

## IMPACTO DE LOS CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO SOBRE CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE CHAVANTES, BRASIL. EVALUACIÓN A TRAVÉS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

### IMPACT OF LAND USE CHANGES ON WATER QUALITY IN THE CHAVANTES RESERVOIR, BRAZIL. EVALUATION THROUGH MULTIESPECTRAL IMAGERY

Federico Berón de la Puente<sup>1</sup>; Edinéia Dos Santos Galvanin.<sup>2</sup>; Paula Andrea Zapperi<sup>1</sup>.

#### RESUMEN

El presente estudio investiga la relación entre los cambios en el uso del suelo y la presencia de sedimentos en suspensión en el reservorio de Chavantes (São Paulo y Paraná), en el contexto de la creciente urbanización impulsada por el turismo. Se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2 y el procesamiento en Google Earth Engine para calcular el NDSSI y el NDVI en cuatro zonas de estudio durante el período 2018–2023. Los resultados revelan un patrón cíclico en el NDSSI, donde se identifican picos máximos y mínimos asociados a la estacionalidad pluviométrica. Durante la estación lluviosa, las intensas precipitaciones contribuyen con la incorporación de sedimentos por escorrentía superficial, evidenciándose en valores mínimos del NDSSI (entre  $-0.7$  y  $-0.8$ ) indicando acumulación de sólidos en suspensión. En contraste, en la época seca, con precipitaciones casi nulas, se observan valores menos extremos, lo que se traduce en una mejor calidad del agua. El análisis de percentiles mostró que los valores máximos de NDVI (P90), que reflejan un mayor vigor fotosintético, coinciden con los mínimos de NDSSI (P10) durante la temporada de lluvias, mientras que la baja actividad agrícola en la estación seca favorece condiciones hídricas óptimas. Además, la severa sequía en la cuenca del río Paranapanema desde 2020 redujo drásticamente los niveles de almacenamiento hídrico, intensificando el impacto de la escorrentía de contaminantes y agroquímicos. Estos hallazgos resaltan la importancia de preservar las áreas de protección permanente e implementar estrategias de gestión sostenible para mitigar los riesgos ambientales y conservar los recursos hídricos.

**Palabras clave:** cambios de uso del suelo, calidad de agua, sedimentación, imagen satelital

#### ABSTRACT

This study investigates the relationship between changes in land use and the presence of suspended sediment in the Chavantes reservoir (São Paulo and Paraná), in the context of increasing urbanization driven by tourism. Sentinel-2 satellite imagery and Google Earth Engine processing were used to calculate NDSSI and NDVI in four study areas over the period 2018-2023. The results reveal a cyclical pattern in NDSSI, with maximum and minimum peaks and troughs associated with rainfall seasonality. During the rainy season, heavy rainfall contributes to the incorporation of sediments through surface runoff, evidenced by minimum NDSSI values (between  $-0.7$  and  $-0.8$ ) that indicate the accumulation of suspended solids. In contrast, in the dry season, when rainfall is close to 0 mm, less extreme NDSSI values are observed, reflecting better water quality. Percentile analysis showed that the maximum NDVI values (P90), reflecting higher photosynthetic vigor, coincide with the minimum NDSSI values (P10) during the rainy season, while low agricultural activity in the dry season favors optimal water conditions. In addition, severe drought in the Paranapanema river basin since 2020 has drastically reduced water storage levels, intensifying the impact of pollutants and agrochemical runoff. These findings highlight the importance of preserving permanent protection areas and implementing sustainable management strategies to mitigate environmental risks and ensure the conservation of water resources.

**Keywords:** land use changes, water quality, sedimentation, satellite image.

<sup>1</sup> Departamento de Geografía y Turismo - Universidad Nacional del Sur / CONICET, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencia, Tecnología y Educación - Campus Ourinhos - Universidade Estadual Paulista, Brasil

## 1. INTRODUCCIÓN

En Brasil, las plantas hidroeléctricas constituyen la fuente principal de electricidad. Según la Agência Nacional de Energia Eléctrica (ANEEL), los embalses hidroeléctricos se consideran reservorios de agua para la producción de energía eléctrica, pero se destinan también a otras necesidades de la población. El embalse que corresponde a la Central Hidroeléctrica de Chavantes (cuenca media del río Paranapanema) está ubicado en el límite de los estados de San Pablo (SP) y Paraná (PR), entre las ciudades de Chavantes (SP) y Ribeirão Claro (PR). En un contexto de cambio global, factores como las alteraciones en el uso y la cobertura del suelo (LULC por sus siglas en inglés) incrementan sus efectos sobre los procesos de sedimentación y erosión que repercuten en las condiciones de aprovechamiento del reservorio (Brujinzeel, 2014; Ellison et al., 2017). Es entonces que la cobertura vegetal de una región puede considerarse un indicador de las condiciones ambientales, con lo cual su información espacial constituye una vía de monitoreo de recursos naturales (Friedl et al., 2002).

Para el caso específico de los embalses, Machado, Silva y Oliveira (2003) encontraron que la presencia de vegetación nativa es esencial para reducir la velocidad del escurrimiento superficial y prevenir la sedimentación en los embalses. Según estos autores, la vegetación nativa disminuye la capacidad de transporte de sedimentos, lo que ayuda a evitar su llegada a la red de drenaje de los tributarios. Contar con datos provenientes de sensores remotos es útil para el análisis de ecosistemas terrestres a través de cambios en los flujos de energía y agua, cubierta vegetal, composición de especies o cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En este sentido, existen antecedentes de aplicación de índices biofísicos como aporte al monitoreo ambiental del embalse y también de los cambios y condiciones de la cobertura de las zonas circundantes al embalse (Zapperi et al., 2021; Harano, 2023). En esta línea, estudios como los de Rex et al. (2018) y Chelotti et al. (2019) dan muestra de la utilidad de la teledetección como herramienta de análisis de la dinámica espaciotemporal de cuerpos de agua y su relación con el uso del suelo. Por otra parte, existen investigaciones orientadas a determinar cómo las actividades humanas en la cuenca del embalse

Chavantes han alterado, o podrían alterar, las condiciones ecológicas y de calidad de agua. En este sentido, Rosa et al. (2016) llevaron a cabo una investigación en los arroyos Cruz y Taquaruçu, tributarios del embalse, y reportaron altos niveles de conductividad eléctrica, probablemente vinculados a procesos de eutrofización originados por la urbanización, la agricultura y la disminución de la vegetación fluvial, lo cual afectó de manera adversa a la diversidad de peces. Pomari et al. (2018), por otro lado, detectaron patrones estacionales en nutrientes y clorofila relacionados con las etapas húmedas y secas en varios embalses del río Paranapanema, incluyendo Chavantes, aunque indicaron que la calidad del agua se conservaba en rangos aceptables. Una perspectiva alternativa es la propuesta por Perbiche-Neves et al. (2021), quienes emplearon un índice de estado trófico (TSI) y la existencia de copépodos ciclopoides como marcadores biológicos en 30 minas de Sudamérica. Para Chavantes, a pesar de las actividades de piscicultura en jaulas, se notó una elevada transparencia del agua y una reducida concentración de nutrientes, lo que facilitó su identificación como un sistema oligotrófico. Más recientemente, Harano y Galvanin (2025) subrayaron que las modificaciones en la utilización del suelo entre 1995 y 2022, en particular la expansión de la agricultura de soja y caña de azúcar estarían vinculadas directamente con el aumento de fuentes difusas de contaminación, lo que subraya la importancia de continuar supervisando estos procesos. Si bien las investigaciones mencionadas se centran en parámetros concretos de calidad del agua, en este estudio se adopta una visión complementaria. De esta manera, el objetivo es proporcionar pruebas de cómo las modificaciones del paisaje, particularmente en zonas próximas al embalse, podrían afectar la existencia de sólidos suspendidos, con el propósito de mejorar la comprensión y administración ambiental de la zona.

Es importante mencionar, que a través de la Ley Federal 12651/2012 de Protección de Vegetación Nativa (Brasil, 2012), la franja costera de la represa se categoriza como área de preservación permanente (APP). Las APP son zonas en las que, por norma, la vegetación debe mantenerse intacta con el fin de garantizar la preservación de los recursos hídricos, la estabilidad geológica, la biodiversidad, así como el bienestar de las

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

poblaciones humanas. En el caso del reservorio de Chavantes, esta zonificación determina un área buffer de 100 m de extensión desde la línea media de costa. De esta manera, se incluyen áreas cubiertas por vegetación (nativa y exótica) con el objetivo de preservar la calidad del agua, facilitar el flujo de la fauna y la flora y proteger el suelo, entre otros. No obstante, el proceso de parcelamiento y loteo con fines urbanos que se da aún desde forma previa al establecimiento del APP sigue en crecimiento. El alto potencial paisajístico a lo largo del embalse que se deriva de las características del relieve (frontones y acantilados) y de una rica red de drenaje originó la construcción de desarrollos inmobiliarios en torno al lago destinados al uso turístico y de ocio (Mazzetti Ferreira, 2022).

Precisamente, en el año 2019 mediante la Ley Federal 13.921 se estableció oficialmente a la región de Angra Doce, como Área Especial de Interés Turístico (AEIT) la cual comprende el embalse de la represa eléctrica de Chavantes y zonas aledañas. Esta situación muestra que Chavantes no es ajeno a lo que ocurre con numerosos embalses en los que se desarrollan actividades que difieren con los propósitos iniciales de su construcción (Jaramillo Gómez, 2020). En América Latina la construcción de embalses ha generado una transformación en el uso de estos espacios y en los últimos años se ha observado un creciente interés por explotar su potencial turístico, complementando sus funciones tradicionales como fuentes de agua para riego y generación de energía. Esta nueva dinámica, como señala García (2004), ha enriquecido el uso del territorio y ha generado nuevas oportunidades económicas para las comunidades locales. Así pues, estos espacios brindan, en su mayoría, condiciones para el desarrollo de un turismo sostenible, entiendo a esto último como la manifestación de una armonización de los intereses de la comunidad local, la industria turística y el medio ambiente. De modo que debe asegurarse la conservación de los recursos naturales y culturales, la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales y la satisfacción de las necesidades de los turistas (Mbaiwa y Stronza, 2009). Bajo esta premisa, Inostroza y Cànoves (2014) plantean que la conservación y el turismo pueden ser actividades complementarias si se adoptan enfoques de desarrollo sostenible. No obstante, un turismo mal planificado también tiene la capacidad de perjudicar el medio ambiente, sobre todo en zonas que poseen un alto valor ecológico.

Normalmente los usos no extractivos en los reservorios destinados al aprovechamiento energético suelen estar permitidos, pero están sujetos al uso principal del embalse, así como a factores como la variabilidad climática, el desarrollo económico y el crecimiento poblacional. Cabe aclarar que esto último puede desatar conflictos socioambientales por la demanda del recurso. A su vez, las irregularidades e incertidumbres en el régimen fluvial añaden desafíos a la gestión de este tipo de emprendimientos (Mereu et al., 2016).

Con respecto a esto último, es importante aclarar que si bien el embalse de Chavantes se encuentra dentro de la zona climática C-Zona húmeda tropical (Clasificación de Koppen) con un promedio anual de lluvias de 1400 a 1500 mm por año, existe una marcada estación seca entre los meses de mayo y agosto (Alvares et al., 2013). En este contexto, el objetivo de este trabajo consistió en explorar la relación entre los cambios en el LULC debido a la urbanización y la presencia de sedimentos en suspensión en el embalse de Chavantes (Brasil) mediante el uso del Índice de Diferencia Normalizada de Sedimentos en Suspensión (NDSSI) e Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI). Este estudio busca profundizar en el entendimiento de los cambios ambientales en la zona a través de metodologías de modelación, teledetección y análisis estadísticos. Estos enfoques permitirán evaluar las transformaciones del paisaje, con especial atención en las áreas adyacentes al embalse y su posible vinculación con el aumento de sólidos en suspensión en el agua.

## 2.1. Reservorio chavantes

El embalse Chavantes (Figura 1) está ubicado en la cuenca del río Paranapanema, que pertenece al sistema del alto río Paraná (Ayroza, 2012). Con una superficie de 100.800 km<sup>2</sup>, el embalse forma parte de una secuencia de aguas de 11 embalses, ubicados en el límite entre los estados de São Paulo y Paraná, que afectan a 20 municipios de la región. Esta planta es de gran relevancia pues contribuye al sector eléctrico con 414 MW de capacidad instalada, energía suficiente para abastecer a una ciudad de 840.000 habitantes. El embalse de Chavantes se considera oligotrófico, es decir, presenta una baja concentración de nutrientes de origen vegetal y animal. En las zonas urbanas de la región destacan los sectores de servicios y comercio, con cierta presencia de

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

actividades industriales en los principales centros urbanos.

Por otro lado, en las zonas rurales la agricultura y la ganadería son las actividades predominantes, destacándose especialmente la expansión de los cultivos de caña de azúcar, impulsada por el crecimiento de la industria azucarera y alcohólica. Esta transformación económica ha sido significativa para la región, que, debido al tamaño del área y la diversidad litológica, presenta suelos que varían desde ácidos y arenosos, lo que sugiere el uso de correctivos y la adopción de prácticas de conservación que los apoyen, hasta arcillosos, con una variación en su pH de origen natural o antrópico. La clasificación climática de Köppen (Alvares et al., 2013) sitúa al área de estudio dentro de la categoría C, subtropical húmeda. Esta clasificación, queda respaldada por los datos del Instituto de Aguas del Paraná (2017), que revelan un clima caracterizado por veranos cálidos y escasa influencia oceánica, especialmente en las regiones central y norte.

A pesar de recibir una precipitación anual considerable, entre 1400 y 1500 mm (Alvares et al., 2013), el régimen de lluvias en la región presenta una marcada estacionalidad. La estación seca, que se extiende desde junio a septiembre, contrasta con períodos de mayor pluviosidad durante el resto del año. Este patrón climático influye directamente en las prácticas agrícolas y en la disponibilidad hídrica. Es importante mencionar que además de la estacionalidad pluviométrica mencionada, en los años 2014, 2016 y 2021 se dieron mínimos extremos de lluvia que prolongaron la duración de la estación seca y por ende la disminución de los niveles en los embalses de la región y la presión sobre las actividades con dependencia de agua (Hucke, 2023).

La historia del Municipio de Chavantes muestra una evolución en su actividad económica. Originalmente marcada por el ferrocarril y el cultivo del café, la región se transformó a partir de mediados del siglo XX en un importante productor de caña de azúcar (Dias, 2020). Este cultivo ha aprovechado las condiciones locales favorables y se ha convertido en el motor de la economía municipal, abasteciendo a las industrias azucarera y de biocombustibles en Brasil. Sin embargo, esta expansión también conlleva preocupaciones ambientales significativas. El uso intensivo de agua para el cultivo puede afectar la disponibilidad

hídrica en Chavantes, especialmente durante épocas secas. En cuanto al embalse que dio lugar a la represa, su construcción comenzó en el año 1958 para ser inaugurado en 1971 en un área de 428,34 km<sup>2</sup>. Esta planta hidroeléctrica es concesionada a la empresa China Three Gorges (CTG), que opera la instalación desde 2016. Se ubica en el curso medio del río Paranapanema, aguas abajo de la central hidroeléctrica del río Jurumirim y su capacidad instalada permite el almacenamiento de 3,04 billones de litros (ANA, 2020). Esta infraestructura no solo contribuye con la generación de energía eléctrica, sino que también tiene importantes implicancias para el manejo del agua en la región.

Como se mencionó anteriormente, a través de la Ley Federal 12.651/2012 de Protección de Vegetación Nativa, a lo largo de la franja costera del embalse se determinó un área buffer de 100 m de extensión categorizada como APP con el objetivo de preservar la cubierta de vegetación (nativa y exótica) en beneficio de la conservación del patrimonio natural y de los recursos hídricos. Sin embargo, en Brasil existe un intenso debate sobre su importancia para garantizar la productividad agrícola. Muchas APP no están adecuadamente preservadas, lo que resulta en problemas como la sedimentación del canal fluvial, aumento de la erosión y disminución de la permeabilidad del suelo, lo que lleva a una pérdida significativa de nutrientes. Es interesante señalar que el año 1965 a través del artículo 2º (inciso b) del Código Forestal (Ley 4771), los reservorios de agua, tanto naturales como artificiales, ya se consideran dentro de las áreas cuya vegetación circundante debía preservarse. Años después, con la sanción de la Ley de Parcelamiento de Suelo Urbano, el establecimiento de áreas urbanas se convirtió en un factor influyente en la calidad del agua. Dicha ley estableció una franja no edificable de quince metros para las subdivisiones urbanas, tanto a lo largo de cursos de agua como en cuerpos de agua líticos, es decir, aquellos que no fluyen a través de un cauce. Esta ley incluye requisitos explícitos más rigurosos establecidos por legislación específica para garantizar una adecuada protección ambiental (Araújo, 2002). No obstante, tal como se observa en la figura 2, para el año 2012 ya se identifican procesos de parcelamiento y construcción de residencias. En este contexto, es preciso aclarar que en el año 2001 a partir de la Medida Provisoria 2166-67/01 (art. 4º inciso 2º), se establece la posibilidad de

suprimir la vegetación en un APP que se quede incluida dentro de un área urbana. Si bien se disponen requisitos como la autorización del organismo ambiental competente y la existencia de un consejo ambiental dentro del municipio estudiado, esta medida dio lugar a múltiples pedidos como también a distintos proyectos de ley.

En este sentido, y como señala Araújo (2002), las zonas declaradas como APP en contextos urbanos y rurales representa un desafío complejo. Esto requiere una articulación efectiva entre los distintos niveles de gobierno, así como ajustes específicos en las normativas relacionadas con su creación, control y eliminación.

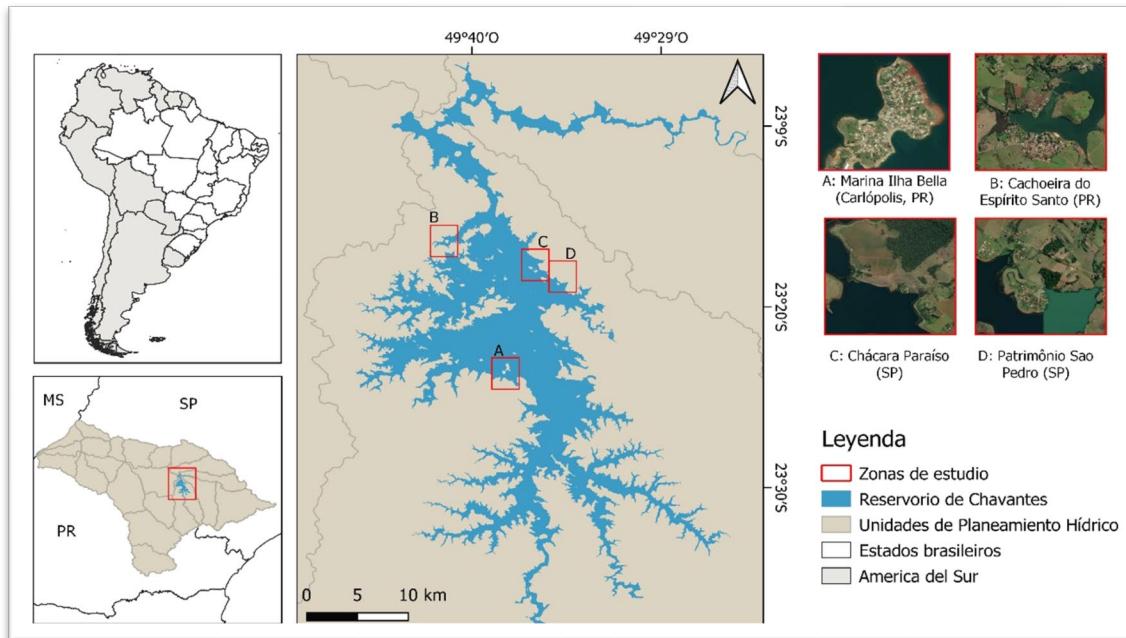


Figura 1. Zonas de estudio dentro embalse Chavantes, Brasil.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Selección de lugares para análisis

El objetivo del trabajo consistió por un lado en explorar la relación entre los cambios LULC en favor de la urbanización mediante el uso de imágenes satelitales provistas de Google Earth Pro. Debido a la disponibilidad de imágenes en la zona, se tomó como punto de partida el año 2012, ya que coincidió con la categorización de la franja costera del reservorio de Chavantes como Área de Preservación Permanente (APP) mediante la promulgación de la Ley Federal 12.651/2012. Además, este fue el año en el que los cuatro puntos de estudio contaban con imágenes de alta resolución.

De esta manera, se trabajó sobre sectores en los que se identificaron procesos de urbanización sobre las orillas del embalse a partir de la construcción de infraestructura vial, residencias con piscinas como también barrios y hoteles tipo

resort destinados al uso turístico y de ocio. Tal como se observa en la figura 1, el punto A es la zona en donde se encuentra Marina Ilha Bella (Carlópolis, PR), ubicada a 10 km de la ciudad de Carlópolis. En este lugar es que el municipio recibe miles de turistas y pescadores, debido a la gran cantidad y diversidad de especies que hay en la represa. También la posibilidad de practicar actividades acuáticas actúa como factor de atracción para el turismo. Por otra parte, el punto B, corresponde a Cachoeira do Espírito Santo (PR), en Ribeirão Claro, y se destaca por ser sede del campeonato estatal del canotaje en velocidad (sprint) que forma parte de la Competencia de Juegos de Aventura y Naturaleza de la región de Angra Doce. Allí, las características del relieve y la presencia de las geoformas localmente denominadas "morros" favorecen la oferta de rutas de trekking y senderismo. Los puntos C y D, están ubicados sobre la costa paulista. Por un lado, Chácara Paraíso (SP) (punto C) que es donde se presenta la menor densidad de ocupación del suelo a partir de la instalación de segundas residencias.

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

La mayor parte de las construcciones se congrega en torno al pequeño poblado que lleva este nombre y se encuentra a 230 km de la localidad de Fartura. Por último, Patrimônio São Pedro (SP) (punto D) se caracteriza por la presencia de condominios y posadas que tienen acceso directo al embalse a través de pequeños muelles en los lotes particulares.

En una segunda instancia, para realizar un análisis más detallado de las áreas seleccionadas y de los cambios en la cobertura del suelo alrededor de la represa de Chavantes, se empleó la herramienta MapBiomas (Souza Jr. et al., 2020). Esta plataforma proporciona datos de alta resolución que ayudan a la dinámica LULC alrededor del embalse, así como su oferta de datos de series temporales, lo que permite el seguimiento de los cambios en el tiempo. Diferentes aplicaciones la muestran como una herramienta útil para monitorizar los cambios en los patrones de uso y cobertura del suelo y comprender las tendencias a largo plazo (Bendini et al., 2020). Es entonces que, en este trabajo, se definieron cuatro clases de LULC (Urbano, Bosque, Agrícola, Pastizal) con el fin de reconocer los cambios de LULC dentro de las áreas de amortiguamiento alrededor del embalse para el período 1990-2023. Esto permitió ver cómo era la situación años antes de la creación de la Ley Federal y cómo fue su evolución en el tiempo.

## 2.2. Aplicación de índices biofísicos

Para el caso de la calidad del agua en el área de estudio se recurrió a la utilización de imágenes Sentinel-2 distribuidas por la Agencia Espacial Europea (ESA). Este programa ofrece una mayor disponibilidad espacio-temporal de imágenes con un período de revisita de 10 días entre los satélites 2A y 2B. Sumado a la resolución espacial de 10 metros de tamaño de pixel, lo cual hace ideal para el estudio en detalle de las zonas elegidas. Para el procesamiento de las imágenes satelitales se utilizaron los servicios de cloud computing provistos por la plataforma de Google Earth Engine (GEE). El dataset empleado es la colección "COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED" que recoge las imágenes Sentinel 2 con nivel 2A de pre-procesado. Sobre la base de una colección de 236 imágenes para el período 2018 - 2023, se creó un dataset donde se filtró por nubosidad y se calcularon los índices NDSSI y NDVI.

Ambos índices se trabajaron sobre sectores en los que se identificaron procesos de urbanización

sobre las orillas del embalse, ya sean construcción de infraestructura vial, residencias con piscinas como también barrios y hoteles tipo resort destinados al uso turístico y de ocio. Las zonas elegidas se muestran en la figura 1: Chácara Paraíso (SP), Cachoeira do Espírito Santo (PR) Marina Ilha Bella (Carcópolis, PR), Patrimônio São Pedro (SP). La elección de estos índices radica en que, una alta concentración de sedimentos aumenta la retrodispersión y la absorción en bandas de onda corta (Wang et al., 2003). El NDSSI permite estimar la concentración de sedimentos en un cuerpo de agua. Las bandas azules (Blue) e infrarrojas cercanas (NIR) se utilizan para calcular el NDSSI (Ecuación 1), ya que son las más sensibles para el análisis de la transparencia del agua (Hossain et al., 2010). Los valores del NDSSI varían entre -1 y +1; los más bajos reflejan una mayor concentración de turbidez y sólidos en suspensión, mientras que los más altos indican una menor concentración.

$$\text{NDSSI} = \text{NIR} - \text{Blue} / \text{NIR} + \text{Blue} \quad (1)$$

Por otro lado, el NDVI se utiliza ampliamente para evaluar el estado de la cubierta vegetal y se calcula mediante la diferencia normalizada entre los valores de reflectancia de las bandas roja (Red) e infrarroja cercana (NIR) (Ecuación 2). Esta última, capta la luz solar reflejada por la clorofila en el espectro infrarrojo cercano, mientras que la banda roja mide la luz reflejada por la vegetación en el espectro rojo visible. Los valores del NDVI también oscilan entre -1 y +1. Valores superiores a 1 indican vegetación en buen estado, mientras que valores inferiores a 0 indican una zona sin vegetación (Rouse et al., 1973).

$$\text{NDVI} = \text{NIR} - \text{Red} / \text{NIR} + \text{Red} \quad (2)$$

Una vez obtenidos los índices NDSSI y NDVI se analizó cómo fueron las variaciones temporales para los 4 puntos de estudio en el período 2018-2023. Para el NDSSI se determinó el percentil P10, y para el NDVI, el percentil P90, de modo que se puedan identificar las fechas en las que los valores de sólidos en suspensión alcanzan su mínimo en la serie temporal, mientras que el NDVI registra sus máximos.

## 3. RESULTADOS

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

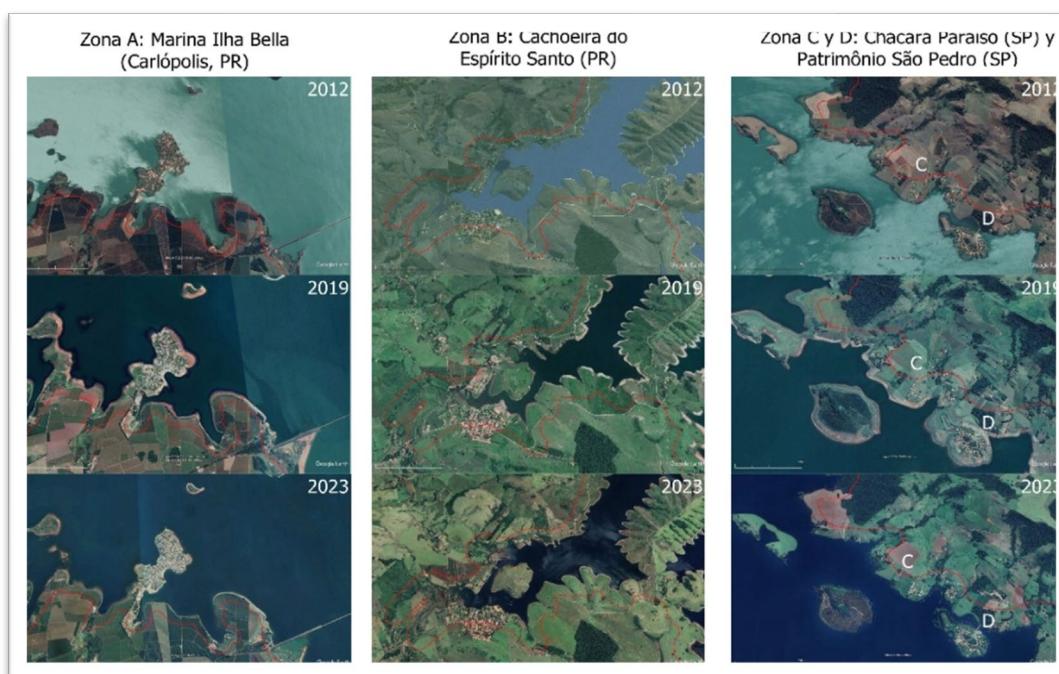
### 3.1. Usos y cobertura del suelo (LULC)

La figura 2 muestra las 4 zonas de estudio e ilustra el crecimiento del área urbanizada en las proximidades del reservorio de Chavantes, reflejo de la creciente demanda de infraestructura turística y del aumento del flujo de visitantes. Este proceso de urbanización, sin embargo, plantea serias preocupaciones ambientales, especialmente en relación con la degradación de los ecosistemas acuáticos y la calidad de los recursos hídricos. La expansión urbana provoca una mayor impermeabilización del suelo, lo que incrementa el escurrimiento superficial y la contaminación del agua, comprometiendo así la biodiversidad local y los servicios ecosistémicos (Lima et al., 2016; Harano, 2023).

En particular, la zona A (Figura 2) ha experimentado la mayor expansión en los últimos 11 años, indicando un crecimiento urbano significativo impulsado por la popularidad del reservorio como destino turístico. Este aumento ha llevado al desarrollo de más instalaciones y servicios en la región. En contraste, en la zona B, la urbanización se ha concentrado en el norte de Cachoeira do Espírito Santo. Por otro lado, las zonas C y D han mostrado cambios mínimos, con

asentamientos dispersos y poco densificados; aquí, predomina la actividad rural caracterizada por cultivos, sugiriendo una resistencia al cambio urbano y una preferencia por mantener prácticas agrícolas tradicionales.

Es aquí donde, los cambios en el uso y cobertura del suelo (LULC) tienen importantes implicaciones para los sistemas hidrológicos locales. Según Ellison et al. (2017), la conversión de áreas naturales a zonas urbanizadas puede afectar negativamente la calidad del agua al reducir la infiltración y la recarga de los cuerpos hídricos. Además, esta transformación incrementa los nutrientes y la descarga de sedimentos (Uriarte et al., 2011; Huang et al., 2016). La variación estacional del embalse y las precipitaciones contribuyen a un aumento de sedimentos. Un estudio realizado por Galvanin et al. (2023) en la zona B reveló signos de degradación del suelo que facilitan la transferencia de material sólido hacia el cuerpo de agua en cuestión. Esto demuestra cómo la urbanización en áreas adyacentes a zonas declaradas como APP está impactando negativamente el entorno, amplificando la generación de sedimentos y alterando características de la calidad del agua.



**Figura 2.** Zonas de estudio en cortes temporales, en línea roja, el límite de la zona buffer de 100 metros.

La tabla 1 presenta las variaciones de superficie en hectáreas para los mismos cortes, destacando que la categoría de bosque en las zonas B, C y D disminuye de unas 170 y 226 ha a 87,5 y 190 ha respectivamente, representando una reducción del 50 y 83% en relación con la superficie inicial registrada en los años 1990. En contraste, en la zona A, los cortes entre 1990 y 2012 resultaron en una disminución de casi 50% en la superficie de estudio. Sin embargo, entre 2012 y 2023, esta zona experimentó una recuperación de aproximadamente 60 ha en la categoría de bosque. Es importante resaltar que, a partir de la implementación de la Ley Federal de 2012, la tasa de cambio de la clase Bosque se redujo significativamente. Como resultado, las zonas A, C y D lograron recuperar algunas áreas de bosque, mientras que en la zona B la disminución fue mínima, con sólo 2 hectáreas menos.

**Tabla 1.** Superficie de cobertura de suelo, en hectáreas, para los años 1990, 2001, 2012 y 2023. Fuente: elaboración propia a partir de la colección MapBiomas Brasil, 2024.

	Clase	1990	2001	2012	2023
Zona A	Bosque	225,3	129,6	109,1	171,2
	Urbano	0	7,3	30,6	61,3
	Agricultura	953,1	1.055,6	1.074,7	957,6
	Pastizal	308,1	267,9	230,7	95,8
Zona B	Bosque	171,3	160,2	89,7	87,5
	Urbano	7,1	9,8	11,4	13
	Agricultura	799,9	834,7	911,1	890,7
	Pastizal	585,6	621,1	684	726,9
Zona C y D	Bosque	226,8	205,8	188,5	190,1
	Urbano	0	0	0	0
	Agricultura	537,2	577,7	607,6	581,8
	Pastizal	197,6	316,9	349,9	347,6

Otro de los cambios que se ha producido de manera gradual es la urbanización. En términos de superficie, la zona A fue la de mayor aumento durante los años estudiados, pues duplicó su tamaño a pesar de la Ley de 2012. En contraste, el aumento en la zona B fue menor, mientras que en las zonas C y D, debido a que la resolución de Map Biomas es de 30 metros y la urbanización en estas

áreas es poco densa, no se obtuvo superficie significativa a partir de los mapas proporcionados. En lo que respecta a la agricultura, esta se ha mantenido relativamente constante, con escasas variaciones a lo largo de los años de estudio en las 4 zonas. Los incrementos máximos en superficie fueron de aproximadamente 50 ha (zona C y D entre 1900 y 2023), 80 ha (zona B entre 1990 y 2023) y 110 ha (zona A entre 1990 y 2012) aunque posteriormente esta superficie se redujo, alcanzando prácticamente la misma extensión que en 1990.

Finalmente, el pastizal fue el que mayor cambio tuvo para la zona A, donde su superficie disminuyó de 308 a apenas 95 ha. En contraste, en las otras zonas, este valor se ha incrementado en superficie, pasando de 585 a 726 ha para la zona B y de 197 a casi 350 ha para las zonas C y D.

### 3.2. Índices NDSSI Y NDVI

En la figura 3, se presenta el promedio de los datos obtenidos de las imágenes de Sentinel 2 durante el período comprendido entre 2018 y 2023. En esta representación, se destacan cuatro zonas de interés, junto con los valores del NDVI y el NDSSI en las proximidades de estos puntos. Los máximos valores de NDVI, que se representan en un color verde oscuro, corresponden a áreas donde se lleva a cabo actividad agrícola intensa. Por otro lado, las zonas urbanas se identifican con un color blanco, lo que indica una baja presencia de vegetación y una posible transformación del paisaje natural debido a la urbanización. En contraste, los mínimos valores del índice NDSSI se visualizan en tonos rojo-anaranjados, lo que señala la presencia de altas concentraciones de sólidos en suspensión. Este fenómeno es particularmente preocupante, ya que sugiere un deterioro en la calidad del agua asociado con la actividad humana.

Es importante destacar que las máximas concentraciones de sólidos en suspensión durante el período de estudio se concentran en las bahías, ubicadas cerca de los asentamientos urbanos. Este hallazgo resalta la influencia negativa que la urbanización puede tener sobre los cuerpos de agua circundantes. A medida que nos alejamos de la costa, los valores de concentración de sólidos en suspensión tienden a disminuir, alcanzando niveles que oscilan entre 0,50 y 0,20. Este patrón también se observa en otros cuerpos hídricos, como el Río Paraguay en Brasil, donde la proximidad a áreas urbanas está comprometida por la calidad del agua. Durante la estación lluviosa, este problema se

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

agrava, ya que se incrementa la cantidad de sólidos en suspensión debido al escurrimiento superficial y a la erosión del suelo (Lima et al., 2016).

Además, si observamos el NDVI, se denota la gran cantidad de zonas agrícolas que hay dentro de la zona de los 100 m para la conservación. Esta cercanía de actividades favorece, como se demostrará en el siguiente apartado, el escurrimiento superficial durante épocas de precipitación, arrastrando sedimentos que desembocan en las entradas de las bahías (Harano, 2023). Además, la influencia de las zonas urbanas incrementa el valor del NDSSI.

Este tipo de análisis llevado a cabo mediante el uso de imágenes satelitales y cálculos en la nube, ofrece una herramienta valiosa para los tomadores de decisiones. Poniendo de manifiesto la necesidad urgente de implementar estrategias efectivas para gestionar y mitigar el impacto ambiental asociado con las actividades urbanas y agrícolas, asegurando así la sostenibilidad de los recursos hídricos y la salud del ecosistema local. A su vez, es importante tener en cuenta la naturaleza de los sólidos. Dado que sustancias coloidales o disueltas que pueden significar contaminación microbiana no necesariamente puede reflejarse en un aumento de la concentración de sólidos en suspensión (Marcó et al., 2004). Precisamente,

para el caso del embalse Chavantes, Castilho (2012) encontró, a través del estudio de silvicultura de la tilapia, que si bien los niveles de coliformes termotolerantes en el agua circundantes a los tanques de cría se mantenían dentro de los límites normativos, se detectaron bacterias patógenas en los peces (*Aeromonas* spp., *Pseudomonas* spp., *Salmonella* y *Staphylococcus aureus*) lo que evidencia contaminación microbiana cuya identificación queda fuera del análisis de parámetros fisicoquímicos. Es importante señalar la ausencia de estudios previos que analicen la presencia de microorganismos patógenos que guardan una estrecha relación con actividades recreativas, como la *Escherichia coli* (Stec et al., 2022) dado que se trata de una actividad que se está extendiendo en el área.

Por ejemplo, en Argentina, provincias como San Luis y Córdoba, con trayectoria en el surgimiento del turismo a partir de la construcción de embalses, han evidenciado una degradación en la calidad del agua. En algunos casos, los niveles alcanzados requieren mayores precauciones por parte de la población, lo que subraya la necesidad de establecer pautas diferenciadas de calidad microbiológica para la recreación humana en ambientes de agua dulce (Garnero, 2023; Maero, 2023).

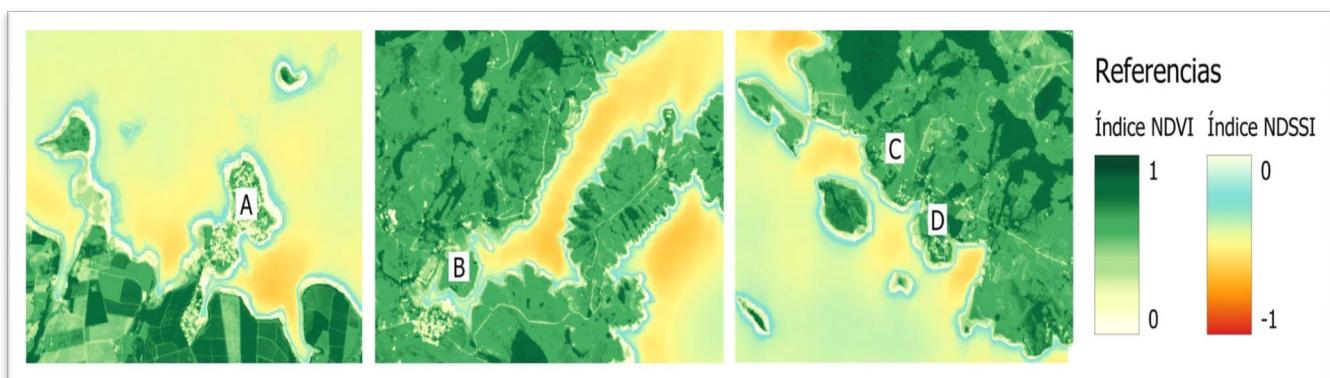


Figura 3. Zonas de estudio en cortes temporales período 2018 – 2023.

### 3.3. Cambios espacio-temporales

Para reconocer la existencia de picos máximos en la concentración de sólidos en suspensión a lo largo del año y su influencia así en la calidad del agua, se analizaron las tendencias de los valores promedio en cada una de las cuatro zonas de

estudio, entre 2018 y 2023. En la figura 4 se puede observar la distribución de los valores de NDSSI para ese período. En líneas generales, en los cuatro sitios seleccionados se aprecian tanto la tendencia como los distintos picos de valores

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

máximos y mínimos, revelando un patrón cíclico vinculado a la estación lluviosa. En este sentido, los mínimos valores que ha alcanzado el NDSSI (entre -0.7-0.8), que indican gran acumulación de sólidos suspendidos en el agua, se han dado de forma coincidente con los meses de mayor monto de lluvia. Precisamente, durante la estación lluviosa, las precipitaciones intensas contribuyen a la dilución de los sólidos en suspensión, lo que permite que las concentraciones en el agua disminuyan notablemente.

Esta variación en cuanto al aumento y descenso del índice NDSSI puede ser explicada en gran medida a partir de los montos de precipitación, pues si estos aumentan, se produce un lavado natural de los sedimentos acumulados, lo que resulta en una mejora temporal de la calidad del agua. Sin embargo, este fenómeno también puede tener efectos adversos si las lluvias provocan escorrentías que arrastran contaminantes y sedimentos desde áreas agrícolas y urbanas hacia los cuerpos de agua. Por ejemplo, el uso intensivo de agroquímicos en las plantaciones cercanas puede llevar a un aumento en la carga contaminante durante las lluvias, lo que contrarresta los beneficios observados durante períodos secos (Bonnet et al., 2008; Steffen, et al., 2011). En ese sentido, estudios realizados en ambientes acuáticos en Alemania demostraron que, a partir de procesos de erosión generados por la precipitación, y la escorrentía, los metales pesados llegaban a los cuerpos de agua atrasando con ellos diferentes metales pesados como Cobre, Plomo, Zinc (Scherer, et al., 2011). Además, en los sistemas de embalses, se puede evidenciar contaminación por materia orgánica y nutrientes que están bajo actividades antrópicas (Rigacci, 2021).

Cabe destacar que, para las cuatro zonas, en cada época de lluvias estos valores mínimos se reducen, y que en general la tendencia de la serie temporal es positiva, llegando a tomar valores de -0.6 en la última estación de lluvias en el año 2023. Esta tendencia puede estar explicada por los períodos recurrentes de sequía que ocurren en la región y que últimamente de gran intensidad.

A partir del análisis de las series temporales en la figura 4, se exploraron los momentos en donde los valores de NDVI alcanzan sus máximos, superando el percentil 90 (P90), lo que indica un mayor vigor fotosintético. Simultáneamente, se identificaron los

períodos donde el NDSSI toma los valores mínimos, por debajo del percentil 10 (P10), lo que sugiere una mayor generación de sedimentos en suspensión en el cuerpo de agua. El objetivo de este análisis es determinar si existe alguna condicionante, además de la estacionalidad climática, que explique el proceso de incremento y reducción de NDSSI. En la figura 5, se discriminan los meses en los que coinciden las fechas del P90 del NDVI con el P10 del NDSSI. Se observa claramente que los momentos de menor vigor fotosintético, asociado a la baja actividad agrícola, ocurren durante la época seca, cuando las precipitaciones son cercanas a 0 mm. En estos meses, los valores de NDSSI no alcanzan sus mínimos, contribuyendo con una mejora en la calidad del agua. Estos meses son de agosto, septiembre, octubre y noviembre.

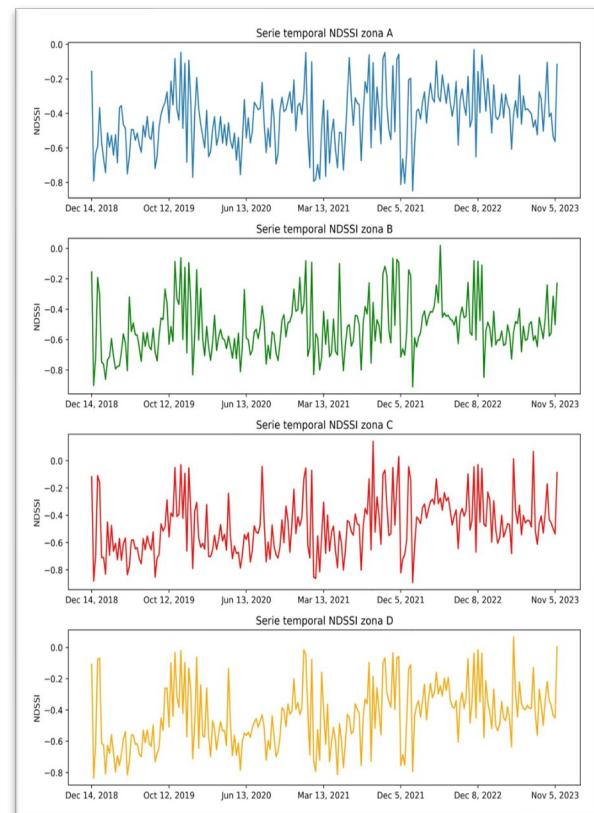


Figura 4. Series temporales de NDSSI para las 4 zonas de estudio entre 2018 – 2023.

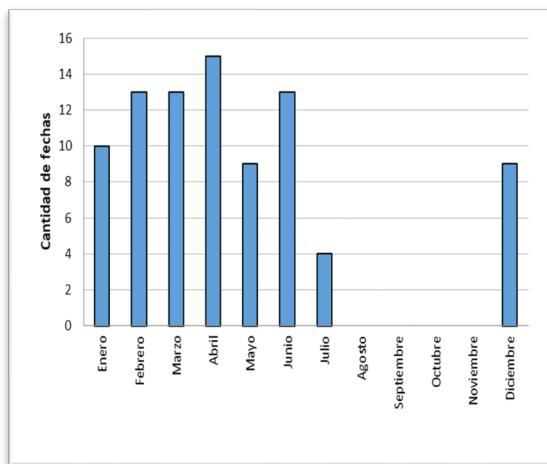
Caso contrario, durante toda la época de lluvias se registra la mayor coincidencia de días entre estos percentiles, lo que conlleva a una elevada concentración de sólidos en suspensión. Esta

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

situación se presenta especialmente entre los meses de febrero y junio, durante y al final de la temporada de lluvias.

Además, Galvanin et al. (2023) destacan que el aumento de las concentraciones de cianobacterias, en el área urbana del distrito de Cachoeira do Espírito Santo, Ribeirão Claro/PR, está directamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, y que a menudo se introducen en el ambiente acuático a través del escorrentamiento superficial durante las lluvias. Este fenómeno es particularmente preocupante en áreas urbanas, donde la impermeabilización del suelo y el uso intensivo de agroquímicos pueden intensificar la carga contaminante en los cuerpos de agua. Así, la combinación de urbanización (Silva, 2016) y prácticas agrícolas inadecuadas puede crear condiciones propicias para floraciones de cianobacterias, comprometiendo no solo la calidad del agua, sino también la seguridad para usos recreativos.

Por lo tanto, es fundamental monitorear la calidad del agua en áreas afectadas por la urbanización y la agricultura intensiva. El análisis continuo de la presencia de cianobacterias y de nutrientes asociados permitirá una mejor comprensión de los impactos ambientales y ayudará en la formulación de estrategias para mitigar los riesgos a la salud pública y a la biodiversidad acuática.



**Figura 5.** Fechas en donde el valor NDSSI está dentro del percentil 10 y el valor NDVI está sobre el percentil 90.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados evidencian la influencia de la cobertura del suelo sobre la calidad del agua en un sector donde la conservación de los recursos hídricos debería ser prioritaria, especialmente ante el crecimiento de la urbanización impulsada por la actividad turística. En las zonas adyacentes al embalse analizadas, los valores mínimos del NDSII indican la presencia de sólidos en suspensión en el agua, lo que sugiere una relación directa entre el uso del suelo y la degradación de la calidad hídrica. Además, se observaron altos valores de NDVI en las zonas categorizadas como APP, lo que refleja una alta concentración de biomasa vegetal. Esto indica que, a pesar de los impactos negativos de la urbanización, existen áreas que aún mantienen su capacidad de retención de sedimentos y contribuyen a la mejora de la calidad del agua.

Es crucial considerar las características climáticas del área, donde se presenta una marcada estacionalidad pluviométrica. La estación húmeda, que se extiende desde octubre hasta abril, contrasta con una temporada seca que va desde junio a septiembre, que puede limitar la disponibilidad hídrica. Esta variabilidad climática debe ser un factor central en análisis futuros, ya que las lluvias no solo afectan a la vegetación, sino que también intensifican la erosión hídrica del suelo, contribuyendo a la sedimentación en el embalse.

Un análisis detallado sobre la evolución de los cambios en LULC permitiría identificar los usos específicos asociados con la generación de sedimentos que ingresan al agua del embalse. Por otra parte, se abren otros interrogantes asociados con la regularidad de los loteos en el marco de las APP como también la restricción del acceso público al lago respaldada por la Ordenan 230/2004.

Asimismo, es importante mencionar que, como continuidad del presente trabajo, se están realizando campañas de muestreo *in situ* en distintos puntos del embalse con el objetivo de evaluar las características fisicoquímicas del agua en distintos momentos del año. Estos análisis permitirán avanzar en la comprensión de la dinámica de los sólidos disueltos, especialmente en

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

períodos de lluvias, donde el lavado de suelos puede tener un rol importante en la calidad del agua del embalse. Esta aproximación complementa las herramientas de teledetección utilizadas, al incorporar datos directos sobre los procesos de contaminación difusa. Además, se prevé avanzar en el estudio de la composición del suelo en las áreas de mayor transformación antrópica, a fin de establecer vínculos más sólidos entre el tipo de cobertura del suelo, su uso y los procesos de arrastre y deposición de sedimentos.

Por otra parte, es fundamental incluir la gestión de riesgos y el desarrollo de políticas públicas que consideren los impactos de la urbanización y el turismo, enfocándose en la prevención de la contaminación y la protección de los recursos hídricos, en consonancia con la legislación ambiental vigente.

También resulta fundamental ampliar el enfoque hacia la contaminación microbiológica. Actividades como la silvicultura, el desarrollo urbano recreativo y el uso turístico en torno al embalse pueden introducir microorganismos patógenos en el sistema, representando riesgos para la salud y el ambiente. En esta línea, investigaciones futuras deberían incluir el monitoreo sistemático de indicadores microbiológicos, así como el análisis específico de contaminantes emergentes y la detección de floraciones de cianobacterias, cuyo crecimiento puede verse favorecido por el incremento de nutrientes y cambios en las condiciones hidrológicas. En conclusión, este trabajo no solo que resalta la necesidad de implementar estrategias efectivas para proteger los recursos hídricos, sino que también abre un camino para futuras investigaciones que aborden tanto los impactos ambientales como las políticas de gestión en zonas expuestas a la urbanización y otros cambios de usos del suelo.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Para la realización del presente trabajo se recibió el financiamiento de la Fundación de Amparo a la Investigación del Estado de São Paulo (FAPESP) por la aprobación del Proyecto Regular (Proceso 2021/14250-5) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA). (2016). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2016. Brasília: ANA.

Agência Nacional de Águas (ANA). (2020). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2020. Brasília: ANA.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M. y Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANEEL. (2000). Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de informações georreferenciadas de energia e hidrologia . Brasília: ANEEL.

Araújo, S. M. V. G. (2002). As áreas de preservação permanente e a questão urbana. Consultora Legislativa da Área XI Meio Ambiente e Direito Ambiental, Organização Territorial, Desenvolvimento Urbano e Regional. Brasilia: Biblioteca Digital da Camara dos Deputados.

Ayroza, D. M. M. de R. (2012). *Características limnológicas em áreas sob influência de piscicultura em tanques-rede no reservatório da UHE Chavantes, Rio Paranapanema, SE/S, Brasil.* (Tesis Doctoral). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, San Pablo.187 pp.

Bendini, H. N., Fonseca, L. M. G., Schwieder, M., Rufin, P., Korting, T. S., Koumrouyan, A. y Hostert, P. (2020). Combining environmental and landsat analysis ready data for vegetation mapping: a case study in the brazilian savanna biome. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2020, 953–960. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-953-2020>

Bonnet, B. R. P., Ferreira, L. G. y Lobo, F. C. (2008). Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. *Revista Árvore*, 32(2), 311–322. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622008000200014>

Brasil. Lei nº 12.651. (2012, de 25 de maio). Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15

de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário oficial da União. Poder Executivo, Brasília, DF, 14 ago. 2012. Seção 1, p. 1

Bruijnzeel, L. A. (2014). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 104, 185-228.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>

Castilho, I. (2012). *Qualidades microbiológica do ambiente e da tilápia-do-Nilo (Oreochromis niloticus) produzida em sistema de tanques-rede no reservatório de Chavantes, SP.* (Tesis de Maestría). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu

Chelotti, G. B., Martinez, J. M., Roig, H. L., y Olivietti, D. (2019). Análise espaço-temporal dos sedimentos em suspensão em reservatório de baixa concentração por meio de sensoriamento remoto. RBRH, 24, e17. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180061>

Dias, F. M. F. (2020). A gênese de Chavantes - SP até a primeira metade do século XX: relação rural-urbano. *ENTRE-LUGAR*, 11(22), 267-287. <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.11581>

Ellison D., Morris C. E., Locatelli B., Sheil D., Cohen J., Murdiyarsa D., ... y Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43: 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>

Friedl, M., Brodley, C. y Strahler, A. (2002). Maximizing land cover classification accuracies produced by decision trees at continental to global scales. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (2), 969-977. <https://doi.org/10.1109/36.752215>

Galvanin, E. A. S., Perusi, M. C., Ferreira, J. J., Silva, L. A. G. y Rocha, M. C. (2023). Cambios tierra-agua en el embalse Chavantes-Brasil En: XXIII Simposio Mexicano - Polaco. México.

García, L. (2004). Agua y turismo. Nuevos usos de los recursos hídricos en la Península Ibérica. Enfoque integral. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. (37), 239-255. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1985>

Garnero, G. (2023). Socio-naturalezas hídricas, turismo y espirales de riesgo ambiental: Las sierras de Córdoba durante el siglo XX (Argentina). *Estudios Rurales*, 13(27). <https://doi.org/10.48160/22504001er27.472>

Harano, F. K. F. (2023). *Avaliação espaço temporal do risco potencial de poluição por cargas difusas para a bacia de contribuição do reservatório de Chavantes - SP.* (Tesis de Maestría). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, San Pablo. 154 pp.

Harano, F. K. F., y Galvanin, E. A. S. (2025). Spatio-temporal assessment of potential nonpoint pollution risk sources in the Chavantes reservoir basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 152, 105310.

Hossain, A. K. M. A., Jia, Y. y Chao, X. (2010). Development of remote sensing-based index for estimating/mapping suspended sediment concentration in river and lake environments. En: *Proceedings of the 8th International Symposium on ECOHYDRAULICS (ISE 2010)* (pp. 578-585).

Huang Z., Han L., Zeng L., Xiao W. y Tian Y. (2016). Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 3943-3955. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5874-8>

Hucke, A. T. D. S. (2023). *Impactos del cambio climático en las principales cuencas fluviales de Brasil: análisis comparativo entre modelos hidrológicos y modelos de inteligencia artificial.* (Tesis de Maestría). Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG. 146 pp.

Inostroza, G. y Cànoves, G. (2014). Turismo sostenible y proyectos hidroeléctricos: contradicciones en la Patagonia chilena. *Cuadernos de Turismo*, (34), 115-138. <https://revistas.um.es/turismo/article/view/203051>

Instituto de Aguas de Paraná. (2017). Plano da bacia hidrográfica do rio Paranapanema. Curitiba, PR: Instituto das Águas do Paraná.

Jaramillo Gómez, E. A. (2020) *Conflictos por usos no extractivos en embalses de almacenamiento*

energético en Colombia. Caso de estudio: Embalse Peñol-Guatape. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 148 pp.

Lima, R. N. de S., Ribeiro, C. B. de M., Barbosa, C. C. F. y Rotunno Filho, O. C. (2016). Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(1), 139–150. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220201600100127676>

Maero, I. (2023). Interpretación de la Calidad del agua de uso recreativo. En: Actas de las Jornadas Turismo, comunidades y ruralidad - Debates y construcción de sentido desde los territorios. La Plata, Argentina. 6 al 8 de mayo de 2021. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/152168>

Machado, R. S., Silva, C. A., y Oliveira, L. M. (2003). A importância da vegetação nativa na conservação dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(3), 731-732. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592003000300006>

Mbaiwa, J. y Stronza, A. (2009). The challenges and prospects for sustainable tourism and ecotourism in developing countries. The SAGE Handbook of Tourism Studies, 333-353. SAGE, Londres.

Marcó, L., Azario, R., Metzler, C. y García M.C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales. *Higiene y Sanidad Ambiental*. 4, 72-82.

Mazzetti Ferreira, R. (2022). *Parcelamentos de solo e potencial turístico. Estudo de caso do entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Chavantes, no Rio Paranapanema*. (Tesis de Maestría). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, San Pablo. 145 pp.

Mereu, S., Sušnik, J., Trabucco, A., Daccache, A., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Renoldi, S., ... y Assimacopoulos, D. (2016). Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case study from Sardinia. *Science of the Total Environment*, 543, 1028–1038. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.066>

Perbiche-Neves, G., Pomari, J., Serafim-Júnior, M., y Nogueira, M. G. (2021). Cyclopoid copepods as indicators of trophic level in south American reservoirs: a new perspective at species level based on a wide spatial-temporal scale. *Ecological Indicators*, 127, 107744.

Pomari, J., Kane, D. D., y Nogueira, M. G. (2018). Application of multiple-use indices to assess reservoirs water quality and the use of plankton community data for biomonitoring purposes. *International Journal of Hydrology*, 2(2), 168-179.

Rex, F.E., Kazama, V., Corte, A.P., y Sanquetta, C. (2018). Dinâmica do uso e cobertura da terra do entorno do reservatório do Passo Real – RS. *Encyclopédia Biosfera*, 15(27). [https://doi.org/10.18677/EnciBio\\_2018A35](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A35)

Rigacci, L. N. (2021). Análisis de la capacidad de depuración de la represa Ing. Roggero, Buenos Aires (Argentina). Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche.

Rosa, RR, Caetano, DLF, Bellay, S., de Moraes, VR y Vieira, FEG (2016). Diversidad de peces en afluentes del embalse Chavantes, PR, cuenca alta del río Paraná. *Biotemas*, 29 (2), 33-43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9909465>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. y Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 3 (pp. 309-317). Washington: NASA.

São Paulo. (2021). Secretaria de Gestão Pública. Parecer CT/UM para o CRH. Documento eletrônico. <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/events/CRH/9456/parecer-ct-um-para-o-crh-09fev2021.pdf>.

Scherer, U., Sagemann, S., & Stephan, F. (2011). Emission via erosion and retention of heavy metals in river basins of Germany. In *Geophys. Res. Abstr* 13, 4769.

Silva, R. F. da. (2016). Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. *Caderno de Geografia*,

Impacto de los cambios en el uso del suelo sobre calidad del agua del embalse Chavantes, Brasil.  
Evaluación a través de imágenes multiespectrales

Federico Javier Berón de la Puente - Edinéia Aparecida Dos Santos Galvanin - Paula Andrea Zapperi

26(47), 966–976. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26n47p966>

Souza Jr., C. M., Z. Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L., A. Alencar, A., Rudorff, B. F., ... y Azevedo, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

Stec, J., Kosikowska, U., Mendrycka, M., Stępień-Pyśniak, D., Niedzwiedzka-Rystwej, P., Bębnowska, D., Hrynkiewicz, R., Ziętara-Wysocka, J., & Grywalska, E. (2022). Opportunistic pathogens of recreational waters with emphasis on antimicrobial resistance—A possible subject of human health concern. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7308. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127308>

Steffen, G. P. K., Steffen, R. B., y Antoniolli, Z. I. (2011). Contaminação do solo e da água pelo uso

de agrotóxicos. *Tecno-Lógica*, 15(1), 15-21. <https://doi.org/10.17058/tecnologia.v15i1.2016>

Uriarte M., Yackulic C. B., Lim Y. L. y Arce-Nazario A. J. (2011). Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. *Landscape Ecology*, 26, <https://doi.org/1151-1164.10.1007/s10980-011-9642-y>

Wang, X., Wang, Q. y Wu, Q. (2003). Estimating suspended sediment concentration in coastal water of Minjiang River using remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 7(1), <https://doi.org/54-57.10.11834/jrs.20030110>

Zapperi, P., Revollo, N., Galvanin, E.A.S. & Gil, V. (2021). Utilización de índices biofísicos como aporte al monitoreo ambiental del embalse Chavantes (Paranapanema, Brasil). En: XVIII Encuentro de Geografías de América Latina y el VIII Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas de la República Argentina. [https://drive.google.com/drive/folders/1OYEJmF2ugusEOzQ\\_nyX5pDKtdHu-gLpn?usp=sharig](https://drive.google.com/drive/folders/1OYEJmF2ugusEOzQ_nyX5pDKtdHu-gLpn?usp=sharig)