

DOI: 10.35319/acta-nova.20233

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

Centro de Levantamientos
Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para
el Desarrollo Sostenible de los
Recursos Naturales.
Campus Central UMSS, Edificio
Multiacadémico 2º piso (Jordán y
Oquendo). Cochabamba, Bolivia

Correspondencia:

Nelson Jery Sanabria Siles
n.sanabria@umss.edu

Área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada mediante series de tiempo de índices espectrales de vegetación (Periodo de estiaje 1990 – 2022)

Downstream Influence Area of La Cañada Dam through Time Series of Spectral Vegetation Indices (Dry Period 1990 - 2022)

Nelson Jery Sanabria Siles, María René Sandoval Gómez, Javier Stephan Dalence Martinic

Resumen: La interrupción y regulación del flujo del agua en un río por efecto de la construcción de una presa, puede disminuir la humedad tanto del suelo como de las hojas de las plantas de la ribera del río, o, por otro lado, puede favorecer la presencia de nueva vegetación. La dinámica de cambio de la vegetación puede ser monitoreada a partir de su reflectancia, utilizando índices espectrales. Este estudio estima el área de influencia sobre la vegetación, aguas abajo de la presa La Cañada, empleando series de tiempo de imágenes Landsat (1990 – 2022), con fines de delimitación de área de influencia y de monitoreo. La presencia de vegetación fue evaluada mediante cuatro índices espectrales: NDVI, NDWI, MSI y el índice de verdor de Tasseled Cap (Greenness); este último índice demostró una mayor capacidad para discriminar la presencia de vegetación de otras coberturas. Los análisis de tendencias y homogeneidad reflejan que previo a la construcción de la presa, las áreas vegetación mostraban mayor variabilidad y dispersión, con marcada ausencia de vegetación; sin embargo, tras la construcción de la presa, se evidencia una tendencia positiva y un notable incremento en la presencia de vegetación en la zona. Se demostró que la presa tiene un impacto favorable aguas abajo, ya que las áreas de vegetación aumentaron en un 30% y los valores de verdor que indican presencia de vegetación aumentaron en un 27,5%. 82 % de la superficie estudiada, presentó un cambio positivo en la presencia de vegetación cercana al río principal.

Palabras clave: Tasseled Cap, La Cañada, índices espectrales, área de influencia, series de tiempo

1 Introducción

Las presas o represas son estructuras que cumplen un papel fundamental en el suministro de agua potable, agua para riego, generación de energía eléctrica, la regulación de caudales, la protección contra las inundaciones, recreación y turismo (Alla & Lee, 2021; Fernández Cruz & Rivero, 2022; Galván Plaza, 2020; Schmutz & Moog, 2018). Los impactos negativos al medio ambiente y a la sociedad, se presentan en la etapa de construcción, en la etapa de funcionamiento operacional y durante el cierre o

Abstract: The construction of a dam that disrupts the water flow in a river can decrease both soil and leaf moisture in plants, or alternatively, it can positively alter the dynamics of vegetation along the riverbank. Vegetation can be estimated based on its reflectance using spectral indices. This study estimates the influence area on downstream vegetation of La Cañada Dam, utilizing time series of vegetation spectral indices during the low-flow period (June, July, and August), for purposes of delimitation of area of influence and monitoring. The presence of vegetation was evaluated using four spectral indices: NDVI, NDWI, MSI, and the Tasseled Cap greenness index; the latter index demonstrated a greater ability to accurately discriminate the presence of vegetation. Trend and homogeneity analyses reflect that prior to the construction of the dam, the data exhibited higher variability and a noticeable absence of vegetation; however, post-dam construction, a positive trend, and a significant increase in vegetation presence in the area are evident. It was demonstrated that the dam has a favorable impact downstream, with a 30% increase in vegetation areas and a 27,5% increase in greenness values indicating vegetation presence. 82 % of the area studied, presented a positive change in the presence of vegetation near the main river.

Keywords: Tasseled Cap, La Cañada, spectral indices, influence area, time series

abandono de la presa (Delladova, 2011; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS), 2019; Vilorio Villegas, Cadavid, & Awad, 2018). Las presas pueden tener un efecto significativo en los ecosistemas acuáticos y terrestres, incluida la pérdida de hábitats naturales y la alteración de los patrones de migración de la fauna. Asimismo, alteran el flujo del agua, lo cual puede tener impactos aguas abajo, incluida la reducción de la disponibilidad de agua para ecosistemas y comunidades río abajo (Andrade & Olaya, 2023; Fernández Cruz & Rivero, 2022).

Si entendemos Impacto Ambiental (IA) como la alteración producida en el medio natural donde el hombre desarrolla su vida, ocasionada por un proyecto o actividad dados (Sanz, 1991, citado por Pelaez & Correa, 2004, p.78), o como la alteración de la calidad del medio ambiente producida por una actividad humana (Salvador et al., 2005), los proyectos de construcción de presas o represas impactarán sobre su entorno en las diferentes y sucesivas etapas de su desarrollo (Andrade & Olaya, 2023; Católico, et al., 2021; SAyDS, 2019; Vilorio Villegas, Cadavid, & Awad, 2018).

De acuerdo al Sistema Nacional de Evaluación del impacto ambiental (SEIA, 2018), el área donde se manifestarán los impactos ambientales de un proyecto, el cual considera todos los factores ambientales en su conjunto, y sobre los cuales el proyecto podría generar algún impacto ambiental, puede definirse como el Área de Influencia (AI) del proyecto, por lo tanto, será una superficie que se extenderá en función de los impactos potenciales, y representará uno de los principales resultados de una evaluación de impacto ambiental. En consecuencia, también será aquella área sobre la cual el proyecto debe prever las medidas de mitigación y el plan de gestión ambiental (SAyDS, 2019), asimismo, representará el área o espacio geográfico de donde se obtiene la información necesaria para predecir y evaluar los impactos en los elementos del medio ambiente (SEIA, 2018).

Dentro el área de influencia se pueden distinguir un Área de Influencia Directa (AID), que corresponde a todos aquellos espacios físicos donde los impactos se presentan de forma evidente, entendiéndose como impacto ambiental a la alteración favorable o desfavorable, en el medio o en un componente del medio, consecuencia de una actividad o acción (Conesa Fernández-Vitoria, 2009), es decir, al área donde se emplaza el proyecto, conformado por la suma de las áreas que serán ocupadas por los componentes del proyecto y en su entorno a los componentes ambientales (Sistema Nacional de Evaluación del impacto ambiental (SEIA), 2018). Asimismo, se distingue un Área de Influencia Indirecta (AII), vinculada al área donde se manifiestan impactos indirectos de segundo o tercer orden respecto a las actividades del proyecto.

El área de influencia se obtiene como resultado de la evaluación de varios impactos (aguas arriba, zona de emplazamiento, aguas abajo, más los impactos socioeconómicos), por lo tanto, es una sumatoria de varias superficies que pueden sobreponerse entre sí o no, este proceso permitirá identificar cuáles serán los sitios de mayor o menor alteración causada por la ejecución de las actividades durante el ciclo del proyecto.

En teledetección, los índices espectrales son herramientas fundamentales para el monitoreo de vegetación debido a

las numerosas ventajas que ofrecen, por ejemplo: Resaltan las características de la vegetación en las imágenes satelitales o aéreas, son altamente sensibles a la presencia y salud de la vegetación (Villatoro, Fuentes, & Barrera, 2021). No dependen de condiciones atmosféricas porque muchos índices espectrales se crean combinando múltiples bandas, lo que reduce la influencia de la atmósfera en los resultados (Roy, 2021). Facilidad de interpretación: Los índices espectrales proporcionan valores numéricos que pueden compararse directamente con umbrales o valores de referencia. Esto facilita la interpretación y el análisis de los datos para identificar cambios en la vegetación. Monitorización a largo plazo (Das, 2021), esto es especialmente valioso para estudios de cambio climático, deforestación, degradación de la tierra y seguimiento de la salud de los ecosistemas. Detección temprana de estrés vegetal: Los índices espectrales pueden detectar signos de estrés en las plantas antes de que sean visibles a simple vista (Jeremy, David, Julia, & Clifford, 2004), esto es crucial para la gestión de cultivos, la detección de enfermedades vegetales y la evaluación de la sequía. Algunos ejemplos de índices espectrales ampliamente utilizados incluyen el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), y el Índice de Vegetación Realzado o mejorado (EVI). Estos índices y otros similares han demostrado ser herramientas valiosas en la monitorización y el estudio de la vegetación en una amplia variedad de aplicaciones, desde la agricultura hasta la conservación ambiental (Ahmed & Akter, 2017; Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019; Das, 2021; Fornacca, Ren, & Xiao, 2018; Jeremy, et al., 2004).

El presente estudio evalúa series de tiempo de índices espectrales de la vegetación aguas abajo de la presa La Cañada, con fines de delimitación de área de influencia y monitoreo, para ello se ha empleado bandas de imágenes satelitales para seleccionar áreas de cambio mediante un índice espectral que permita discriminar la vegetación de otras coberturas de mejor manera.

Asimismo, es importante mencionar que esta investigación ha sido generada dentro del Programa mibio *“Improved biodiversity conservation and management through monitoring of ecological and social impacts of hydropower megaprojects in Bolivia (2020 – 2023)”*, en el marco de Convenio entre las Universidad de Bonn (UNIBONN), Universidad Católica Boliviana, (UCB), la Universidad Mayor de San Simón (UMSS).

2 Planteamiento del problema de investigación

La delimitación del área de influencia de proyectos con construcción de una presa podría parecer una actividad simple y fácil; sin embargo, su determinación es compleja

ya que, además de consideraciones de tipo social y económico, involucra delimitar superficies de afectación ambiental, que incluyen estudios del embalse, la represa y sus alrededores, la cuenca o cuencas del río, y las zonas aguas abajo de la represa. Además, debe ser realizada con la participación de expertos en diversas áreas, desde un enfoque multidisciplinario y con cumplimiento de regulaciones ambientales y legales vigentes.

La vegetación a orillas del río aguas abajo de una presa, ya sea hidroeléctrica o de otros fines, se verá eventualmente afectada con la interrupción del curso de agua, donde puede ocasionar estrés o sequedad en las plantas, o donde, por el contrario, la regulación del caudal aumente a lo largo del año, la disponibilidad de agua. En cualquiera de los casos, la dinámica de la vegetación a la ribera del río se verá siempre afectada, por lo que es importante evaluar los impactos que se están produciendo para poder realizar medidas correctivas cuando sea necesario.

La evaluación de impacto ambiental convencional necesita buscar nuevas técnicas que minimicen el tiempo, esfuerzo y gastos operativos tanto en la identificación de áreas de influencia directa, sobre todo aquellos que permitan utilizar datos geo referenciados y de disponibilidad gratuita en internet.

3 Objetivos

El objetivo principal es estimar el área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada, mediante la aplicación de series de tiempo de índices espectrales de vegetación, durante el periodo de estiaje (1990 al 2022).

Objetivo específico 1. Determinar superficies de vegetación para la época seca (junio, julio y agosto) del periodo de 1990 al 2022 mediante análisis de series de tiempo de índices espectrales derivados de imágenes Landsat 5, 7 y 8.

Objetivo específico 2. Evaluar la variación de la superficie de vegetación cercana a orillas del río a través mediante análisis de frecuencia, de tendencia y de homogeneidad,

4 Sustento Teórico

4.1 Índices espectrales

Los índices espectrales son medidas cuantitativas derivadas de las propiedades espectrales de la luz reflejada o emitida por la superficie terrestre, que se utiliza para caracterizar y analizar características específicas de la superficie terrestre, como la vegetación, la humedad del suelo, la presencia de agua, entre otros, a partir de datos recopilados por sensores remotos.

Están basados en la relación entre las bandas espectrales de las imágenes, se expresan como una proporción simple o como una serie de algoritmos entre bandas, que involucra, “el proceso o transformación desde información espectral cruda contenida en imágenes de sensores remotos, con la finalidad de que la sensibilidad de estas bandas resalte cambios en la superficie terrestre y sus variaciones en el tiempo” (Fornacca, Ren, & Xiao, 2018).

Los índices espectrales asociados a la evaluación de la vegetación son el resultado de la transformación de dos o más bandas, que contribuyen en la mejora del análisis de las propiedades de la vegetación y permiten obtener la distribución espacial de contenido de clorofila y otros componentes, así como la estructura de la vegetación de manera fiable y rápida (Huet et al., 2002) citado por (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019).

4.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ha sido utilizado ampliamente para estudios de vegetación empleando teledetección (Das, 2021; Gao B. C., 1996 citado por Phan, Kuch, & Lehnert, 2020; Le Maire et al., 2011; Peters et al., 2002). Jeremy et al., 2004, define NDVI como la proporción o cociente (ratio) de los valores de reflectancia de las porciones de Infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (RED), del espectro electromagnético (rangos 0.72–1.10 and 0.58–0.68 μm , respectivamente). Por su parte Gao B. C., 1996 explica que, la Banda roja está localizada en una región de fuerte absorción de clorofila, mientras que la Banda de Infrarrojo cercano, está localizada en la zona de alta reflectancia de las cubiertas vegetales. La reflectancia de la porción roja del espectro disminuye a medida que la radiación solar es absorbida, en gran parte por la clorofila, mientras que la reflectancia de la porción del infrarrojo cercano es causada por la estructura del mesófilo de las hojas. Los dos canales perciben profundidades muy diferentes a través de las cubiertas vegetales.

Los valores de NDVI teóricamente varían en un rango de –1.0 a +1.0. Los valores positivos (NIR>RED) indican verde, superficies de vegetación, y los valores positivos altos indican incrementos en vegetación verde. Los valores negativos de NDVI indican superficies sin vegetación como agua, hielo y nieve. Los estudios han relacionado el NDVI con variables biofísicas como el área foliar, la cobertura del dosel, la productividad y la densidad de clorofila, así como con la fenología de la vegetación (Gao B. C., 1996; Kremer & Running, 1993, citado por Jeremy et al., 2004; Yunlong, et al., 2022).

El NDVI, puede ser obtenido a través de la siguiente expresión.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red)} \quad \text{Ec. 1}$$

4.3 Índice de Agua de Diferencia Normalizada NDWI (Normalized Difference Water Index)

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) es un índice espectral derivado de las bandas del infrarrojo cercano (NIR Near Infrared) y de infrarrojo de onda corta (SWIR short wave infrared) que reflejan cambios en el contenido de agua (absorción de la radiación SWIR) y el mesófilo esponjoso de las cubiertas (Gao B. C., 1996 citado por Gu *et al.*, 2007). Debido a que el NDWI está influenciado tanto por la desecación como por el marchitamiento de la cubierta vegetal, puede ser un indicador más sensible que el NDVI para el seguimiento de la sequía (Gu *et al.*, 2007).

El NDWI ha demostrado tener una mejor correlación con el contenido de agua de las hojas que los índices de vegetación que emplean la banda visible y la banda infrarroja (Chen, Huang, & Jackson, 2005; Gao B. C., 1996). En comparación con el NDVI, se ha descubierto que la saturación de este índice espectral basado en SWIR es más pronunciado. Las bandas SWIR de 1640 y 2130 nm, disponibles en Landsat, fueron utilizadas para demostrar que la absorción de agua era dominante y sensible a las variaciones del contenido de agua de la vegetación (Chen, Huang, & Jackson, 2005; Jackson, *et al.*, 2004).

De acuerdo con Gao (1996), citado por (Gao *et al.*, 2015), la absorción por parte de la vegetación de agua líquida cercana a 0,86 μm es insignificante. Hay una débil absorción de líquido a 1,24 μm . La dispersión del dosel mejora la absorción de agua. Como resultado, el NDWI es sensible a los cambios en el contenido de agua líquida de las cubiertas vegetales. El NDWI es menos sensible a los efectos atmosféricos que el NDVI. GAO (1996) también menciona que el NDWI debería ser considerado como un índice de vegetación independiente y que es complementario y no sustituto del NDVI.

McFeeters (1996), utilizó este índice para resaltar e identificar cuerpos de agua en imágenes satelitales. Se calcula restando el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (NIR) del valor de reflectancia en la banda del verde (GREEN) (rangos 0.72–1.10 and 0.52–0.565 μm , respectivamente) y luego dividiendo el resultado por la suma de estos dos valores. Este índice ha demostrado ser eficaz para la detección de agua en diversos entornos y ha sido ampliamente utilizado en estudios de teledetección (Chen, Huang, & Jackson, 2005; Gu *et al.*, 2007; McFeeters 2013; Xu, 2006; Yunlong, *et al.*, 2022).

Los valores negativos del NDWI indican la ausencia de agua, mientras que los valores positivos indican la presencia de agua, por lo que se interpreta como un indicador de la cantidad de agua presente en la vegetación y el suelo. El NDWI se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, como la detección de inundaciones, la monitorización de agua y la evaluación del estrés hídrico en las plantas (Ahmed & Akter, 2017; Xu, 2006; Yunlong, *et al.*, 2022).

El NDWI puede ser obtenido a través de la siguiente expresión, según Método de McFeeters (1996).

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad \text{Ec. 2}$$

4.4 Índice de estrés por humedad MSI (Moisture Stress Index)

Villatoro (Villatoro, Fuentes, & Barrera, 2021) explica que el MSI es una medida de reflectancia que es sensible al aumentar el contenido de agua de la hoja. A medida que el contenido de agua en la copa de las plantas aumenta la fuerza de la absorción alrededor de 1599 nm aumenta. La absorción a 819 nm casi no es afectada por el cambio de contenido de agua, por lo que se utiliza como referencia.

El MSI tiene relación inversa con los otros índices de vegetación de agua, los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua. El valor de este índice varía de 0 a más de 3. El intervalo común para la vegetación verde es de 0.4 a 2,0 (Villatoro, Fuentes, & Barrera, 2021).

Las aplicaciones de este índice incluyen el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad y el modelamiento, análisis del estado del riesgo de incendio, y los estudios de la fisiología del ecosistema.

El NDWI puede ser obtenido a través de la siguiente expresión:

$$MSI = \frac{Mid IR}{NIR} \quad \text{Ec. 3}$$

4.5 Transformación Tasseled Cap (Tasseled Cap Transformation)

El Tasseled Cap Transformation (Kauth & Thomas, 1976) es una transformación de teledetección que se utiliza para analizar y mapear fenómenos de vegetación y cambios en el desarrollo urbano detectados por varios sistemas de sensores satelitales (ESRI, 2020). Esta transformación se conoce como "Tasseled Cap" debido a la forma de la distribución gráfica de los datos que adopta una forma de "gorro con pompón". Proporciona una forma analítica de detectar y comparar cambios en vegetación, suelo y características artificiales a lo largo del tiempo (Dymond, Mladenoff, & Radeloff, 2002).

Tasseled Caps puede ser considerado como un conjunto de índices espectrales en lugar de un solo índice. El Tasseled Cap es una transformación que se aplica a las bandas espectrales de una imagen satelital para resumir la información espectral en tres componentes principales o índices conocidos como el "brillo" (Brightness), el "verde" (Greenness) y el "humedad" (Wetness) (Healey, et al., 2005). La transformación se basa en la combinación lineal de las bandas espectrales originales, generalmente en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano, y permite reducir la dimensionalidad de los datos, facilitando así la interpretación y el análisis de las imágenes. Estos tres índices del Tasseled Cap se derivan matemáticamente a partir de las bandas espectrales originales, generalmente en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano. Cada uno de estos índices tiene un significado particular:

Índice de brillo (Brightness): Relacionado con la luminancia o la reflectancia de las superficies y describe cómo la luz es reflejada por la superficie. Puede estar relacionado con la cantidad de vegetación y la aspereza del terreno.

Índice de Verdor (Greenness): Se relaciona con la cantidad y la salud de la vegetación. Puede indicar la densidad de vegetación y cambios en la vegetación a lo largo del tiempo.

Índice de Humedad (Wetness): Se asocia con la cantidad de agua presente en la superficie. Puede utilizarse para detectar áreas húmedas o zonas con estrés hídrico.

4.6 Series de tiempo

Murillo, Trejos, & Olaya Carvajal (2003), definen Serie de Tiempo como cualquier variable que conste de datos reunidos, registrados u observados sobre incrementos sucesivos de tiempo; por lo tanto, en teledetección, una serie de tiempo hace referencia a una secuencia ordenada de observaciones o mediciones tomadas a lo largo del tiempo en un lugar específico o en múltiples lugares. Estas observaciones pueden incluir datos de satélites, sensores remotos, estaciones meteorológicas u otras fuentes, y se utilizan para analizar y monitorear cambios y tendencias en la superficie de la Tierra a lo largo del tiempo.

4.7 Plataforma de Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE), una plataforma informática basada en la nube puede resolver los problemas más importantes relacionados con el mapeo de la cobertura terrestre de grandes áreas. Los usuarios pueden analizar todas las imágenes disponibles obtenidas de forma remota utilizando un editor de código de entorno de desarrollo integrado (IDE) basado en la web sin descargar estos datos a la máquina local. De esta manera, los usuarios pueden acceder, seleccionar y procesar fácilmente grandes volúmenes de datos para una gran área de estudio (Phan, Kuch, & Lehnert, 2020).

5 METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio



Figura 1: Ubicación del área de estudio. Presa La Cañada, Comarapa.

La Presa "La Cañada" está localizada a 6 km al Suroeste de la población de Comarapa Figura 1, capital de la provincia Manuel María Caballero, en el Departamento de Santa Cruz. Coordenadas geográficas Latitud 17° 56' 34" Sur y

Longitud 64° 34' 24" oeste. Altitud aproximada de 1800 msnm. Su curso de agua principal es el Río Comarapa. Esta represa es la obra hidráulica más importante del Proyecto de Riego Comarapa-Saipina, fue la primera represa en

Bolivia, construida con el método de hormigón compactado con rodillo RCC (Roller Compacted Concrete). Su construcción finalizó el año 2002, fue realizada con el fin de aumentar la oferta de agua en la zona semiárida de los valles intermedios y entró en funcionamiento desde el año 2003. Tiene una altura de 52 metros y una corona de 155 metros de longitud, con una capacidad de embalse de 10 X 106 m³. La zona es productora de hortalizas, legumbres y frutas. La región posee clima semiárido, con una temperatura media de 20,8°C.

5.2 Datos y procesamiento

El análisis de los índices espectrales se realizó para la época seca, utilizando un promedio de los valores de reflectancia de junio, julio y agosto, para las imágenes disponibles de Landsat 5, 7 y 8 nivel-2, desde 1990 hasta el 2022, cuya colección por año es de aproximadamente 22 imágenes.

El procesamiento y análisis de las imágenes se realizó mediante la plataforma de Google Earth Engine (GEE) (Gorelick, 2017), donde se realizó la corrección de máscara de nubes y sombras mediante banda QA_Pixel (Roy et al., 2021), que contiene la información de las estadísticas de calidad de cada pixel de la imagen, adicionalmente mediante un enmascaramiento se eliminaron todos los pixeles afectados por nubes y sombras; para que finalmente, mediante un reductor de promedio se obtenga los valores de reflectancia promediados para el período de interés. (julio a agosto); permitiendo resumir la información espectral de las imágenes en una sola imagen promedio para cada año, lo que facilitó el análisis de tendencias a lo largo del tiempo en relación con las condiciones de la vegetación.

Con el fin de establecer los cambios que se generaron aguas abajo, por efecto del emplazamiento de la presa, se derivaron los índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), Índice de Estrés Hídrico (MSI) y la transformación de Tasseled Cap, que genera nuevos ejes que maximiza la información contenida en las bandas espectrales, permitiendo determinar el vigor de la vegetación dentro el espacio espectral (Kauth & Thomas, 1976). Los resultados, mostraron una satisfactoria correlación con la cobertura vegetal, siendo que transformación de Tasseled Cap, demostró ser altamente eficaz para resaltar los cambios en la vegetación.

5.3 Transformación de Tasseled Cap

La transformación Tasseled Cap, utiliza los datos de 6 bandas espectrales (3 visibles, 1 infrarrojo cercano y 2 infrarrojas de onda corta), siendo el índice de verdor (Greenness) el cual permitió capturar de manera más detallada de la dinámica de la vegetación a lo largo del

tiempo. El neo canal de verdor se obtuvo mediante la siguiente transformación:

$$Verdor = \sum_{k=1}^6 C_{kv} \rho_k \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde, C_{kv} representa el coeficiente para obtener verdor (v) de la banda k; que se detallan en la Tabla 1, para los diferentes sensores de Landsat.

Tabla 1. Coeficientes de Tasseled Cap. Coeficientes utilizados para transformar los datos de reflectancia de superficie del sensor Landsat al neocanal de verdor.

Sensor	Azul	Verde	Rojo	NIR	SWIR1	SWIR2
LandSat 5	-0,1603	-0,2819	-0,4934	0,7940	-0,0002	-0,1446
LandSat 7	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7242	0,0840	-0,1800
LandSat 8	-0,2941	-0,2430	-0,5424	0,7276	0,0713	-0,1608

Fuente: www.indexdatabase.de (Henrich, 2012)

5.4 Tendencia y homogeneidad de los datos

Los datos transformados fueron analizados mediante dos pruebas estadísticas clave: el Test de Mann-Kendall y el Test de Homogeneidad de Pettitt.

Los datos transformados fueron sometidos al Test de Mann-Kendall, una prueba utilizada para identificar posibles tendencias positivas de cambio. Se consideraron dos períodos distintos; el primero abarcó desde 1990 hasta 2001, antes de la construcción de la presa y segundo fue 2005 hasta 2022, después del emplazamiento y puesta en funcionamiento.

Adicionalmente, se aplicó el Test de homogeneidad de Pettitt para evaluar la presencia de cambios abrupto en la serie de datos a lo largo del tiempo. Este cambio puede manifestarse como un punto de cambio súbito en los valores de la serie temporal, lo que indica una falta de homogeneidad en los datos. Así mismo, se consideraron los dos periodos, antes y después de la construcción de la presa.

5.5 Detección de cambios

Con el propósito de identificar las modificaciones en el área de influencia de la presa, se estableció una franja considerando las áreas planas que son susceptibles a la expansión de cultivos. Esta franja se determinó mediante el cálculo del flujo acumulado, ya que estas áreas tienen un potencial significativo para la acumulación de flujo.

El año 1990, se considera como el punto de partida, representando la situación inicial, siendo que los cambios desde el 1990 hasta el 2022 resumen la transición y al aumento de áreas de cultivo. Estos cambios se evaluaron de manera anual y en periodos de seis años exceptuando el periodo comprendido del 2002 al 2004 (periodo de construcción de la presa), mediante la diferencia de los

valores de píxeles entre la situación inicial y los estados posteriores Figura 2.

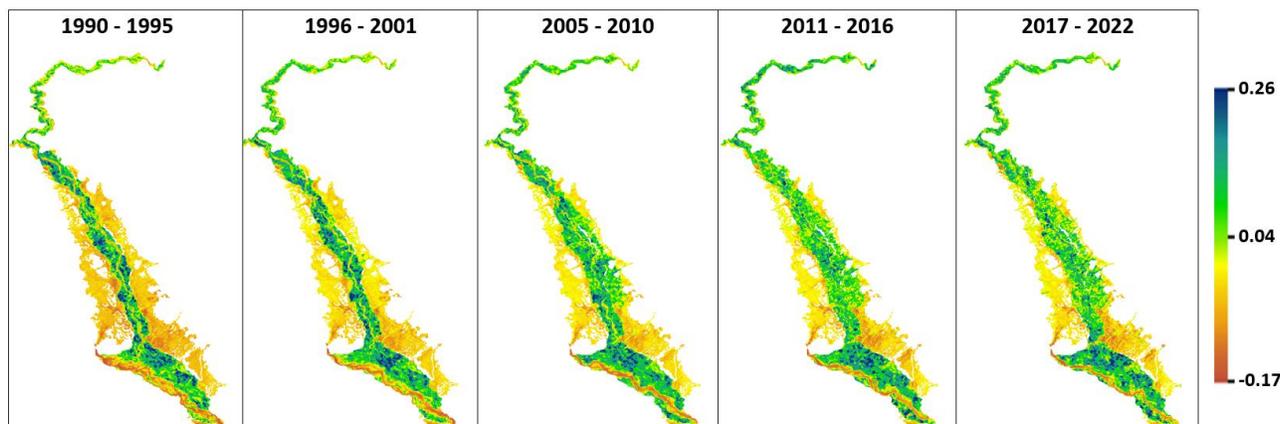


Figura 2: Serie de imágenes de verdor (Tasseled Cap) desde 1990 al 2022, promediadas cada 6 años. Periodo de 1990 al 2001, antes de que se construya la presa y después del emplazamiento de la presa, 2025 al 2022. Procesamiento y análisis de las imágenes satelitales mediante la plataforma Google Earth Engine.

En última instancia, se establecieron umbrales específicos que se detallan en la Tabla 2, exhibiendo los cambios que se han producido a través del tiempo.

Tabla 2. Tasa de cambio

Tasa de cambio	Codificación	Descripción
< - 10%	(--)	Cambios negativos significativos, que denotan decremento alto de los valores del índice (NDVI, NDWI, MSI, Verdor).
- 10% a -5%	(-)	Cambios negativos bajos, que denotan decremento bajo de los valores del índice (NDVI, NDWI, MSI, Verdor).
- 5% a 5%	(o)	Sin cambios, que denota que los valores del índice (NDVI, NDWI, MSI, Verdor) se mantienen.
5% a 10%	(+)	Cambios positivos bajos, que denotan incremento bajo de los valores del índice (NDVI, NDWI, MSI, Verdor).
> 10%	(++)	Cambios positivos significativos, que denotan incremento alto de los valores del índice (NDVI, NDWI, MSI, Verdor).

5.6 Área de influencia aguas debajo de la presa

El área de influencia aguas debajo de la presa se basa en el índice de verdor derivado de la transformación Tasseled Cap, que refleja la condición y vitalidad de la vegetación. Este indicador, llamado "verdor", es una representación

de la salud de la vegetación. Con el fin de establecer el área de influencia aguas abajo de la presa, se analizaron los valores máximos de cada píxel registrados entre 1990 y 2022, donde se definió como área de influencia a todos aquellos píxeles que superaban el umbral de 0,05; esta selección se basa en la presencia de valores positivos, indicando la existencia de vegetación en algún momento.

6 Resultados

6.1 Series de tiempo

La determinación de índices de normalizados de vegetación NDVI, agua NDWI, estrés hídrico MSI y la transformación de Tasseled Cap, permitieron identificar el comportamiento anual de la variación de la vegetación del periodo de estiaje (junio, julio y agosto), donde se puede evidenciar que los índices reportaron un comportamiento similar, Figura 3. Antes del emplazamiento de la presa, la dispersión entre los valores de los índices es aproximadamente del 9,13% con respecto al valor central; sin embargo, tras la implementación de la presa, esta dispersión disminuye, siendo que esta dispersión se reduce al 4,35%.

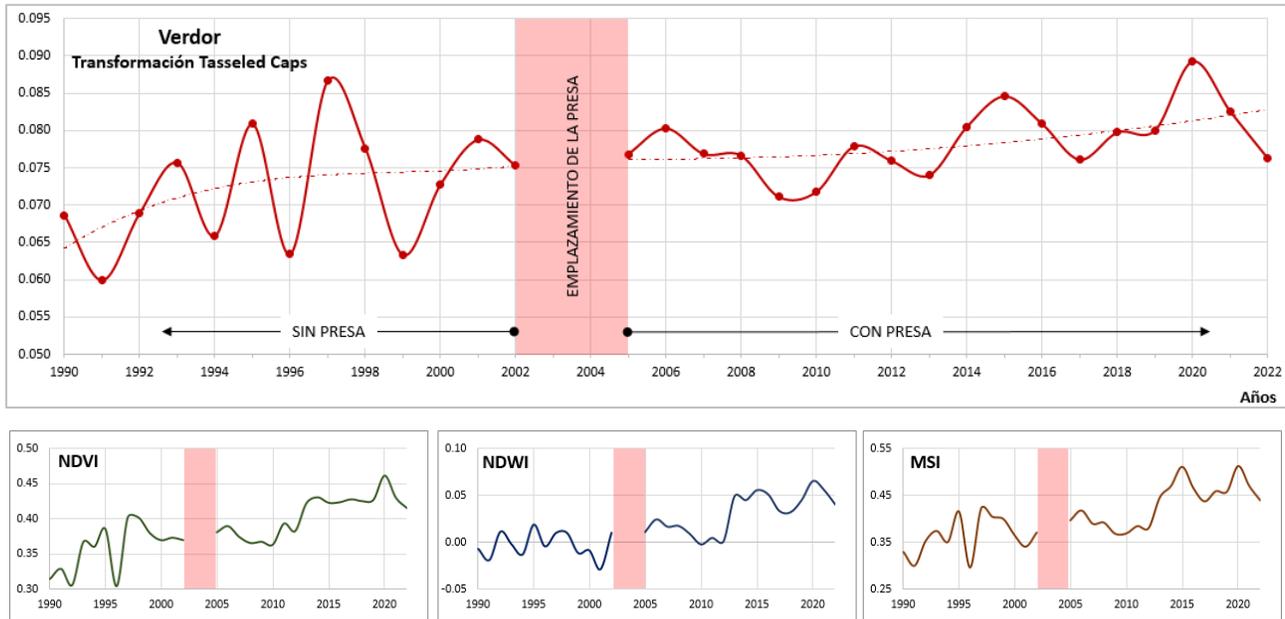


Figura 3: Series de tiempo de los promedios de VERDOR, NDVI, NDWI y MSI (1990–2022).

6.2 Tendencia y homogeneidad de los datos

El análisis estadístico utilizando prueba de Mann Kendall revela que, no hay una tendencia significativa en la serie durante el periodo de 1990 a 2002 (sin presa), con un coeficiente de Kendall (τ) de $-0,121$; en cambio, en el periodo de 2005 al 2022 (con presa) muestra que hay una tendencia positiva en la serie donde el coeficiente Kendall es $0,229$. Resultados obtenidos para un nivel de significancia de $0,15$.

En el análisis estadístico de homogeneidad de Pettitt, se identifica un cambio significativo positivo en el año 2013, durante el período comprendido entre 2005 y 2022, este hallazgo sugiere una alteración notable en la serie temporal en el año 2013. Este cambio se traduce en un incremento del 5,5% en los valores desde 2005 hasta 2013, y un aumento del 12,5% desde 2013 hasta 2022 en comparación con el período de referencia de 1990 a 2002, sin presa Figura 4.

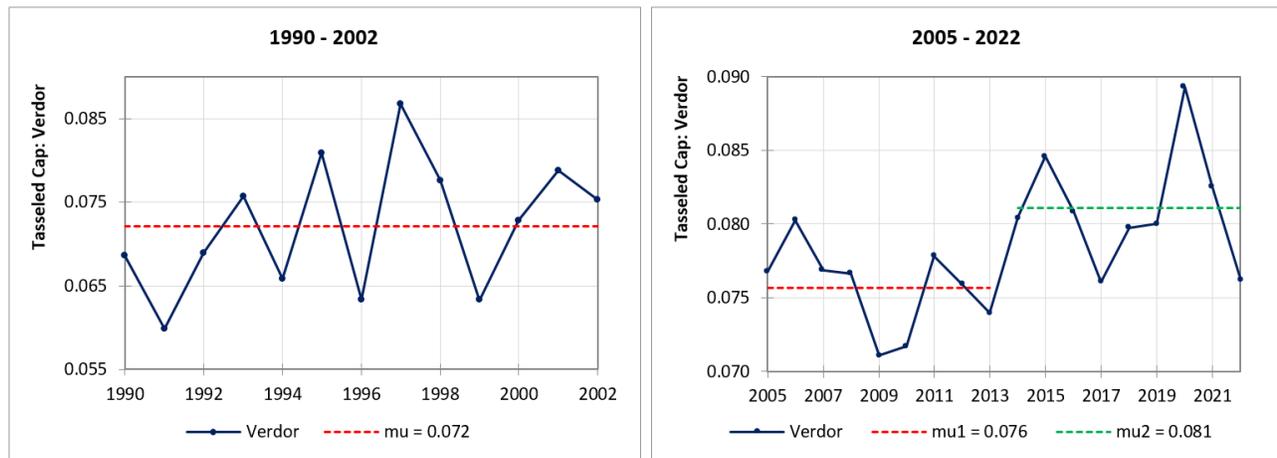


Figura 4: Prueba de homogeneidad de Pettitt, periodos 1990 – 2002, y 2005 – 2022, antes y después del emplazamiento de la presa.

6.3 Distribución de la frecuencia del índice de verdor

La información derivada de las imágenes satelitales, expresada a través de índices espectrales, muestran mediante la distribución de frecuencias como en el periodo de 1990 al 2001 (antes de la construcción de la presa), se tenía una distribución asimétrica, que refleja

una concentración de valores bajos de verdor donde el rango promedio 0,02 y 0,04; no obstante, entre 2005 y 2022 (después de la construcción de la presa), la distribución se vuelve simétrica, mostrando una tendencia hacia la mesocúrtica, Figura 5. Los valores que indican el verdor, es decir, mayor presencia de vegetación, se distribuyen de manera más uniforme en la zona y, además, estos valores aumentan, con un promedio que se sitúa en un rango de 0,07 a 0,09.

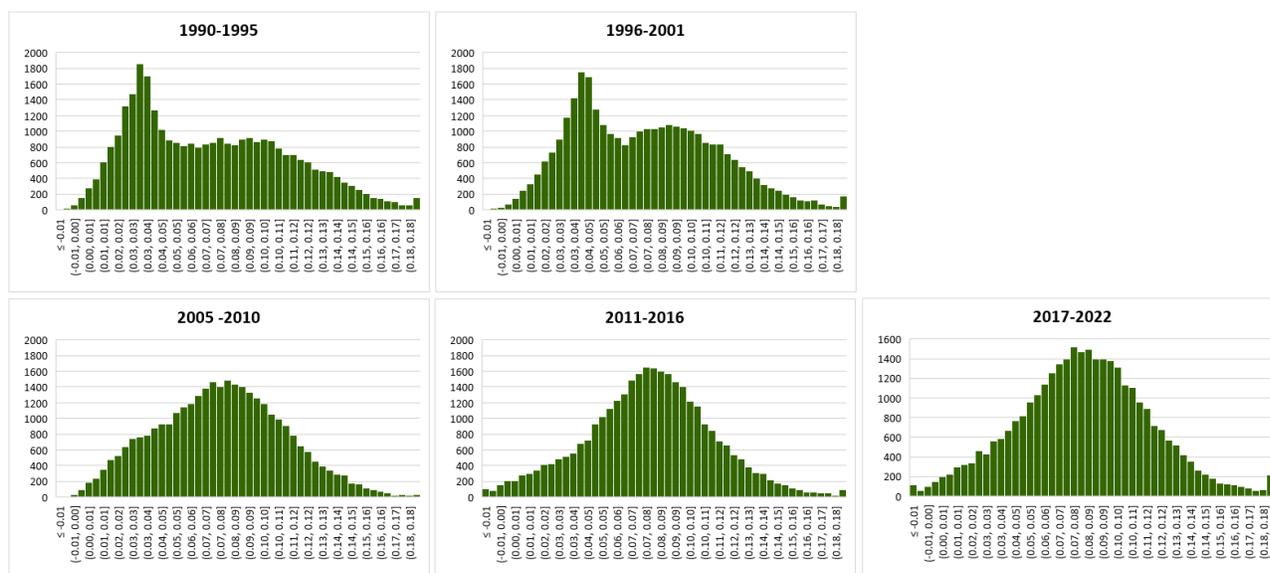


Figura 5: Histograma de los valores de transformación de Tasseled Cap: Índice de verdor. Periodo 1990 - 2001, antes de que se construya la presa y después del emplazamiento de la presa, periodo 2005 - 2022.

6.4 Variación de la vegetación

La variación de la vegetación es un proceso dinámico. Si examinamos la serie temporal, notamos que previo a la construcción de la presa, la vegetación experimentaba un incremento gradual atribuido a la influencia de las actividades humanas y su variabilidad correlacionada con los patrones de precipitación. En este contexto, el promedio de la extensión vegetal era de 1 340 hectáreas; no obstante, con la operatividad de la presa, se observa un aumento más uniforme en las áreas de vegetación, alcanzando un promedio de 2 072 hectáreas Figura 6; de las cuales 637 hectáreas corresponden a un cambio positivo bajo (+) y 1 435 hectáreas a un cambio positivo significativo (++).

En el área de investigación delimitada en función a las condiciones de relieve, se evidencia el impacto positivo generado por la presa. Durante el período de 1996 a 2001,

el 71% del área no experimentó cambios (o); en comparación con el período anterior de 1990 a 1995; sin embargo, en el período de 2017 a 2022, solo el 43% del área muestra no cambio (o), indicando una menor proporción de áreas sin cambios. En contrapartida, en el último periodo 2017 al 2022 la variación de la vegetación se ve reflejada en un aumento positivo del 18% al 41% (++ y +), en comparación con el período de partida.

La vegetación a lo largo de los años se ve influenciada positivamente por la presa. Se puede notar un incremento de las áreas que exponen valores de verdor, indicando mayor presencia de vegetación; a partir del emplazamiento de la presa, desde el 2005 al 2022, las áreas que inicialmente tenía cambios nulos o negativos (o, -, --) en verdor ha experimentado una reducción promedio del 25%, Figura 8.

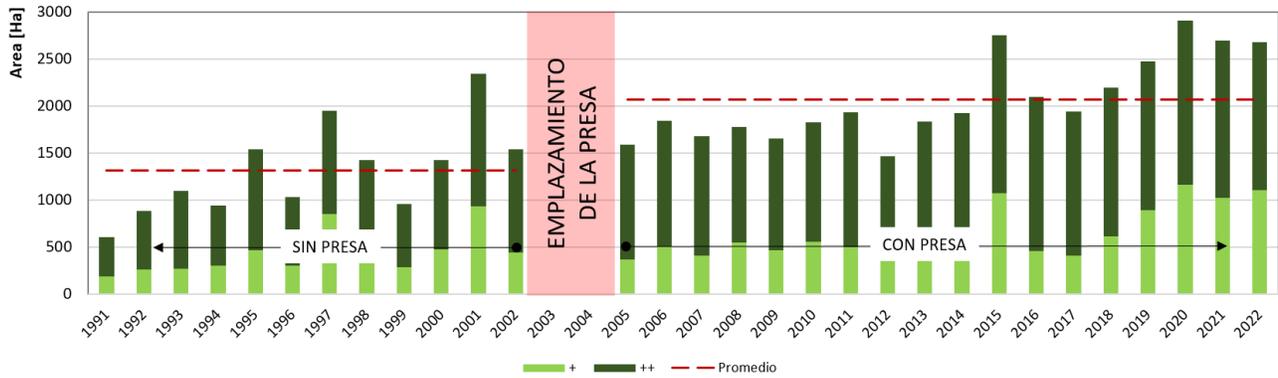


Figura 6: Áreas de vegetación antes y después del emplazamiento de la presa

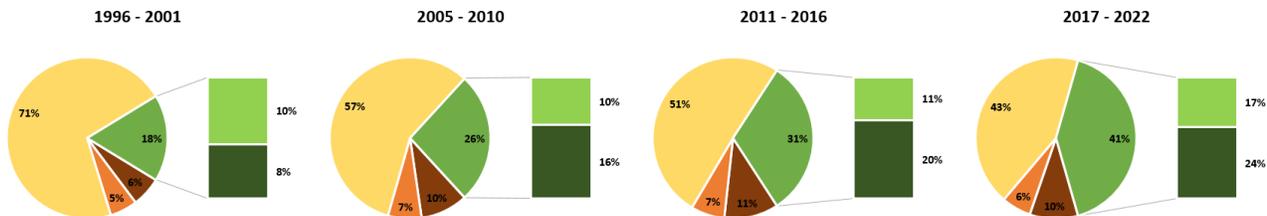


Figura 7: Variación de las áreas de vegetación en comparación al periodo de partida 1990 - 1995.



Figura 8: Tendencia de la variación de las áreas de vegetación en comparación al periodo de partida 1990

6.5 Área de influencia aguas debajo de la presa

El área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada, fue determinada considerando un envolvente de los valores máximos de verdor que se pueden presentar a lo largo del tiempo. De las 5 685,3 hectáreas de la región en análisis, un total de 4 657,8 hectáreas (82 %) mostraron

incrementos en verdor por encima de 0,05, Figura 9. Los valores de verdor más altos indican que hay probabilidad mayor de densidad y vigor de la vegetación en la zona observada, mientras que valores más bajos pueden indicar menor presencia o salud de la vegetación.

Alrededor del 25 % de la totalidad del área exhibe bajos niveles de verdor, sugiriendo una presencia vegetal

escasa; por otro lado, el 20% muestra niveles moderados, y un 36,5% presenta una tendencia que va de moderada a densa. El promedio de verdor previo al emplazamiento de la presa era de 0,097, y este ha incrementado a 0,124, representando un aumento del 27,5% con la presencia de la presa.

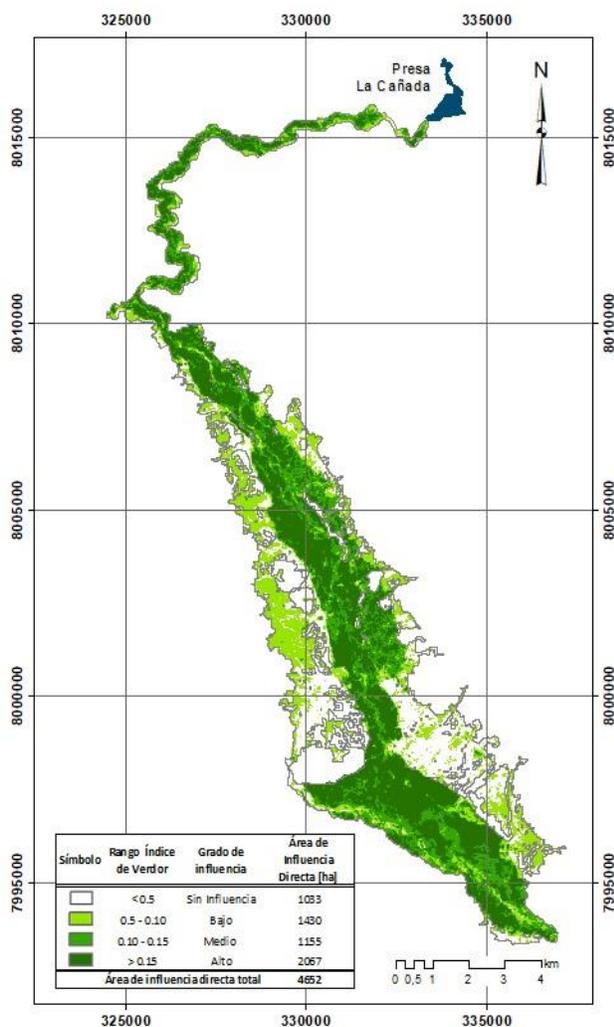


Figura 9: Área de influencia en función a la variación de la vegetación aguas abajo de la presa La Cañada.

7 Análisis y discusión

En los últimos años, se han llevado a cabo investigaciones que evalúan la vegetación utilizando índices espectrales (Quiroz & Anthony, 2022) (Revelo L., Mejia M., & Montoya-Bonill, 2020), la mayoría de los estudios se centran en índices ampliamente estudiados, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Salud de la Vegetación (MSI) y el Índice Modificado de Agua por Diferencia Normalizada (MDWI),

para determinar las características de áreas específicas. Sin embargo, en este estudio, se observó que la respuesta de la transformación Tasseled Cap, especialmente en su índice de verdor, demostró ser muy efectivo para la detección de vegetación; esto se debe a que la transformación utiliza una combinación de 6 canales, compuestos por 3 canales visibles, 1 infra rojo y 2 infrarrojos de onda corta; proceso que elimina los efectos de las sombras, tal como explican Kauth & Thomas (1976).

Asimismo, Aponte-Saravia & Ospina-Noreña (2019), reportan buenos resultados en la aplicación del índice de verdor para la identificación de vegetación de ambientes semi áridos, similar al área de estudio de este trabajo. En el mismo contexto, Insaurralde, (2019), encontró valores medios de índice de verdor de 0,02, 0,02 y 0.19, de cobertura bosque, pastizal, y cultivo respectivamente, rango de valores similares a los de esta investigación.

8 Conclusiones

La presencia de vegetación aguas abajo de la presa La Cañada, fue evaluada mediante series de tiempo de cuatro índices espectrales; NDVI, NDWI, MSI y índice de verdor Tasseled Cap (Greenness), para el periodo de estiaje 1990 - 2022.

El área de influencia sobre la vegetación aguas abajo de la presa La Cañada, tiene una extensión total de 4657,8 ha, y ha sido estimada en función a la presencia de vegetación determinada por el índice de verdor Tasseled Cap, el cual permitió una mejor discriminación de la vegetación frente a otras coberturas.

Los resultados del análisis de tendencia y homogeneidad muestran que antes de la construcción de la presa, existe una mayor dispersión de los datos y una gran cantidad de valores que denotan menor presencia de vegetación. Después de construida la presa, los datos tienen menor dispersión, una tendencia positiva y revelan mayor presencia de vegetación.

Luego del emplazamiento de la presa, aproximadamente el 82 % de la superficie estudiada, ha presentado un cambio positivo de superficie de vegetación cercana al río principal.

En el análisis estadístico de homogeneidad de Pettitt, se identificó un cambio positivo significativo en el año 2013, este hallazgo sugiere una alteración notable en la serie temporal para dicho año.

Es relevante destacar que, a menudo, los estudios se enfocan en los posibles impactos ambientales adversos que pueden surgir con la construcción de una presa; sin embargo, es importante reconocer que, al funcionar como una estructura para la captación y distribución adecuada

del agua, una presa puede generar impactos positivos en el entorno. El actual estudio, se demostró que la presa es favorable aguas abajo, en época de estiaje (junio, julio y agosto), debido a que las áreas de vegetación incrementaron en 30% y los valores de verdor que indican presencia vegetación incrementaron en un 27,5%.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, K. R., & Akter, S. (2017). Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with Landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 168-181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.010>
- Alla, Y. M., & Lee, L. P. (2021). Impacts of dams on the environment: a review. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 6(1), 64 - 74. doi:[10.22161/ijeab.61.9](https://doi.org/10.22161/ijeab.61.9)
- Andrade, J., & Olaya, A. (2023). Impactos ambientales asociados a las hidroeléctricas en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(2), 217-250. doi:<https://doi.org/10.22490/21456453.6074>
- Aponte-Saravia, J., & Ospina-Noreña, J. E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Revista de Teledetección*, 1(53), 59-72. doi:<https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- Católico, A., Maestrini, M., Strauch, J., Giusti, F., & Hunt, J. (2021). Socioeconomic impacts of large hydroelectric power plants in Brazil: A synthetic control assessment of Estreito hydropower plant. 151(111508).
- Chen, D. Y., Huang, J. F., & Jackson, T. J. (2005). Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near and short-wave infrared bands. *Remote Sense Environment*, 98, 225-236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.008>
- Conesa Fernandez-Vitoria, V. (2009). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Das, P. (2021). 20 years MODIS-NDVI monitoring suggests that vegetation has increased significantly around Tehri Dam reservoir, Uttarakhand, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100610>
- Delladova, M. G. (2011). Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. La Plata: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata.
- Dymond, C. C., Mladenoff, D. J., & Radeloff, V. C. (2002). Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote sensing of environment*, 80(3), 460-472. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00324-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00324-8)
- ESRI. (2020). Tasseled Cap function—ArcGIS Pro | Documentation. Recuperado el 18 de 9 de 2023, de Esri. com: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/tasseled-cap-function.htm>
- Fernandez Cruz, S. D., & Rivero, G. S. (2022). Indicadores para la gestión de impactos ambientales en la etapa de explotación de las presas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 79-91. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v43n1/1680-0338-riha-43-01-79.pdf>
- Fornacca, D., Ren, G., & Xiao, W. (2018). Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a mountainous region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10(8), 1196. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10081196>
- Galvan Plaza, R. (24 de 01 de 2020). www.iagua.es. Recuperado el 14 de 9 de 2023, de Los usos recreativos en los embalses de la cuenca del Ebro: <https://www.iagua.es/blogs/rogelio-galvan-plaza/usuarios-recreativos-embalses>
- Gao, B. C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. 58(3).
- Gao, Y., Walker, J. P., Allahmoradi, M., Monerris, A., Ryu, D., & Jackson, T. J. (2015). Optical sensing of vegetation water content: A synthesis study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), 475-482. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.021>
- Gorelick, N. H. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 102, 18-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdín, J. P., & Warlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical research letters*, 34(6). doi:<https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Healey, S. P., Cohen, W. B., Zhinqiang, Y., & Krankina, O. N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote sensing of environment*, 97(3), 301-310. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009>
- Henrich, V. K. (2012). Index DataBase. Recuperado el Junio de 2023, de <https://www.indexdatabase.de/>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1 - 2), 195-213. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Insaurralde, J. A. (2019). Aplicación de la transformación Tasseled Cap en la generación de información temática a partir de las imágenes satelitales del Lándsat 8 (OLI). *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (24), 3. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7383254>

- Jackson, T. J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., . . . Hunt, R. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *92(4)*, 475-482. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.021>
- Jeremy, L. W., David, S. G., Julia, E. C., & Clifford, N. D. (2004). Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, *58(2)*, 249-272. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.07.001>
- Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976). The tasseled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. En *LARS symposia*.
- Kremer, R. G., & Running, S. W. (1993). Community type differentiation using NOAA/AVHRR data within a sagebrush-steppe ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, *46(3)*, 311-318. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90051-X)
- Le Maire, G., Clalire, M., Yann, N., Clovis, G., Hakadama, R., Stape, J.-L., & Laclau, J.-P. (2011). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote sensing of Environment*, *115(10)*, 2613-2625. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.017>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, *17(7)*, 1425-1432. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- McFeeters, S. K. (2013). Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: a practical approach. *Remote Sensing*, *5(7)*, 3544-3561. doi:<https://doi.org/10.3390/rs5073544>
- Murillo, J., Trejos, A., & Olaya Carvajal, P. (2003). Estudio del pronóstico de la demanda de energía eléctrica, utilizando modelos de series de tiempo. *Scientia et Technica*, *3(23)*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjRz6qqpr6BAxW1NTUKHZ4jAvoQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2F Dialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4845141.pdf&usg=AOvVaw1by0xZBtgXBkPdIXX5a0hb&opi=89978449>
- Pelaez, J. D., & Correa, J. A. (2004). Evaluación del impacto ambiental de proyectos de desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, 3. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001413.pdf>
- Peters, A., Walter-Shea, E., Ji, L., Vina, A., HAYES, M., & Svoboda, M. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, *68(1)*, 71-75.
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*, *12(15)*, 2411. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Quiroz, R., & Anthony, R. (2022). Tendencia del NDVI en el Área de Conservación Regional Angostura Faical de Tumbes, Perú, 1999-2019. *Manglar*, *19(3)*, 233-337. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2414-10462022000300233&script=sci_abstract&tlng=en
- Revelo Luna, D., Mejia Manzano, J., & Montoya-Bonill, L. (2020). Analysis of the Vegetation Indices NDVI, GNDVI, and NDRE for the Characterization of Coffee Crops (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, *38*, 298-312. doi:<https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>
- Roy, D. P. (2021). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, *145*, 154-172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Salvador, A., Alcaide, A., Sánchez, C., & Salvador, L. (2005). Evaluación de impacto ambiental. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Sanz, J. L. (1991). Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Schmutz, S., & Moog, O. (2018). Dams: ecological impacts and management. *Riverine ecosystem management: Science for governing towards a sustainable future*, *8*, 111-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.07.001>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Buenos Aires: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2019). Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental de proyectos hidroeléctricos. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo - Argentina. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2019_-_guia_esia_proyectos_hidroelectricos.pdf
- Sistema Nacional de Evaluación del impacto ambiental (SEIA). (2018). Guía para la elaboración de la línea base en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental. Lima: Ministerio del Ambiente Peru. Obtenido de <https://faolex.fao.org/docs/pdf/per183059anx1.pdf>
- Villatoro, B., Fuentes, R., & Barrera, C. (2021). Uso de índices de humedad NDWI y MSI como herramientas para buscar el momento óptimo de cosecha de caña de azúcar. Memoria. Presentación de resultados de investigación (1). Zafra. Obtenido de <https://cengicana.org/files/20210730114552348.pdf>
- Viloria Villegas, M. I., Cadavid, L., & Awad, G. (2018). Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *28(2)*, 121-156. Obtenido de

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702018000200121&script=sci_arttext

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.

doi:<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Yunlong, L., Hongwei, L., Peipei, T., & Lihua, Q. (2022). Evaluating the effects of dams and meteorological variables on riparian vegetation NDVI in the Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*, 83(1), 154933.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154933>