



Improved biodiversity conservation and management through monitoring of ecological and social impacts of hydropower megaprojects in Bolivia (2020 – 2023)



GUÍA PRÁCTICA

DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE UNA PRESA SOBRE LA VEGETACIÓN AGUAS ABAJO, MEDIANTE SERIES DE TIEMPO DE ÍNDICES ESPECTRALES

Caso de estudio: La Cañada (Periodo de estiaje 1990 – 2022). Comarapa, Bolivia



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA



UNIVERSIDAD
MAYOR DE SAN SIMÓN
Ciencia y Conocimiento desde 1832

Autores:

Sanabria Siles, Nelson Jery¹

Sandoval Gómez, María René¹

Dalence Martinic, Javier Stephan¹

¹ Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales (CLAS) - Universidad Mayor de San Simón

Cita de la guía:

Programa mibio. (2023). *Series de tiempo de índices espectrales de vegetación para la determinación del área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada (Periodo de estiaje 1990 – 2022)*. [Guía práctica]. Cochabamba, Bolivia. 40 p.

Programa mibio:

Improved biodiversity conservation and management through monitoring of ecological and social impacts of hydropower megaprojects in Bolivia (2020 – 2023)

Alianza Interinstitucional:

Universidad de Bonn (UNIBONN), Alemania

Center for Development Research (ZEF) - <https://www.zef.de/zefhome.html>

Universidad Católica Boliviana, (UCB), Bolivia

Centro de Investigación en Ciencias Exactas e Ingeniería (CICEI)

Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Bolivia

Dirección de Investigación Científica y Tecnológica (DICyT)

Con el apoyo de:

German Academic Exchange Service (DAAD)

Fotografías portada:

Mapa comarapa Fuente: <https://mapcarta.com/>

Represa de Misicuni Autor: Ana María Michel Vargas

Diseño editorial y diagramación:

Vanessa Lowyck Michel

© Edición e impresión:

“EDITORIAL OLIMPO”

Junín N° 133 entre Av. Heroínas y Gral Achá

Tel.: 4796920

Cel.: 72772794 • 76956255 • 72722064

E-mail: olimpoeditorial.gv@gmail.com

Cochabamba - Bolivia

DL: 2-2-1459-2024

ISBN: 978-9917-634-09-6

@Programa mibio

Primera edición / diciembre 2023

Esta guía ha sido desarrollada en el marco del Proyecto: *“Improved biodiversity conservation and management through monitoring of ecological and social impacts of hydropower megaprojects in Bolivia (2020 – 2023)”* actualmente Programa mibio, coordinado y operado por la alianza interinstitucional académica conformada por la Universidad de Bonn (a través del ZEF), la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (a través del CICEI) y la Universidad Mayor de San Simón (a través de la DICyT), con fondos externos del DAAD.



ÍNDICE

A MANERA DE PRÓLOGO	9
1. Introducción	11
2. Proceso metodológico	15
2.1 Área de estudio	15
2.2 Procedimiento para la determinación de índices espectrales mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE siglas en inglés)	16
2.2.1 Función de máscara de nubes y sombras (cloudMaskL457)	17
2.2.2 Colección de imágenes Landsat	17
2.2.3 Aplicación de factores de escala	18
2.3 Procedimiento para el cálculo de los índices	19
2.3.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI	19
2.3.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada NDWI	21
2.3.3 Índice de Estrés por Humedad MSI	22

2.3.4 Transformación Tasseled Cap	23
2.4 Configuración visualización	25
2.5 Exportar la Imagen Final del Índice	26
2.6 Series de tiempo	27
2.7 Tendencia y homogeneidad de los datos	29
2.8 Distribución de la frecuencia del índice de verdor	30
2.9 Procedimiento para la detección de cambios	31
3. Determinación del área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada	34
4. Referencias bibliográficas	37



ÍNDICE

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. Presa La Cañada, Comarapa.	15
Figura 2. Serie de imágenes del índice de verdor (Tasseled Cap)	26
Figura 3. Izq. Puntos aleatorios. Der. Serie de tiempo de los promedios de VERDOR, NDVI, NDWI y MSI (1990-2022)	28
Figura 4. Prueba de homogeneidad de Pettitt, para los datos de Tasseled Cap: Verdor	29
Figura 5. Histograma de los valores de Transformación de Tasseled Cap: Índice de verdor	30
Figura 6. Cambios producidos en el tiempo en función al índice verdor (Tasseled Cap)	32
Figura 7. Variación porcentual anual de las áreas de vegetación en comparación al año inicial	33
Figura 8. Variación porcentual por periodos de 6 años de las áreas de vegetación en comparación al año inicial	33
Figura 9. Áreas de la vegetación antes y después del emplazamiento de la presa	34
Figura 10. Área de influencia en función a la variación de la vegetación aguas abajo de la presa La Cañada.	36

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

24

Tabla 2. Tasa de cambio

31



ÍNDICE TABLAS

A MANERA DE PRÓLOGO

En un mundo donde la gestión del agua y el equilibrio entre el desarrollo humano y la conservación del ambiente son temas cruciales, es un placer presentarles esta valiosa guía que aborda un aspecto fundamental en esta ecuación: el impacto de las presas en nuestros ecosistemas. Las represas desempeñan un papel esencial en la provisión de agua potable, la generación de energía, la protección contra inundaciones y muchas otras funciones vitales. Sin embargo, también conllevan impactos significativos en el entorno natural y en las comunidades que dependen de él.

Los autores de esta guía han realizado un trabajo excepcional al abordar el desafío de evaluar el impacto ambiental de las represas de una manera clara y práctica. Su enfoque en la aplicación de productos de teledetección para monitorear estos impactos es de suma importancia en un mundo que busca soluciones innovadoras y sostenibles para preservar nuestro planeta.

Al analizar detenidamente la información presentada en esta guía, nos damos cuenta de la importancia de comprender y cuantificar los efectos de las represas en los ecosistemas. Es un llamado a la acción para aquellos interesados en la gestión sostenible del agua y la conservación del ambiente. La evaluación de impacto ambiental es una herramienta crucial en la toma de decisiones responsables y esta guía ofrece una valiosa contribución en este sentido.

Felicitemos a los autores, Nelson Jery Sanabria Siles, María René Sandoval Gómez, y Javier Stephan Dalence Martinic, por su dedicación y esfuerzo en la creación de esta guía. Su trabajo no solo enriquece el campo de la teledetección y la evaluación de proyectos hidroeléctricos, sino que también contribuye a la preservación de nuestro entorno natural y la promoción de prácticas más sostenibles.

Les invitamos a sumergirse en el contenido de esta guía, a utilizar sus conocimientos y a aplicar las técnicas que se presentan. Solo a través del conocimiento y la acción podemos marcar la diferencia en la conservación de nuestro planeta. ¡Felicidades a los autores por su destacado trabajo y gracias por compartirlo con nosotros!

@ Programa mibio

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).

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). Los impactos negativos de estas estructuras 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 abandono de la presa (Delladova, 2011; SAyDS, 2019; Viloría Villegas, et al., 2018).

La presente guía tiene el propósito de introducir de manera comprensible y práctica, la aplicación de productos de teledetección en la evaluación de impacto ambiental de represas.

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 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, Maestrini, et al., 2021; SAyDS, 2019; Viloría Villegas, et al., 2018).

De acuerdo al 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 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 Fernandez-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 (SEIA, 2018). Asimismo, aunque no es de interés de este caso de estudio, 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 de una presa se obtiene como resultado de la evaluación de varios impactos (aguas arriba de la presa, la zona de emplazamiento, aguas abajo, más la adición de los impactos socioeconómicos), por lo tanto, es una sumatoria de varias superficies que pueden superponerse entre sí no. Este proceso permite identificar cuáles serán los sitios de mayor o menor alteración causada por la ejecución de las actividades durante el ciclo del proyecto.

La interrupción 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, o, por otro lado, puede alterar de manera favorable,

la vegetación en las riberas. Evaluar los impactos que se han producido o que se están produciendo es importante, para poder realizar medidas correctivas cuando sea necesario.

La dinámica de la superficie de la vegetación puede ser monitoreada a partir de su reflectancia espectral, mediante el uso de índices espectrales. 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 las plantas (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 et al., 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. La monitorización a largo plazo (Das, 2021), es especialmente valiosa para estudios de cambio climático, deforestación, degradación de la tierra y seguimiento de la salud de los ecosistemas.

La 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 et al., 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 Normalized Difference Vegetation Index - sigla en inglés), el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI Normalized Difference Water Index - sigla en inglés), y el Índice de vegetación realzado o mejorado (EVI, por sus siglas en inglés Enhanced Vegetation Index). 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 alcance de esta guía comprende un “caso de estudio” para usuarios de Sistemas de Información Geográfica con nivel avanzado a intermedio. La guía presenta una secuencia estructurada y metódica, que permite evaluar registros de imágenes satelitales multiespectrales de disponibilidad gratuita en Internet, para determinar áreas afectadas por la construcción de represas.

La presente guía tiene como objetivo, evaluar 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 de los meses más secos del año (Junio, Julio, Agosto) de periodo 1990 – 2022, con la meta de, seleccionar áreas de cambio mediante un índice espectral que permita discriminar la vegetación de otras coberturas de mejor manera, y ver su cambio en el tiempo.

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



2. Proceso metodológico

2.1 Área de estudio

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.

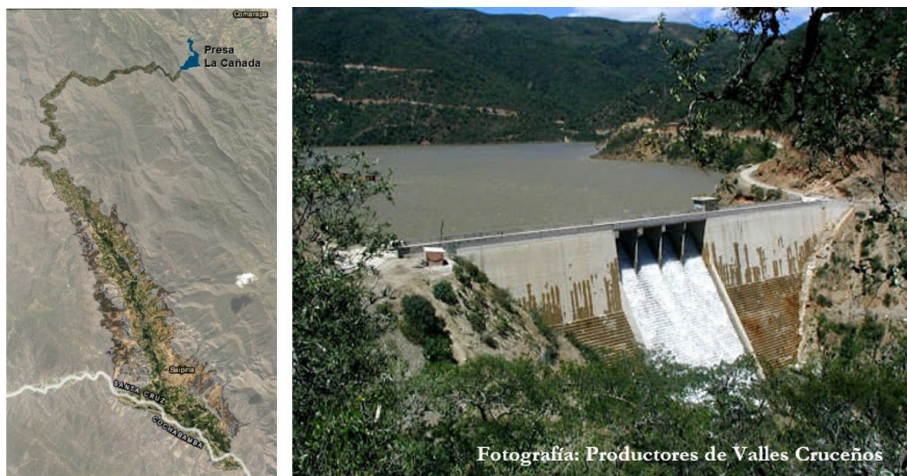


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Presa La Cañada, Comarapa.

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.

2.2 Procedimiento para la determinación de índices espectrales mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE siglas en inglés)

El código para la determinación de los índices espectrales fue desarrollado en la plataforma 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).

A continuación, se describe el código en JavaScript para cargar imágenes de Landsat 5, 7 u 8 en Google Earth Engine (GEE), aplicar una máscara para eliminar nubes y sombras, reducir la máscara de la imagen a través de una media, realizar ajustes en las bandas, calcular índices y exportar la imagen resultante a Google Drive para análisis posterior.



2.2.1 Función de máscara de nubes y sombras (cloudMaskL457)

Se utiliza una función de máscara de nubes y sombras **cloudMaskL457**. Para eliminar píxeles de nubes y sombras de la imagen, seleccionar la banda 'QA_PIXEL' de la imagen, se calcula una máscara para píxeles de nubes y sombras utilizando operaciones bitwise (AND, OR, desplazamiento de bits) y se realiza una reducción de la máscara original, devolviendo una imagen sin nubes ni sombras.

```
1 var cloudMaskL457 = function(image){
2   var qa = image.select('QA_PIXEL')
3   var cloud = qa.bitwiseAnd(1<<5).and(qa.bitwiseAnd(1<<7)).or(qa.bitwiseAnd(1<<3))
4   var mask2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.mean())
5   return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(mask2)};
6
7
```

2.2.2 Colección de imágenes Landsat

Obtener imágenes de Landsat en una región determinada, Region Of Interest (ROI) y para un período de tiempo específico; que, para el caso de estudio, las imágenes deben estar comprendidas entre el 1ro. de junio al 30 de agosto. Obtener imagen para cada año, periodo de análisis del 1990 al 2022.

Utilizar **ee.ImageCollection** para obtener una colección de imágenes Landsat entre las fechas de su elección y aplicar la función **cloudMaskL457**, para eliminar nubes y sombras de cada imagen en la colección; estas imágenes se filtrarán para una región de interés (ROI).

```
8 // Extraer imagenes de la colección Landsat8
9 var l8 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
10   .filterDate('2013-06-01', '2013-08-31')
11   .map(cloudMaskL457)
12   .filterBounds(roi);
13 print(l8, 'l8');
14 Map.centerObject(roi, 12);
15
```

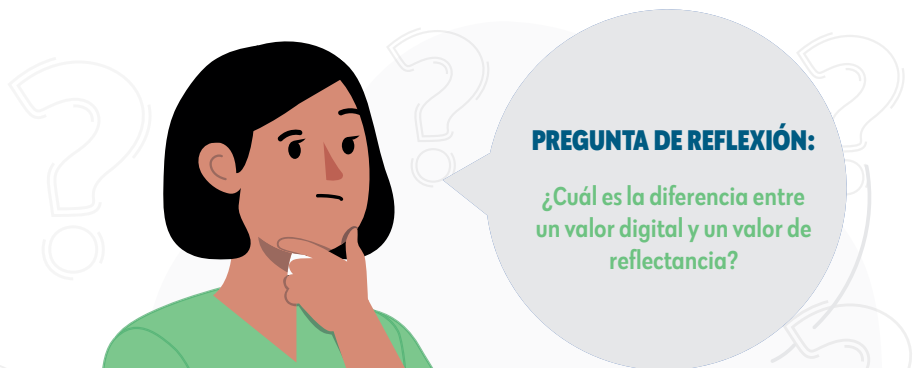
La fecha debe ser ajustada al requerimiento y dependiendo del sensor Landsat, la colección de imágenes debe ser llamada de la siguiente manera:

- **L5:** var l5 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2") – Periodo 1990 - 1998
- **L7:** var l7 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C02/T1_L2") – Periodo 1999 - 2012
- **L8:** var l8 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2") – Periodo 2013 - 2022

2.2.3 Aplicación de factores de escala

La función **applyScaleFactors** tiene como propósito aplicar factores de escala a las bandas de una imagen Landsat. Estos factores de escala son utilizados para convertir los valores digitales de las bandas en valores físicos o de reflectancia, lo que facilita la interpretación y análisis de la información contenida en las bandas. Además de la aplicación de factores de escala, también se realizan ajustes en las bandas para corregir offset y multiplicadores; por lo tanto, se debe ajustar las bandas ópticas de acuerdo a los factores de escala predeterminados por la colección Landsat.

```
16 // Aplicación de factores de escala
17 function applyScaleFactors(image) {
18   var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
19   return image.addBands(opticalBands, null, true)
20 }
21
22 l8 = l8.map(applyScaleFactors);
23
```



PREGUNTA DE REFLEXIÓN:

¿Cuál es la diferencia entre un valor digital y un valor de reflectancia?

2.3 Procedimiento para el cálculo de los índices

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 (Huete *et al*, 2002) citado por (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019).

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).

A continuación se procede a la generación de archivos diferentes en GEE, para cada índice.

2.3.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI

Los valores de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 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, 1996) (Yunlong et al, 2022) (Kremer & Running, 1993) citado por Jeremy (Jeremy et al, 2004).

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

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

Para generar una imagen compuesta promedio, el código es el siguiente:

```
24 //Calculo de NDVI
25 var comp = l8.mean();
26 var NDVI = comp.normalizedDifference(['SR_B5', 'SR_B4']).rename('NDVI');
27 var composite = ee.Image.cat(comp,NDVI);
28
```

Es fundamental identificar los rangos espectrales para garantizar que se utilicen las bandas ópticas apropiadas según el sensor Landsat específico.

Las bandas a ser seleccionadas en el código GEE, en función al sensor Landsat son:

- **L5:** Banda Roja (red) 'SR_B3'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L7:** Banda Roja (red) 'SR_B3'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L8:** Banda Roja (red) 'SR_B4'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B5'



2.3.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada NDWI

Los valores negativos del NDWI (Normalized Difference Water Index) 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; Gu et al, 2007).

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

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

Para generar una imagen compuesta promedio, el código es el siguiente:

```
24 //Cálculo de NDWI
25 var comp = l8.mean();
26 var NDWI = comp.normalizedDifference(['SR_B5', 'SR_B2']).rename('NDVI');
27 var composite = ee.Image.cat(comp,NDWI);
28
```

Las bandas a ser seleccionadas en el código GEE, en función al sensor son:

- **L5:** Banda Verde (red) 'SR_B2'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L7:** Banda Verde (red) 'SR_B2'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L8:** Banda Verde (red) 'SR_B5'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B5'

2.3.3 Índice de Estrés por Humedad MSI

El MSI (Moisture Stress Index) 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).

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

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

Para generar una imagen compuesta promedio, el código es el siguiente:

```
24 //Calculo de MSI
25 var comp = l8.mean();
26 var msiValue = comp.select('SR_B6').divide(comp.select('SR_B5')).rename('MSI');
27 var msiCollection = l8.map(function(image) {
28   return msiValue;});
```

Las bandas a ser seleccionadas en el código GEE, en función al sensor son:

- **L5:** Banda Infrarrojo Medio (NidIR) 'SR_B5'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L7:** Banda Infrarrojo Medio (red) 'SR_B5'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B4'
- **L8:** Banda Infrarrojo Medio (red) 'SR_B6'; Banda Infrarroja Cercana (NIR) 'SR_B5'



2.3.4 Transformación Tasseled Cap

La transformación Tasseled Cap puede ser considerada 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 “verdor” (Greenness) y la “humedad” (Wetness) (Healey et al., 2005).

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 permite capturar de manera más detallada la dinámica de la vegetación a lo largo del tiempo.

El neo1 canal de verdor se obtuvo mediante la siguiente transformación:

$$\mathbf{Verdor} = \sum_{k=1}^6 \mathbf{C}_{kv} \rho_k \quad \text{Ecuación 4}$$

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

Para generar una imagen compuesta promedio, el código es el siguiente:

```
29 // Define the de las bandas
30 var msi = function(image) {
31   var Blue = image.select('SR_B2');
32   var Green = image.select('SR_B3');
33   var Red = image.select('SR_B4');
34   var NIR = image.select('SR_B5');
35   var SWIR1 = image.select('SR_B6');
36   var SWIR2 = image.select('SR_B7');
37 }
```

```

38 //Calculo de TC: Verdor
39 var tcValue = Blue.multiply(-0.2941)
40                               .add(Green.multiply(-0.2430))
41                               .add(Red.multiply(-0.5424))
42                               .add(NIR.multiply(0.7276))
43                               .add(SWIR1.multiply(0.0713))
44                               .add(SWIR2.multiply(-0.1608))
45                               .rename('TC');
46
47 return msiValue;
48 };
49
50
51 // Aplicando la collección de imagenes
52 var tcCollection = l7.map(tc);
53

```

Dependiendo del sensor Landsat, es fundamental para garantizar que se utilicen los coeficientes apropiados según el sensor Landsat específico (Figura 1). Los coeficientes a ser seleccionados en el código de GEE, en función al sensor son:

Tabla 1. Coeficientes de Tasseled Cap, 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)

¡Neo = ‘nuevo’, ‘reciente’



2.4 Configuración visualización

Composición a color natural. Se configura la visualización utilizando tres bandas espectrales para mostrar la imagen en colores naturales (rojo, verde y azul) en un rango específico de valores, los cuales pueden variar de acuerdo al usuario.

```
30 // Visualización
31 var visualization = {
32   bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'],
33   min: 0.0,
34   max: 0.3,
35 };
36
37 var color = {bands:['SR_B4','SR_B3','SR_B2'], min:0.0081, max:0.224};
38 Map.addLayer(l8, visualization, 'l8');
39
```

Visualización de los índices. Se muestra la configuración para la visualización específicamente para la capa de NDVI; pero en el caso de los otros índices, este se debe cambiar en la línea de comando 40, reemplazando NDVI por NDWI, MSI o TC.

```
40 var viz_wi = {"opacity":1,"bands":["NDVI"],
41              "min":-0.5,"max":0.5,
42              "palette":["white", 'blue', 'green', 'yellow', 'red']};
43
44 Map.addLayer(NDVI.clip(roi),viz_wi,'NDVI')
45
```

Los rangos de visualización y la paleta de colores pueden cambiar de acuerdo al índice y en función al requerimiento y gusto del usuario.

2.5 Exportar la Imagen Final del Índice

Una vez, que se tiene el resultado final del índice, para el área de interés (ROI), se procede a exportar la imagen al Google Drive con una descripción, prefijo de nombre de archivo, escala, y otros parámetros especificados. La descripción, el prefijo y el folder, se debe renombrar en función al nombre del índice. Se recomienda siempre mantener de manera sistemática un orden en el nombre de las variables en función al índice.

```
46 // Exportar la imagen al google drive
47 - Export.image.toDrive({
48   image: NDVI,
49   description: 'NDVI_Landsat-8',
50   fileNamePrefix: 'NDVI_l8_',
51   folder: 'GEE_NDVI',
52   scale: 30,
53   maxPixels: 1e13,
54   region: roi
55 });
```

La imagen final puede ser descargada (Figura 2) y desplegada en formato raster para poder realizar la colección de las 33 imágenes (desde 1990 al 2022) o el periodo de análisis que el usuario establezca y el índice que desee analizar. Se muestran las imágenes de cada 10 años.

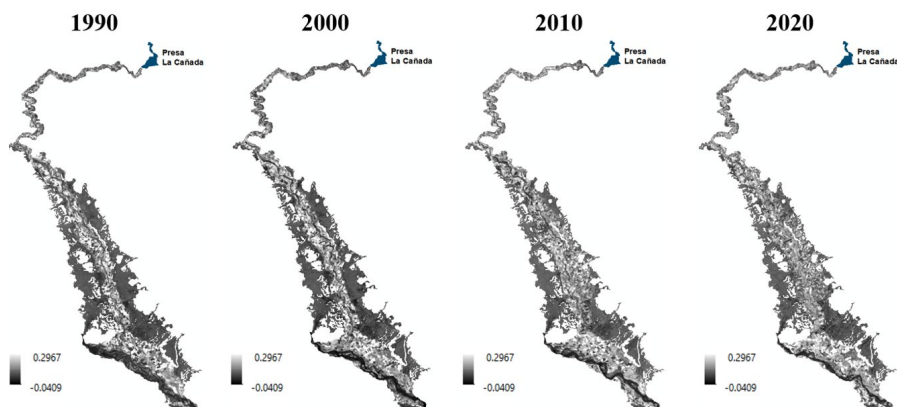


Figura 2. Serie de imágenes del índice de verdor (Tasseled Cap)

Se presentan las imágenes cada 10 años, con fines ilustrativos, siendo que el análisis comprende del periodo de 1990 al 2001, antes de que se construya la presa y después del emplazamiento de la presa, 2005 al 2022. Procesamiento y análisis de las imágenes satelitales mediante la plataforma Google Earth Engine.



2.6 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.

Dependiendo del usuario, se puede obtener imágenes para los 33 años; caso contrario, el usuario puede seleccionar un período de análisis de su elección.

Para generar las series de tiempo, se necesita computar las estadísticas de la imagen en el área de estudio, esto se puede determinar mediante las propiedades de la imagen o, generando puntos aleatorios de muestreo y extrayendo para un punto la información de la imagen. Tabular la información y realizar el análisis en el tiempo de los promedios, máximos y mínimos. Para el ejemplo se muestra los valores promedios obtenidos para los diferentes índices, Figura 3.

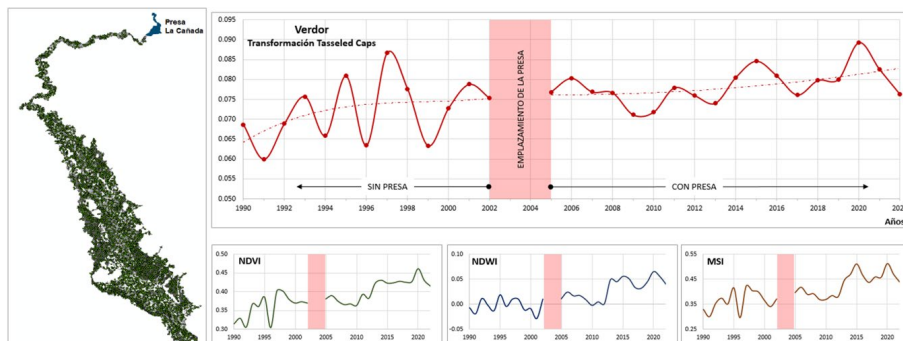


Figura 3. Izq. Puntos aleatorios. Der. Serie de tiempo de los promedios de VERDOR, NDVI, NDWI y MSI (1990-2022)

2.7 Tendencia y homogeneidad de los datos

Los valores promedio de los índices deben someterse al Test de Mann-Kendall, una prueba utilizada para identificar posibles tendencias positivas de cambio y, al Test de homogeneidad de Pettitt (Figura 4) 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.

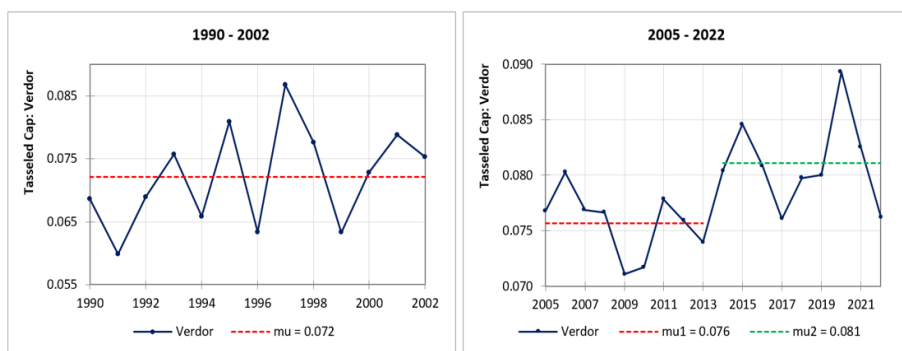


Figura 4. Prueba de homogeneidad de Pettitt, para los datos de Tasseled Cap: Verdor

Considere dos períodos; el primero desde 1990 hasta 2001, antes de la construcción de la presa y segundo del 2005 hasta 2022, después del emplazamiento y puesta en funcionamiento; como ejemplo se presentan las gráficas para el verdor, donde en el análisis estadístico de homogeneidad de Pettitt, se identifica un cambio significativo positivo en el año 2013, que sugiere una alteración notable en la serie temporal.

Dependiendo del usuario, se puede elegir un solo índice o ver el comportamiento de los datos con distintos índices y niveles de significancia; en el presente caso el nivel de significancia es de 0,15. Se recomienda que se utilice el XLStat, para el análisis de los datos.

2.8 Distribución de la frecuencia del índice de verdor

Es importante ver la información derivada las imágenes satelitales, expresada a través de índices espectrales, mediante un histograma, para ver la distribución de frecuencia con que se repiten los mismos valores; la interpretación del histograma permite identificar patrones, tendencias y en este caso, permite detectar si hay cambios en los valores de los índices y si hay una mejor distribución de los datos. Como ejemplo, se agruparon los datos desde 1990 al 1995 (antes de la construcción de la presa) y se observa una distribución asimétrica, que refleja una concentración de valores bajos de verdor donde el rango promedio está entre 0,02 y 0,04; no obstante, entre 2017 y 2022 (después de la construcción de la presa), la distribución se vuelve simétrica, mostrando una tendencia hacia la mesocúrtica (Figura 5).

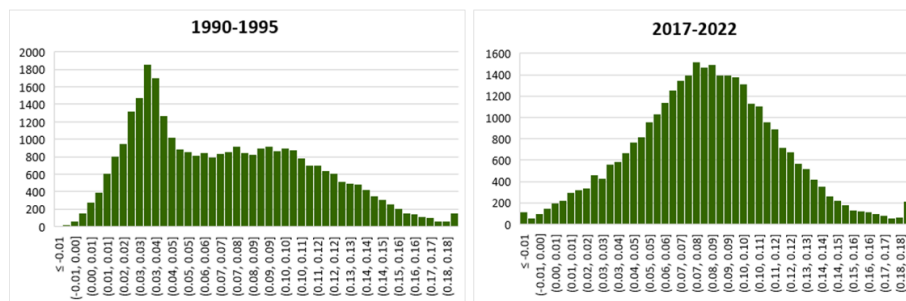


Figura 5. Histograma de los valores de transformación de Tasseled Cap: Índice de verdor

Periodo 1990 – 1995, antes de que se construya la presa y después del emplazamiento de la presa, periodo 2017 – 2022.






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; esto sugiere una distribución más eficiente del recurso hídrico en la zona.

Dependiendo del usuario, se pueden agrupar los datos o hacer un análisis del periodo inicial 1990 y comparar con años posteriores. Se recomienda que se utilice el XLStat, para el análisis de los datos.

2.9 Procedimiento para la detección de cambios

El año 1990, se considera como punto de partida de tal forma que, los cambios desde el 1990 hasta el 2022 permiten describir la transición (cambio) y el incremento de áreas de cultivo. Estos cambios se pueden evaluar de manera anual y/o en periodos de años agrupados, exceptuando el periodo comprendido del 2002 al 2004 (no considerado por ser el periodo de construcción de la presa), mediante la diferencia porcentual de los valores de índices entre la situación inicial y los estados posteriores. Se establecen umbrales específicos que se detallan en la Tabla 2, que exhibe el cambio que se ha producido a través del tiempo. Estos umbrales pueden variar de acuerdo a las condiciones de la imagen y al usuario.

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).

Como ejemplo, se muestra los cambios que se han ido presentando desde 1991, un año posterior al punto de partida; 2001, año antes de que comienza la construcción de la presa; 2005, año donde la presa ya se encuentra en funcionamiento y, 2022 periodo final de análisis. (Figura 6). Es recomendable realizar el análisis de manera anual para ver tendencias, patrones e ir estableciendo zonas de cambio.

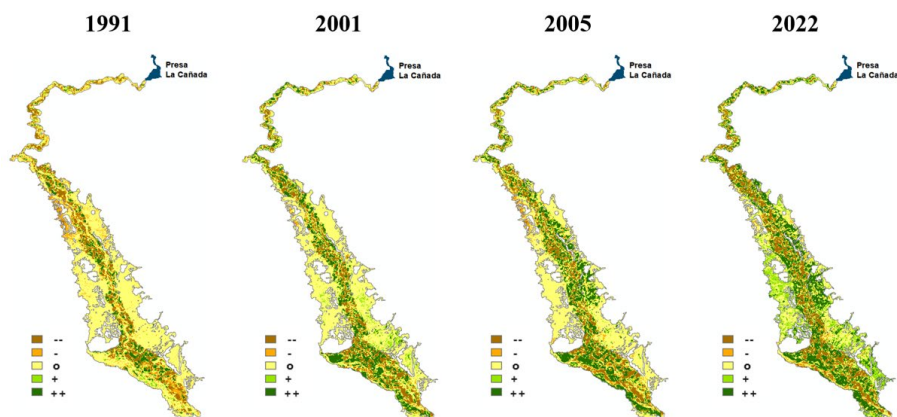


Figura 6. Cambios producidos en el tiempo en función al índice verdor (Tasseled Cap)

La variación de la vegetación es un proceso dinámico en constante cambio. Si examinamos la serie temporal, se denota un cambio de la vegetación, en algunos casos experimenta un incremento gradual atribuido a la influencia de las actividades humanas y su variabilidad correlacionada con los patrones de precipitación o viceversa. Por otra parte, en la mayoría de los casos donde las presas han sido diseñadas con fines de riego; se nota un cambio positivo desde el emplazamiento de la presa; por lo tanto, es importante evaluar de manera cuantitativa el cambio que se ha ido dando a través del tiempo.

Para esta evaluación cuantitativa, puede apoyarse en gráficas de barra o pies (Figura 7, Figura 8, Figura 9). A continuación, se muestra como ejemplo este tipo de gráficas.

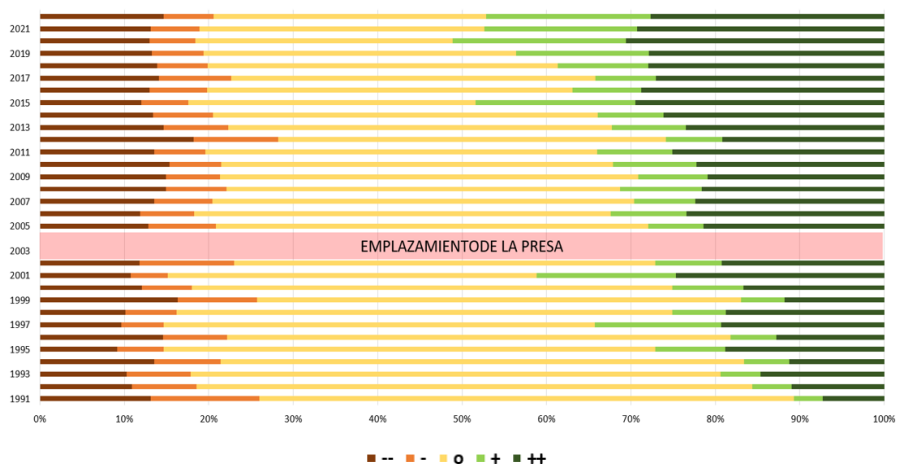


Figura 7. Variación porcentual anual de las áreas de vegetación en comparación al año inicial

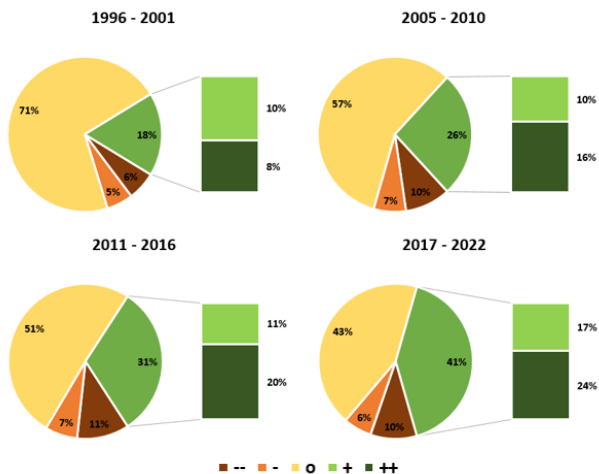


Figura 8. Variación porcentual por periodos de 6 años de las áreas de vegetación en comparación al año inicial

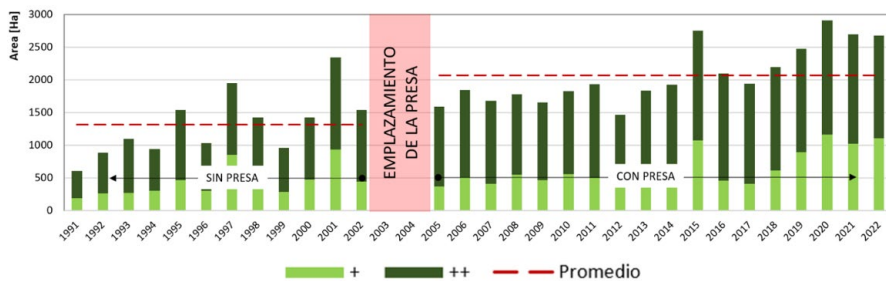


Figura 9. Áreas de la vegetación antes y después del emplazamiento de la presa

3. Determinación del área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada

El área de influencia aguas abajo de la presa puede ser determinada mediante un índice que discrimine la vegetación de otras coberturas como el suelo, agua, roca, etc.

Con el fin de establecer el área de influencia aguas abajo de la presa, se analizaron los valores máximos para cada píxel registrados entre 1990 y 2022, donde se definió como área de influencia, a todos aquellos píxeles que superan un umbral, el cual debe ser definido en función a la zona y según el índice que se está utilizando; esta selección se basa en la presencia de valores positivos, indicando la existencia de vegetación en algún momento.

La transformación de Tasseled Cap, índice de Verdor, discrimina mejor la vegetación de otras coberturas, por lo que fue aplicado para determinar el área de influencia de la presa La Cañada, con un umbral de 0.05, donde aproximadamente, el 81% de toda el área exhiben valores mayores a 0.05 en algún momento entre 1990 y 2022 (Figura 10).

An illustration featuring two stylized human figures, a woman on the left and a man on the right, both in a thoughtful pose with their hands on their chins. They are standing on a light grey ground with some green foliage. The background is white with several faint, light grey question marks scattered around. A large, light grey speech bubble is positioned in the center, containing text. The overall style is clean and modern.

PREGUNTA DE REFLEXIÓN:

¿Qué superficie de vegetación se ve influenciada aguas abajo de la presa?

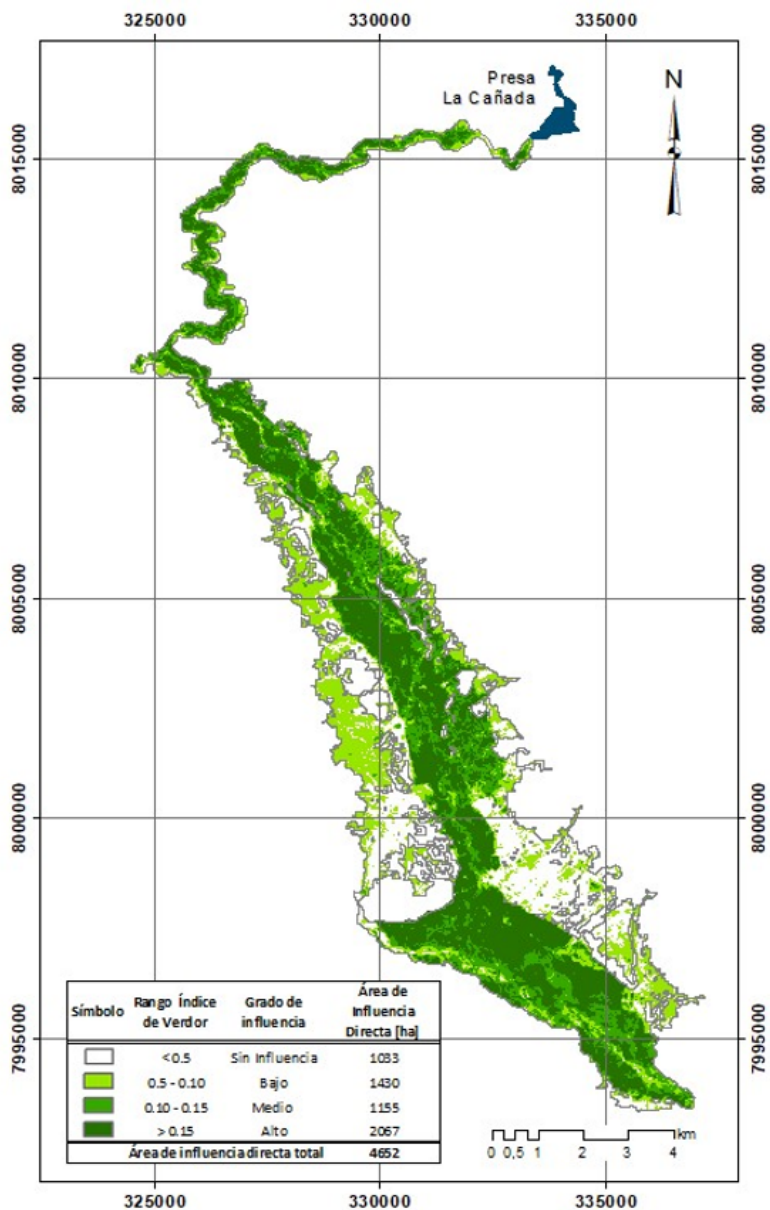


Figura 10. Área de influencia en función a la variación de la vegetación aguas abajo de la presa La Cañada.

4. 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
- 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).
- 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.

- 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/usos-recreativos-embalses>
- Gao, B. C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. 58(3).
- 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)
- 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>

- 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)
- 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>
- 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/l?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjRz6qqpr6BAxW1NTUKHZ4jAvoQFnoECBEQAQ&url=http%3A%2F%2Fdia.net.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4845141.pdf&usq=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>
- 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>
- PHAN, T., KUCH, V., & LEHNERT, L. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. 12(15).
- Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., & Anderson, M. (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 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>



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA



UNIVERSIDAD
MAYOR DE SAN SIMÓN
Ciencia y Conocimiento desde 1832



zef
Zentrum für
Entwicklungsforschung
Universität Bonn



CICEI
Centro de Investigación en Ciencias
Exactas e Ingeniería



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Con el apoyo de:

DAAD

Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service

