

Degradación de humedales del Sistema Leyes Tulumaya y estado de conservación como hábitat para la biodiversidad de Mendoza

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria

Ever Tallei

Licenciado en Biología, Universidad del Aconcagua - 2014

Lugar de trabajo: Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA), Centro Científico Tecnológico CONICET Mendoza



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires



TUTORA

Laura Zalazar

Licenciada en Geografía (Universidad Nacional de Cuyo)

Doctora en Geografía (Universidad Nacional del Sur)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Carlos Di Bella

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon

Leticia Castro Sardiña

Licenciada en Biología (Universidad Nacional de San Juan)

Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 14 de agosto de 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres, por apoyarme siempre en cada proyecto. A mi china jujeña Jamaica, mi compañera de vida y de aventuras. A mi chino recién llegado también. A mis amigos y compañeros, cables a tierra y energía sinfín para recargar.

A Laura Zalazar, por acompañarme a transitar la última etapa de este acontecimiento espacial. A July Straschnoy, porque motiva y sostiene a los estudiantes de esta carrera, pilar indiscutible para que todo esto funcione. A los jurados, por sus aportes y dedicación. A los docentes de esta carrera, por su paciencia y predisposición con nuestra cohorte pandémica.

A la UBA y a la Universidad Pública, por darnos posibilidades de crecimiento y desarrollo profesional al pueblo argentino. A la Ciencia argentina, porque somos muchos quienes creemos, queremos y anhelamos hacer ciencia de calidad para nuestro país, y es sobre todo un orgullo.

¡Gracias!

“En memoria de los humedales del desierto del Monte central y en constancia de que aún podemos remediar su degradación ambiental”

*“La ciencia no tiene patria,
pero el hombre de ciencia la tiene”*

Bernardo Hussay

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución"

ÍNDICE

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
Objetivo general y específicos	11
Materiales y Métodos	11
Área de estudio	11
Productos, procesamiento y análisis de datos	14
<i>Series temporales</i>	15
Uso de productos espaciales	15
Procesamiento de datos	16
Análisis de datos	16
<i>Cambios de uso del suelo</i>	17
Uso de productos espaciales	17
Procesamiento de datos	18
Análisis de datos	18
<i>Influencia humana</i>	19
Uso de productos espaciales	19
Procesamiento de datos	19
Análisis de datos	19
Resultados	20
<i>Series temporales</i>	20
<i>Cambios de uso del suelo</i>	26
<i>Influencia humana</i>	29
Discusión	30
Conclusión	36
Bibliografía	37

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Sistema de humedales Leyes Tulumaya y matriz agropecuaria en donde se localizan. Se muestra, además, la distancia al Área Metropolitana de Mendoza y los sitios de estudio (A-D).	12
Figura 2. Precipitación mensual del área del estudio y caudal medio mensual del Río Mendoza.	13
Figura 3. Esquema que muestra los productos espaciales y las técnicas y herramientas utilizadas para el procesamiento y análisis de datos.	15
Tabla 1. Descripción de los tipos de coberturas utilizadas a partir del proyecto MapBiomias Argentina.	18
Tabla 2. Estadística descriptiva de la superficie de agua de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya para el período 1986 – 2023.	20
Figura 4. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna Bombal para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.	21
Figura 5. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna del Viborón para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.	22
Figura 6. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna La Paloma para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.	23
Figura 7. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna de Soria para el período 1986-2023 (línea azul = media semestral); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua mensual del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.	24
Figura 8. Series temporales de la superficie de agua (línea negra) de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya y sus predicciones para el período 2024-2033 (línea azul) a partir de los modelos ARIMA.	25
Figura 9. Diagramas de flujos de los cambios en el uso del suelo y tipos de coberturas entre los años 1985 y 2022 en los humedales del SLT.	27
Tabla 3. Cambios en el uso del suelo y tipos de coberturas entre los años 1985 y 2022 en los humedales del Sistema Leyes Tulumaya.	28
Figura 10. Influencia humana en humedales del Sistema Leyes Tulumaya. Letras diferentes indican diferencia significativa entre pares ($p < 0.01$).	29
Figura 11. Relación entre el índice de huella humana y la distancia al área metropolitana de Mendoza en humedales del Sistema Leyes Tulumaya.	30

RESUMEN

En el desierto del Monte central de Argentina, los humedales son un recurso escaso y limitante para la biodiversidad que depende de ellos. La influencia humana ha sido un factor determinante en la degradación de los humedales a través de actividades como la agricultura intensiva, la urbanización y la explotación de los recursos naturales. Además, la agricultura es el mayor usuario de agua dulce a escala mundial y el principal factor de degradación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. El objetivo de este estudio es evaluar la degradación ambiental de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya (Mendoza, Argentina), su estado de conservación como hábitat para la biodiversidad y su tendencia para los próximos años. Se utilizaron herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica para analizar los cambios en la superficie de agua de los humedales entre 1986 y 2023. Asimismo, se cuantificaron los cambios de uso del suelo y la influencia humana en la matriz circundante de los cuatro sitios de estudio: Bombal, La Paloma, Viborón y Soria. Excepto Soria, los humedales mostraron una tendencia negativa en la superficie de agua interanual. Se detectó una estacionalidad intraanual, con superficies máximas entre julio y septiembre, y mínimas entre enero y marzo. Los modelos predictivos sugieren que Bombal y Viborón enfrentarán una sequía hidrológica en la próxima década, mientras que La Paloma y Soria mantendrán una superficie media inferior al promedio observado. Los cambios de uso del suelo, que transformaron áreas naturales en agropecuarias, fueron más pronunciados en Bombal (80%), seguido de Laguna del Viborón (65%), La Paloma (53%) y Soria (39%). Se observó una relación inversa entre la distancia al área metropolitana de Mendoza y el índice de huella humana, resultando Bombal como el humedal con mayor influencia humana. La información generada en este estudio es importante para promover medidas de gestión y manejo que favorezcan la conservación de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya y sus contribuciones a las personas.

Palabras clave: cambios de uso del suelo, conservación de la biodiversidad, desierto del Monte central, influencia humana, series temporales

ABSTRACT

In the central Monte Desert of Argentina, wetlands are a scarce and limiting resource for the biodiversity that depends on them. Human influence has been a determining factor in wetland degradation through activities such as intensive agriculture, urbanization, and the exploitation of natural resources. Furthermore, agriculture is the largest consumer of freshwater on a global scale and the main factor in the degradation of surface and groundwater resources. The aim of this study is to evaluate the environmental degradation of the wetlands in the Leyes Tulumaya System (Mendoza, Argentina), their conservation status as a habitat for biodiversity, and their trend for the coming years. Remote sensing and geographic information systems tools were used to analyse changes in the wetland water surface between 1986 and 2023. Additionally, land use changes and human influence on the surrounding matrix of the four study sites – Bombal, La Paloma, Viborón, and Soria – were quantified. Except for Soria, the wetlands showed a negative trend in the interannual water surface area. Intra-annual seasonality was detected, with maximum surface areas between July and September and minimum areas between January and March. Predictive models suggest that Bombal and Viborón will face hydrological drought in the next decade, while Paloma and Soria will maintain a lower average surface area than the observed mean. Land use changes, transforming natural areas into agricultural zones, were most pronounced in Bombal (80%), followed by Viborón (65%), Paloma (53%), and Soria (39%). An inverse relationship was observed between distance to the Mendoza metropolitan area and the human footprint index, with Bombal emerging as the wetland most affected by human influence. The information generated in this study is crucial for promoting management and conservation measures that favour the preservation of the Leyes Tulumaya System wetlands and their contributions to people.

Keywords: biodiversity conservation, central Monte Desert, human influence, land use changes, time series

INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental es el proceso mediante el cual los recursos naturales se deterioran debido a las actividades humanas, afectando a los ecosistemas y seres vivos (Johnson et al. 1997). Los humedales, actualmente tienen altas tasas de degradación y están disminuyendo drásticamente en su extensión y calidad a nivel global (Fluet-Chouinard et al. 2023). Estos ambientes, tienen una gran importancia en relación con los procesos hidrológicos y ecológicos que en ellos ocurren, como el almacenamiento de agua, el ciclado y retención de nutrientes, y el refugio para la biodiversidad (Bezabih & Mosissa 2017, Serran et al. 2017, Brinson & Rheinhardt 2019). También son sumideros de carbono altamente eficientes, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático al almacenar grandes cantidades de carbono en sus suelos y vegetación (Zedler & Kercher 2005). Se estima que los humedales proveen el 40 % de los bienes y servicios ecosistémicos del total de los ecosistemas del planeta (Costanza et al. 1997). A pesar de su importancia global tanto ecológica como socioeconómica, los humedales están desapareciendo (Junk et al. 2013, Bolpagni & Piotti 2016, Young et al. 2016).

El cambio en el uso del suelo es uno de los principales factores modeladores del cambio global (Wu 2008). El incremento de la población humana y sus niveles de consumo, han sido determinantes en el aumento de la degradación de los ecosistemas (De Chazal & Rounsevell 2009, Giménez et al. 2020). En Argentina, este proceso ha sido más pronunciado en las regiones del centro y norte, las cuales han experimentado una expansión no planificada y sin precedentes de tierras cultivadas, infraestructura y áreas urbanas (Pacheco 2012). Los cambios en la cobertura y/o uso del suelo tienen importantes consecuencias ecológicas y económicas. La conversión de áreas naturales en tierras cultivadas tiene efectos directos sobre el balance hidrológico y los ciclos biogeoquímicos de la superficie terrestre, y como consecuencia sobre los procesos ecológicos (Nosetto et al. 2005, Jobbágy et al. 2011, Costanza et al. 2014). Tanto a escala global como local, los impactos ambientales negativos de tales cambios producen una degradación ambiental que afecta a las contribuciones de la naturaleza (Díaz et al. 2018, IPBES 2019) y genera diversas problemáticas socio-ambientales del desarrollo (Klijn 1994, Carreño et al. 2012).

La agricultura es el mayor usuario de agua dulce a escala mundial y el principal factor de degradación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (Baigún et al. 2008). Los cambios en el uso del suelo por la agricultura degradan la calidad del hábitat e influyen en el

ciclo hidrológico de los humedales tanto física como químicamente (van Asselen et al. 2013, Sica et al. 2016). En el desierto del Monte central de Argentina, el desarrollo de la agricultura bajo riego produjo la pérdida y degradación de numerosos humedales (Prieto et al. 2008, Álvarez et al. 2024). Esto se debe principalmente al uso del agua para los oasis (i.e., zonas cultivadas por riego artificial) y las condiciones climáticas que incrementan el déficit hídrico en los Andes Centrales (Masiokas et al. 2019). Si bien, se desconoce la tasa de pérdida del área total de los humedales de esta región (Benzaguen et al. 2017), se encontró que para el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero, y del Bebedero se produjo una pérdida del 80% de la cobertura en los últimos 30 años (Abrahan 2019).

Las actividades humanas pueden afectar profundamente la abundancia y distribución de las especies, produciendo cambios en las comunidades (Rayfield et al. 2009, Hagen et al. 2012, Venier et al. 2014). Estos cambios, pueden ser descriptos a escala global y regional mediante herramientas como el índice de la huella humana (Sanderson et al. 2002, Martinuzzi et al. 2017). La huella humana mide colectivamente la pérdida, fragmentación y conversión del hábitat, que son las causas principales de la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad en todo el mundo (Hannah et al. 1995, Venter et al. 2016). Los índices de huella humana pueden ser utilizados en estrategias que mitiguen los impactos causados por los humanos a nivel de paisaje y sobre las especies (Newbold et al. 2015, Watson et al. 2016). Al monitorear los cambios en el tiempo de la huella humana, se puede evaluar potencialmente si los esfuerzos de conservación que implementan tales estrategias están realmente mitigando o reduciendo la huella humana en un paisaje o ecosistema definido a una escala espacial y temporal específica (Haines et al. 2008).

En el mundo ha aumentado el número de especies con riesgo de extinción e incluso, muchas especies comunes tienen poblaciones en disminución (Powers & Jetz 2019). No solo nos enfrentamos a uno de los mayores eventos de extinción, sino que las consecuencias tendrán un efecto negativo en cascada en el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos fundamentales para sostener a la humanidad (Cardinale et al. 2006, Ceballos et al. 2017). Los humedales proporcionan hábitats esenciales para una amplia variedad de especies, muchas de las cuales están adaptadas exclusivamente a las condiciones específicas de estos entornos (Davidson 2014). Estos ecosistemas, actúan como refugios críticos para muchas especies de aves, anfibios, peces y plantas, proporcionándoles áreas de reproducción, alimentación y descanso (Zedler & Kercher 2005). La pérdida y degradación de estos hábitats

debido a las actividades humanas, como la agricultura intensiva, el drenaje de tierras para la urbanización y la extracción de agua, ha llevado a la disminución de poblaciones de especies dependientes de los humedales, algunas de las cuales se encuentran actualmente en peligro de extinción (Junk et al. 2013).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la degradación ambiental de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya y su estado de conservación como hábitat para la biodiversidad en Mendoza, Argentina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la dinámica espacio-temporal de la superficie de agua en lagunas del Sistema Leyes Tulumaya durante el periodo 1986-2023 y predecir sus tendencias para la próxima década.
2. Comparar los cambios en los tipos de coberturas y usos del suelo en la matriz en donde se localizan las lagunas entre los años 1985 y 2022.
3. Cuantificar la influencia humana en la matriz en donde se localizan las lagunas y analizar su relación con el área metropolitana de Mendoza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en cuatro humedales pertenecientes al Sistema Leyes Tulumaya (de ahora en más “SLT”, Fig. 1), Mendoza, Argentina: Laguna Bombal (32°56'31"S, 68°37'31"O), Laguna del Viborón (32°53'26"S, 68°36'42"O), Laguna La Paloma (32°50'37"S, 68°36'8"O) y Laguna de Soria (32°47'46"S, 68°35'14"O). El SLT es un humedal de tipo fluvial que se desarrolla sobre una gran llanura y presenta muy escasa pendiente, con valores promedio inferiores a 10° (Rubio 2018). Este humedal, se encuentra en la ecorregión del Monte de mesetas y llanuras (Oyarzabal et al. 2018). El clima es árido a semiárido, con temperaturas medias de 22°C en verano y 8°C en invierno (González-Loyarte et al. 2009). La

vegetación natural del SLT está diferenciada en dos tipos de comunidades predominantes, la hidrófila y la xerófila. La vegetación natural hidrófila está conformada por totora (*Typha dominguensis*), juncos (*Schoenoplectus californicus*; *Juncus spp.*), carrizo (*Phragmites australis*) cortaderas (*Cortaderia spp.*) y pájaro bobo (*Tessaria absinthioides*), entre otros. La vegetación xerófila es de tipo arbustiva con asociaciones caracterizadas por palo azul (*Ciclopeys genistioides*), vidriera (*Suaeda divaricata*), jume (*Allenrolfea vaginata*), zampas (*Atriplex spp.*), vinagrillo (*Salicornia perennis*) y campa (*Ehretia cortesiá*). Por otra parte, se pueden encontrar parches de vegetación arbórea caracterizados por algarrobos (*Neltuma spp.*) y chañares (*Geoffroea decorticans*).

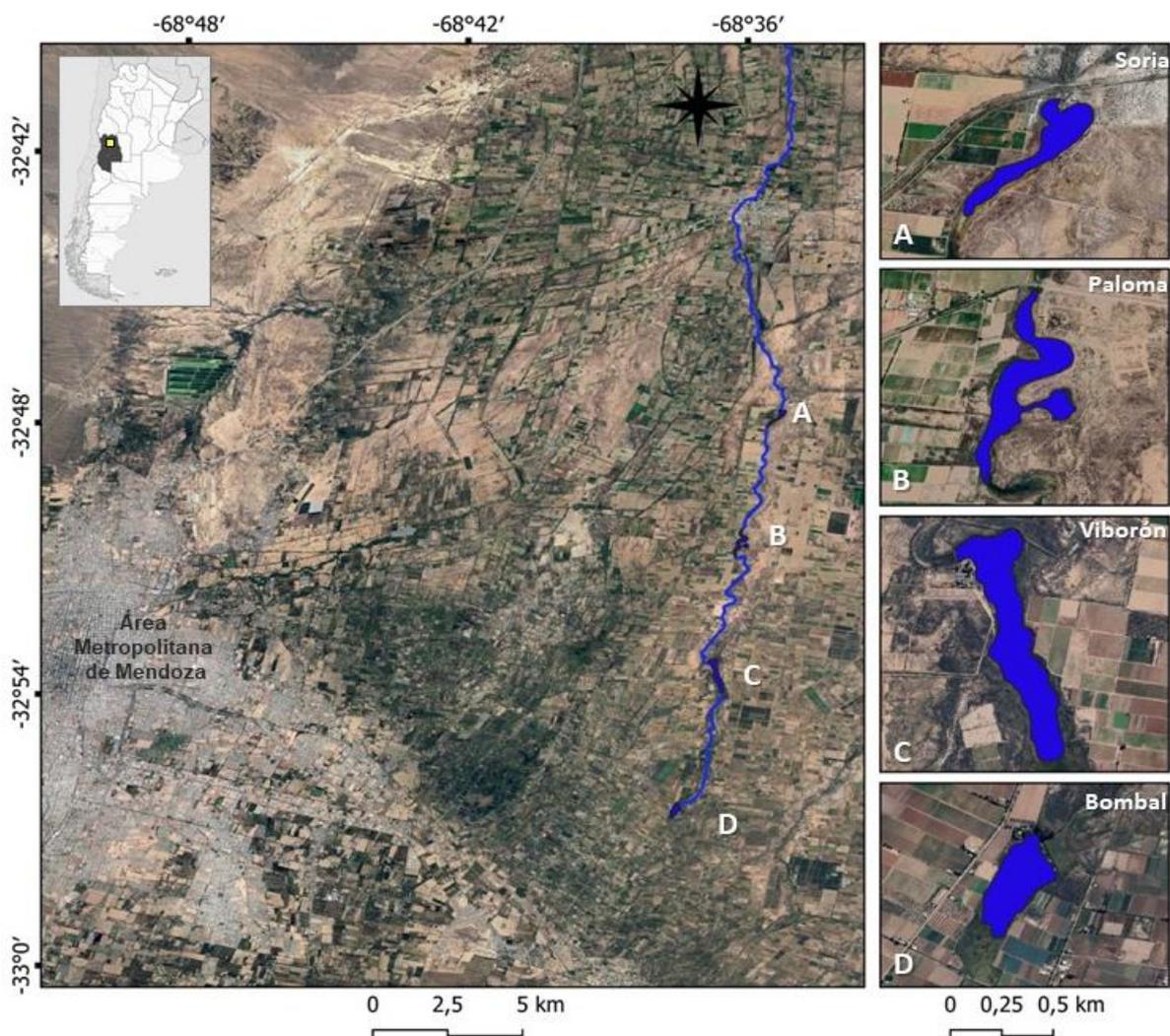


Figura 1. Sistema de humedales Leyes Tulumaya y matriz agropecuaria en donde se localizan. Se muestra, además, la distancia al Área Metropolitana de Mendoza y los sitios de estudio (A-D).

El SLT, constituye uno de los últimos relictos de las grandes extensiones palustres de la provincia de Mendoza (Mirábile et al. 2005). Esta área fue conocida como la Ciénaga del Bermejo en el siglo XVIII, la cual fue sometida a procesos de canalización y drenaje para incorporar los terrenos a la producción agrícola (Prieto et al. 2008). Actualmente, escasos humedales interconectados conforman el sistema SLT (Prieto & Rojas 2012, Rubio 2018) y son considerados sitios de alta biodiversidad en la provincia (BIOTA 2020). Las fluctuaciones hídricas de este sistema, se encuentra sujeta al ciclo hidrológico de los Andes Centrales de Argentina. El SLT pertenece a la cuenca hidrográfica del río Mendoza y es abastecido principalmente por el río homónimo (Fig. 2). Las precipitaciones son de régimen estival con una media de 200 a 250 mm anuales (Norte 2000; Fig. 2). Además, recibe excedentes provenientes de las escorrentías pluviales del área metropolitana, como así también de desagües industriales y agrícolas (Mirábile et al. 2005). Sin embargo, se desconoce el grado de impacto que tiene el uso del agua de las zonas agrícolas del oasis norte en el sistema de humedales. En la última década, se registraron eventos de secamiento de algunas lagunas durante semanas y/o meses (Los Andes 2022, Rios et al. 2025), y en el caso de humedales como Laguna Seca o Bañados del Tulumaya, no volvieron a tener agua hasta la actualidad (Tallei Obs. Personal, BIOTA 2020). Teniendo en cuenta el valor de los humedales para las zonas áridas y la alta tasa de degradación global actual (Minckley et al. 2013) son escasos los estudios que existen sobre el SLT.

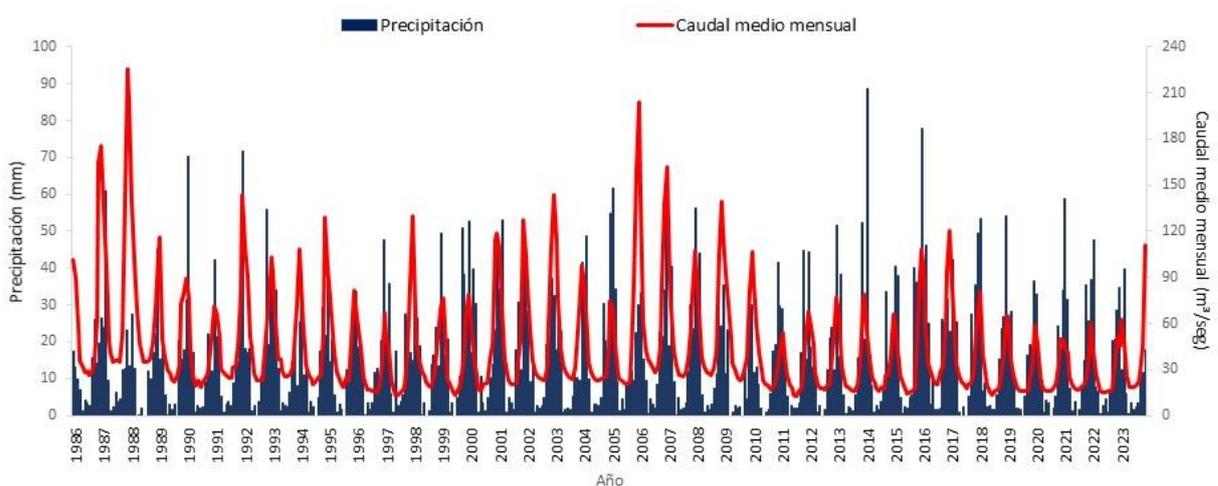


Figura 2. Precipitación mensual del área del estudio y caudal medio mensual del Río Mendoza. Los datos de precipitación se extrajeron a partir del producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) y los de caudal a partir de la estación Guido (Red Hidrológica Nacional; snih.hidricosargentina.gob.ar).

Con la llegada de la ciencia ciudadana, en la última década se incrementaron los registros sobre biodiversidad del SLT (Callaghan et al. 2019). Esta información generó un creciente interés entre naturalistas, fotógrafos e investigadores, fomentando la exploración de los humedales (Martínez et al. 2015, BIOTA 2020, Zanotti 2020, Tallei et al. 2021, Tabeni en preparación). Además, el conocimiento del sistema y su importancia ecológica impulsó a que diversas organizaciones ambientales incluyan en la agenda política provincial la urgente necesidad de conservarlo (El Despertador 2020). A pesar de estos esfuerzos, el SLT continúa sin ser una prioridad en la gestión provincial, ya que no cuenta con ninguna ley de protección ambiental (Prieto & Rojas 2012, Esteves 2023). Actualmente, solo existe una declaración provincial que lo reconoce como "Sitio de importancia para la conservación" (Resolución N° 1.168/2007; Gobierno de Mendoza 2020) y dos lagunas, Viborón y Soria, han sido designadas como "Reserva Natural Municipal" mediante ordenanzas (Maipú 1383/2008 y Lavalle 1121/2020). Sin embargo, estas normativas permanecen sin una implementación efectiva de acciones que contribuyan a proteger o revertir la degradación del humedal (El Despertador 2022). No obstante, desde una perspectiva social, el panorama resulta más alentador. Los pobladores que administran el ingreso a las lagunas del Viborón y Soria han adoptado un nuevo paradigma de gestión, pasando de ser clubes de caza y pesca a propiciar la conservación del ecosistema, ya que reconocen los valores naturales y estéticos del lugar (Esteves 2023). Este cambio ha sido impulsado por el incremento de visitantes y la llegada de más naturalistas a la zona.

Productos, procesamiento y análisis de datos

Para el desarrollo del presente trabajo se emplearon distintos tipos de productos espaciales, técnicas y herramientas para el procesamiento y análisis de datos, las cuales se resumen en el siguiente esquema (Fig. 3) y se describen a continuación.

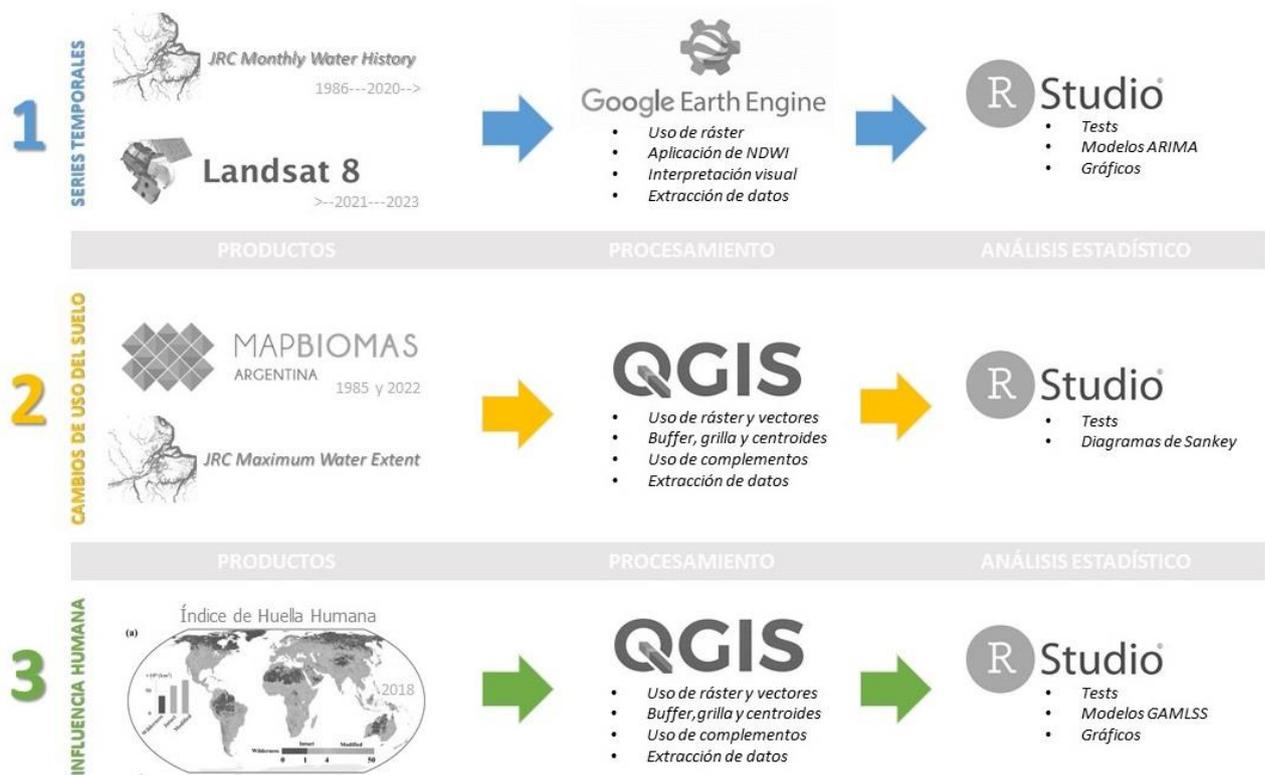


Figura 3. Esquema que muestra los productos espaciales y las técnicas y herramientas utilizadas para el procesamiento y análisis de datos del presente trabajo. Los números corresponden a cada objetivo específico de este estudio.

Series temporales

Uso de productos espaciales. Se utilizó el producto *JRC Monthly Water History* (Pekel et al. 2016) para identificar y monitorear los cambios en la superficie de los humedales (1986 - 2021). El *JRC Monthly Water History* es un producto disponible en Google Earth Engine (GEE) que proporciona información detallada sobre la presencia y los cambios en los cuerpos de agua superficiales a nivel global, con una resolución espacial de 30 m. Este producto, permite analizar tendencias en la dinámica del agua, evaluar el impacto de fenómenos naturales y actividades humanas, y planificar la gestión de los recursos hídricos. El período por analizar corresponde a 37 años (desde 1986 a 2023), y se seleccionó a partir de ese año porque si bien el producto tiene información desde 1984, el mismo muestra vacíos de información entre 1984 y 1985. Complementariamente, se utilizaron colecciones de imágenes Landsat 8 (LANDSAT/LC08/C02/T1_L2) para cubrir el período de tiempo restante a analizar (año 2021 a 2023).

Procesamiento de datos. Para el análisis de la superficie de agua de los últimos tres años, se seleccionaron imágenes Landsat 8 aplicando un filtro de nubes ($< 20\%$) y temporal (2021 – 2023). Se calculó el índice espectral NDWI (*Normalized Difference Water Index*) a partir de las bandas 3 (Green) y 5 (NIR) para identificar y monitorear los cambios en los cuerpos de aguas superficiales. Se aplicó una máscara de agua utilizando un umbral de 0.01 en NDWI. Tanto en el producto *JRC Monthly Water History* como en las imágenes Landsat, se extrajo el número de píxeles clasificados como cobertura agua delimitado a cada zona de estudio (laguna) y se expresaron los valores en hectáreas. Además, se revisaron los valores atípicos realizando una interpretación visual de la imagen, descartando datos mensuales y/o imágenes dañadas o erróneas. La identificación de valores atípicos es importante para verificar y analizar su causalidad, o en caso contrario, considerar eliminarlos de la serie para evitar distorsiones estadísticas (Guerra Rodríguez 2022). Se promediaron los valores mensuales en aquellos casos en donde existían dos o más imágenes por mes (solo para el período 2021-2023). Se construyó una matriz de datos mensuales desde 1986 a 2023. Los datos fueron procesados utilizando el software Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com>).

Análisis de datos. Se graficó una serie de tiempo, a partir de los datos de *JRC* y Landsat 8, de la fluctuación mensual de la superficie de agua de cada humedal y su promedio anual. Además, se aplicó una interpolación lineal para aquellos valores en donde existía ausencia de estos. Para describir el comportamiento de la serie de tiempo, se utilizó un modelo multiplicativo y se descompuso en datos observados, tendencia, estacionalidad, y componente aleatorio. Por otro lado, para analizar la dinámica intraanual se generaron gráficos de caja y para evaluar la tendencia de la serie se aplicó el test de Mann-Kendall y la estacionariedad el test de Dickey-Fuller. Las series que no resultaron estacionarias fueron transformadas mediante una diferenciación (operación matemática para eliminar tendencias en la serie hasta que las propiedades estadísticas de la misma sean constantes). El análisis del comportamiento estadístico de las series temporales se realizó a través de Modelos Autorregresivos Integrados de Medias Móviles estacional (ARIMA estacional, Guerra Rodríguez 2022). Se utilizó la función *autoarima* para la selección del modelo más adecuado teniendo en cuenta el criterio de información de Akaike (AIC). Posteriormente, se validó el modelo a partir de los residuos (verificación de ruido blanco a través de los correlogramas ACF y PACF de los residuos) e independencia (validación de la distribución de los datos de forma independiente a través del test Q de Ljung-Box). A partir del modelo generado para cada serie temporal, se elaboró un

pronóstico de cada humedal para los próximos diez años, modelando su tendencia y los intervalos de confianza al 95% y 80%. Los gráficos y análisis estadísticos se realizaron utilizando los paquetes *ggplot2*, *zoo*, *lubridate*, *tseries*, *tidyverse* y *forecast* en el software R versión 4.0.4 (R Development Core Team 2023).

Cambios en el uso del suelo

Uso de productos espaciales. Se utilizaron los productos de cobertura y uso del suelo del Proyecto MapBiomias Argentina (2024) para la ecorregión Monte, Puna, y Altos Andes. Los mismos, son productos de tipo ráster de una resolución espacial de 30 m que clasifican el suelo en diversas categorías de coberturas. Son mapas anuales desarrollados por una red colaborativa de instituciones y expertos, que permiten analizar los cambios en la cobertura y uso del suelo de distintas regiones de Argentina. Se seleccionaron mapas de los años 1985 y 2022 ya que corresponden al mayor rango temporal de los productos en disponibilidad. Las coberturas correspondientes al área de estudio fueron: vegetación leñosa (cerrada, abierta, y dispersa), vegetación no leñosa (inundable y pastizal), agropecuaria (plantación forestal y mosaico agropecuario) y áreas sin vegetación (Tabla 1). Además, se utilizó el producto *JRC Maximum Water Extent* (Pekel et al. 2016) disponible en GEE, para generar un vector de la cobertura máxima de agua de cada laguna. El mismo, muestra la extensión máxima de agua superficial a nivel global durante el período de 1984 a 2021. El producto fue elaborado a partir de imágenes satelitales Landsat con una resolución de 30 m. Es útil para comprender la dinámica histórica de los cuerpos de agua, evaluar riesgos de inundaciones, planificar la gestión de recursos hídricos y la conservación de humedales.

Tabla 1. Descripción de los tipos de coberturas utilizadas a partir del proyecto MapBiomás Argentina. En la categoría pastizal se utilizó la descripción perteneciente a la ecorregión Chaco, ya que no existe la misma para Monte.

Tipo de cobertura	Categoría	Descripción
Vegetación natural leñosa	cerrada	Áreas con vegetación natural formada por árboles, arbustos o una mezcla de ambos, con una cobertura superior o igual a 65%.
	abierta	Áreas con vegetación natural formada por árboles, arbustos o una mezcla de ambos, con una cobertura superior o igual al 20% y menor al 65%.
	dispersa	Áreas con vegetación natural formada por árboles, arbustos o una mezcla de ambos, con una cobertura superior o igual al 5% y menor al 20%.
Vegetación natural no leñosa	inundable	Áreas con vegetación natural influenciada por una capa freática cercana a la superficie o dependiente de inundaciones.
	pastizal	Áreas con vegetación natural formada por herbáceas con una cobertura igual o superior al 5%. En esta categoría se admite la presencia de leñosas, pero las mismas deben encontrarse en coberturas comprendidas entre el 1-5 y 20%.
Agropecuario	plantación forestal	Áreas con cubiertas por vegetación leñosa de origen antrópico. En esta región esta clase incluye arboles y arbustos cultivados sin discriminar.
	mosaico agropecuario	Áreas con cubiertas vegetales de origen antrópico conformadas por una asociación heterogénea en el tiempo y el espacio de agricultura, pasturas, hortalizas y frutales, en general de pequeña escala, típica pero no exclusiva de áreas irrigadas.
Áreas sin vegetación		Áreas con cobertura vegetal menor al 5%. Clase mixta que incluye playas, dunas y salinas (cordones arenosos de color blanco brillante, en donde no hay predominio de vegetación de ningún tipo), infraestructura urbana y rural (con predominio de superficies no vegetadas como construcciones y asfalto, excluyendo situaciones de vegetación en asentamientos como arbolado o pastos), áreas de minería (como canteras, minería a cielo abierto, sin presencia de agua), afloramientos rocosos (roca naturalmente expuesta en la superficie sin cobertura vegetal) y otras áreas con escasa o nula cobertura vegetal.

Procesamiento de datos. A partir del producto *JRC Maximum Water Extent* se generó un polígono de cada laguna, el cual representó su máxima extensión. Se generó un buffer de 2 km alrededor de cada laguna y en base al área así delimitada se generó una grilla (unidades del mismo tamaño que los píxeles del producto) a la cual se le calcularon centroides para extraer las variables categóricas (tipo de cobertura) utilizando el complemento *Point Sampling Tool*. Se construyó una matriz de datos con los valores de superficie de cada tipo de cobertura para ambos años y se expresaron en hectáreas. El procesamiento de las capas se realizó utilizando las herramientas del sistema de información geográfica del software Quantum GIS versión 3.16.4 (QGIS Development Team 2021).

Análisis de datos. Se graficaron las proporciones de cada tipo de cobertura para cada año y laguna utilizando un diagrama de Sankey. El diagrama de Sankey expresa el flujo de valores de un conjunto a otro, donde las coberturas se muestran conectadas como nodos y las conexiones como enlaces. Los diagramas de Sankey son útiles para analizar el movimiento de

la información a lo largo del tiempo (Cuba 2015). Se aplicó el test de Fisher para evaluar diferencias en la superficie de cada tipo de cobertura entre ambos periodos (1985 y 2022). Los gráficos y análisis estadísticos se realizaron utilizando los paquetes *dplyr*, *networkD3*, *DescTools* y *rcompanion* en el software R versión 4.0.4 (R Development Core Team 2023).

Influencia humana

Uso de productos espaciales. Se utilizó el producto de índice de *Huella Humana* de Mu et al. (2022) correspondiente al año 2018 para cuantificar la influencia humana. La huella humana es una herramienta que mapea la dimensión espacial de la influencia humana, mostrando la extensión e intensidad, tanto de la presencia humana como de sus acciones, más allá de su área física (Tapia-Armijos et al. 2017). El índice tiene una resolución espacial de 1 km² y se estima a partir de las siguientes variables: densidad poblacional, asentamientos humanos, infraestructura de transporte, acceso a carreteras, uso agrícola del suelo, uso ganadero del suelo, infraestructura de energía, explotación forestal, y polución lumínica. Estas variables son combinadas y normalizadas para crear un índice global que varía en una escala de 0 a 50, donde valores más altos indican un mayor impacto humano sobre el entorno natural.

Procesamiento de datos. A partir del buffer delimitado en el objetivo anterior, se generó una nueva grilla (unidades del tamaño de los píxeles del producto) con centroides para extraer los valores del índice de huella humana con el complemento *Point Samplig Tool*. Luego, se creó una capa vectorial de la matriz urbana del área metropolitana de Mendoza utilizando como base el producto de cobertura y uso del suelo MapBiomias (año 2022). A partir de la misma, se generó un centroide y se calcularon las distancias a la grilla de centroides de cada laguna con el complemento *Distancia al eje más próximo*. El procesamiento de los datos se realizó utilizando las herramientas del sistema de información geográfica del software Quantum GIS versión 3.16.4 (QGIS Development Team 2021).

Análisis de datos. Se exploró la naturaleza de los datos mediante métodos de la estadística descriptiva (cálculo de medidas numéricas y gráficos). Se aplicó el test de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los datos. Para comparar el índice de huella humana entre las lagunas, se generaron gráficos de cajas y se aplicó el test U de Mann-Whitney para comparaciones por pares. Para relacionar el índice de huella humana y la distancia a la matriz

urbana del área metropolitana de Mendoza, se aplicó un modelo aditivo generalizado para localización, escala, y forma (GAMLSS; Rigby & Stasinopoulos 2005). Estos modelos permiten la inclusión de términos no lineales y no paramétricos, contando con una amplia gama de distribuciones y funciones de enlace a la variable de respuesta (Stasinopoulos & Rigby 2007). Los GAMLSS son especialmente útiles en situaciones donde los datos presentan dependencia o autocorrelación (Stasinopoulos et al. 2017, Hudson et al. 2010). El modelo se ajustó utilizando una distribución SEP2 (*Skew Exponential Power type II distribution*). Se incluyó como efecto aleatorio a los sitios, para capturar la variabilidad no explicada en los datos y debido a la estructura anidada de los mismos. Los gráficos y análisis estadísticos se realizaron utilizando los paquetes *gamlss*, *ggplot2*, *ggpubr*, *viridis*, *hrbrthemes*, *skimry*, *tidyverse* y *rstatix* en el software R versión 4.0.4 (R Development Core Team 2023).

RESULTADOS

Series temporales

Se registraron cerca de 400 datos mensuales de la superficie de agua para cada uno de los humedales durante el periodo 1986 - 2023 (Tabla 2). Laguna del Viborón presentó la mayor superficie media, seguida por La Paloma, Bombal y Soria (Tabla 2). Por otra parte, Bombal resultó como el humedal con una alta dispersión relativa en torno a la media (CV = 44.29 %), mientras que el resto mostraron una dispersión moderada (Tabla 2). Todas las lagunas llegaron a secarse en algún momento [rango mín. = 0] durante el periodo analizado.

Tabla 2. Estadística descriptiva de la superficie de agua (ha) de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya para el periodo 1986 – 2023. Referencias: N = datos, DE = desvío estándar, EE = error estándar, CV = coeficiente de variación, Mín. = rango mínimo, Máx. = rango máximo.

Laguna	N	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana	Datos faltantes
Bombal	397	7.31	3.24	0.16	44.29	0	12.15	8.19	59
Viborón	398	16.41	5.72	0.29	34.82	0	24.57	17.91	58
Paloma	386	9.53	3.43	0.17	35.97	0	14.67	10.26	70
Soria	384	6.66	2.02	0.10	30.29	0	9.99	7.02	72

Laguna Bombal se secó por primera vez durante marzo y abril de 2013, y luego consecutivamente a partir del 2020 incrementando los períodos de sequía (Fig. 4.A). La serie temporal mostró una tendencia negativa ($\tau = -0.57$, $p < 0.001$, Fig. 4.B) y una estacionalidad definida con un patrón anual (Fig. 4.B). Además, la serie presentó estacionariedad ($\tau = -3.97$, $p < 0.05$). En relación con el comportamiento intraanual, la superficie de agua máxima se observó en septiembre y la mínima en marzo (Fig. 4.C).

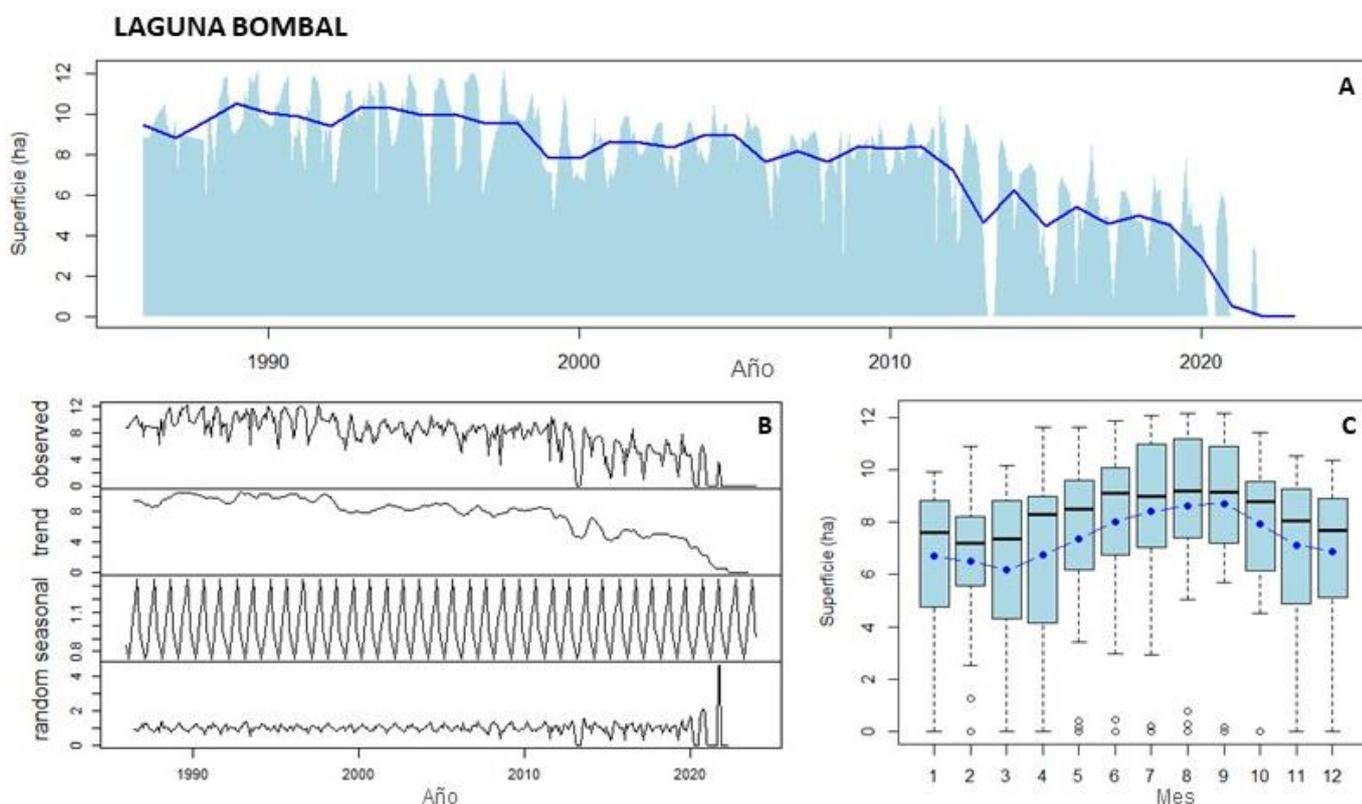


Figura 4. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna Bombal para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.

Laguna del Viborón comienza a disminuir abruptamente la superficie a partir de marzo de 2022 y se seca en octubre hasta el siguiente año (Fig. 5.A). La serie temporal mostró una tendencia negativa ($\tau = -0.16$, $p < 0.001$, Fig. 5.B) y una estacionalidad definida con un patrón anual (Fig. 5.B). Además, la serie presentó no estacionariedad ($\tau = -3.28$, $p > 0.05$), justificando aplicar un ajuste por diferencial para transformarla en estacionaria. En relación con el comportamiento intraanual, la superficie de agua máxima se observó en septiembre y la mínima en marzo (Fig. 5.C).

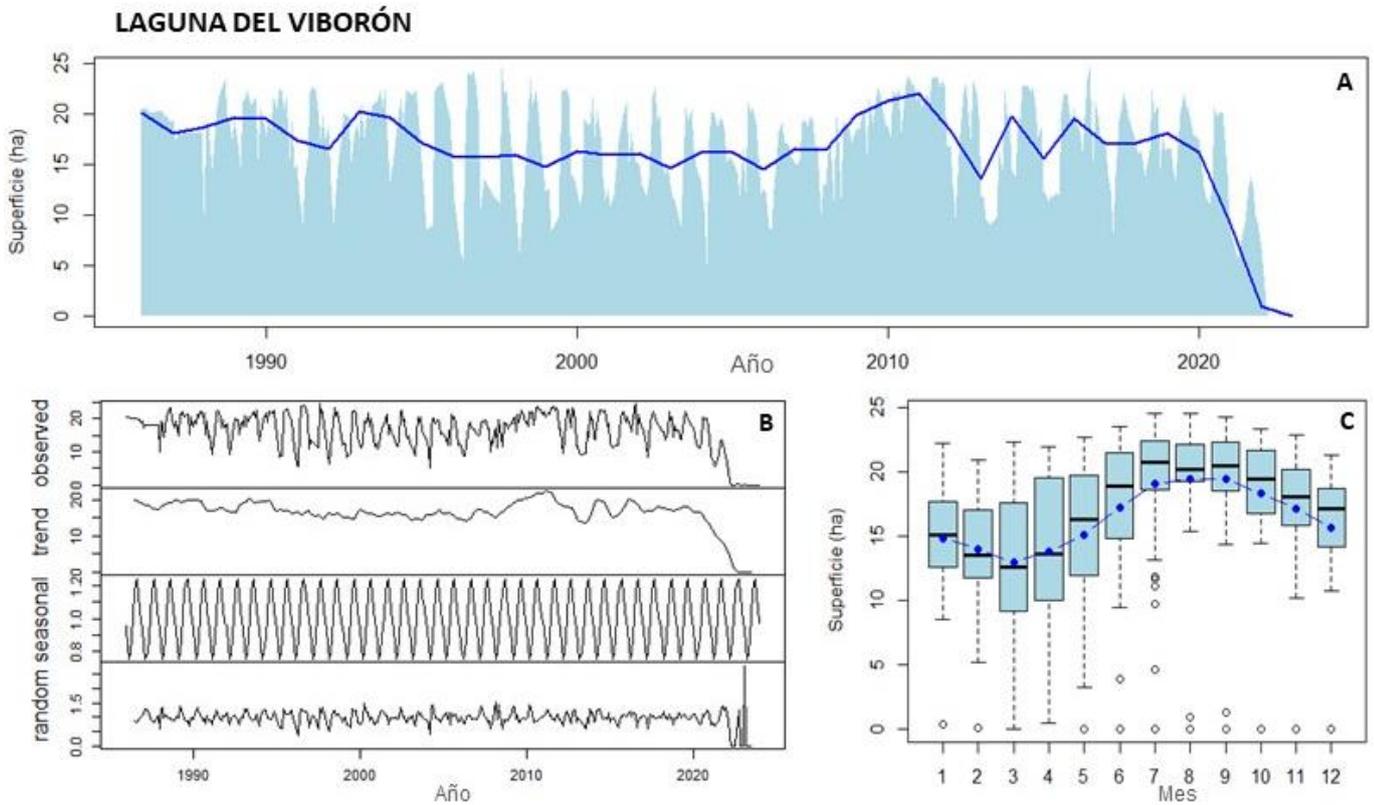


Figura 5. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna del Viborón para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.

Laguna La Paloma se seca por primera vez a partir de marzo de 2023 y hasta septiembre de ese año (Fig. 6.A). La serie temporal mostró una tendencia negativa ($\tau = -0.12$, $p < 0.01$, Fig. 6.B) y una estacionalidad definida con un patrón anual (Fig. 6.B). Además, la serie presentó no estacionariedad ($\tau = -3.28$, $p > 0.05$). En relación con el comportamiento intraanual, la superficie de agua máxima se observó en julio y la mínima en enero (Fig. 6.C).

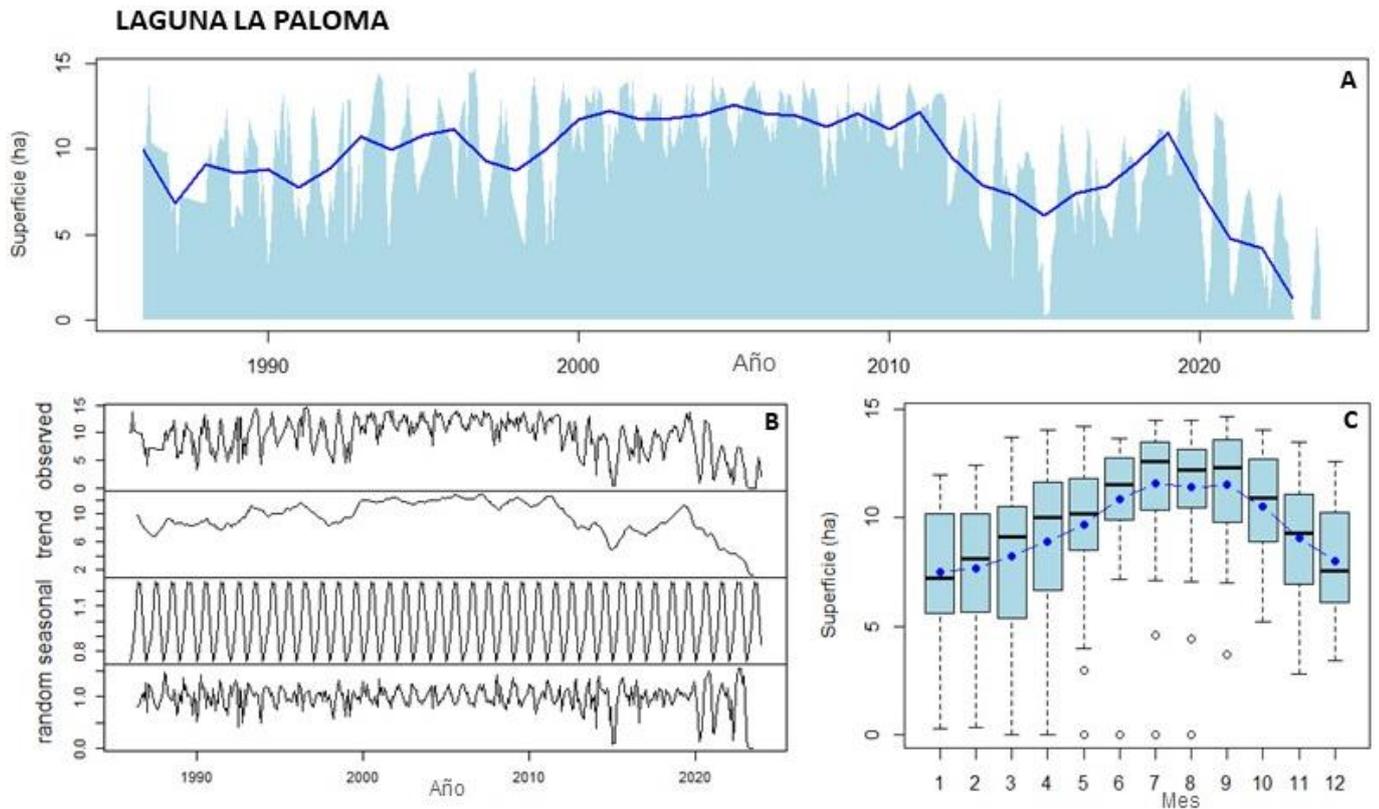


Figura 6. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna La Paloma para el período 1986-2023 (línea azul = media anual); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media mensual (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.

Laguna de Soria comienza a disminuir abruptamente la superficie a partir de febrero de 2023, continúa decreciendo (en mayo presenta una superficie menor a 1 ha) y se seca en diciembre de ese año (Fig. 7.A). La serie temporal no mostró tendencia ($\tau = 0.05$, $p > 0.05$, Fig. 7.B) y una estacionalidad definida con un patrón anual (Fig. 7.B). Además, la serie presentó no estacionariedad ($\tau = -3.11$, $p > 0.05$). En relación con el comportamiento intraanual, la superficie de agua máxima se observó en agosto y la mínima en marzo (Fig. 7.C).

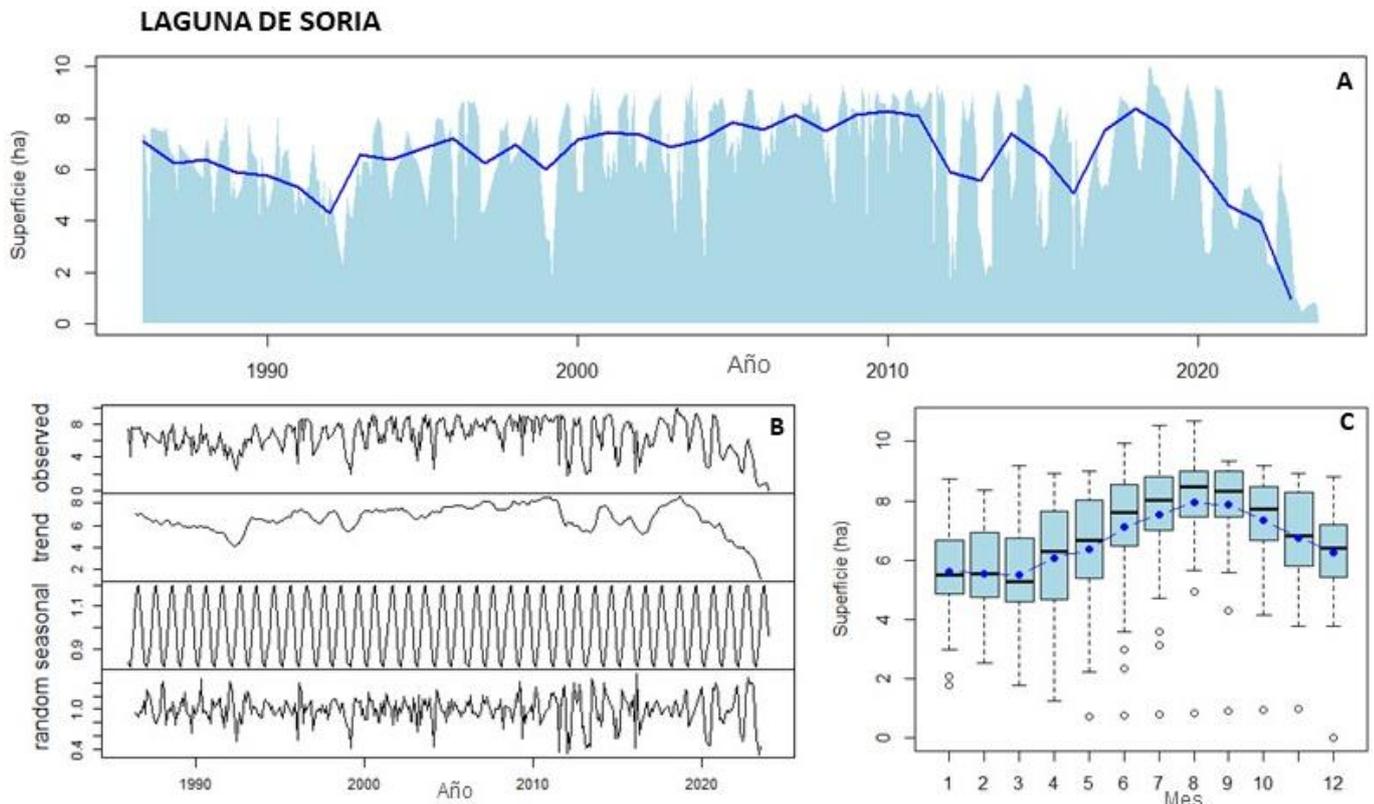


Figura 7. A) Serie temporal de la superficie de agua de Laguna de Soria para el período 1986-2023 (línea azul = media semestral); B) descomposición de la serie temporal; y C) superficie de agua mensual del humedal, mostrando la variabilidad (cajas) y la media (puntos y línea azul) para el período 1986-2023.

Los modelos ARIMA estacional que fueron seleccionados se constituyeron por los siguientes parámetros: Bombal ($p = 1, d = 1, q = 1$) ($P = 2, D = 0, Q = 0$) [$s = 12$]; Viborón ($p = 2, d = 1, q = 3$) ($P = 2, D = 0, Q = 0$) [$s = 12$]; La Paloma ($p = 3, d = 1, q = 2$) ($P = 1, D = 0, Q = 0$) [$s = 12$]; y Soria ($p = 1, d = 0, q = 0$) ($P = 2, D = 0, Q = 0$) [$s = 12$]. Los modelos no mostraron autocorrelación en los residuos ($p > 0.05$), indicando un buen ajuste. Las predicciones durante los próximos diez años indican que la superficie de agua de Laguna Bombal continuará disminuyendo presentando una media de 0.04 ± 0.01 ha; y en el caso de Laguna del Viborón se mantendría la sequía total del cuerpo de agua (Fig. 8). Estos resultados son consistentes con la tendencia decreciente observada en ambas lagunas. Por otra parte, las predicciones indican que La Paloma y Soria tendrán una superficie media de 3.15 ± 0.27 ha y 5.98 ± 0.85 ha respectivamente, durante los próximos diez años (Fig. 8). Estos resultados mostrarían estabilidad en cuanto a la presencia del recurso hídrico en ambas lagunas, aunque el mismo será inferior a la media observada durante el período 1986 - 2023.

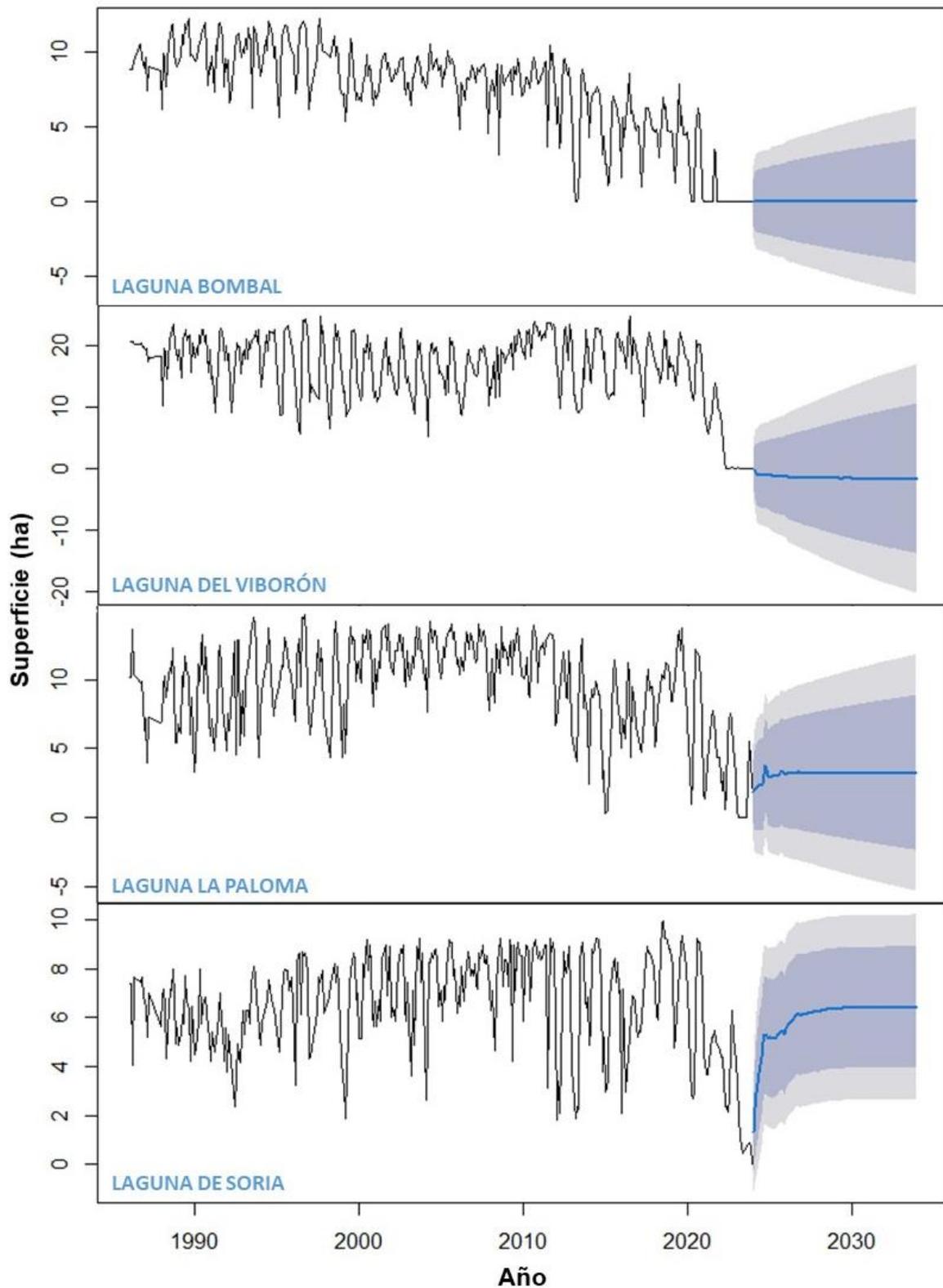


Figura 8. Series temporales de la superficie de agua (línea negra) de los humedales del Sistema Leyes Tulumaya y sus predicciones para el período 2024-2033 (línea azul) a partir de los modelos ARIMA. El área gris oscuro representa los IC 80% y el gris claro los IC 95%.

Cambios en el uso del suelo

Entre 1985 y 2022, todas las coberturas experimentaron cambios significativos en las cuatro lagunas (Fig. 9, Tabla 3), excepto en la vegetación leñosa dispersa y pastizal de la laguna Bombal, donde no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$, Tabla 3). El mayor cambio en el uso del suelo agropecuario se observó en Bombal (80 %), seguido por Laguna del Viborón (65 %), La Paloma (53 %), y Soria, que presentó la menor transformación (39 %).

A nivel general, las áreas sin vegetación disminuyeron progresivamente hacia 2022, siendo reemplazadas en su mayoría por áreas agropecuarias y vegetación leñosa abierta (Fig. 9). En particular, la superficie de las áreas agropecuarias aumentó significativamente para 2022, destacándose la transformación de plantaciones forestales en mosaicos agropecuarios (Fig. 9).

Con respecto a la vegetación natural, el patrón observado en las cuatro lagunas es la disminución hacia el año 2022 de vegetación no leñosa inundable (Tabla 3), la cual muestra que fue transformada principalmente en mosaico agropecuario (Fig. 9) y otros tipos de coberturas. Por otra parte, la cobertura de vegetación natural que predomina en las lagunas es vegetación leñosa abierta (> 24 %), exceptuando Bombal en donde predomina la vegetación no leñosa inundable (9 %). La vegetación leñosa abierta y dispersa disminuyó en Viborón y La Paloma y fue transformada principalmente en mosaico agropecuario (Fig. 9), mientras que la vegetación leñosa cerrada tuvo un leve incremento en Bombal, La Paloma, y Soria.

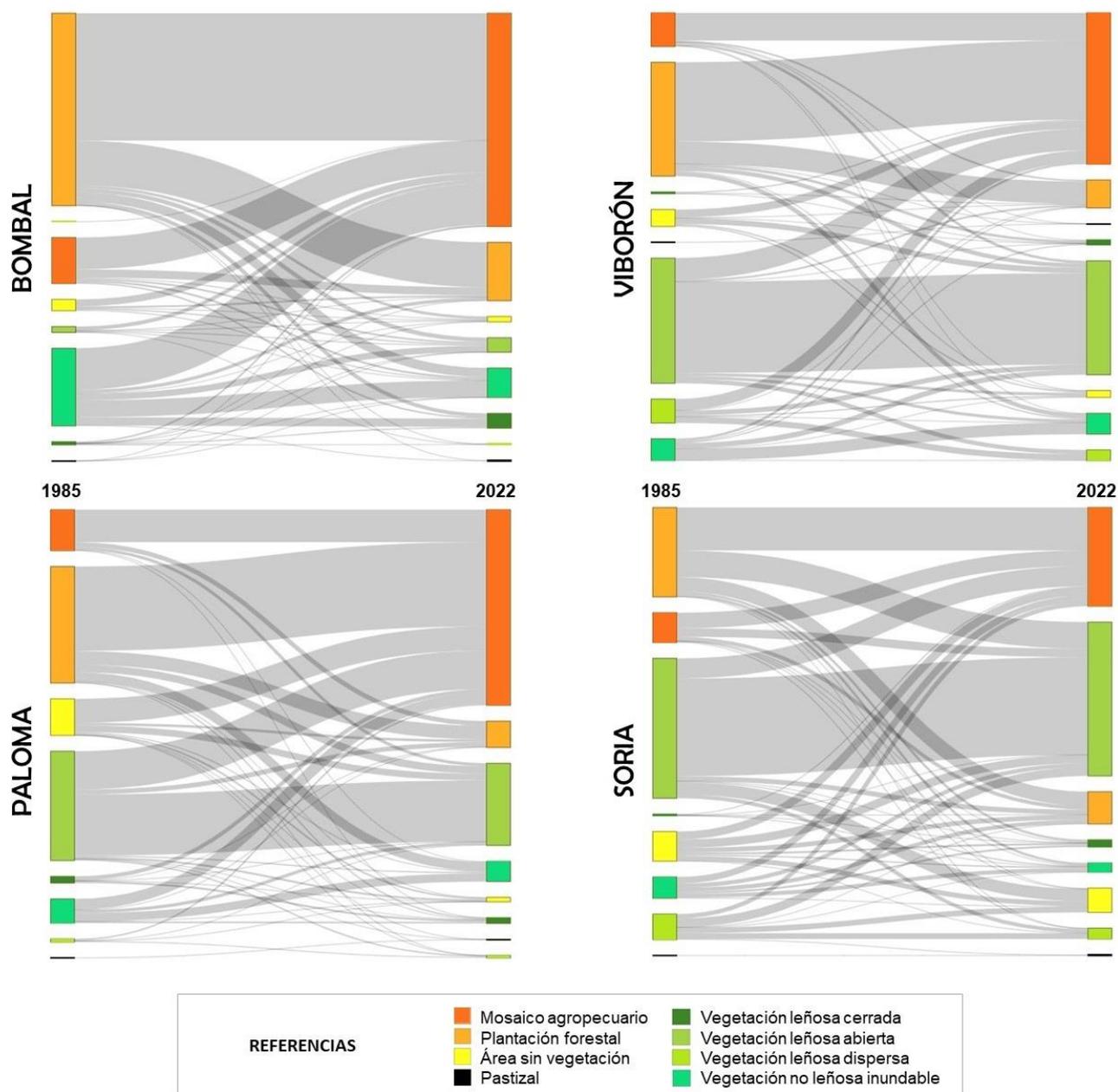


Figura 9. Diagramas de flujos de los cambios en el uso del suelo y tipos de coberturas entre los años 1985 y 2022 en los humedales del Sistema Leyes Tulumaya. Los nodos representan a los tipos de coberturas y las conexiones a los cambios de esa cobertura en el tiempo.

Tabla 3. Cambios en el uso del suelo y tipos de coberturas entre los años 1985 y 2022 en los humedales del Sistema Leyes Tulumaya. *indica diferencias significativas: *** = $p < 0.001$; ** = $p < 0.01$.

COBERTURAS	AÑO 1985		AÑO 2022		P	
	Sup (ha)	%	Sup (ha)	%		
BOMBAL	<i>Área agropecuaria</i>					
	Plantación forestal	883.31	57.08	267.36	17.22	***
	Mosaico agropecuario	211.19	13.65	979.51	63.08	***
	<i>Vegetación natural leñosa</i>					
	Cerrada	15.36	0.99	67.58	4.35	***
	Abierta	27.15	1.75	66.41	4.28	***
	Dispersa	1.24	0.08	3.03	0.19	n/s
	<i>Vegetación natural no leñosa</i>					
	Inundable	355.80	22.99	141.28	9.10	***
	Pastizal	1.32	0.09	2.79	0.18	n/s
	<i>Área sin vegetación</i>	51.98	3.36	24.90	1.60	***
	<i>Total</i>	1547.36	100.00	1552.86	100.00	
VIBORON	<i>Área agropecuaria</i>					
	Plantación forestal	646.83	34.53	145.86	7.79	***
	Mosaico agropecuario	227.71	12.16	1086.19	57.98	***
	<i>Vegetación natural leñosa</i>					
	Cerrada	36.93	1.97	32.66	1.74	***
	Abierta	606.95	32.40	456.35	24.36	***
	Dispersa	17.30	0.92	13.42	0.72	***
	<i>Vegetación natural no leñosa</i>					
	Inundable	134.53	7.18	112.50	6.01	***
	Pastizal	0.31	0.02	1.78	0.10	***
	<i>Área sin vegetación</i>	202.73	10.82	24.52	1.31	***
	<i>Total</i>	1873.29	100.00	1873.29	100.00	
PALOMA	<i>Área agropecuaria</i>					
	Plantación forestal	600.51	33.77	147.64	8.30	***
	Mosaico agropecuario	177.05	9.96	797.88	44.87	***
	<i>Vegetación natural leñosa</i>					
	Cerrada	9.85	0.55	27.23	1.53	***
	Abierta	660.25	37.13	601.52	33.83	***
	Dispersa	126.08	7.09	55.63	3.13	***
	<i>Vegetación natural no leñosa</i>					
	Inundable	114.90	6.46	110.48	6.21	***
	Pastizal	0.31	0.02	1.47	0.08	***
	<i>Área sin vegetación</i>	89.15	5.01	36.23	2.04	***
	<i>Total</i>	1778.09	100.00	1778.09	100.00	***
SORIA	<i>Área agropecuaria</i>					
	Plantación forestal	433.54	26.51	156.41	9.57	***
	Mosaico agropecuario	144.62	8.84	479.09	29.30	***
	<i>Vegetación natural leñosa</i>					
	Cerrada	8.07	0.49	35.07	2.14	***
	Abierta	677.86	41.46	745.44	45.59	***
	Dispersa	123.83	7.57	51.90	3.17	***
	<i>Vegetación natural no leñosa</i>					
	Inundable	103.27	6.32	45.46	2.78	***
	Pastizal	0.39	0.02	3.88	0.24	**
	<i>Área sin vegetación</i>	143.53	8.78	117.85	7.21	***
	<i>Total</i>	1635.10	100.00	1635.10	100.00	

Influencia humana

La influencia humana fue mayor en Laguna Bombal (media \pm DE = 28.87 ± 3.70 , $p < 0.001$) en comparación al resto de los humedales (Fig. 10), seguida por Laguna del Viborón (25.95 ± 4.03). Por otra parte, La Paloma (23.08 ± 4.30) y Soria (21.93 ± 5.48) no mostraron diferencias entre sí en cuanto a los valores del índice de huella humana ($p > 0.05$), pero resultaron con la menor influencia humana en comparación a los otros dos humedales ($p < 0.001$; Fig. 10).

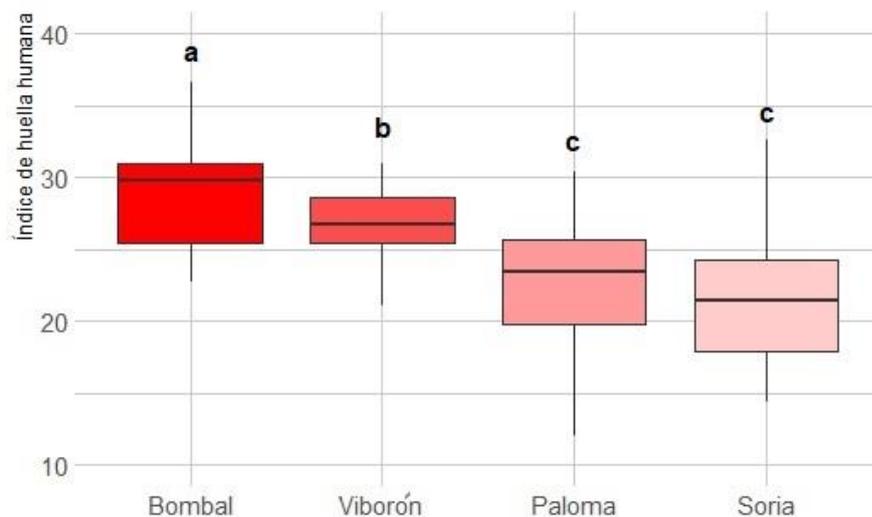


Figura 10. Influencia humana en humedales del Sistema Leyes Tulumaya. Letras diferentes indican diferencia significativa entre pares ($p < 0.01$).

El índice de huella humana mostró una relación inversa significativa ($\beta_0 = 44.68$, $p < 0.001$) a la distancia del área metropolitana de Mendoza ($\beta = -0.99$, $p < 0.001$), lo que indica una disminución del índice a medida que aumenta la distancia (Fig. 11). Para el parámetro de escala (σ) el intercepto resultó significativo ($\beta_0 = -1.70$, $p < 0.001$) y la distancia mostró un efecto positivo ($\beta = 0.18$, $p < 0.001$), sugiriendo que la variabilidad del índice aumenta en sitios más alejados del área urbana. Para el parámetro de asimetría (v) el intercepto no fue significativo ($\beta_0 = 1.66$, $p = 0.083$), lo que sugiere que la distribución del índice no presenta un sesgo marcado hacia ninguno de los extremos. En el parámetro de curtosis (τ) el intercepto fue significativo ($\beta_0 = 1.73$, $p < 0.001$), lo que evidencia una distribución con colas más pesadas respecto de la normalidad. Esta característica justifica la pertinencia del uso de la distribución SEP2, en lugar de distribuciones más restrictivas como la normal o la gamma. El uso de la distancia al área metropolitana en el modelo responde a su valor como proxy

espacial del gradiente de urbanización. Si bien puede existir cierto solapamiento conceptual con el índice de huella humana, la distancia representa un factor espacial que permite explorar patrones ecológicos en el territorio de forma robusta.

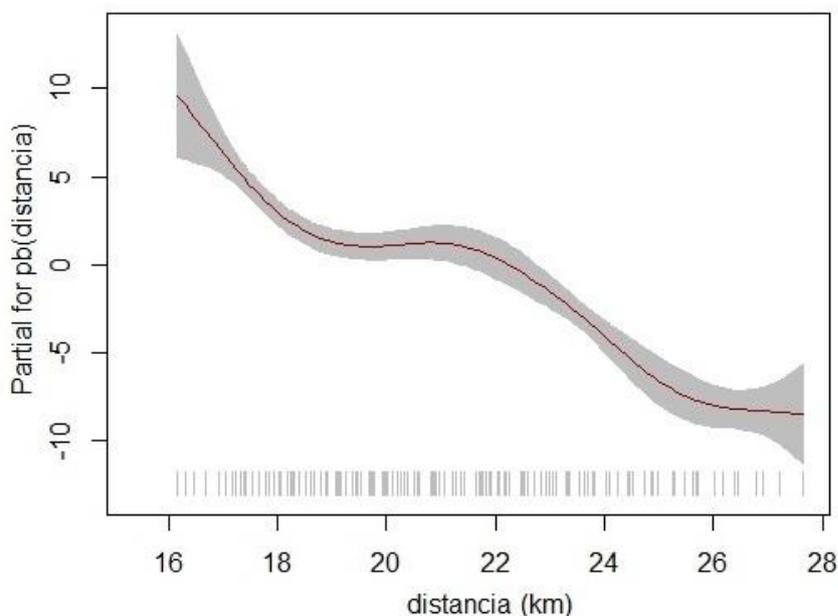


Figura 11. Relación entre el índice de huella humana y la distancia al área metropolitana de Mendoza en humedales del Sistema Leyes Tulumaya. Se muestra el efecto parcial de la variable distancia en el modelo, estimado mediante un suavizador P-spline (*pb*) utilizado en GAMLSS. La línea continua corresponde a las tendencias modeladas y el área sombreada a los intervalos de confianza del 95 %.

DISCUSIÓN

Los humedales del Sistema Leyes Tulumaya mostraron un continuo proceso de degradación ambiental desde las últimas cuatro décadas. La degradación de los humedales es un proceso complejo impulsado por múltiples factores (King et al. 2021, Fluet-Chouinard et al. 2023), entre los cuales destacan la disminución del recurso hídrico, los cambios en el uso del suelo y la influencia humana. La sobreexplotación del agua subterránea y superficial para riego agrícola ha llevado a una disminución significativa en los niveles de agua en muchas regiones de tierras secas (Gomez et al. 2022), afectando la capacidad de los humedales para

mantener su dinámica hidrológica natural (Wehncke & Mariano 2021, Fluet-Chouinard et al. 2023). Además, la urbanización y la conversión de humedales en áreas agrícolas han reducido la extensión de estos ecosistemas, lo que ha llevado a la pérdida de biodiversidad y la degradación de los servicios ecosistémicos que proporcionan a la humanidad (Mitsch & Gosselink 2000, Davidson 2014). La combinación de estos factores ha acelerado la degradación de los humedales en el mundo, en sinergia con el cambio climático que altera los patrones de precipitación y evapotranspiración, intensificando la presión sobre los mismos (Rivera et al. 2021).

El patrón de estacionalidad intraanual de los cuatro humedales, podría responder al uso intensivo del agua para la agricultura que transcurre a partir de la primavera, cuando comienza la temporada de riego de los cultivos estivales y la vid (Duek & Comellas 2015). Esto podría deberse a que los humedales se localizan en una extensa matriz agrícola del oasis norte de Mendoza (Akil 2020), donde se encuentra la mayor producción hortícola (Van Den Bosch & Bres 2021). Las fluctuaciones de los humedales de la ecorregión del Monte central, depende en gran medida de la recarga de los acuíferos, las precipitaciones estacionales y el deshielo de los Andes Centrales de Argentina (Sosa & Vallvé 1999). En respuesta a estos factores, los humedales de esta región, como el Sistema del río Desaguadero y el Sistema de Lagunas de Guanacache, muestran una fluctuación de mayor caudal hídrico y superficie entre los meses de octubre y marzo, y durante el invierno tienden a disminuir (Álvarez et al. 2024). Estos patrones han estado sujeto a los fenómenos climáticos de los años Niño y Niña, y en última instancia a la creación de embalses que alteraron la dinámica hidrológica de los humedales como el dique Potrerillos en la cuenca del río Mendoza (Bastidas Mejías 2022, Álvarez et al. 2024). Por otro lado, Rubio (2018) señala que los ciclos de expansión del SLT son coincidentes con la temporada estival y su retracción se produce en los meses de invierno y primavera. Sin embargo, el patrón encontrado en este estudio en el SLT difiere, ya que las superficies máximas de agua se registraron entre julio y septiembre, que es cuándo el nivel freático estaría más alto (Jobbágy & Noretto 2015). A partir de octubre, la superficie disminuye drásticamente hasta el verano, y este comportamiento hídrico, podría responder a la expansión de tierras agrícolas y el uso intensivo de sistemas de riego artificial que puede causar una disminución en los niveles de agua subterránea, afectando negativamente la extensión y permanencia de agua superficial de los humedales (Fernández et al. 2013). En Mendoza existen cerca de 20.000 pozos de agua, de los cuales el 75 % se encuentra en el oasis norte y la mayoría se destina a riego agrícola (Departamento General de Irrigación

2016). La extracción excesiva de agua subterránea para riego a partir de perforaciones reduce los niveles freáticos, lo que a su vez disminuye la cantidad de agua disponible para mantener los humedales (Wehncke & Mariano 2021).

Tres de los cuatro humedales experimentaron una tendencia negativa en su superficie, e incluso los cuatro llegaron a secarse en su totalidad por primera vez durante la última década, un fenómeno global que se ha profundizado en el último siglo (Davidson 2014). Estos eventos de sequía hidrológica, además causan un secado severo e irreversible de los suelos de los humedales. La penetración del oxígeno conduce a un aumento en la oxidación de la materia orgánica y una reducción de elementos inorgánicos, como resultado, los impactos incluyen la acidificación del suelo, la movilización de metales, la pérdida de materia orgánica, y un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano (Stirling et al. 2020). Bombal y Viborón resultaron como los humedales con sequía más prolongada y, además, las coberturas contiguas son en su mayoría agropecuarias, lo que su secamiento podría conllevar a que dichos impactos no solo se vean reflejados en el ecosistema natural sino también en el agrícola (Corrales Chávez 2025). En algunas áreas, los cambios en los suelos pueden durar más de 10 años, afectando la calidad del agua una vez que los humedales vuelven a llenarse (Stirling et al. 2020). El secamiento parcial o total de los humedales, también incide profundamente en la pérdida de su capacidad para almacenar carbono y mitigar el cambio climático debido a estas alteraciones (Corrales Chávez 2025). Además, estas alteraciones, pueden generar efectos en cascada asociados a extinciones locales de especies y salinización de los suelos, entre otros (Jolly et al. 2008, Rubio 2018).

Para la próxima década, se espera una disminución del recurso hídrico en el SLT y una sequía hidrológica extrema en Bombal y Viborón, de forma análoga a lo que sucede en distintas regiones agrícolas del mundo y los humedales de esas áreas (Kingsford et al. 2016, Corrales Chaves 2025). El gradiente altitudinal decreciente entre los humedales del SLT (i.e. Bombal a Soria; Rubio 2018) y la sobreexplotación del agua subterránea (Gomez et al. 2022), podría explicar el patrón de secamiento de las lagunas. Estos efectos se ven profundizados en periodos de sequía, donde la demanda de agua para riego aumenta mientras que la recarga de acuíferos se reduce (Gomez et al. 2022), intensificando la presión sobre los humedales y llevando, en algunos casos, a la desaparición temporal o permanente de los cuerpos de agua, como sucedió con Bombal. Esto es debido a que, tanto las aguas subterráneas como las superficiales, son dos componentes interconectados de un mismo recurso, es decir, los

impactos en un componente afectan la cantidad o la calidad del otro (Abdelhalim et al. 2019). Además, en la última década, los caudales hídricos de los Andes Centrales de Argentina, mostraron tendencias negativas que culminaron en severas sequías (Maziokas et al. 2019), lo cual podría profundizar los efectos en la dinámica observada de los humedales del SLT. Por otra parte, este estudio no consideró variables climáticas las cuales podrían influir sobre las tendencias encontradas en los humedales a futuro (Rivera et al. 2021). Sin embargo, hasta el momento no se encontró ninguna relación entre variables climáticas e hidrológicas, sugiriendo que la desecación de los humedales podría vincularse principalmente a la intervención humana (Ríos et al. 2025).

La influencia humana ha sido un factor determinante en la degradación de los humedales a nivel global (Kingsford et al. 2016, Corrales Chaves 2025), y los resultados indicaron una estrecha relación entre el área metropolitana de Mendoza y su impacto en el SLT. Actividades como la agricultura intensiva, la urbanización, la construcción de infraestructuras y la explotación de recursos naturales han llevado a la pérdida de grandes extensiones de los humedales (Finlayson et al. 1999, Zedler & Kercher 2005, Kingsford et al. 2016). Si bien el SLT aún conserva una cierta distancia a los núcleos urbanos densamente poblados, se puede observar una expansión urbana acelerada del Área Metropolitana de Mendoza entre 2003 y 2020 debido al bajo valor del suelo cultivado, la cercanía a la capital y la pérdida de rentabilidad agrícola (Esteves 2023). En relación con esto, durante el año 2020 se inició un proyecto ilegal para el desarrollo inmobiliario de Laguna de Soria, el cual fue pausado por presiones de ONG ambientalistas y posteriormente instituciones del estado (El Despertador 2020). Entre las acciones que se llevaron a cabo, se produjo el desmonte de áreas con vegetación nativa y nivelación del terreno mediante maquinaria para tal fin (Babel 2020). Esto no es un caso aislado del avance de la urbanización sobre los humedales, sino que es un fenómeno mundial que ha sido intensificado durante el último siglo, causando el drenaje y la degradación de estos (Mirábile et al. 2005, Corrales Chávez 2025). Además, la creciente presión humana mediante actividades como la caza furtiva y la pesca indiscriminada ha reducido las poblaciones de especies clave de los humedales, afectando el equilibrio de las comunidades biológicas (Kingsford et al. 2016). La contaminación, tanto de origen agrícola como industrial, introduce en estos ambientes nutrientes en exceso, metales pesados y residuos químicos, generando procesos de eutrofización que alteran su funcionamiento ecológico (Zuluaga et al. 2013). Sin embargo, el STL podría jugar un rol importante en la

purificación de las aguas provenientes del riego agrícola y los desagües industriales que producen el área metropolitana de Mendoza (Santos 2011).

Tres humedales poseen más del 50 % de su matriz transformada en área agropecuaria, lo que representa no solo una pérdida del hábitat natural para las especies nativas, sino también impactos negativos en la calidad del hábitat (Kingsford et al. 2016). Los cambios en el uso del suelo afectaron las distintas coberturas de vegetación que representan tipos de hábitats para la biodiversidad. La cobertura de vegetación leñosa abierta y dispersa disminuyó en las cuatro lagunas, y este tipo de hábitat es óptimo para mamíferos de tierras secas que han sido detectados en el SLT como el Zorro gris, distintas especies de roedores y armadillos, y el Yaguarundí el cual tiene escasos registros en la provincia de Mendoza (Martínez et al. 2015, BIOTA 2020). Por otra parte, se han registrado 11 especies de herpetofauna en el sistema (dos de ellas anfibios), las cuales dependen de hábitats de tierras secas y en el caso de los anfibios de la presencia de agua (BIOTA 2020). En cuanto a la ictiofauna, se han registrado diez especies (Santos 2011, BIOTA 2020) de las cuáles tres fueron nuevos registros para la provincia (*Pimelodella laticeps*, *Australoheros facetus* y *Corydoras paleatus*). La disminución de los tipos de coberturas naturales representa una pérdida de hábitat para las especies, más aún en aquellas estrictamente acuáticas como los peces y anfibios (Kingsford et al. 2016), grupos que probablemente resultaron más afectados durante los periodos de sequías hidrológicas detectados en este estudio.

Las aves son el grupo de vertebrados más diverso del SLT y se puede llegar a encontrar cerca de 220 especies en este ecosistema (BIOTA 2020). Existen registros en el SLT de especies de aves muy raras en Mendoza (Contreras & Fernández 1980, Martínez & Calí 2013) y otras con escasos registros (BIOTA 2020). Por ejemplo, la Lechuza bataraz chaqueña (*Strix chacoensis*), tiene una distribución restringida al bosque del noreste de la provincia y se encontró un registro de su presencia en el SLT (Contreras & Fernández 1980), aunque la fragmentación y pérdida de cobertura de vegetación leñosa podría haber afectado la permanencia de esta especie en el siglo pasado (Rojas et al. 2009). Prieto y Chiavazza (2005) sostienen que existieron bosques en galerías de algarrobos en los márgenes del arroyo Tulumaya, desde la antigua Ciénaga del Bermejo hasta las Lagunas de Guanacache, hoy extintos y reemplazados por la especie invasora Tamarindo (*Tamarix gallica*). La vegetación no leñosa inundable también mostró cambios negativos en su extensión en las cuatro lagunas, y esto podría afectar a las aves especialistas de ese hábitat ya que dependen de ciertos

recursos vegetales como los juncos, carrizos y cortaderas para forrajear y reproducirse (e.g., *Tachuris rubrigastra*, *Phleocryptes melanops* y *Cistothorus platensis*). También en la actualidad, se pueden encontrar cerca de 12 especies de aves de interés para la conservación, como el Doradito pardo (*Pseudocolopteryx dinelliana*), el Flamenco austral (*Phoenicopterus chilensis*), el Lechuzón de campo (*Asio flammeus*) y la Monjita salinera (*Neoxolmis salinarum*), entre otras (MAyDS & AA 2017, BIOTA 2020, Tallei et al. 2021). Estas especies tienen poblaciones reducidas o en disminución, y serían directamente afectadas con la pérdida del humedal y sus áreas contiguas. La información registrada durante los últimos años sugiere que el SLT es un lugar de alimentación, nidificación y/o de paso para una elevada diversidad de especies de aves acuáticas (Santos 2011, BIOTA 2020), siendo destacado desde hace décadas por autores como área de importancia para la conservación de las aves (Contreras & Fernández 1980, Chebez 2005).

Es fundamental que futuros estudios analicen la relación entre el uso del agua para la agricultura, tanto subterránea como superficial, y los efectos en la dinámica de los humedales del SLT. También sería relevante monitorear la calidad del agua, evaluar el impacto de la explotación de agua de pozo en los acuíferos, así como las posibles consecuencias del secamiento de los humedales, tales como la salinización de los suelos y su efecto en los cultivos y la pérdida de biodiversidad.

CONCLUSIÓN

Los humedales del Sistema Leyes Tulumaya se encuentran bajo un pronunciado proceso de degradación ambiental debido a la disminución del recurso hídrico, la transformación de la vegetación natural por áreas agrícolas y el incremento de la influencia humana asociada al área metropolitana de Mendoza. Estos impactos se observan más acentuados en Laguna Bombal y de forma decreciente hacia Soria. Asimismo, los pronósticos indican una sequía hidrológica para los próximos diez años en Bombal y Viborón, y una disminución de la superficie de agua por debajo del promedio observado para La Paloma y Soria, aunque estas últimas lagunas tendrían una superficie de agua estable a futuro. No obstante, estos ecosistemas siguen siendo refugio para cientos de especies de plantas y animales asociados a los humedales y sus áreas contiguas de tierras secas.

Este es el primer trabajo que reconstruye la historia hídrica de cuatro lagunas del SLT durante casi cinco décadas (considerando el periodo de predicción). Debido a que el desierto del Monte central de Argentina ha perdido la mayoría de la superficie de los humedales, las lagunas del SLT deberían ser prioridad de conservación por las instituciones gubernamentales. Estos humedales relictuales aún sostienen una alta diversidad de especies en relación con la extensión de superficie considerada. Además de funcionar como refugios de vida silvestre, actúan como corredores biológicos hacia otros humedales y ecosistemas terrestres. La manera de asegurar la conservación de los humedales del SLT, es implementando esquemas de manejo integrado con un enfoque basado en distintas escalas espaciales (microhábitats, hábitats, y paisaje) y actores, que permita la gestión intergubernamental de los municipios y provincia junto a los pobladores, para asegurar tanto restauración del ecosistema como la sostenibilidad del recurso hídrico. La información generada en este estudio es importante para promover medidas de gestión y manejo que favorezcan la conservación de los humedales y sus contribuciones a las personas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelhalim, A., Sefelnasr, A., & Ismail, E. (2019). Response of the interaction between surface water and groundwater to climate change and proposed megastructure. *Journal of African Earth Sciences* 162, 103723.
- Abrahan, V. A. (2019). Fluctuación espacio-temporal del complejo de Lagunas de Guanacache, Divisadero y Bebedero durante 1987-2018. *Boletín de Estudios Geográficos* 112, 161-180.
- Akil, Nur Noemí. (2020). *Zonificación del cinturón verde de Mendoza en base a las funciones ecosistémicas*. Tesina de Grado. Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias.
- Álvarez, L. M., Rivera, J. A., & Archina, A. C. (2024). Efectos de la variabilidad climática y las políticas hídricas en el Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache (San Juan, Mendoza y San Luis, Argentina): cuando la gestión finaliza en los diques. *Cuadernos Geográficos* 63(1), 142-157.
- Babel (2020). https://bbl.com.ar/nota_12782_peligro-ambiental-barrios-privados-avanzan-sobre-las-lagunas-del-norte-provincial- [Consultado el 28 de enero de 2025]
- Baigún, C. R., Puig, A., Minotti, P. G., Kandus, Quintana, R., Vicari R., Bo, R., Oldani, N. O., & Nestler J. A. (2008). Resource use in the Parana River Delta (Argentina): moving away from an ecohydrological approach?. *Ecohydrology & Hydrobiology* 8, 245-262.
- Bastidas Mejía, L. B. (2022). Caudal ambiental en el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina.
- Benzaquen L., Blanco, D. E., Bo, R., Kandus, P., Lingua, G., Minotti, P., & Quintana, R. (2017). Regiones de Humedales de la Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín y Universidad de Buenos Aires.
- Bezabih, B., & Mosissa, T. (2017). Review on distribution, importance, threats and consequences of wetland degradation in Ethiopia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering* 9, 64-71.

- BIOTA (Asociación para la Conservación de la Diversidad Biológica Argentina), (2020). Biodiversidad presente en el Sistema de humedales de los arroyos Leyes y Tulumaya (Mendoza, Argentina). *Informe de la Asociación Biota*, edición electrónica. Mendoza. 28 pp.
- Bolpagni, R., and Piotti, A. (2016). The importance of being natural in a human-altered riverscape: role of wetland type in supporting habitat heterogeneity and the functional diversity of vegetation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 26, 1168-1183.
- Brinson, M. M., & Rheinhardt, R. D. (2019). Wetland functions and relations to societal values. In *Southern Forested Wetlands* (29-48 pp.). Routledge.
- Callaghan, C. T., Poore, A. G., Major, R. E., Rowley, J. J., & Cornwell, W. K. (2019). Optimizing future biodiversity sampling by citizen scientists. *Proceedings of the Royal Society B* 286(1912), 20191487.
- Cardinale, B. J., Srivastava, D. S., Duffy, J. E., Wright, J. P., Downing, A. L., Sankaran, M., & Jouseau, C. (2006). Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature* 443(7114), 989-992.
- Carreño, L., Frank, F. C., & Viglizzo, E. F. (2012). Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154, 68-77.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., & Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(30), E6089-E6096.
- Chebez, J.C. (2005). Guía de las Reservas Naturales de la Argentina: Zona Centro. Editorial Albatros, Buenos Aires.
- Contreras, J. R. & A. Fernández (1980). Ecología de la avifauna de la laguna el Viborón, departamento Maipú, provincia de Mendoza. *Revista del Museo de Historia Natural de San Rafael* (1): 3-14.
- Corrales Chaves, L. (2025). ¿Estamos perdiendo los humedales más rápido de lo que podemos restaurarlos?. *Revista de Ciencias Ambientales* 59(1).

- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I. et al. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change* 26, 152-158.
- Cuba, N. (2015). Research note: Sankey diagrams for visualizing land cover dynamics. *Landscape and Urban Planning*, 139, 163-167.
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research* 65(10), 934-941.
- De Chazal, J., & Rounsevell, M. D. (2009). Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: a review. *Global Environmental Change* 19(2), 306-315.
- Departamento General de Irrigación (2016). Aquabook, www.aquabook.irrigacion.gov.ar/2_0 Mendoza, Argentina [Consultado el 10 de febrero de 2025]
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., et al. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science* 359, 270-272.
- Duek, A. E., & Comellas, E. A. (2015). Consumo de agua en la cadena vitivinícola de Mendoza, Argentina. Escenarios de uso sostenible. *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad* 2(6), 110-130.
- El Despertador (2020). <https://despertadorlavalle.com.ar/2020/07/agua-norte-un-proyecto-que-no-resiste-un-informe/> [Consultado el 28 de enero de 2025]
- El Despertador (2022). <https://despertadorlavalle.com.ar/2022/12/otra-vez-el-sistema-leyes-tulumaya-en-peligro-por-empresarios-inmobiliarios/> [Consultado el 28 de enero de 2025]
- Esteves, M. J. (2023). El paisaje de humedales de zonas periurbanas en la planificación territorial: El caso del Sistema arroyo Leyes-Tulumaya (Mendoza-Argentina). *Espiral* 4(8): 031-052.

- Fernández, B. G., Gámir, V. N., & Sánchez, L. A. (2013). A synthetic model of surface inundation relationships and water source impacts of the wetland Las Tablas de Daimiel National Park, Central Spain. *Ecological engineering*, 61, 407-418.
- Finlayson, C. M., Davidson, N. C., Spiers, A. G., & Stevenson, N. J. (1999). Global wetland inventory—current status and future priorities. *Marine and Freshwater Research* 50(8), 717-727.
- Fluet-Chouinard, E., Stocker, B. D., Zhang, Z., Malhotra, A., Melton, J. R., Poulter, B., et al. (2023). Extensive global wetland loss over the past three centuries. *Nature* 614, 281-286.
- Giménez, R., Mercau, J. L., Bert, F. E., Kuppel, S., Baldi, G., Houspanossian, J., Magliano, P., & Jobbágy, E. G. (2020). Hydrological and productive impacts of recent land-use and land-cover changes in the semiarid Chaco: Understanding novel water excess in water scarce farmlands. *Ecohydrology* 13(8), e2243.
- Gobierno de Mendoza (2020). Ambiente declara de interés al humedal Sintema Leyes Tulumaya <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/ambiente-declara-de-interes-al-humedal-sistema-leyes-tulumaya/> [Consultado el 10 de febrero de 2025]
- Gomez, M. L., Hoke, G., D'Ambrosio, S., Moreiras, S., & Castro, A. (2022). Hydrogeology of Northern Mendoza (Argentina), from the Andes to the eastern plains, in the context of climate change. *Hydrogeology Journal* 30(3), 725-750.
- González-Loyarte, M. M., Menenti, M. & Diblasi, A. M. (2009). Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo* 1, 105-122.
- Guerra Rodríguez, J. (2022). Fundamentos y variantes de los modelos ARIMA para el análisis de series temporales: Aplicación a la estadística universitaria. Tesis de Grado. Universidad de La Laguna.
- Hagen, M., Kissling, W. D., Rasmussen, C., De Aguiar, M. A., Brown, L. E., Carstensen, D. W. et al. (2012). Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world. *Advances In Ecological Research* 46(1), 89-210.

- Haines, A. M., Leu, M., Svancara, L. K., Scott, J. M., & Reese, K. P. (2008). A theoretical approach to using human footprint data to assess landscape level conservation efforts. *Conservation Letters* 1(4), 165-172.
- Hannah, L., Carr, J. L., & Lankerani, A. (1995). Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global data set. *Biodiversity & Conservation* 4(2), 128-155.
- Hudson I.L., Kim, S. W., & Keatley, M. R. (2010). Climatic Influences on the Flowering Phenology of Four Eucalypts: A GAMLSS Approach. In: Hudson I. & M. Keatley (Eds) *Phenological Research*. Springer, Dordrecht, pp 209-228.
- IPBES (2019). Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Brondizio, E.S., Settele, J., Diaz, S. & Ngo, H.T. (Eds). IPBES secretariat, Bonn, Germany. ISBN: 978-3-947851-20-1
- Jobbágy, E. G., & Nosoetto, M. D. (2015). Las napas freáticas superficiales como agente de degradación de suelos. *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina, Buenos Aires, Editorial FECIC* 1, 287-300.
- Jobbágy, E. G., Baldi, G., & Nosoetto, M. D. (2011). Tree plantation in South America and the water cycle: impacts and emergent opportunities. *Forests in development: a vital balance* 53-63.
- Johnson, D. L., Ambrose, S. H., Bassett, T. J., Bowen, M. L., Crummey, D. E., Isaacson, J. S., et al. (1997). Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality* 26(3), 581–589.
- Jolly, I. D., McEwan, K. L., & Holland, K. L. (2008). A review of groundwater–surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. *Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology* 1(1), 43-58.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, S. A., Mitsch, W. J., & Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world’s wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences* 75(1), 151-167.

- King, S. L., Laubhan, M. K., Tashjian, P., Vradenburg, J., & Fredrickson, L. (2021). Wetland conservation: challenges related to water law and farm policy. *Wetlands* 41(5), 54.
- Kingsford, R. T., Basset, A., & Jackson, L. (2016). Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 26(5), 892-916.
- Klijn (1994). Ecosystem classification for environmental management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Los Andes (2022). <https://www.losandes.com.ar/sociedad/laguna-del-viboron-un-humedal-clave-que-esta-al-borde-de-la-sequia-absoluta-y-la-desaparicion> [Consultado el 30 de enero de 2025]
- Martínez, F., & Calí, R. (2013). Primer registro para la avifauna mendocina del gaviotín Golondrina (*Sterna hirundo*) y revalorización de los últimos relictos del gran humedal de Huanacache. *Nótulas faunísticas* 140, 1-5.
- Martínez, F., Moreno P., Montani S. & J. Veiga (2015). Nuevo registro del Gato moro o Yaguarundí (*Herpailurus yagouaroundi*) en la provincia de Mendoza, Argentina. *Nótulas faunísticas Segunda Serie* 188, 1-4.
- Martinuzzi, S., Rivera, L., Politi, N., Bateman, B. L., De Los Llanos, E. R., Lizarraga, L. et al. (2017). Enhancing biodiversity conservation in existing land-use plans with widely available datasets and spatial analysis techniques. *Environmental Conservation* 45(3), 252-260.
- Masiokas, M. H., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B. H., Toum, E., Christie, D. A., Le Quesne, C., & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Scientific Reports* 9, 17879.
- MAyDS & AA [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable y Aves Argentina]. (2017). Categorización de las Aves de la Argentina (2015). Informe del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación y de Aves Argentinas, edición electrónica. C. A. Buenos Aires.
- Minckley, T. A., Turner, D. S., & Weinstein, S. R. (2013). The relevance of wetland conservation in arid regions: a re-examination of vanishing communities in the American Southwest. *Journal of Arid Environments* 88, 213-221.

- Mirábile, C., Zuluaga, J., Fusari, M., Burgos, V., & Nuñez, M. (2005). Estudio de la variación temporal del área palustre del río Mendoza a partir de datos históricos, cartográficos y satelitales. *Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Andino*.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Mu, H., Li, X., Wen, Y., Huang, J., Du, P., Su, W., et al. (2022). A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data* 9, 176.
- Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A. et al. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* 520(7545), 45-50.
- Norte, F. (2000). Mapa climático de Mendoza. In: Abraham, M.E., and Rodríguez-Martínez, F. (Eds.). Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja. Pp. 25-27. Vol.I-II. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, Universidad de Granada. Mendoza, Argentina.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M. (2005). Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11(7), 1101-1117.
- Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I. et al. (2018). Vegetation units of Argentina. *Ecología austral* 28(01).
- Pacheco, P. (2012). Actor and frontier types in the Brazilian Amazon: Assessing interactions and outcomes associated with frontier expansion. *Geoforum* 43(4), 864-874.
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S., (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418-422.
- Powers, R. P., & Jetz, W. (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change* 9(1), 323-329.
- Prieto, M., & Rojas, F. (2012). Documentary evidence for changing climatic and anthropogenic influences on the Bermejo Wetland in Mendoza, Argentina, during the 16th-20th century. *Climate of the Past Discussions* 7, 3775-3794.

- Prieto, M., Abraham, E., & Dussel, P. (2008). Transformaciones de un ecosistema palustre. La Gran Ciénaga del Bermejo, Mendoza, SIGLOS XVIII Y XIX. *Multequina* 17, 147-164.
- Prieto, Ma. del R., & Chiavazza, H. (2005). Aportes de la historia ambiental y la arqueología para el análisis del patrón de asentamiento huarpe en el oasis norte de Mendoza”. *Anales de Arqueología y Etnología* 59-60, 163-195.
- Proyecto MapBiomias Argentina, (2024). Colección [versión 1] de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Argentina, consultada el 24 de julio: [<https://argentina.mapbiomas.org/>]
- QGIS Development Team, (2021). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Available at <http://qgis.osgeo.org>.
- R Development Core Team, (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org>
- Rayfield, B., Moilanen, A., & Fortin, M. J. (2009). Incorporating consumer–resource spatial interactions in reserve design. *Ecological Modelling* 220(5), 725-733.
- Rigby, R. A., & Stasinopoulos, D. M. (2005). Generalized additive models for location, scale and shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 54(3), 507-554.
- Rios, L. D., Moreiras, S. M., De Porras, M. E., & Gomez, M. L. (2025). Driving factors on wetland water area changes in the arid region of central-western Argentina (32° S) during the last two decades. *Andean Geology* 52(1), 101-116.
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water* 3, 640544.
- Rojas, J. F., Prieto, M. D. R., Álvarez, J., & Cesca, E. (2009). Procesos socioeconómicos y territoriales en el uso de los recursos forestales en Mendoza desde fines de siglo XIX hasta mediados del XX. *Revista Proyección* 7, 1-33.
- Rubio, C. (2018). Servicios ecosistémicos de sistemas de humedales en tierra secas. Su abordaje para el ordenamiento territorial. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

- Sanderson, E. W., Jaiteh, M., Levy, M. A., Redford, K. H., Wannebo, A. V., & Woolmer, G. (2002). The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience* 52(10), 891-904.
- Santos, F. (2011). Caracterización Ambiental de los Arroyos Leyes-Tulumaya, Mendoza, Argentina. Tesis de Grado. Universidad Champagnat, Mendoza, Argentina.
- Serran, J. N., Creed, I. F., Ameli, A. A., & Aldred, D. A. (2017). Estimating rates of wetland loss using power-law functions. *Wetlands* 38, 109-120.
- Sica, Y. V., Quintana, R. D., Radeloff, V. C., and Gavier-Pizarro, G. I. (2016). Wetland loss due to land use change in the Lower Paraná River Delta, Argentina. *Science of the Total Environment* 568, 967-978.
- Sosa, H., & Vallvé, S. (1999). Lagunas de Guanacache (Centro-Oeste de Argentina). Procedimiento de inclusión a la Convención sobre los Humedales (RAMSAR, 71). *Multequina* (8), 71-85.
- Stasinopoulos, M. D., & Rigby, R. A. (2007). Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software* 23(7), 1-46.
- Stasinopoulos, M., Rigby, R., Heller, G., Voudouris, V., & Bastiani, F. (2017). Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in R. Chapman and Hall/CRC.
- Stirling, E., Fitzpatrick, R. W., & Mosley, L. M. (2020). Drought effects on wet soils in inland wetlands and peatlands. *Earth-Science Reviews* 210, 103387.
- Tallei, E., Benavidez, A., Schaaf, A., Isola, P., & Zanotti, M. (2021). Seasonal dynamics of waterbirds from a relict wetland in the central Monte Desert, Argentina. *Neotropical Biology and Conservation* 16(2), 333-349.
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., & Munt, D. D. (2017). Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador: Influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas. *Applied Geography* 78, 22-32.
- Van Asselen, S., Verburg, P. H., Vermaat, J. E., & Janse, J. H. (2013). Drivers of wetland conversion: a global meta-analysis. *PloS one* 8, e81292.

- Van Den Bosch, M. E., & Bres, E. (2021). Dinámica de la estructura agraria de los distritos agrícolas del Oasis Norte de Mendoza. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA.
- Venier, L. A., Thompson, I. D., Fleming, R., Malcolm, J., Aubin, I., Trofymow, J. A. et al. (2014). Effects of natural resource development on the terrestrial biodiversity of Canadian boreal forests. *Environmental Reviews* 22(4), 457-490.
- Venter, O., Sanderson, E. W., Magrath, A., Allan, J. R., Beher, J., Jones, K. R. et al. (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications* 7, 12558.
- Watson, J. E., Shanahan, D. F., Di Marco, M., Allan, J., Laurance, W. F., Sanderson, E. W. et al. (2016). Catastrophic declines in wilderness areas undermine global environment targets. *Current Biology* 26(21), 2929-2934.
- Wehncke, E. V., & Mariano, N. A. (2021). Groundwater and Its Role in Maintaining the Ecological Functions of Ecosystems—A Review. *Intensified Land and Water Use: A Holistic Perspective of Local to Regional Integration* 55-86.
- Wu, J. (2008). Land use changes: Economic, social, and environmental impacts. *Choices* 23(4), 6-10.
- Young, H.S., McCauley, D.J., Galetti, M., and Dirzo, R. (2016). Patterns, causes, and consequences of Anthropocene defaunation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 47, 333-358.
- Zanotti, M. (2020). Primeros registros de Siriri vientre negro (*Dendrocygna autumnalis*) para la provincia de Mendoza, Argentina. *Nótulas faunísticas* (297), 1-5.
- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2005). Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources* 30, 39-74.
- Zuluaga, J., Drovandi, A., Bermejillo, A., Cónsoli, D., Valdés, A., Salcedo, C., & Morsucci, A. (2013). Evolución de la contaminación del recurso hídrico en el cinturón verde de Mendoza. In *Presentado en el Congreso Nacional del Agua CONAGUA*.