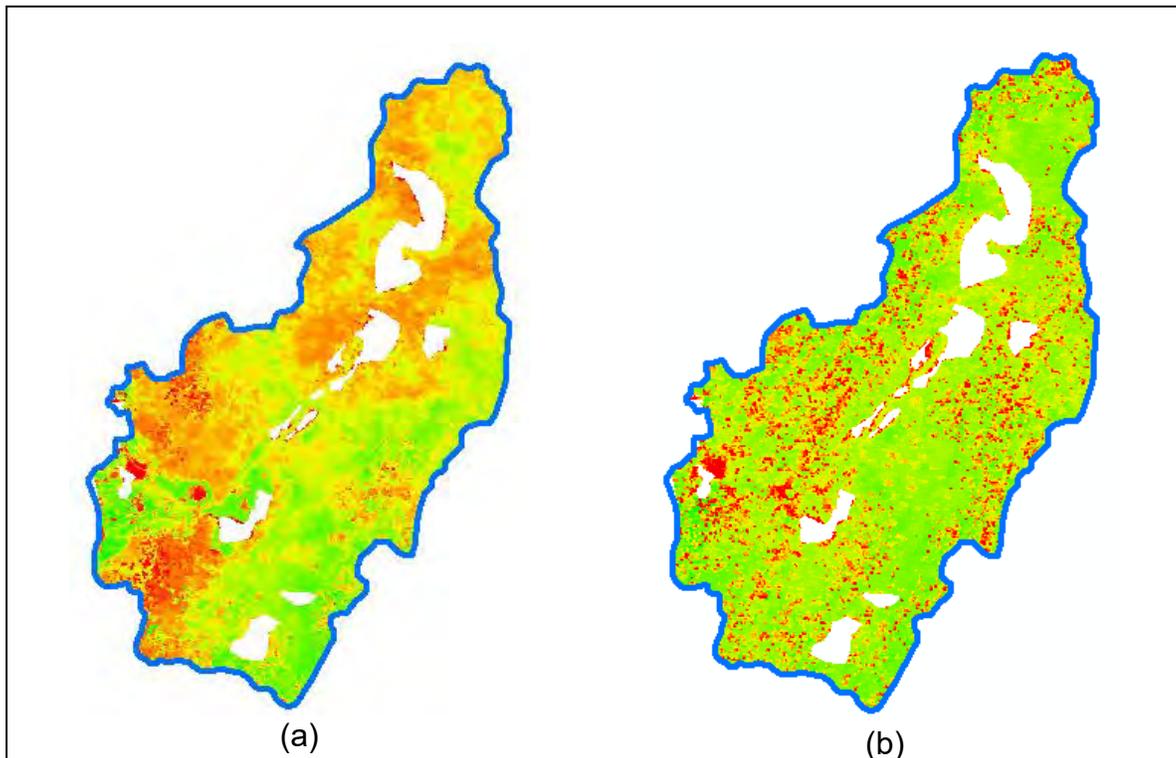


Figura 4-39. NDVI calculado para 04/2020 (a) y 10/2022 (b).
Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente se presenta la variación del NDVI promedio calculado para cada estación, pero esta vez únicamente para las 10 fechas correspondientes a los mapas donde no se tuvieron en cuenta los cuerpos de agua. En la Figura 4-40 se observa que las estaciones han sido organizadas de mayor a menor elevación del terreno en una gráfica de barras, mientras que el NDVI se observa en la gráfica lineal de la misma figura.

El análisis realizado para los mapas de NDVI sin tener en cuenta los cuerpos de agua, arroja la misma conclusión que aquel presentado en la Figura 4-35, donde se observa que en ambos casos de forma general el valor de NDVI promedio tiende a disminuir conforme la elevación del terreno es menor.

De manera comparativa, la Tabla 4-5 presenta la variación de NDVI promedio para las estaciones, entre el análisis realizado para los 50 mapas de NDVI iniciales y los 10 mapas sin presencia de cuerpos de agua.

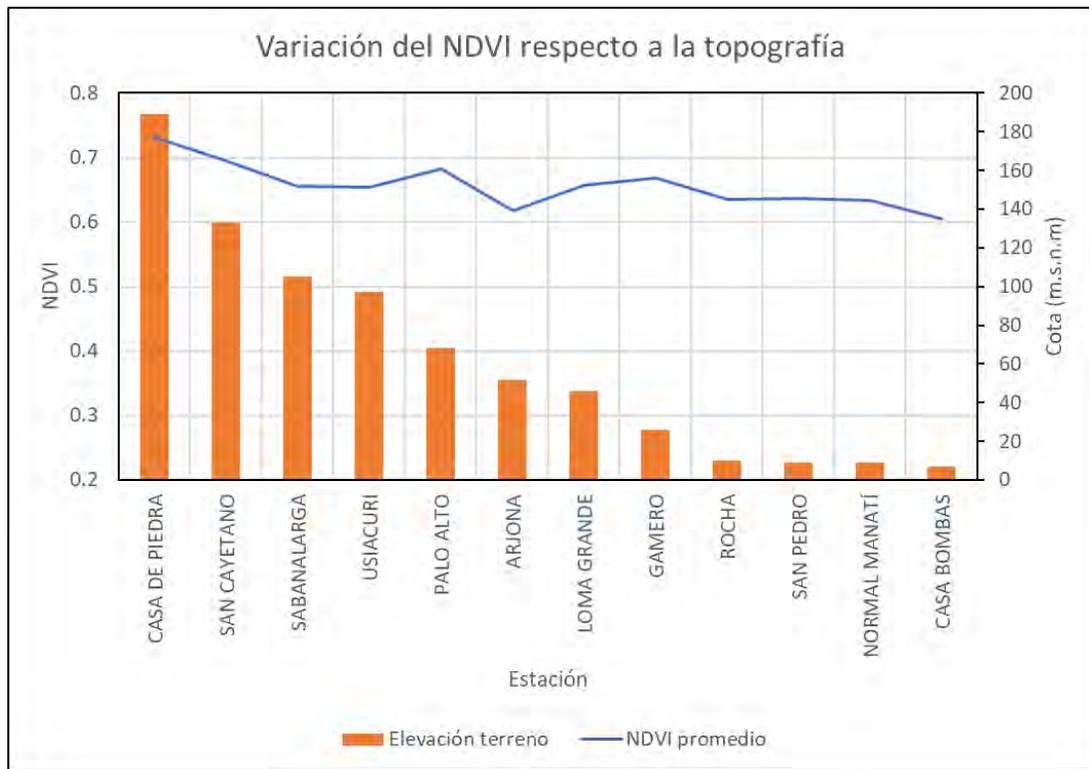


Figura 4-40. Variación del NDVI promedio respecto a las elevaciones del terreno (sin presencia de cuerpos de agua).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-5. Variación de NDVI promedio entre mapas con y sin presencia de cuerpos de agua.

Estación	NDVI (con cuerpos de agua)	NDVI (sin cuerpos de agua)	Variación
Casa de Piedra	0.734	0.732	0.002
San Cayetano	0.703	0.696	0.007
Sabanalarga	0.610	0.656	-0.046
Usiacurí	0.626	0.653	-0.027
Palo Alto	0.680	0.683	-0.003
Arjona	0.651	0.617	0.034
Loma Grande	0.588	0.657	-0.069
Gamero	0.624	0.668	-0.043
Rocha	0.631	0.636	-0.005
San Pedrito	0.622	0.637	-0.015
Normal Manatí	0.582	0.634	-0.052
Casa de Bombas	0.553	0.605	-0.052

Fuente: Elaboración propia.

4.5 EVALUACIÓN DE USO DE SUELO

La cobertura vegetal dentro de una cuenca presenta variaciones temporales conforme las condiciones climáticas. Al analizar las precipitaciones, se observan cambios sustanciales en el NDVI general de la cuenca respecto al ciclo hidrológico, mostrando valores bajos de cobertura vegetal en temporadas antecedentes secas e incrementando los valores de NDVI conforme aumentan las precipitaciones. Esta dinámica se repite de manera anual, tal como se observa en las 50 fechas analizada entre 2000 y 2022 (ver Figura 4-19 hasta la Figura 4-27).

Sin embargo, al analizar las variaciones de NDVI a mayor escala temporal, es evidente que los cambios en uso de suelo dentro de la cuenca se ven reflejados en variaciones de la cobertura vegetal.

Los mapas de NDVI son aplicados en la detección de cambios de uso de suelo por causas antrópicas, como construcciones, expansión urbana, ganadería extensiva y demás actividades agrícolas (Nath, 2014).

La investigación realizada por Aburas (Aburas et al., 2015) en la región de Seremban en Malasia, permitió identificar cambios en el uso de suelo de la ciudad a partir de variaciones del NDVI entre 1990 y 2010. Los mapas fueron calculados a partir de imágenes Landsat y permitieron identificar zonas donde ha disminuido la cobertura vegetal, en las cuales se busca implementar políticas de áreas protegidas en una ciudad de rápido crecimiento económico. Se logró identificar que, en el periodo de 20 años, el porcentaje de área correspondiente a zonas urbanizadas pasó del 3.55% en 1990 al 7.25% en 2010. Mientras que las zonas de vegetación densa disminuyeron de 78.57% a 65.44%.

4.5.1 Cambio de uso de suelo para condición antecedente húmeda.

Un análisis en cuanto al cambio de uso de suelo se realizó para la cuenca del Canal del Dique. Al comparar los resultados de mapas de NDVI para la cuenca en fechas diferentes bajo las condiciones similares de humedad antecedente, se hace evidente la disminución generalizada del NDVI en algunos sectores de la cuenca.

Por ejemplo, al comparar la cobertura de uso de suelo de la cuenca bajo una condición antecedente húmeda entre agosto del año 2000 y septiembre del año 2021, se observa que bajo una misma condición de humedad la respuesta de la cuenca en cuanto a su cobertura vegetal ha disminuido.

De forma generalizada se han presentado disminuciones del NDVI en la cuenca entre el año 2000 y 2021 (ver Figura 4-41). Al evaluar la disminución del NDVI por

sectores de la cuenca (asociados a cada polígono de estaciones) se observa que en los sectores de Loma Grande, Arjona, Casa de Piedra y Palo Alto es donde más ha disminuido el NDVI promedio (ver Figura 4-42).

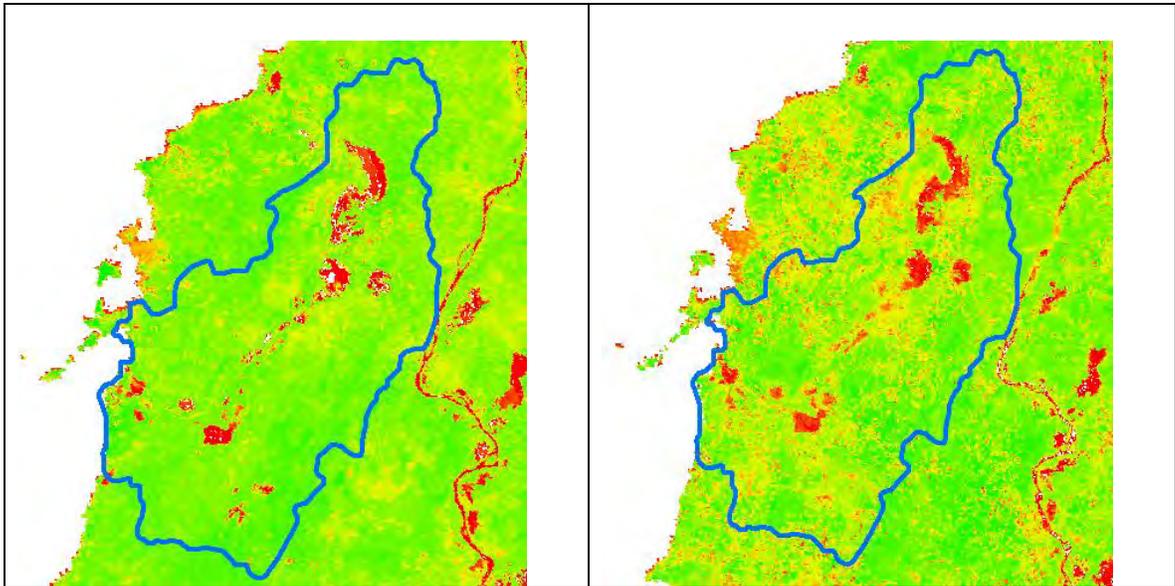


Figura 4-41. NDVI en condición antecedente húmeda para agosto de 2000 (izquierda) y septiembre de 2021 (derecha).
 Fuente: Elaboración propia.

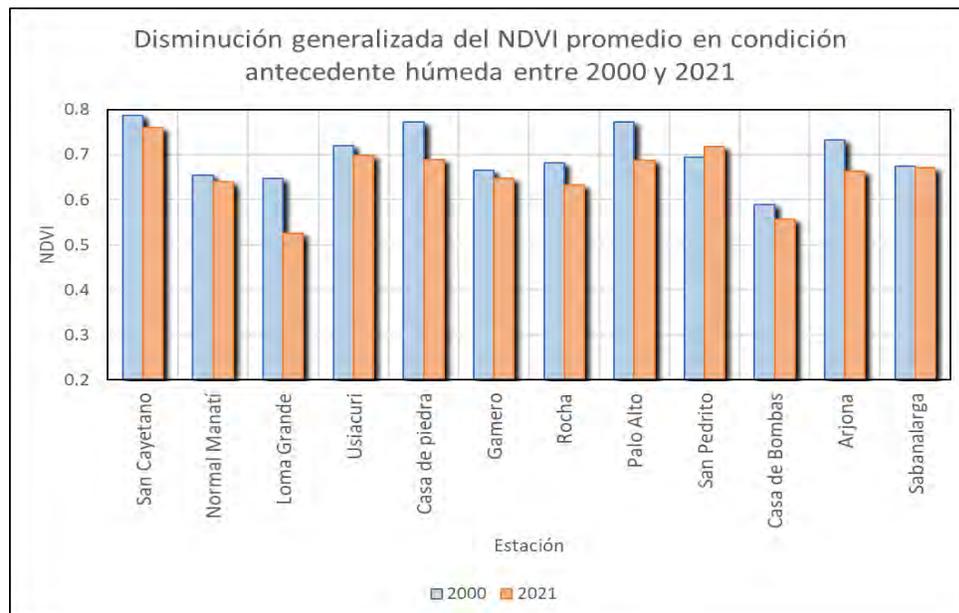


Figura 4-42. Disminución del NDVI promedio en condición antecedente húmeda entre 2000 y 2021.
 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-43 presenta los puntos donde se ha registrado una disminución mayor a 0.2 en el valor del NDVI. Se destacan los sectores de Loma Grande, Arjona, Palo Alto y Casa de Piedra; donde el cambio de uso de suelo se ha visto reflejado en menores valores de NDVI con el pasar del tiempo. Esta disminución puede estar asociada a actividades como el pastoreo, deforestación, construcciones en infraestructura gris y crecimiento de zonas urbanas.

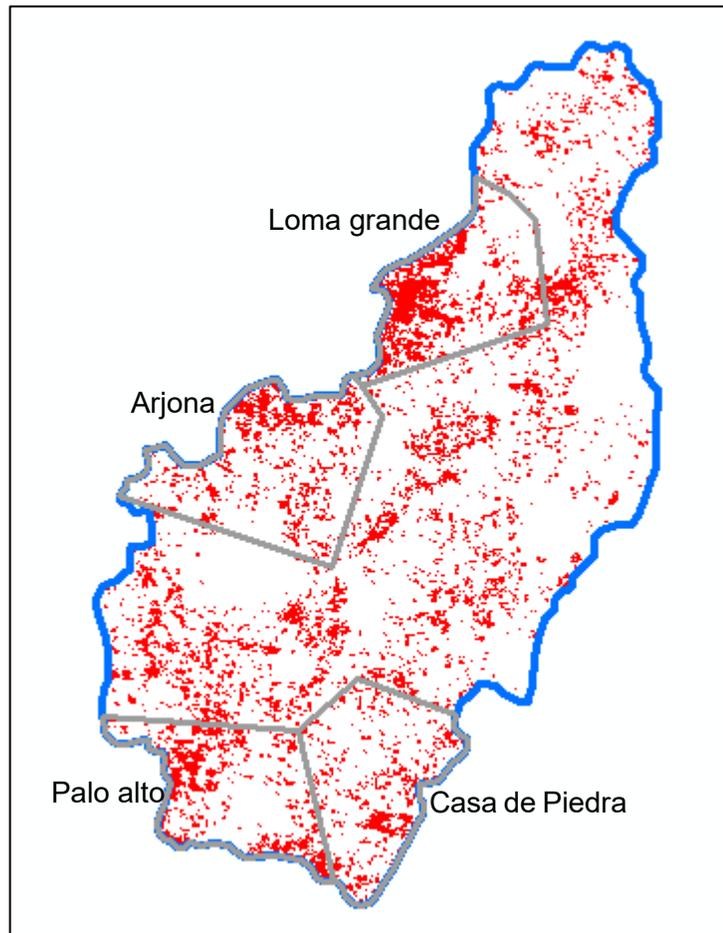


Figura 4-43. Zonas de disminución mayor o igual a 0.2 del NDVI bajo condición antecedente húmeda entre agosto de 2000 y septiembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la cobertura de vegetación densa a lo largo de la cuenca, se tiene como referencia que un uso de suelo con NDVI mayor a 0.5 corresponde a vegetación zana y densa, como es el caso de bosques y matorrales. Al comparar el área de zonas con vegetación densa (NDVI mayor o igual a 0.5) entre los años 2000 y 2021, se observa una disminución en la vegetación densa de la cuenca.

El área de cobertura de vegetación densa en la cuenca del Canal del Dique bajo una condición antecedente húmeda paso de 92.75% en el año 2000 a 82.77% para el año 2021.

4.5.2 Cambio de uso de suelo para condición antecedente seca.

Para las temporadas de condición antecedente seca también se evidencian cambios del uso de suelo reflejados en variaciones del NDVI. Al comparar el mapa de NDVI entre abril de 2002 y abril de 2020, se observan sectores con una notoria disminución de la cobertura vegetal en la cuenca (ver Figura 4-44), aun cuando ambos mapas corresponden a condición de humedad antecedente similar.

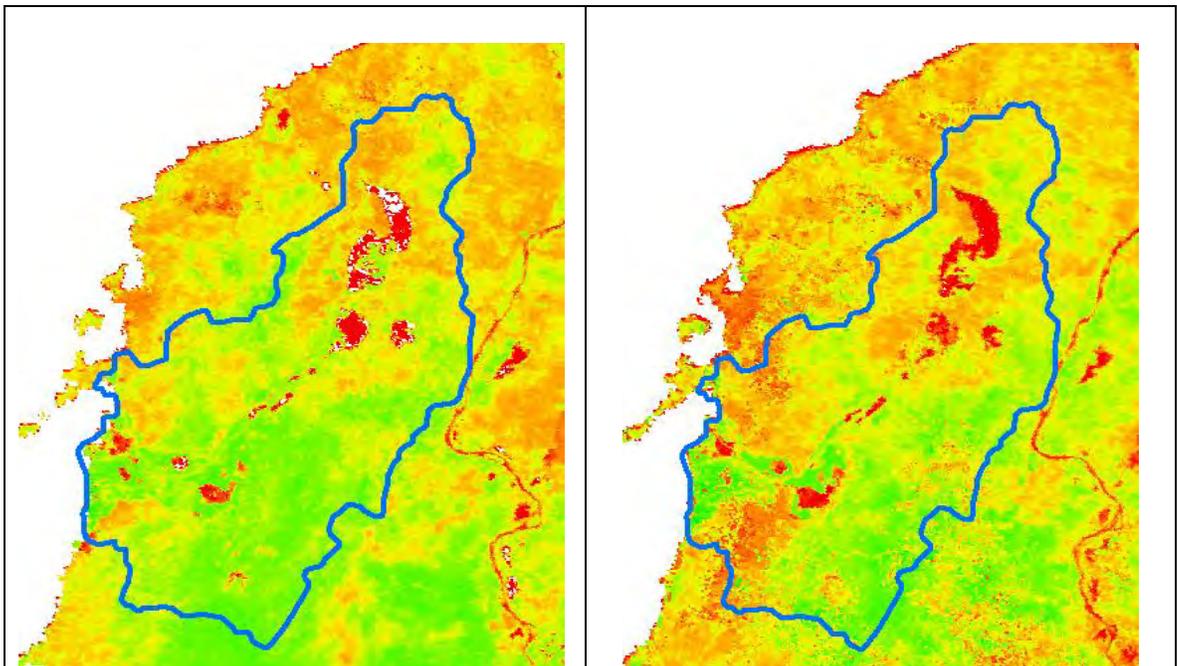


Figura 4-44. NDVI en condición antecedente seca para abril de 2002 (izquierda) y abril de 2020 (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de NDVI promedio por sectores de la cuenca presenta disminuciones considerables en los sectores correspondientes a Rocha, Arjona y Palo Alto (suroccidente de la cuenca) (ver Figura 4-45). Sin embargo, de manera general la cuenca presenta en su mayoría una disminución en el NDVI promedio para la condición antecedente seca.

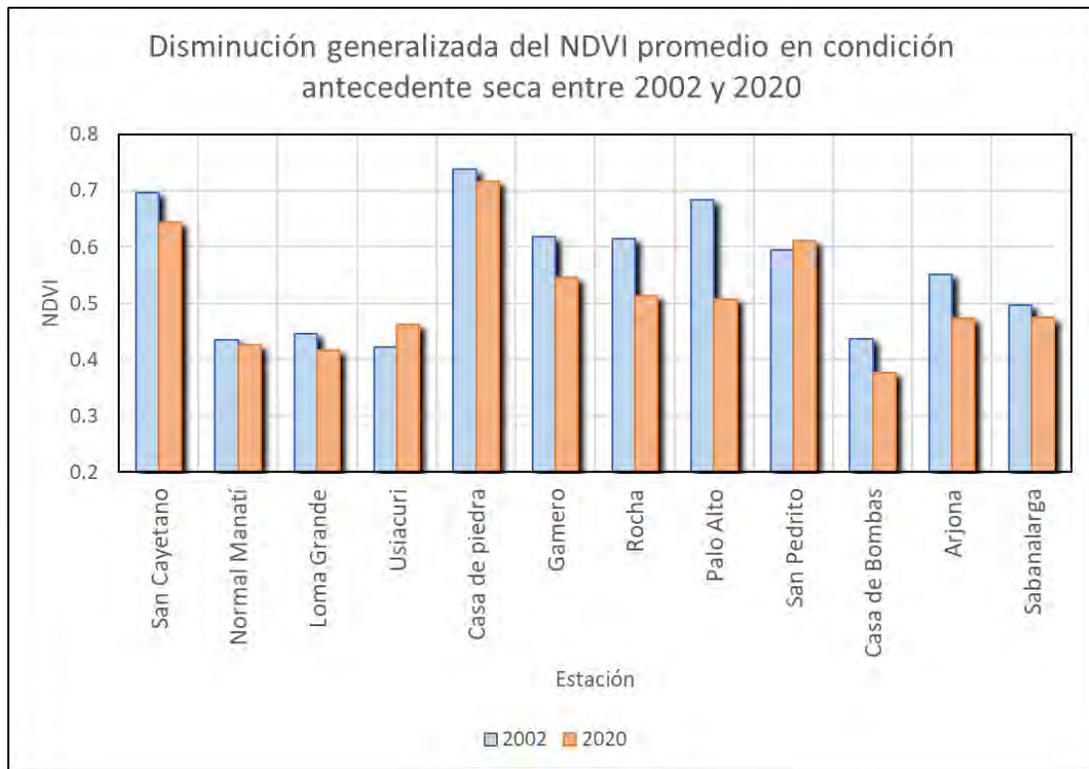


Figura 4-45. Disminución del NDVI promedio en condición antecedente seca entre 2002 y 2020.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-46 presenta los sectores donde el NDVI ha registrado una disminución mayor o igual a 0.2 entre abril del 2002 y abril del 2020. Se destacan las zonas en el suroccidente de la cuenca.

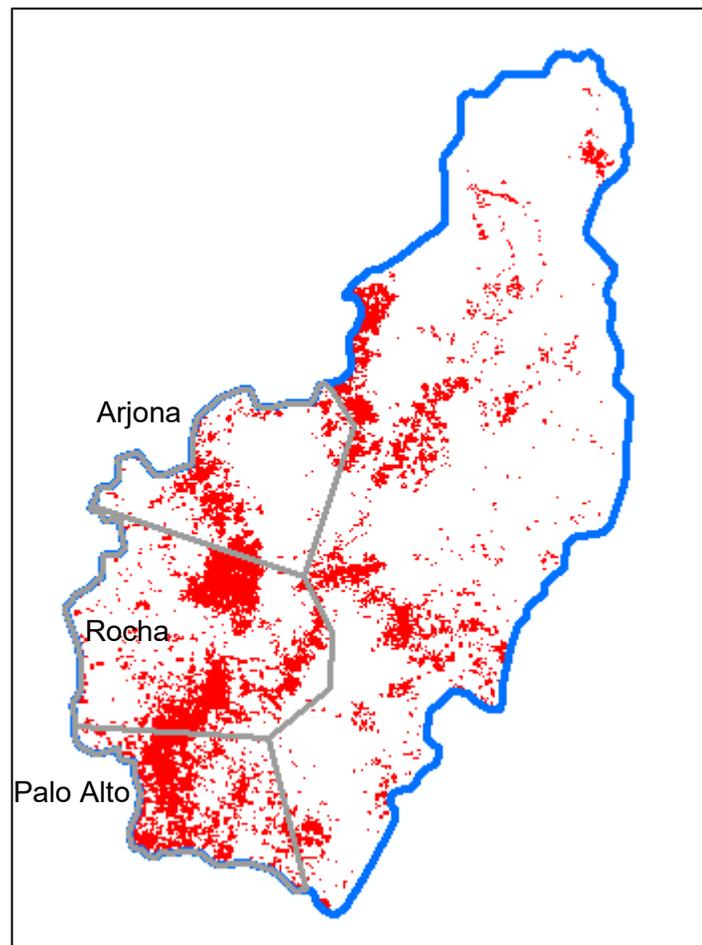


Figura 4-46. Zonas de disminución mayor o igual a 0.2 del NDVI bajo condición antecedente seca entre abril de 2002 y septiembre de 2021.

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca también presenta una disminución en cobertura de vegetación densa entre 2002 y 2020 para condiciones antecedentes seca. Para el año 2002 en condición seca el 69.49% del área de la cuenca estaba cubierta con vegetación densa (NDVI mayor o igual a 0.5), mientras que para una condición de humedad antecedente similar la cobertura de vegetación densa para el año 2020 disminuyó a 54.11% del área total de la cuenca.

La disminución en la cobertura vegetal de la cuenca, reflejada en reducción de valores de NDVI tanto en temporada seca como húmeda, son consecuencia de los cambios en el uso de suelo de la cuenca. Se ha presentado un aumento en el área de la cuenca dedicada a las principales actividades económicas de los municipios

que la integran, como lo son aquellas asociadas al sector agropecuario, pesquero y minero (Aguilera, 2006).

Áreas que anteriormente tenían un uso de suelo clasificado como bosques o vegetación densa, hoy dan paso a mayor número de hectáreas de potreros, corrales y praderas para la actividad agropecuaria. Esto cambios en uso de suelo implican una degradación del suelo mismo y afectan la respuesta de la cuenca en cuanto a su cobertura vegetal en temporadas secas y húmedas (Viana et al., 2019)

4.6 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

La cobertura vegetal de la cuenca del Canal del Dique es variable en función de los regímenes de precipitaciones, las variaciones topográficas del terreno y los constantes cambios en uso de suelo dentro de la cuenca. Sin embargo, es posible implementar ciertas estrategias que permitan mejorar la cobertura vegetal en tiempos de sequía y mantener unos valores de NDVI más altos.

El enfoque está orientado a medidas de mitigación en las temporadas secas dentro de la cuenca, fechas del ciclo hidrológico donde disminuye la cobertura vegetal de forma significativa. Las medidas pueden ser de tipo preventivo o reactivo, y deben involucrar estrategias tecnológicas, ingenieriles, sociales y de gobernanza (Ortega Gaucin et al., 2018).

Se debe tener en cuenta que las sequías son eventos inevitables y cada vez más severos a consecuencia del cambio climático; sin embargo, si bien una cuenca no puede prevenir las sequías, si puede implementar medidas que le ayuden a mitigar sus impactos (Solh & Van Ginkel, 2014). A continuación, se exponen algunas medidas o estrategias que pueden ser implementadas en la cuenca del Canal del Dique para afrontar temporadas de sequía y que permitan mantener una buena cobertura vegetal.

4.6.1 Instrumentalización de la cuenca

Para poder conocer las condiciones meteorológicas actuales en la cuenca, es necesario mejorar su instrumentación, de tal forma que permita aumentar el número de estaciones de medición de parámetros como precipitación, temperatura, humedad, evapotranspiración y brillo solar.

Actualmente la cuenca del Canal del Dique cuenta con 219 estaciones meteorológicas de la red IDEAM, sin embargo, muchas están suspendidas o no proporcionan información diferente a precipitaciones.

Los registros meteorológicos son insumo base para una buena gestión del agua en la cuenca, ya que permite anticiparse a temporadas secas y ayuda a plantear estrategias de mitigación.

4.6.2 Mapeo de la cobertura vegetal con imágenes satelitales

El constante mapeo del NDVI a lo largo de la cuenca permite contar con información actualizada sobre los cambios de cobertura vegetal a corto y mediano plazo. Esta información es un insumo valioso para organizar programas de producción agrícola, estimar cantidades de producción de alimentos, zonificar la cuenca según las actividades económicas (pecuarias, agricultura y pesca) (Coneo Mendoza et al., 2014).

Los agricultores y ganaderos deberían conocer la cobertura vegetal de forma actualizada e incluso en tiempo real, para de esta forma gestión de manera más eficiente sus actividades. Esto a su vez se traduce en disminución de costos de producción y reducir el precio de alimentos para el consumidor final.

4.6.3 Relocalización de zonas de explotación agrícola

Teniendo en cuenta la respuesta de la cuenca en cuanto a su cobertura vegetal para condiciones antecedentes secas, es posible identificar zonas de mayor resiliencia. Por ejemplo, queda demostrado que zonas de mayor elevación topográfica responden de mejor manera en su cobertura vegetal en tiempos de condición antecedente seca que aquellas zonas de menor elevación. Con base en esto se puede identificar cuáles son los mejores sectores para explotación agrícola, e incluso reubicar proyectos de siembra en lugares que presenten menor fluctuación del NDVI en temporadas secas.

La medida de desplazar las plantaciones a altitudes elevadas, para evitar aumentos de temperatura, es recomendada en el sexto informe de evaluación de los impactos del cambio climático del IPCC, con el fin de mejorar la producción agrícola y la seguridad alimentaria en la región de América del Sur. (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2022)

4.6.4 Implementación de distritos de riego

La cuenca del Canal del Dique cuenta con un distrito de riego que permite la disponibilidad de agua para actividades agropecuarias en temporadas secas. Sin embargo, este distrito requiere de mantenimiento y en algunos casos de un rediseño completo.

El objetivo del ordenamiento de la cuenca debe ser la ampliación de los distritos de riego, la mejora de la infraestructura actual y el mantenimiento periódico que los canales y equipos que integran el sistema de riego.

Los distritos de riego futuros deben permitir una mayor producción con menores pérdidas de agua y energía. Se debe migrar de sistemas por gravedad a sistemas presurizados de mayor eficiencia y menor consumo, por ejemplo, sistemas de goteo o aspersión (Solh & Van Ginkel, 2014).

Los sistemas de riego han demostrado mejorar a producción de alimentos en cuencas de uso agrícola (Solh et al., 2013), sin embargo, las medidas de uso responsable del agua deben ser estrictas para garantizar la disponibilidad del recurso en épocas de escases.

4.6.5 Reforestación y control del uso de suelo

Las zonas de expansión urbana de la cuenca deben estar definidas en planes de ordenamiento y los cambios de uso de suelo deben ser controlados y vigilados. Los nuevos desarrollos urbanísticos deben procurar implementar infraestructura verde y flexible que reduzca el porcentaje de zonas impermeables en la cuenca.

Se deben respetar las zonas protegidas ya que protegen a la cuenca en eventos de sequía, garantizando una mejor cobertura vegetal.

La reforestación en algunos sectores de la cuenca permitiría aumentar las zonas de vegetación densa y mejoraría la respuesta del NDVI en tiempos de sequía. Investigaciones han demostrado la correlación positiva entre la reforestación y el NDVI general de la cuenca (X. Lin et al., 2020) los bosques ayudan a disminuir los procesos de evaporación, mantienen la humedad de los suelos, permiten la recarga de acuíferos y hace que la cuenca sea más resiliente al cambio climático (Riebau & Qu, 2005)

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

5.1.1 Conclusiones generales

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador para medir a gran escala la densidad de vegetación en una cuenca hidrográfica, así como para calcular la salud de la vegetación. Para la zona de estudio, correspondiente a la cuenca del Canal del Dique, es un índice que proporciona mucha información no solo en términos de la cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca, sino que permite ser aplicado en las actividades económicas del sector; por ejemplo, el NDVI es ampliamente utilizado para la agricultura de precisión, y sirve como parámetro para la estimación de producción agrícola.

Para evaluar el NDVI en la cuenca del Canal del Dique se tuvieron en cuenta distintas variables hidrológicas, topográficas y de uso de suelo. Los resultados permitieron establecer correlaciones entre estas variables y la cobertura vegetal de la cuenca. Para el análisis del NDVI se elaboraron 50 mapas a partir de la información contenida en imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de descarga libre del satélite Terra, para diferentes fechas de análisis teniendo en cuenta periodos húmedos y secos.

5.1.1 Correlación de NDVI y variables hidrológicas

Al analizar los cambios temporales de NDVI en la cuenca junto con los registros históricos de precipitaciones, se logró establecer una correlación positiva y fuerte entre el NDVI y la precipitación total mensual. Como era de esperarse la cobertura vegetal de la cuenca varía conforme el ciclo hidrológico, periodos húmedos traen consigo un aumento en la cobertura vegetal y una vegetación más saludable; si bien la correlación es fuerte entre el NDVI y la precipitación total mensual, se observa una gran dispersión en los datos correspondientes a valores de precipitación menores a 20 mm de lluvia en el mes; de la alta dispersión; por lo que se correlacionó el NDVI con la precipitación antecedente, tomando como referencia la sumatoria de precipitaciones de los 3 meses anteriores a cada fecha de análisis.

La correlación entre valores de NDVI y la precipitación antecedente, mostró un mejor ajuste y menor dispersión en los datos, por lo tanto, se puede concluir que más que la cantidad de lluvia que se precipita en el mes, el NDVI aumenta si las condiciones de humedad antecedentes son elevadas. Esto se debe a que la vegetación no responde de forma inmediata al iniciar o finalizar la lluvia, sino que la cuenca guarda una memoria; asociado principalmente al contenido de humedad en

el suelo que hace que la vegetación sea más sana y que la respuesta de la cobertura vegetal se prolongue por más tiempo.

Por lo anterior, es importante resaltar que, no necesariamente al presentar un mes con altos registros de precipitación la cobertura vegetal vaya a reflejar de forma inmediata un NDVI con un valor alto cercano a 1.0. Existe un tiempo de respuesta en la capa vegetal, asociado a las condiciones de humedad que guarda el suelo y la cantidad de agua que han logrado absorber las plantas en meses anteriores.

Además de la precipitación, se buscó evaluar otras variables meteorológicas como la temperatura y la humedad, sin embargo, la escasez de registros históricos en la cuenca limitó este análisis. La correlación entre el NDVI y la temperatura media es negativa y débil para la cuenca del Canal del Dique, ya que se está evaluando una zona con muy poca variación en temperaturas, entre 32.9°C y 23.1°C. En cuanto a la humedad, los valores constantemente altos en la cuenca del Canal del Dique no permiten una correlación entre este parámetro y el NDVI. Al ser una cuenca de clima seco tropical semi-árido con temperatura y humedad constantemente altas, no se presentan registros extremos que permitan identificar una clara diferencia en el comportamiento del NDVI respecto a cambios en estas variables.

5.1.2 Relación de NDVI con condiciones topográficas y cambio del uso del suelo

Adicional al análisis de las variables anteriores, se hizo un análisis de la relación de las condiciones topográficas del terreno con el NDVI; encontrando que guardan una clara relación entre ellos. De manera general se observa que los valores promedios de NDVI disminuyen conforme la elevación del terreno es menor dentro de la cuenca del Canal del Dique. Esto indica que sectores de la cuenca con altas elevaciones responden de mejor manera en cuanto a la cobertura vegetal ante cambios en las condiciones climáticas en la cuenca del Canal del Dique. Sectores de mayor elevación logran mantener valores medios y altos de NDVI aún en condición antecedente seca.

Los mapas de NDVI evaluadas a lo largo de 23 años permitieron identificar cambios de uso de suelo dentro de la cuenca del Canal del Dique. De forma generalizada se han presentado disminuciones del NDVI en la cuenca entre el año 2000 y 2022, tanto en condiciones antecedes húmedas como secas. Los resultados de la investigación muestran una disminución de la cobertura de vegetación densa del 9.98% del área de la cuenca en temporadas lluviosas, y del 15.38% en temporadas secas. Es decir, que con el pasar del tiempo la cuenca del Canal del Dique ha perdido capacidad de respuesta en cuanto a la cobertura vegetal.

Áreas que anteriormente tenían un uso de suelo clasificado como bosques o vegetación densa, hoy dan paso a mayor número de hectáreas de potreros, corrales y praderas para la actividad agropecuaria. Esto cambios en uso de suelo implican una degradación del suelo mismo y afectan la respuesta de la cuenca en cuanto a su cobertura vegetal en temporadas secas y húmedas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se ha demostrado que la cobertura vegetal de la cuenca del Canal del Dique, medida a través del NDVI, responde en función de las variaciones meteorológicas, topográficas y de los cambios de uso de suelo. Sin embargo, es posible implementar medidas o estrategias que permitan a la cuenca una mejor respuesta ante factores como el crecimiento de zonas urbanas y el cambio climático.
- Se recomienda inicialmente una mejora en la instrumentalización de la cuenca. Es importante contar no solo con registros históricos sino con mediciones actualizadas de variables distintas a la precipitación. La cuenca carece de registros de temperaturas y brillo solar, que son importantes para cuantificar procesos de evapotranspiración, los cuales inciden en la capacidad de retener condiciones de humedad.
- Es de suma importancia difundir el conocimiento sobre el uso de índice NDVI para que pueda ser aplicado a las principales actividades económicas de la cuenca, como la agricultura y la ganadería. Mapas actualizados de NDVI y a menores escalas, ayudan a la toma de decisiones en estas actividades y son insumo clave para una mejor gestión de los recursos en tiempos de escasez de agua.
- Se recomienda la implementación de medidas de mitigación y adaptación, tales como: reubicar cultivos más resilientes en zonas topográficamente bajas, relocalizar zonas de explotación agrícola en terrenos más elevados de la cuenca, ampliar y mejorar la red de distritos de riego existente en la cuenca, implementar equipos de bajo consumo de agua que permitan un sistema de riego presurizado y de mayor alcance.
- Teniendo en cuenta que Colombia, por su localización geográfica, está expuesta a la ocurrencia de los ciclos El Niño, La Niña - Oscilación del Sur – ENOS; que conlleva a que las afectaciones y alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en el país son explicadas en buena parte, por la variabilidad climática interanual, relacionada a dichos ciclos; se recomienda que en futuras investigaciones se correlacionen los valores extremos de las variables hidrológicas con la respuesta del NDVI.

- A mayor escala es importante determinar los cambios de uso de suelo en zonas protegidas, y de ser necesario ejecutar acciones de reforestación para mantener un uso de suelo adecuado en la cuenca.
- Los cambios de uso de suelo dentro de la cuenca del Canal del Dique no pueden ser desmedidos ni desordenados; por el contrario, deben responder a un plan de ordenamiento que tenga en cuenta las afectaciones en cuanto a la respuesta hidrológica de la cuenca en el mediano y largo plazo.
- Se recomienda tener en cuenta el NDVI como herramienta para la toma de decisiones tanto a escala local (predios privados) como a gran escala (cuenca hidrográfica), ya que permite inferir la respuesta de la cuenca ante el inminente cambio climático y ayudaría a mejorar la capacidad de adaptación de la cuenca.
- Para aumentar la serie de datos en el análisis del NDVI de la cuenca del Canal de Dique, se recomienda utilizar estaciones que, aunque no estén dentro de la cuenca, su zona de influencia si repercute en la respuesta de esta; y que al tener registros actualizados sean útiles para el análisis; como por ejemplo estaciones en la ciudad de Cartagena.
- Se recomienda tener en cuenta esta investigación y complementarse con investigaciones y proyectos en cursos en la cuenca, como es el caso de la *APP Restauración de Ecosistemas Degradados del Canal del Dique*, y de la *Propuesta de un sistema de soporte para el monitoreo espacio-temporal del sistema socioecológico del Canal del Dique y zona de influencia*.
- Dado que la información utilizada como insumo en esta investigación es de tipo secundaria; se recomienda que en investigaciones complementarias se puedan realizar levantamientos de información primaria directamente en la zona.
- Se recomienda para futuras investigaciones realizar la evaluación del NDVI mediante mapas que no tengan en cuenta la presencia de cuerpos de agua en los cálculos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburas, M. M., Abdullah, S. H., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2015). Measuring Land Cover Change in Seremban, Malaysia Using NDVI Index. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.043>
- Agencia Nacional de Infraestructura ANI. (2022). *El Canal del Dique, un megaproyecto fluvial que busca recuperar ecosistemas degradados, pero también mitigar el impacto de posibles inundaciones en la Región Caribe ante fenómenos climáticos*. <https://www.ani.gov.co/el-canal-del-dique-un-megaproyecto-fluvial-que-busca-recuperar-ecosistemas-degradados-pero-tambien>
- Aguilera, M. M. (2006). *El Canal del Dique y su subregión: una economía basada en la riqueza hídrica*.
- Alatorre, L., Miramontes-beltrán, S., García-peña, A., Díaz-caravantes, R., & Bravo, L. (2014). EVOLUCIÓN DE LA DINÁMICA VEGETAL MEDIANTE UNA SERIE DE IMÁGENES LANDSAT TM (1986-2011): REGIÓN CENTRAL DE CHIHUAHUA, MÉXICO. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 449–476.
- Bari, E., Nipa, N. J., & Roy, B. (2021). Association of vegetation indices with atmospheric & biological factors using MODIS time series products. *Environmental Challenges*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100376>
- CARDIQUE, CRA, CORMAGDALENA, UAESPNN, & CI. (2007). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca hidrográfica del complejo de humedales del Canal del Dique*.
- Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (2ª ed. [act.]). Ariel.
- Coneo Mendoza, Y., Barraza Pava, M., López Pineda, L., & Sáenz Zapata, J. (2014). *La subregión del Canal del Dique. Un mar de necesidades en un océano de riqueza*.
- Consortio Canal del Dique. (2018). *Ajuste y/o actualización del POMCA Canal del Dique*. https://crautonomia.gov.co/documentos/pomcas/canaldedique/4%20fase%20formulacion/Fase_Formulacion_Canal_Del_Dique_2903_vf.pdf

- De la Casa, A., & Ovando, G. (2006). Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 67–86.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019*.
- Ding, M., Yili, Z., Liu, L., Wei, Z., Zhaofeng, W., & Wanqi, B. (2007). The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 17. <https://doi.org/10.1007/s11442-007-0259-7>
- Dobbs, C., Hernández-Moreno, Á., Reyes-Paecke, S., & Miranda, M. D. (2018). Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America: The case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile). *Ecological Indicators*, 85, 1068–1080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.062>
- EOS Data Analytics. (2019, August 30). *What NDVI Value Represents Healthy Vegetation, A Positive One Or A Negative One?* <https://Eos.Com/Blog/Ndvi-Faq-All-You-Need-to-Know-about-Ndvi/>.
- EOS Data Analytics. (2021, November 9). *Teledetección: Tipos y aplicaciones de los sensores remotos*. <https://Eos.Com/Es/Blog/Teledeteccion/>. <https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>
- EOS Data Analytics. (2022). *NDVI: Normalized Difference Vegetation Index*. <https://Eos.Com/Make-an-Analysis/Ndvi/>. <https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/>
- ESRI. (2021). *Función NDVI*. <https://Pro.Arcgis.Com/Es/pro-App/Latest/Help/Analysis/Raster-Functions/Ndvi-Function.Htm>. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>
- García-Ruiz, J. M. (1988). La evolución de la agricultura de montaña y sus efectos sobre la dinámica del paisaje. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 146.
- Ghebregabher, M. G., Yang, T., Yang, X., & Eyassu Sereke, T. (2020). Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.003>

- González, G., Casas, V., Castillo, E., & Ramírez, L. (2022). Evaluación de patrones temporales en la dinámica para el cambio de cobertura vegetal en zonas rurales tropicales durante el periodo 2013-2018. Caso de estudio Chaguaní-Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.eptd>
- Guzmán Arévalo, D. F. (2021). *Cálculo del Índice de Vegetación de diferencia normalizada-NDVI usando la plataforma Google Earth Engine para los años 2019 y 2020 de la vereda la Florida en el municipio de Puerto Asís*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Hao, F., Zhang, X., Ouyang, W., Skidmore, A. K., & Toxopeus, A. G. (2012). Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environmental Modeling and Assessment*, 17(4), 389–398. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9297-8>
- Hlavka, C. A., & Strong, L. L. (1992). Assessing deforestation and habitat fragmentation in Uganda using satellite observations and fractal analysis. *Journal of Imaging Science and Technology*, 36(5), 440–445.
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., & Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.001>
- Hussien, K., Kebede, A., Mekuriaw, A., Beza, S. A., & Erena, S. H. (2023). Spatiotemporal trends of NDVI and its response to climate variability in the Abbay River Basin, Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e14113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14113>
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2022). Central and South America. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1689–1816). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2023). *The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. About the IPCC. <https://www.ipcc.ch/about/>
- Kumar, P., Rani, M., Pandey, P., Majumdar, A., & Scholar, R. (2010). Monitoring of Deforestation and Forest Degradation Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Ranchi in Jharkhand (India). In *Report and Opinion* (Vol. 2, Issue 4).

- Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). (2020). *LP DAAC - MOD13Q1*. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN G. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061/>
- Lasanta, T., Vicente-Serrano, S., & Romo, A. (2004). *Influencia de la topografía en la estacionalidad de la actividad vegetal: Análisis en el Pirineo occidental aragonés a partir de imágenes NOAA-AVHRR*.
- Levia, D. F., & Germer, S. (2015). A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics*, 53(3), 673–714. <https://doi.org/10.1002/2015RG000479>
- Li, Z.-L., & Becker, F. (1990). Properties and comparison of temperature-independent thermal infrared spectral indices with NDVI for HAPEX data. *Remote Sensing of Environment*, 33(3), 165–182. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90028-K](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90028-K)
- Liang, W.-L., Kosugi, K., & Mizuyama, T. (2009). A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope. *Journal of Hydrology*, 366(1), 62–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.009>
- Lin, M., Hou, L., Qi, Z., & Wan, L. (2022). Impacts of climate change and human activities on vegetation NDVI in China's Mu Us Sandy Land during 2000–2019. *Ecological Indicators*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109164>
- Lin, X., Niu, J., Berndtsson, R., Yu, X., Zhang, L., & Chen, X. (2020). Ndvi dynamics and its response to climate change and reforestation in Northern China. *Remote Sensing*, 12(24), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12244138>
- Liu, L., Wang, Y., Wang, Z., Li, D., Zhang, Y., Qin, D., & Li, S. (2019). Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 107, 105569. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105569>
- Millán, S., Rodríguez, A., & Sierra-Correa, P. (2021). Delimitación y tipificación de humedales costeros: implicaciones para la gestión ambiental del Caribe continental colombiano. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 50. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.1.994>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, November). *La cuenca y sus características básicas*. Plataforma Colaborativa 5 Canal Del Dique. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/plataformas-colaborativas/plataforma-colaborativa-5-canal-del-dique/>
- Mogollón Vélez, J. V. (2013). *El Canal del Dique. Historia de un desastre ambiental* (El Áncora Editores, Ed.). <https://www.canaldeldique.com/anexos/CUERPO%20DIQUE%20%C3%81NCORA.pdf>
- Musse, M. A., Barona, D. A., & Santana Rodriguez, L. M. (2018). Urban environmental quality assessment using remote sensing and census data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 95–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.010>
- Nath, B. (2014). Quantitative Assessment of Forest Cover Change of a Part of Bandarban Hill Tracts Using NDVI Techniques. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(1), 21–27. <https://doi.org/10.12691/jgg-2-1-4>
- National Aeronautics and Space Administration NASA. (2023a). *About Terra*. TERRA: The EOS Flagship. <https://terra.nasa.gov/about>
- National Aeronautics and Space Administration NASA. (2023b). NASA Holds discussions about the future of the EOS flagship missions. *The Earth Observer*, 1–45. www.nasa.gov
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magallanes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., & Lee, D. (2009). Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. In *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/0896295370>
- Nicholson, S. E., Davenport, M. L., & Malo, A. R. (1990). A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17(2), 209–241. <https://doi.org/10.1007/BF00138369>
- Nse, O. U., Okolie, C. J., & Nse, V. O. (2020). Dynamics of land cover, land surface temperature and NDVI in Uyo City, Nigeria. *Scientific African*, 10, e00599. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00599>

- Observatorio. Fondo de agua de Cartagena. (2016). *SISTEMA CANAL DEL DIQUE. ÁREA DE INFLUENCIA DEL FONDO DE AGUA DE CARTAGENA*. <https://fondodeaguacartagena.org/area-de-influencia/>
- Ordoñez, J., Camacho-Botero, L., Mora, L., & Pinilla Agudelo, G. (2013, September 30). El control activo de caudales en el Canal del Dique. *Anales de Ingeniería de La Sociedad Colombiana de Ingenieros.*, 927, 28–39.
- Ortega Gaucin, D., Cruz Bartolón, J. de la, Castellano Bahena, H., Ortega Gaucin, D. 161651, DE LA CRUZ BARTOLON, J. 98592, & CASTELLANO BAHENA, H. V. 43934. (2018). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología*, 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Pinilla A, G. A., & Duarte C, J. (2006). *La importancia ecológica de las ciénagas del Canal del Dique y la determinación de su estado limnológico*. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7164/Limnologia_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pinilla Agudelo, G., Coy, J., & Mora, L. (2010). Limnological State Index (LSI) to Evaluate Ecological Conditions of the Canal del Dique Wetlands, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 15, 169–188.
- Posada Posada, B. O., & Henao Pineda, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano*.
- Reid, C. E., Kubzansky, L. D., Li, J., Shmool, J. L., & Clougherty, J. E. (2018). It's not easy assessing greenness: A comparison of NDVI datasets and neighborhood types and their associations with self-rated health in New York City. *Health & Place*, 54, 92–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.09.005>
- Relevo Luna, D., Mejía Manzano, J., Montya-Bonilla, B., & Hoyos García, J. (2020). *Analysis of the Vegetation Indices NDVI, GNDVI, and NDRE for the Characterization of Coffee Crops (Coffea arabica)* (Vol. 38).
- Riebau, A. R., & Qu, J. J. (2005). Application of Remote Sensing and GIS for Analysis of Forest Fire Risk and Assessment of Forest Degradation. In M. V. K. Sivakumar, R. P. Motha, & H. P. Das (Eds.), *Natural Disasters and Extreme Events in Agriculture: Impacts and Mitigation* (pp. 335–350). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-28307-2_19

- Salinas-Zavala, C. A., Martínez-Rincón, R. O., & Morales-Zárate, M. V. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 2017(94), 82–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.14350/rig.57214>
- Schultz, P. A., & Halpert, M. S. (1993). Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research*, 13(5), 277–280. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90559-T](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90559-T)
- Sharma, M., Bangotra, P., Gautam, A. S., & Gautam, S. (2022). Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(6), 1779–1789. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02066-1>
- Siles, P., Vaast, P., Dreyer, E., & Harmand, J.-M. (2010). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*. *Journal of Hydrology*, 395(1), 39–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.005>
- Sohoulande Djebou, D. C., Singh, V. P., & Frauenfeld, O. W. (2015). Vegetation response to precipitation across the aridity gradient of the southwestern United states. *Journal of Arid Environments*, 115, 35–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.01.005>
- Solh, M., & Van Ginkel, M. (2014). Drought preparedness and drought mitigation in the developing world's drylands. *Weather and Climate Extremes*, 3, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.003>
- Solh, M., Van Ginkel, M., & Ortiz, R. (2013). *Innovative Agriculture for Food Security An integrated agro-ecosystems approach Science & Policy Comment*. www.icarda.org
- Sun, L., Zhao, D., Zhang, G., Wu, X., Yang, Y., & Wang, Z. (2022). Using SPOT VEGETATION for analyzing dynamic changes and influencing factors on vegetation restoration in the Three-River Headwaters Region in the last 20 years (2000–2019), China. *Ecological Engineering*, 183, 106742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106742>

- Torres-Bejarano, F., Torregroza-Espinosa, A. C., Martínez-Mera, E., & González-Márquez, L. C. (2022). Impact of land cover changes on water quality: an application to the Guájaro reservoir, Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04535-8>
- Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A. A., Javed, M. F., Nazir, A., Abbasi, A. M., Aziz, M., & Mohamed, A. (2023). Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon*, 9(2), e13322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322>
- Unidad de Planeación Rural Agropecuaria UPRA. (2022). *Informe de Gestión Institucional*.
- Viana, C. M., Oliveira, S., Oliveira, S. C., & Rocha, J. (2019). 29 - Land Use/Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis. In H. R. Pourghasemi & C. Gokceoglu (Eds.), *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences* (pp. 621–651). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6>
- Wang, H., Chen, A., Wang, Q., & He, B. (2015). Drought dynamics and impacts on vegetation in China from 1982 to 2011. *Ecological Engineering*, 75, 303–307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.063>
- Wang, M. C., Liu, C. P., & Sheu, B. H. (2004). Characterization of organic matter in rainfall, throughfall, stemflow, and streamwater from three subtropical forest ecosystems. *Journal of Hydrology*, 289(1), 275–285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.026>
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94(2), 244–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.006>
- Wang, Z., Wang, X., Zhang, Y., Liao, Z., Cai, J., & Yu, J. (2023). Estimation of a suitable NDVI oriented for ecological water savings and phytoremediation in Baiyangdian Lake, North China. *Ecological Indicators*, 148, 110030. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110030>

Xiong, Y., & Wang, H. (2022). Spatial relationships between NDVI and topographic factors at multiple scales in a watershed of the Minjiang River, China. *Ecological Informatics*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101617>

Zhan, Z.-Z., Liu, H.-B., Li, H.-M., Wu, W., & Zhong, B. (2012). The Relationship between NDVI and Terrain Factors - A Case Study of Chongqing. *Procedia Environmental Sciences*, 12, 765–771. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.347>