



Seguimiento de las tendencias a largo plazo de la calidad de las aguas continentales a partir del análisis de datos de teledetección: un caso de estudio en la Península Ibérica.



Doctorado en Ingeniería y Gestión del Medio Natural

Presentada para optar al título de Doctor por:

Lady Carolina Echavarría Caballero

Bajo la dirección de:
Dr. María Jesús García García
Dr. José Antonio Domínguez Gómez

Contenido

- Justificación
- Objetivos
- Resultados
- Discusión y conclusiones generales
- Conclusions

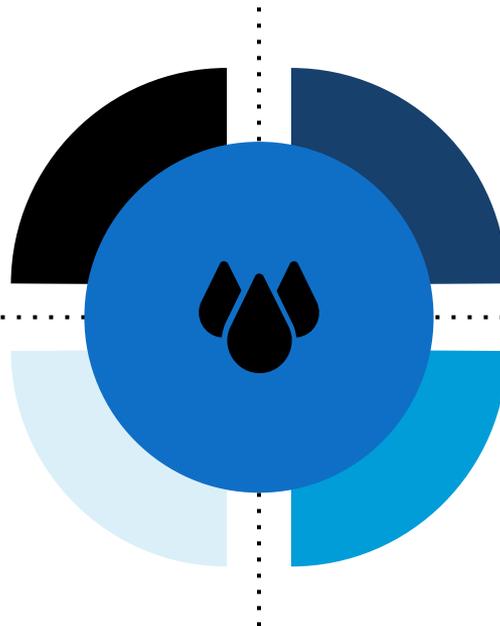


Importancia de los ecosistemas acuáticos

Justificación



Oportunidad de uso de sensores remotos



Escasez de estudios en España



Limitaciones hasta ahora





Importancia de los ecosistemas acuáticos

Los cuerpos de agua continentales superficiales (embalses, lagos y humedales) son **componentes esenciales** del medio ambiente y desempeñan **funciones diversas y vitales** en el funcionamiento de los **ecosistemas y el bienestar humano**:

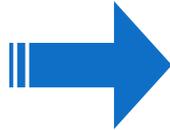
1. Sirven como **hábitat** para una gran variedad de especies
2. Brindan **servicios ecosistémicos** cruciales
3. Fuentes primarias de agua dulce: industria, agricultura, consumo humano
4. Significado cultural, **recreación y el turismo**.





Importancia de los ecosistemas acuáticos

La explotación antropogénica y múltiples factores estresantes **amenazan las funciones ecológicas** de las aguas continentales en todo el mundo.



Objetivo común de **mejorar su estado ecológico a nivel mundial** gracias a directivas y acuerdos nacionales e internacionales.



Es necesaria la identificación de factores estresantes y la implementación de estrategias de gestión sostenible respaldadas por un **seguimiento más o menos frecuente**.



Oportunidad de uso de sensores remotos



Monitoreo a bajo coste en grandes superficies y a largo plazo.

Sensores pasivos ópticos utilizados para estudiar la calidad de las aguas continentales:

- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS);
- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS);
- Sentinel-3 A/B Ocean and Land Cover Instrument (OLCI);
- La constelación Landsat conformada por Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM+), y Operational Land Imager (OLI); y
- Sentinel 2 A/B MultiSpectral Instrument (MSI).

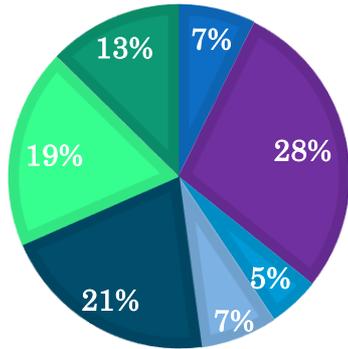
Ventajas de Landsat: imágenes disponibles cada **16 días** desde **1984** con una resolución espacial de **30 - 120 metros y mediana resolución espectral**.

Oportunidad de uso de sensores remotos



Análisis estado de la cuestión:

■ CDOM ■ Chl-a ■ TP ■ T ■ SDD ■ TSS ■ TUR



Palabras clave: "inland water quality remote sensing"

Parámetros de calidad de agua ampliamente estudiados:

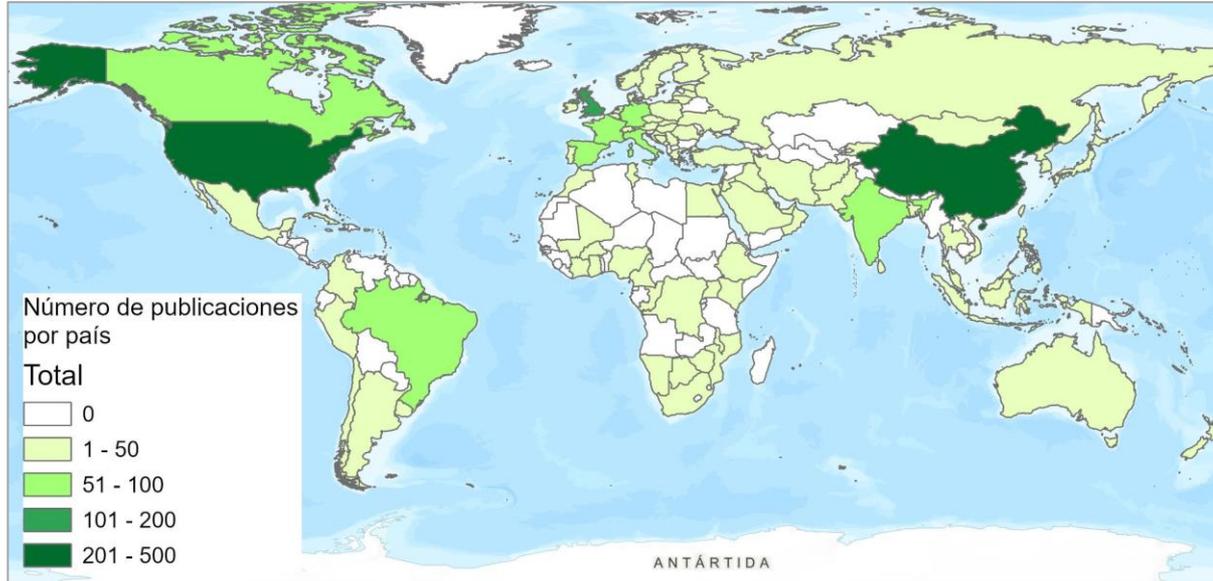
- Clorofila -a (Chl-a)
- **Transparencia** (SDD)
- Sedimentos en suspensión (TSS)
- Turbidez (TUR)
- **Temperatura** (T)
- Materia orgánica coloreada disuelta (CDOM)
- Fósforo total (TP).

* *Disponibilidad de datos de campo*

Escasez de estudios en España



Estudios puntuales pero nada sistemático a nivel nacional.



España: **56** publicaciones

Palabras clave: "inland water quality remote sensing"

Escasez de estudios en España

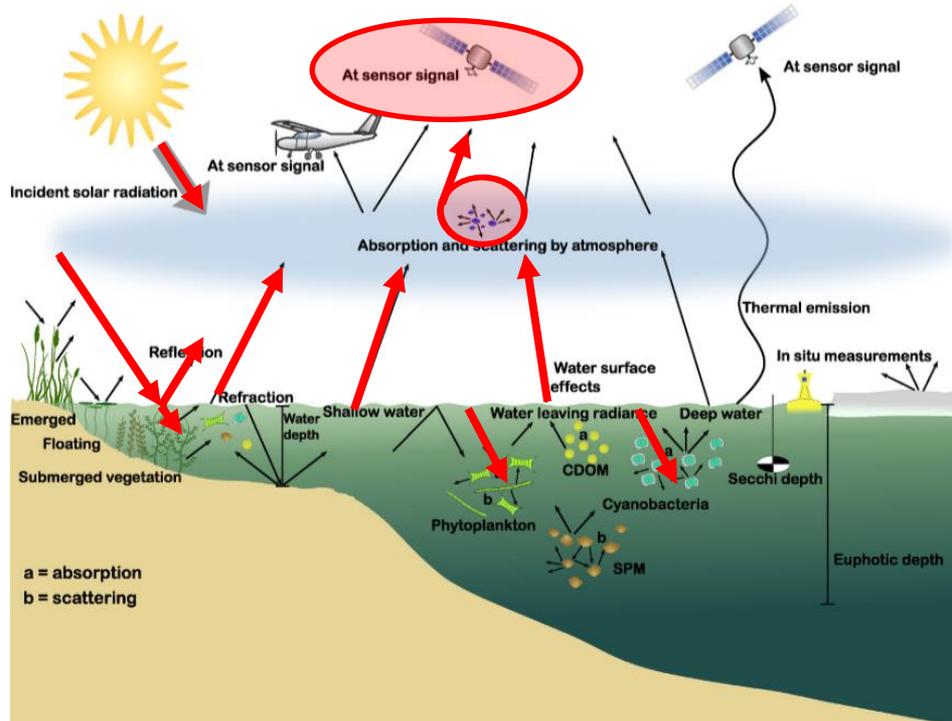


1	Lago Maspalomas	Chl-a	Junio 2017 - 2019
2	28 embalses cuenca Ebro	TSS	2016 – 2020
3	PRSE	SDD	1984 – 2000
4	9 embalses cuenca Júcar	SDD y TUR	2017 – 2018
5	Pequeño embalse	Chl-a	2017

Palabras clave: “inland water quality remote sensing” + “Spain”. Masas de agua continentales y parámetros más estudiados.



Limitaciones: Corrección atmosférica



Aprox. **90%** de la señal se origina en **contribuciones de la superficie del agua y la atmósfera.**

El **2-6%** restante incluye la **radiación proveniente del agua**

Es esencial la eliminación precisa de dichos efectos

Interacción entre la radiación, parámetros de calidad de agua medidos con teledetección y los sensores (Dörnhöfer & Oppelt, 2016).

Limitaciones



1. No existe un **método estandarizado para la corrección atmosférica** en aplicaciones de calidad de aguas continentales → **incertidumbre en las estimaciones**
2. **Alta variabilidad de las propiedades ópticas** inherentes de este tipo de ecosistemas → No existen **Metodologías para obtener parámetros de calidad del agua** continentales dadas las características de las masas de agua.
3. **Datos de campo insuficientes** para hacer estudios a largo plazo que permitan estudiar su variabilidad a nivel regional, nacional y mundial



Objetivos



Objetivo general

Estudiar la calidad de agua en masas de agua continentales a partir de datos de teledetección en la península Ibérica teniendo en cuenta su tamaño y su variabilidad estacional y a largo plazo.

Objetivos específicos



Identificar y evaluar sensores remotos y productos derivados que permitan estudiar la calidad de las masas de agua en este contexto.



Analizar la variación a nivel espacio – temporal de la calidad de agua a partir de determinados parámetros.



Estudiar la influencia de factores geográficos sobre determinados parámetros de calidad de agua.

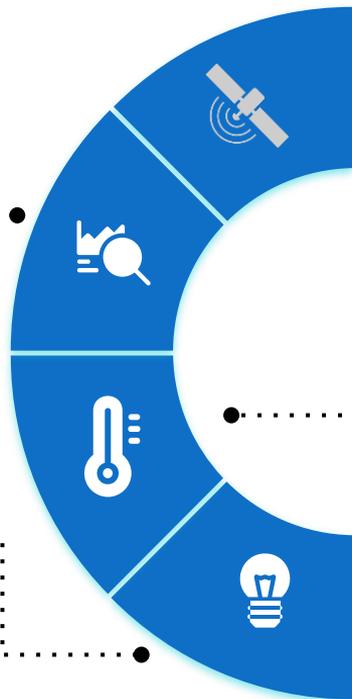
Resultados – 4 intereses / 3 artículos

Interés 2:

Se puede estudiar 1984 – 2009
¿Cómo analizar ambientalmente
espacio-temporal?

Interés 4:

Portugal – Península completa
Ampliar modelado: Machine Learning



Interés 1:

Validez productos Landsat
Ir atrás en la serie de tiempo

Interés 3:

¿Que ha pasado en España?
Diagnóstico temporal + territorial

Resultados – se exponen por artículos



Artículo 2:

Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.
JCR: Q2; SRJ: Q1. # Citas: 1 (2021)

Estancia de investigación:

Análisis de la calidad del agua en Portugal



Artículo 1:

Assessment of Landsat 5 Images Atmospherically Corrected with LEDAPS in Water Quality Time Series
JCR: Q3; SRJ: Q1. # Citas: 2 (2019)



Artículo 3:

Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis.
JCR: Q2; SRJ: Q1. (2024)

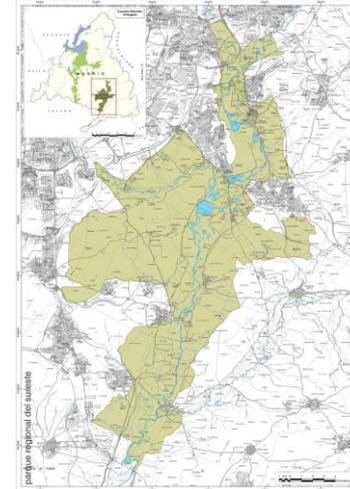
Resultados

Objetivo: evaluar el uso de imágenes Landsat TM5 corregidas atmosféricamente con LEDAPS en el estudio de series temporales de calidad del agua a través de la transparencia utilizando la reflectancia del agua medida en el campo.



Artículo 1:

Assessment of Landsat 5 Images
Atmospherically Corrected with
LEDAPS in Water Quality Time
Series

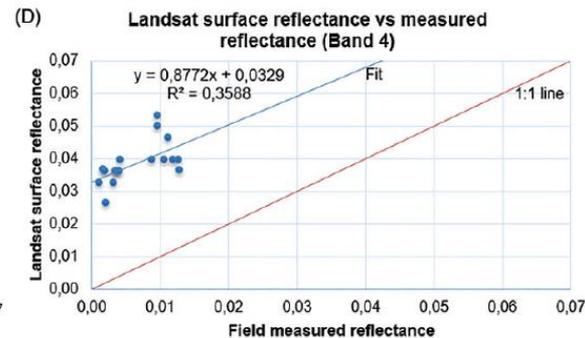
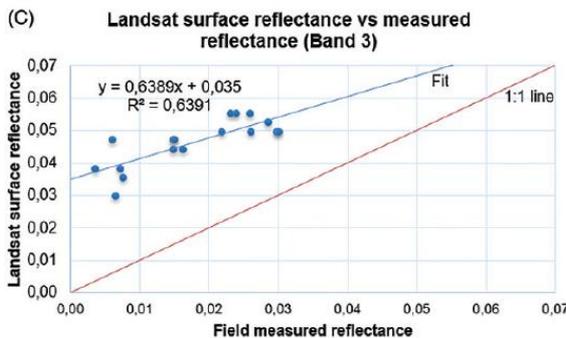
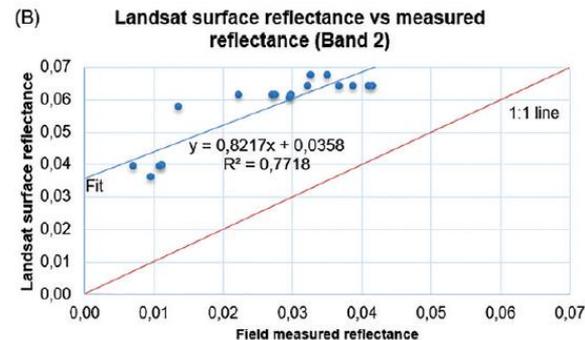
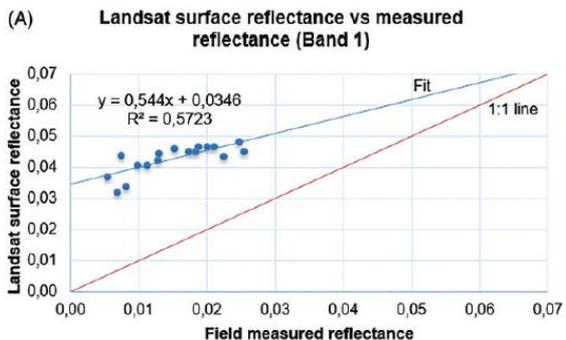


Assessment of Landsat 5 Images Atmospherically Corrected with LEDAPS in Water Quality Time Series

Evaluación del producto

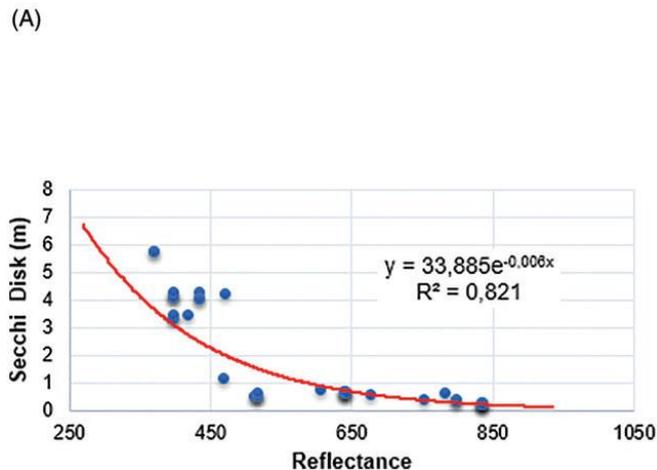
“**Surface reflectance**”: valores de reflectancia medida en campo vs valores de reflectancia de las imágenes Landsat corregidas

Se observa una **sobreestimación** de los valores de reflectancia → se utilizan las imágenes corregidas y se desarrolla un **nuevo modelo** para transparencia

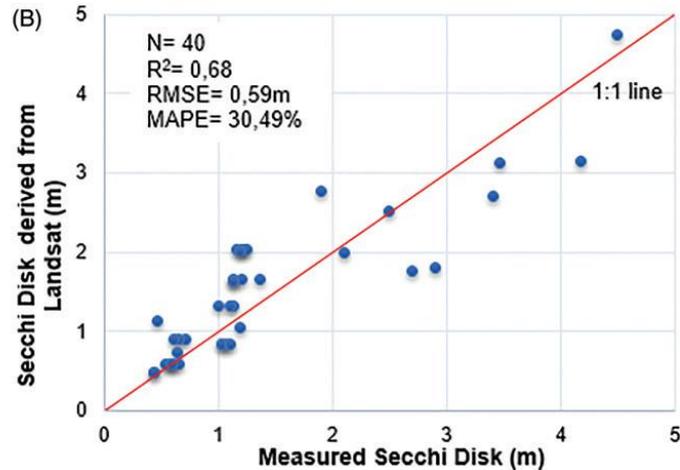


Assessment of Landsat 5 Images Atmospherically Corrected with LEDAPS in Water Quality Time Series

Se obtiene un **modelo que relaciona los valores de transparencia medida en campo** con los valores de **reflectancia de las imágenes corregidas** y se valida.



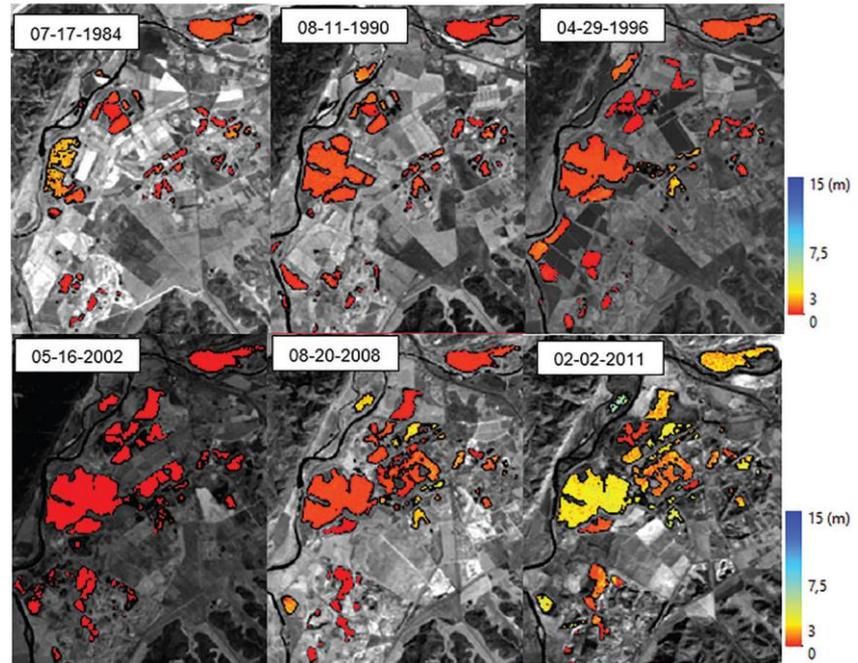
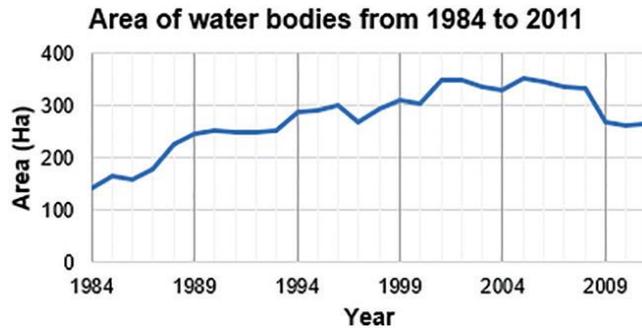
Modelo



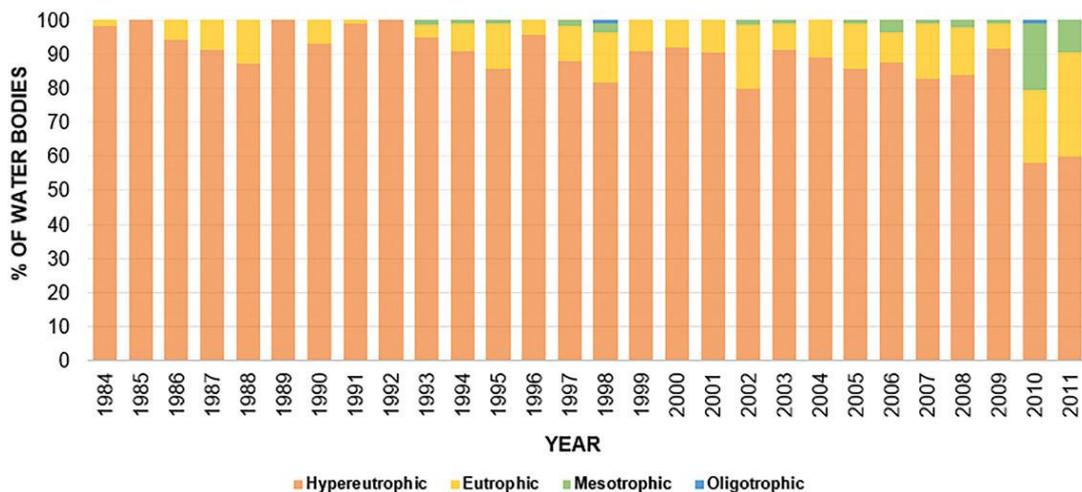
Validación

Assessment of Landsat 5 Images Atmospherically Corrected with LEDAPS in Water Quality Time Series

Se obtiene: El **número de masas de agua** para cada fecha y la **serie espacio temporal** de valores de **transparencia**.



Assessment of Landsat 5 Images Atmospherically Corrected with LEDAPS in Water Quality Time Series



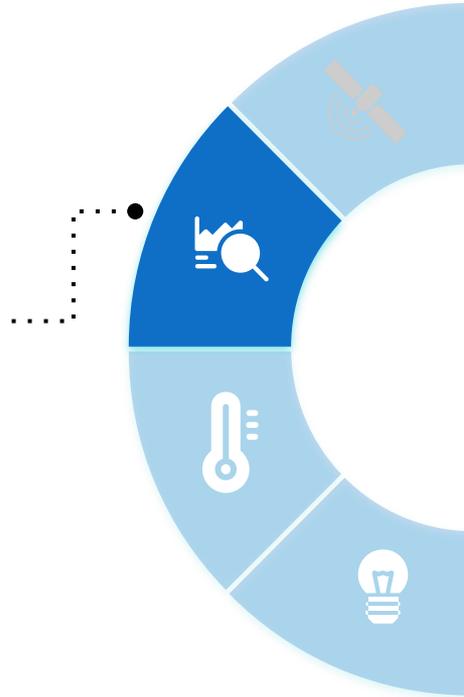
La calidad del agua de las lagunas de gravera dentro del PRSE **mejoró** a lo largo de la serie temporal estudiada según los valores de transparencia.

Resultados



Artículo 2:

Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.

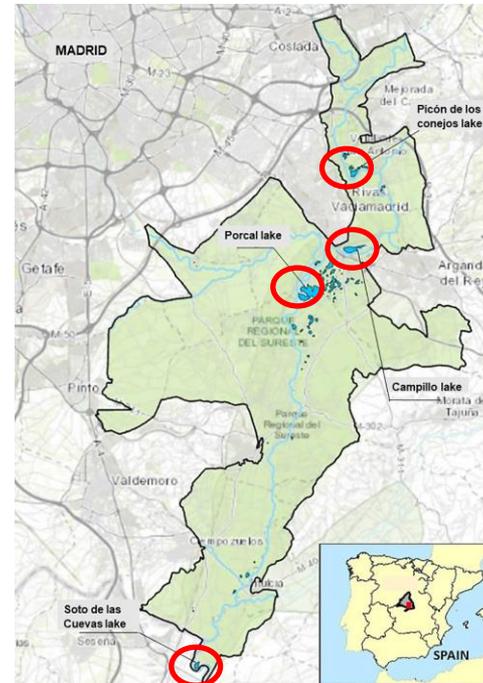


Objetivo: llevar a cabo análisis estadísticos para evaluar los patrones espaciales y temporales de la calidad del agua usando series de tiempo de datos de transparencia obtenidos de imágenes Landsat 5.

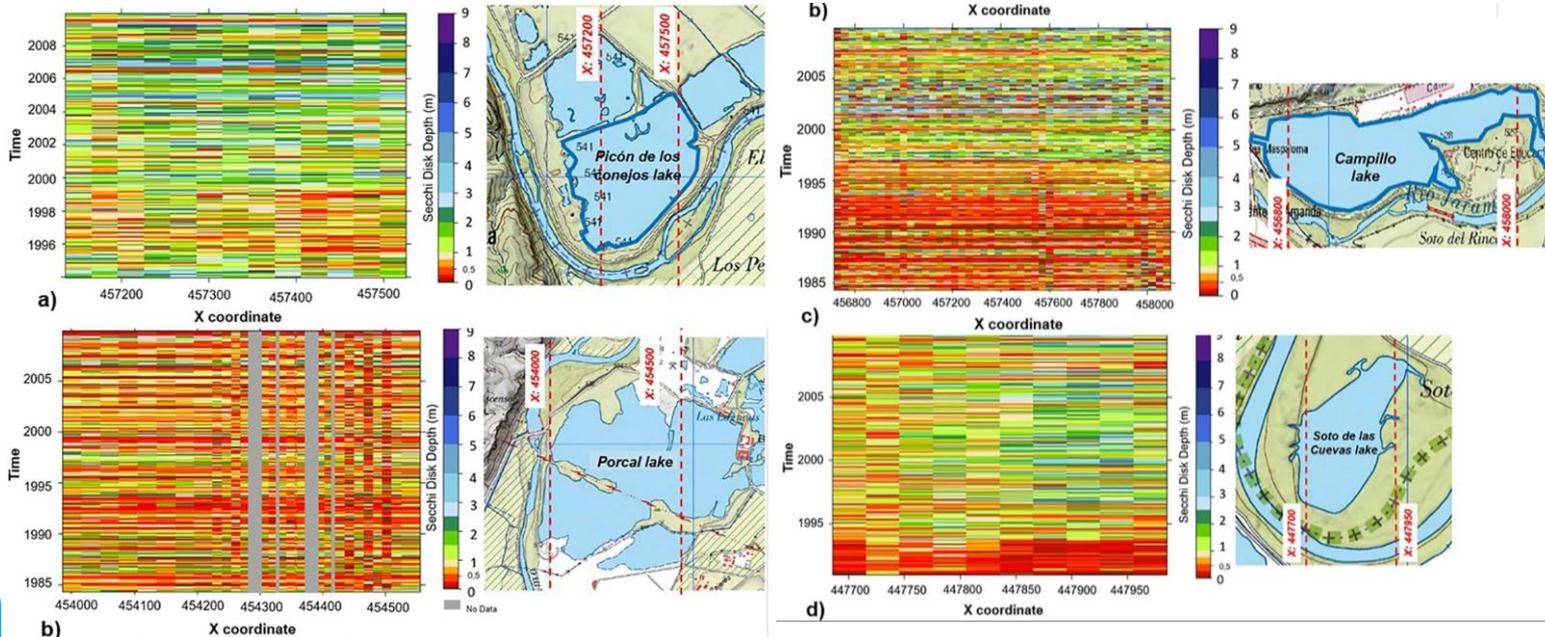
Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.

Se seleccionaron 4 lagunas: Picón de los Conejos, Campillo, Porcal y Soto de las Cuevas. Criterios:

1. **Tamaño suficiente** para ser analizados según resolución de las imágenes Landsat 5;
2. **Se distribuyen por todo el área de estudio**
3. Pertenecen a áreas con **diferentes clasificaciones ambientales** (zonas degradadas por regeneración, áreas de conservación y explotación ordenada de zonas de recursos naturales).



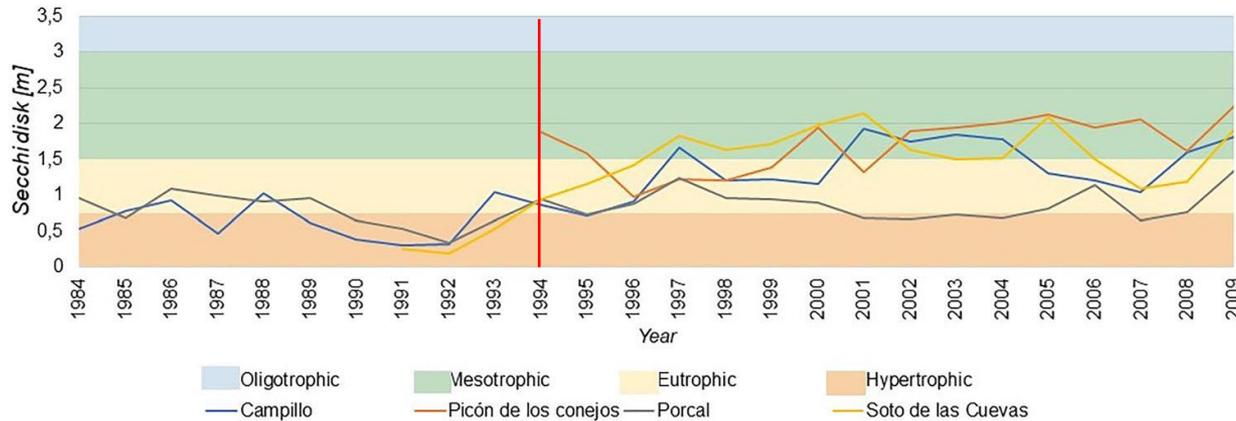
Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.



No se observan claramente patrones espaciales pero sí en el tiempo: la calidad del agua ha mejorado.

Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.

Medias anuales del disco de Secchi para cada laguna y la clasificación del estado trófico según la OCDE.

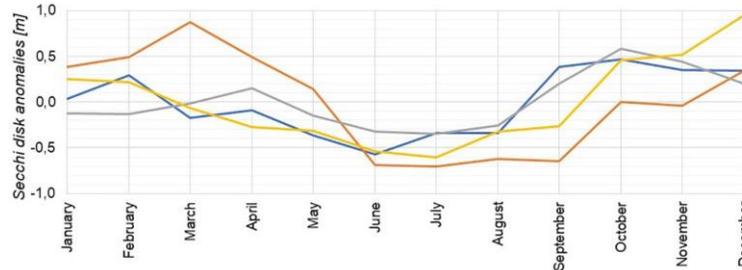


La **calidad del agua** de las lagunas **ha mejorado desde la declaración del parque**, sin alcanzar el estado oligotrófico.

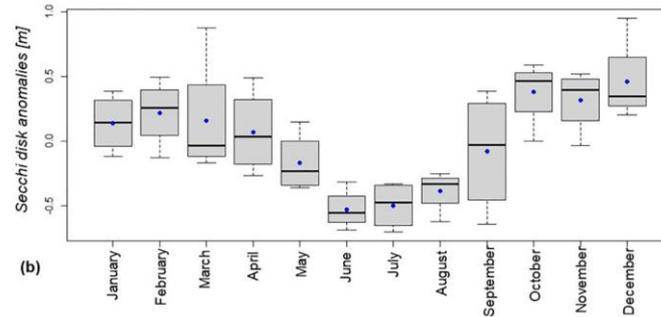
Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.

Evolución mensual de las anomalías del disco de Secchi.

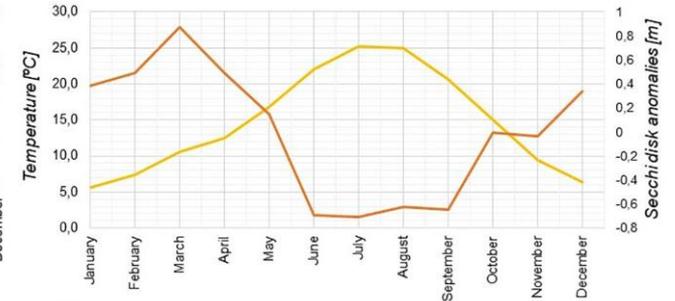
Esta tendencia refleja el nivel de desarrollo de comunidades biológicas → **alta actividad fotosintética en meses cálidos**



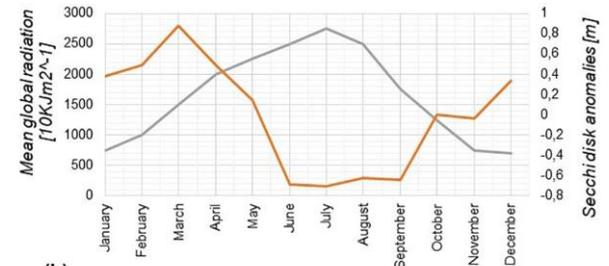
(a) — Campillo — Picón de los Conejos — Porcal — Soto de las Cuevas



(b)

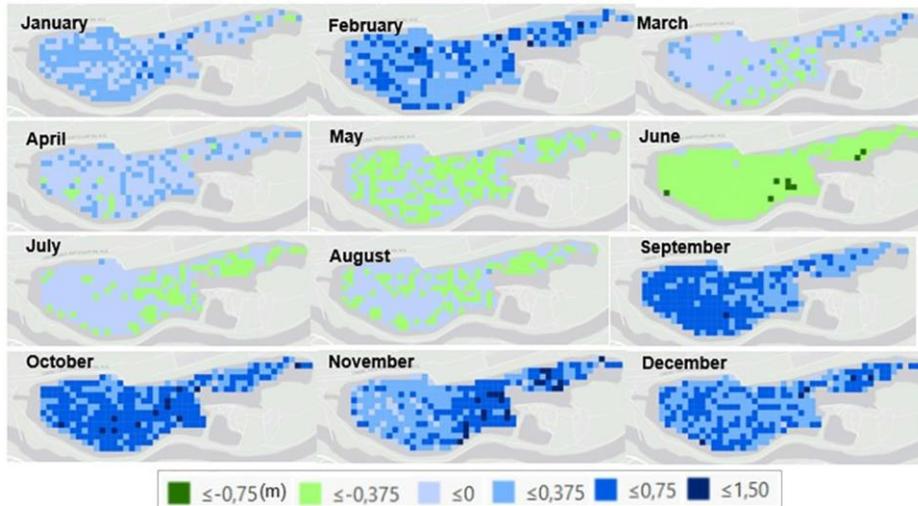


(a) — Temperature — Picón de los Conejos

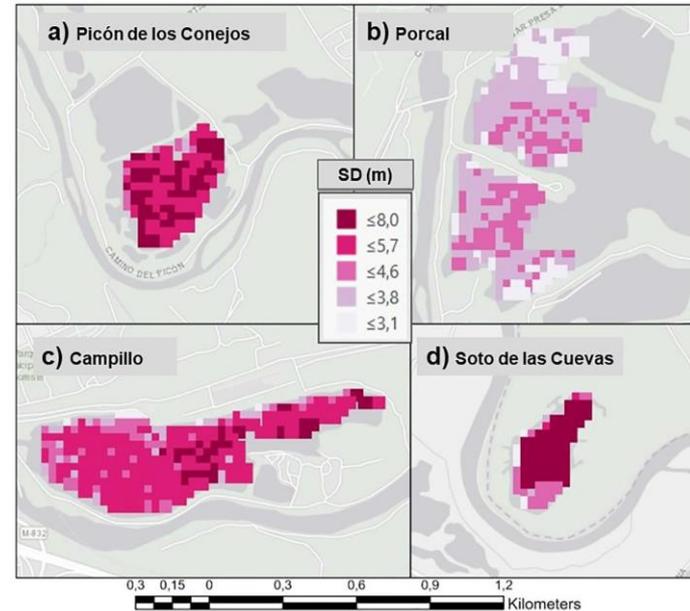


(b) — Mean global radiation — Picón de los Conejos

Water quality spatial-temporal analysis of gravel pit ponds in the southeast regional park Madrid (Spain) from 1984 to 2009.



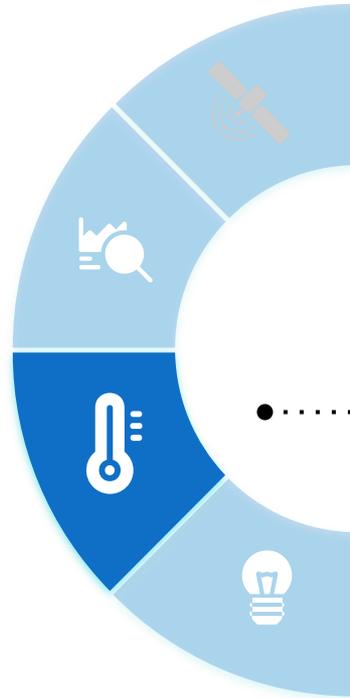
Evolución espacial mensual de las anomalías del disco de Secchi en el Campillo.



Magnitud de cambio del disco de Secchi para cada píxel 1984 - 2009

Resultados

Objetivo: estudiar los cambios a largo plazo en la temperatura superficial de las aguas continentales en España desde 1994 hasta 2011, a través del análisis de la tendencia temporal y el patrón espacial a lo largo del tiempo mediante el uso de teledetección.

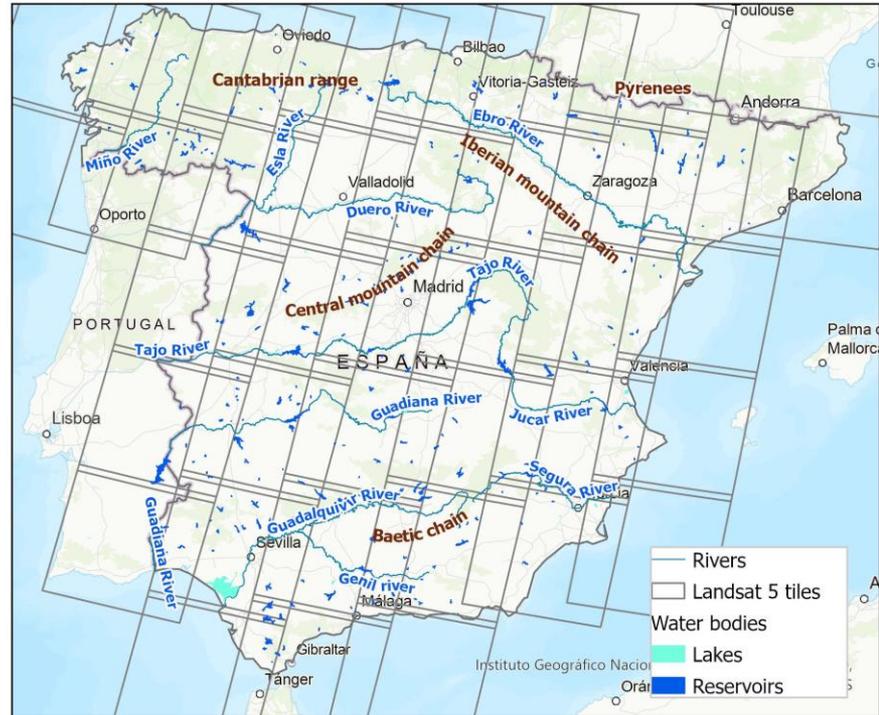


 **Artículo 3:**
Warming inland water in
peninsular Spain revealed by
Landsat 5 analysis

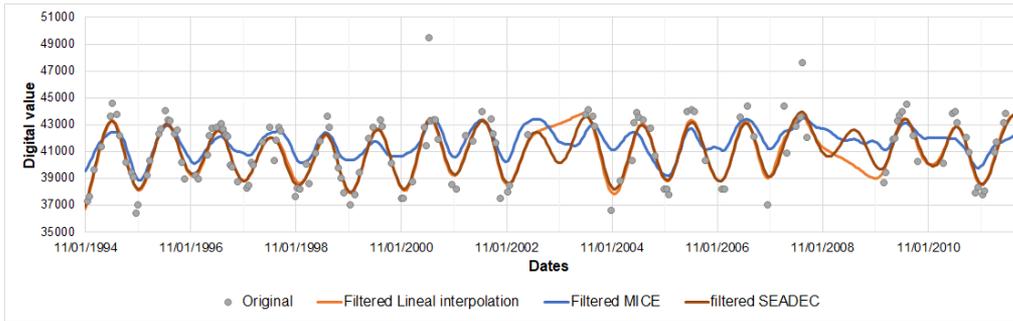
Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis

325 masas de agua (53 lagos y 272 embales):
Tamaño suficiente, no cuerpos de agua con formas alargadas (ríos embalsados).

Se utiliza el producto “**surface temperature**”.

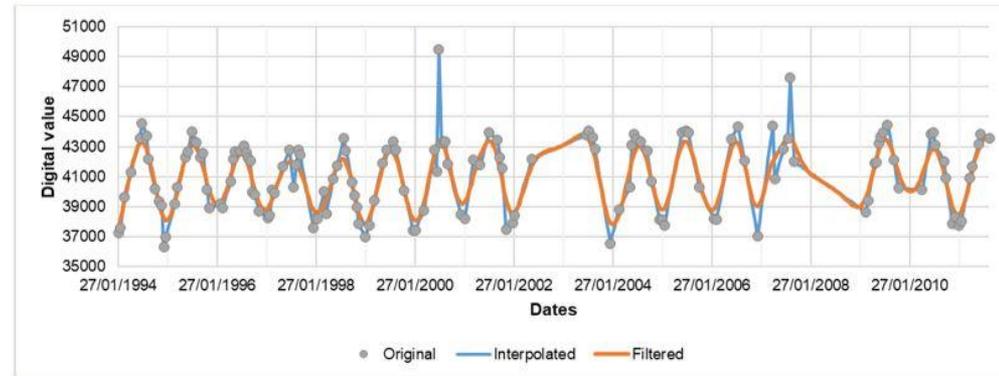


Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis

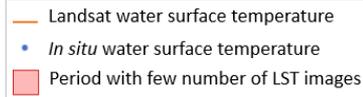
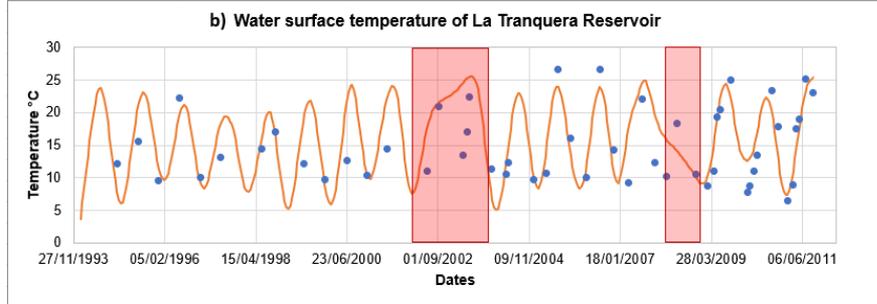
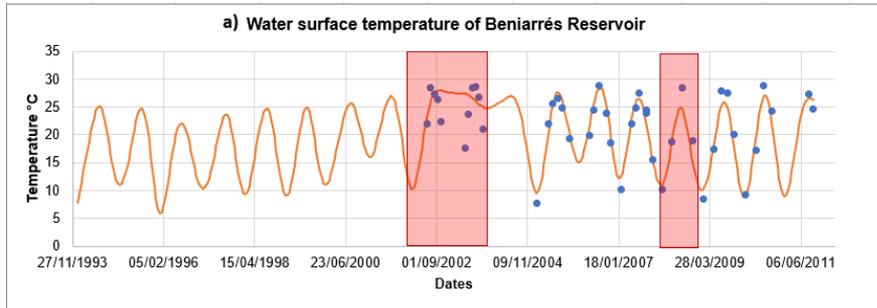


Comparación de los métodos de relleno de datos faltantes

Proceso de interpolación y filtrado



Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis

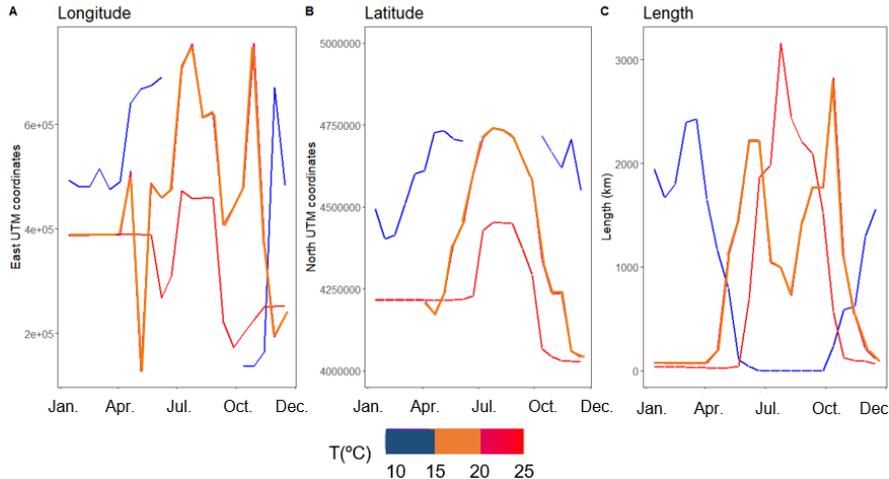


Se obtienen: Series temporales de temperatura superficial del agua Landsat y se comparan con los datos de campo.

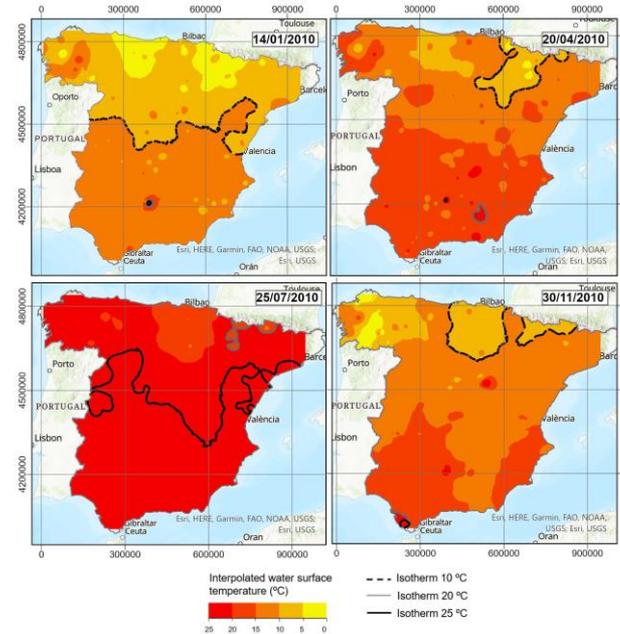
El coeficiente de **correlación de Pearson** varió de **0,60 a 0,98** $p\text{-value} < 0,1$.

A pesar de la sobre estimación en invierno de 2002, 2003 y 2008, **la precisión obtenida es aceptable.**

Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis

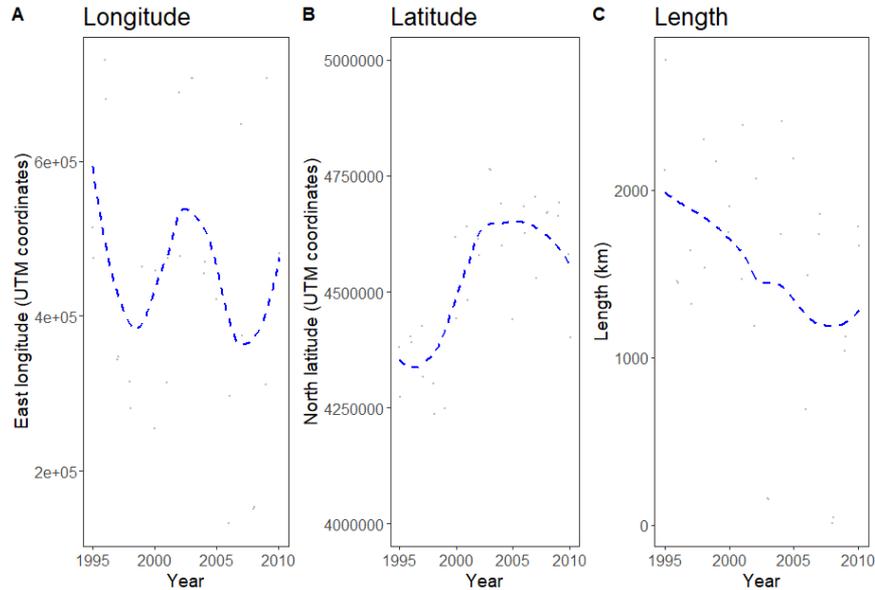


Cambios estacionales de las isothermas de 10°C, 20°C y 25°C de la temperatura media del agua en España durante el año 2010.



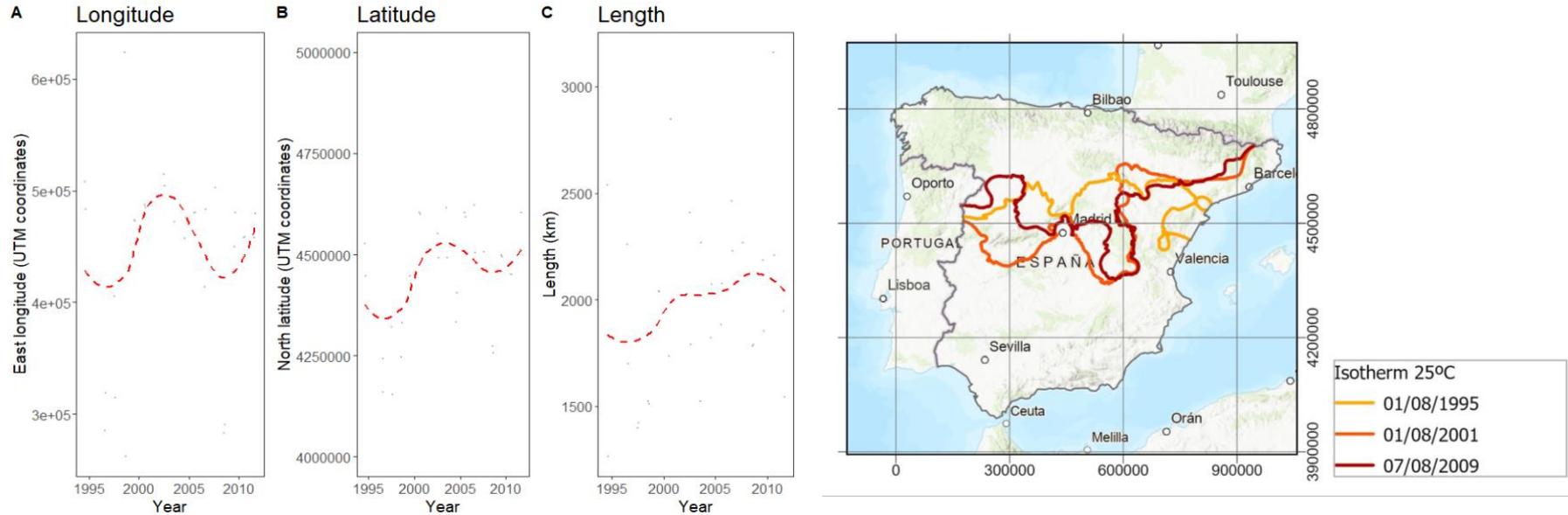
Ubicación de las isothermas de 10°C, 20°C y 25°C de la temperatura media del agua en diferentes estaciones durante el año 2010.

Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis



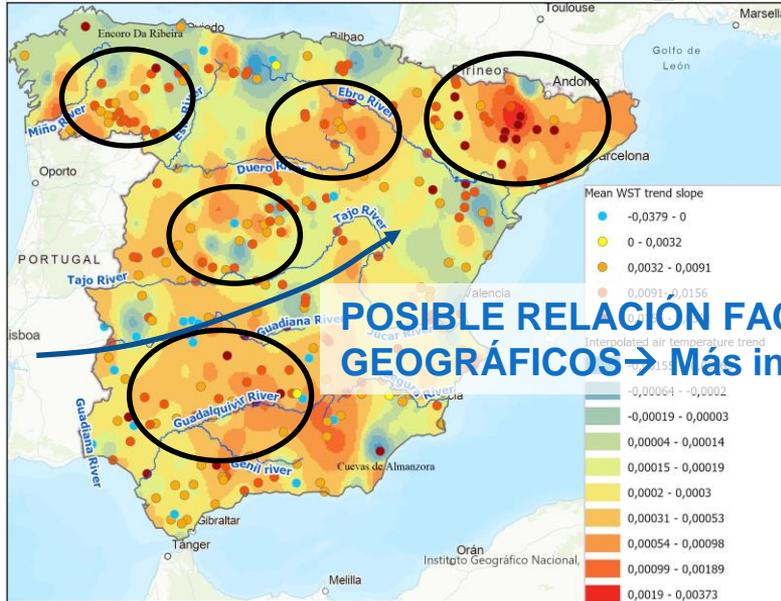
Variación interanual de la isoterma 10°C en las masas de aguas de España en diciembre de 1994 a 2011.

Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis

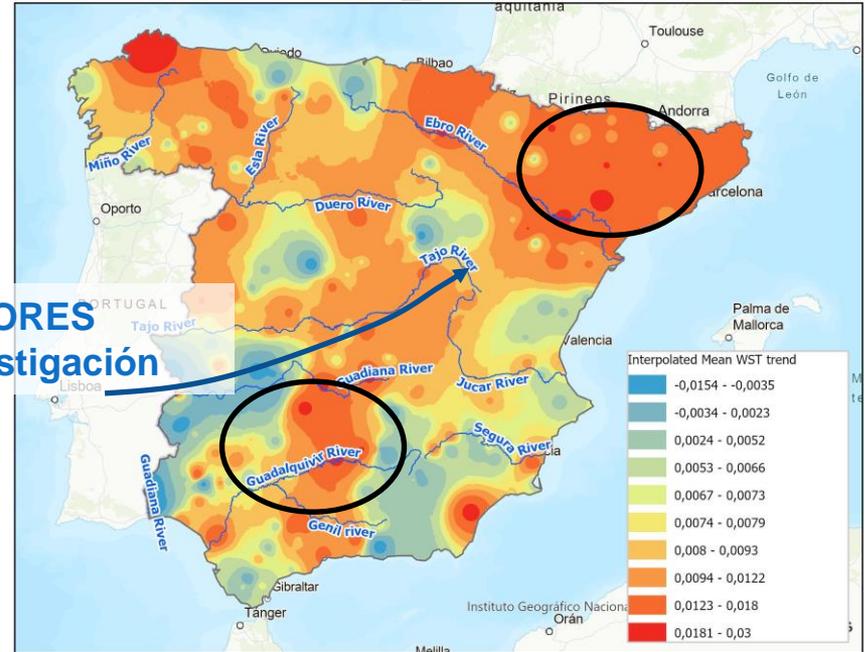


Variación interanual de la isoterma 25°C en las masas de aguas de España en diciembre de 1994 a 2011.

Warming inland water in peninsular Spain revealed by Landsat 5 analysis



Interpolación de la tendencia de la temperatura media diaria del aire y pendiente media significativa de la temperatura media del agua (puntos).

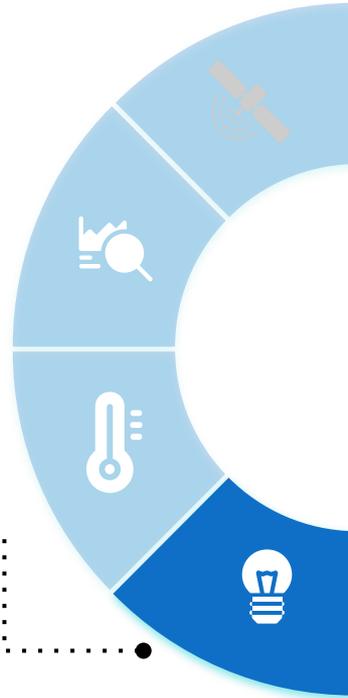


Tendencia media interpolada de la temperatura superficial del agua (método IDW).

Resultados

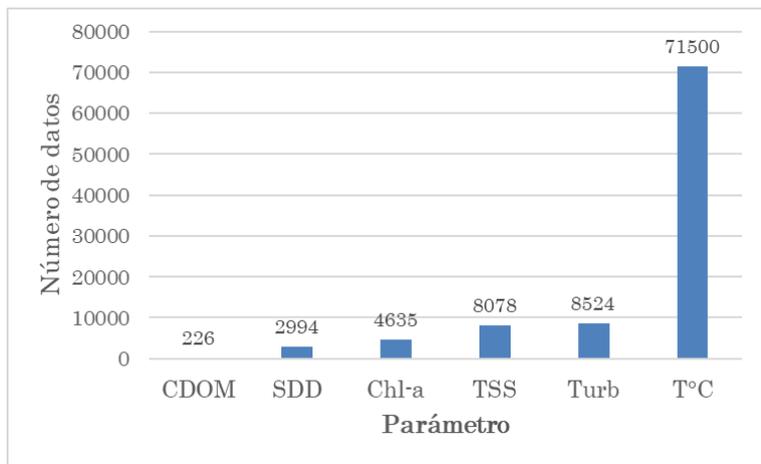
Estancia de investigación:

Análisis de la calidad del agua en Portugal

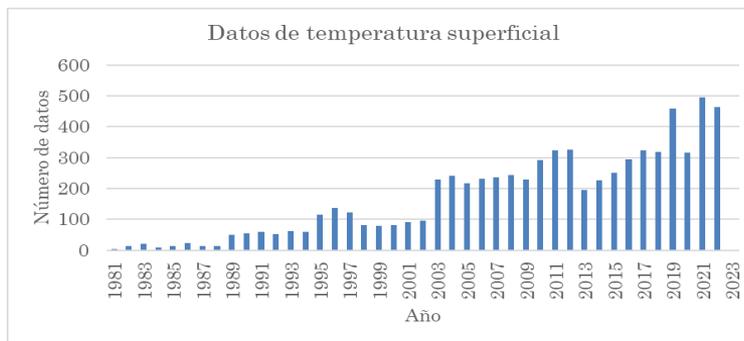


Objetivo: añadir un enfoque multidisciplinar para complementar y hacer más eficiente el mapeo de parámetros de calidad del agua, además de incluir datos de campo de Portugal y obtener una visión conjunta de la península Ibérica.

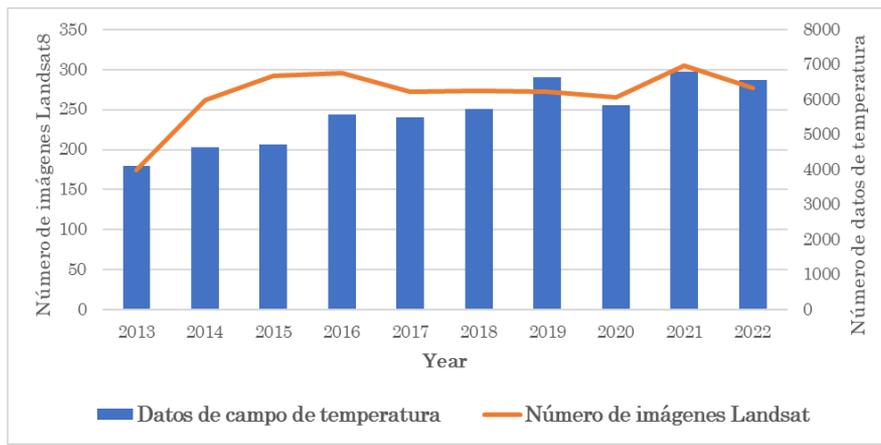
Estancia de investigación:



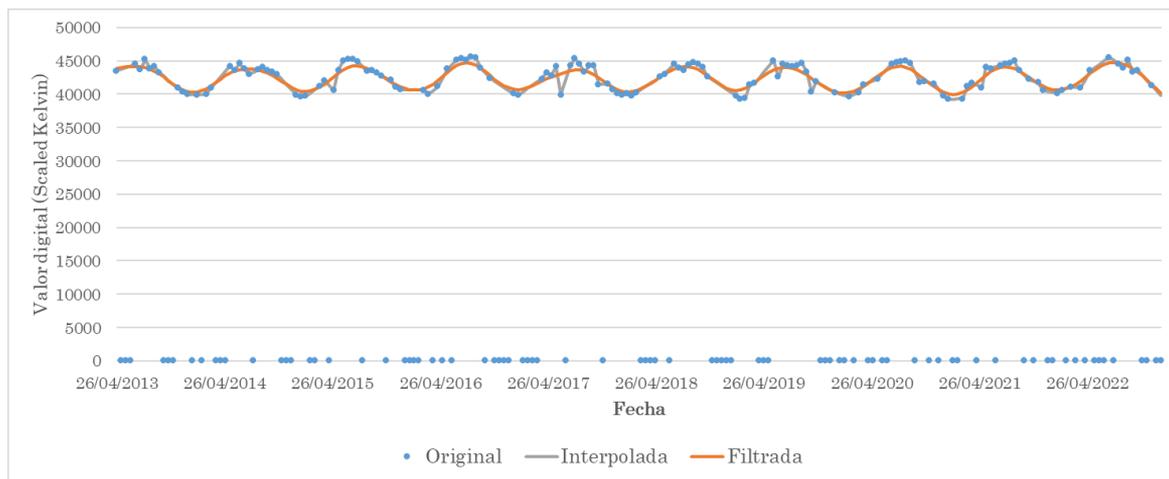
2254 datos de temperatura superficial. Mayor cantidad en la **última década**.



Datos de Campo de temperatura superficial

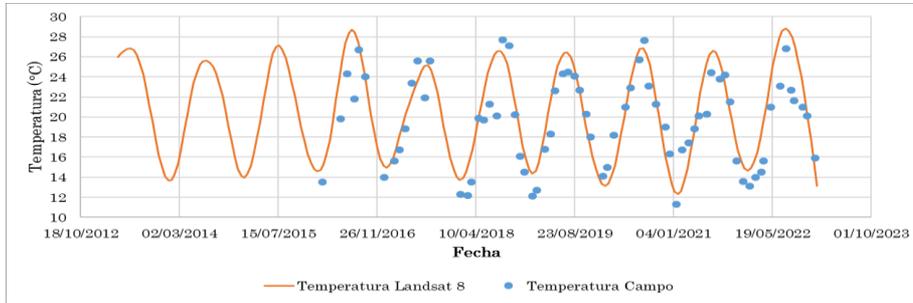


Estancia de investigación:

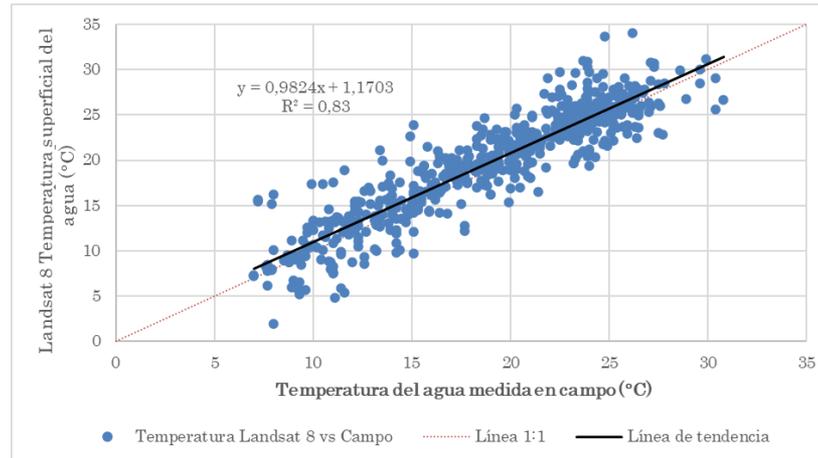


Se seleccionan las **imágenes Landsat 8** y se procesan → se obtienen series de imágenes de temperatura superficial desde **2013 a 2023**.

Estancia de investigación:



Comparación de los valores de temperatura medidos en las imágenes y los valores de campo.



Se analizan las tendencias → En las masas de agua de Portugal durante 2013 a 2023 no se observa una tendencia significativa en la mayoría de las masas de agua.

Estancia de investigación:

- **Los datos de temperatura superficial del agua medidos en las imágenes satelitales de Landsat 8 han sido validados con los datos medidos en campo** → las series obtenidas pueden ser utilizadas para estudiar cambios a largo plazo de este parámetro de calidad, pero **es necesario ampliar las series con otros satélites Landsat desde 1984 hasta la actualidad** para identificar tendencias.
- Con los datos disponibles de los demás parámetros de la calidad del agua, **es posible desarrollar modelos** que correlacionen mediciones de campo con datos de series temporales de imágenes de teledetección utilizando **Machine Learning**.



Recapitulemos

Discusión general y conclusiones

Acerca de identificar y evaluar sensores remotos y productos derivados que permitan estudiar la calidad de las masas de agua en la península Ibérica



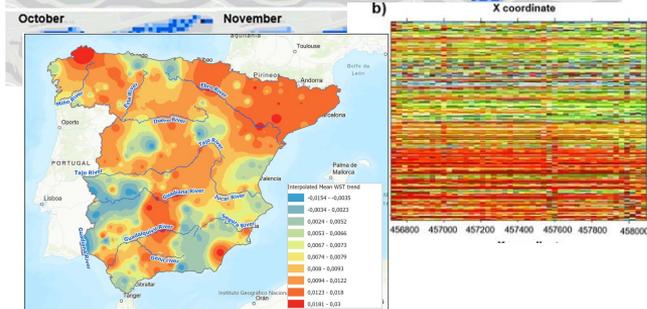
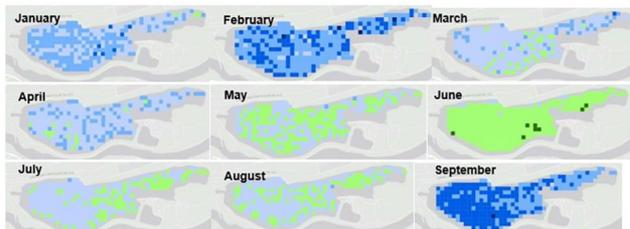
1. Se evaluó el producto Landsat atmosféricamente corregido con LEDAPS – de identificó una **sobreestimación** pero permitió utilizar las imágenes corregidas y con datos de campo locales desarrollar un **nuevo modelo para DS**.
2. Se **validó la ecuación** propuesta proporcionando **resultados aceptables del DS** en las lagunas de gravera del PRSE.
3. Se estudió el desempeño del producto de **temperatura superficial de Landsat** con datos de campo en **España y Portugal** y **existe correlación** temperatura superficial de **Landsat vs in situ** → series temporales ser suficientes para **tendencias estacionales históricas** y **evaluar la variabilidad interanual** de las masas de agua.

Las imágenes Landsat demostraron ser una **poderosa herramienta** para estudiar la calidad de las masas de agua continentales de la Península Ibérica, su **resolución espacial moderada** y **amplia cobertura temporal** lo hacen particularmente adecuado para estudiar cuerpos de agua de diferentes tamaños. Especialmente, el producto de Landsat Colección 2 nivel 2 que incluye productos de temperatura superficial y reflectancia de superficie a nivel global proporciona información relevante en el monitoreo de la calidad del agua, ya que permite **derivar series de tiempo precisas** de parámetros de calidad del agua (**DS** y **Temperatura superficial**).

Es posible, dado que son **productos atmosféricamente corregidos con métodos rigurosos**, listos para ser **utilizados** y ampliamente empleados.

Discusión general y conclusiones

Acerca de analizar la variación a nivel espacio – temporal de la calidad de agua



1. Se estudió el comportamiento estacional de la transparencia valores más altos del disco Secchi en otoño e invierno y valores más bajos en verano → Posible relación entre la transparencia y la temperatura y la radiación solar.

2. Se analizó el comportamiento a largo plazo de la transparencia- se determinó que la transparencia y el estado trófico han mejorado en comparación con el período de estudio inicial en las cuatro lagunas estudiadas. herramientas legales de protección ambiental tales como la declaración como zona protegida PRSE tienen impacto positivo sobre la calidad de las aguas continentales

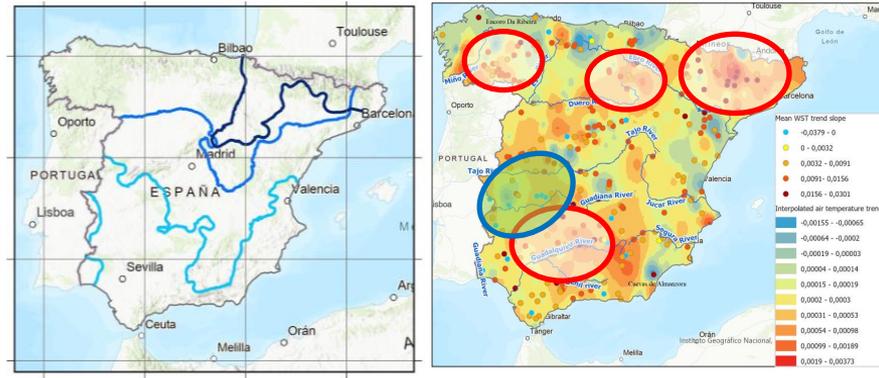
3. Se estudiaron las tendencias de temperatura superficial de las masas de agua en la España peninsular → ha aumentado durante 1994 hasta 2011 con una media de $+0,037^{\circ}\text{C}$ al año. .

A partir de las series espacio temporales de transparencia del agua y temperatura superficial derivadas de las imágenes Landsat ha sido posible estudiar las variaciones estacionales y a largo plazo de la calidad del agua en la península Ibérica.

Discusión general y conclusiones

Acerca de estudiar la influencia de factores geográficos sobre determinados parámetros de calidad de agua:

La distribución de las **tendencias de temperatura superficial** del agua en España es **altamente irregular** debido a su complicada orografía y la diversidad de regiones climáticas. Si bien esta tendencia no puede atribuirse directamente a la altitud o al clima únicamente, es **probable que esté influenciada por una combinación de factores climáticos y características locales, altitud y posición geográfica y radiación solar.**



Se ha podido comprobar la influencia de factores geográficos en la calidad de agua.

Discusión general y conclusiones

Esta tesis **ha aportado una metodología para obtener series de tiempo espacio temporales de datos de calidad de agua derivados de sensores remotos** y analizar dichas series para identificar patrones estacionales y a largo en este contexto geográfico y horizonte temporal. Lo que ha permitido **abordar tareas de análisis ambiental no realizadas hasta ahora en este contexto geográfico y horizonte temporal.**

Como futuras líneas de trabajo es necesario **comprender factores externos que afectan los procesos de calentamiento en las masas de agua de la Península Ibérica:** además de factores globales como la tendencia creciente de la temperatura del aire asociada al cambio climático, existen otras influencias más **locales como la geomorfología, la elevación y el clima** que necesitan ser analizadas.

Además, con los datos de campo disponibles se podrían desarrollar modelos que correlacionen mediciones de campo de otros **parámetros de calidad con datos de series temporales de imágenes de teledetección utilizando Machine Learning** con el objetivo de mejorar los modelos predictivos y apoyar mejores estrategias de gestión de los recursos hídricos.

Conclusions

Conclusions

Landsat images has demonstrated its effectiveness as a powerful tool for studying the water quality of the Iberian Peninsula inland water bodies:

1. **Surface reflectance** data which are atmospherically corrected using **rigorous methodologies**, enable the accurate derivation of time series data for critical water quality parameters such as transparency.
2. **Surface temperature** validation with in situ data shows good agreement → **enable its use** to study spatio – temporal time series.

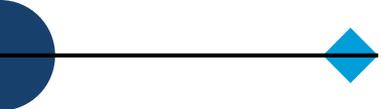
Conclusions

By using the spatio-temporal series of water transparency and surface temperature → to explore both seasonal and long-term variations in water quality across the Iberian Peninsula.

3. Water transparency reaches its highest levels in autumn and winter, while it declines in summer. Possibly influenced by factors such as temperature and global radiation

4. Legal environmental protection measures, have had a positive impact on the quality of continental waters.

5. Increase in water surface temperatures across peninsular Spain from 1994 to 2011. Trends exhibit considerable variability due to Spain complex orography and diverse climatic regions.



Gracias

