



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

TRAZABILIDAD Y ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA QUE ABASTECE A UN EMBALSE A PARTIR DE IMÁGENES MULTIFUENTE. CASO PANTANO DEL RUMBLAR (BAÑOS DE LA ENCINA, JAÉN)

Autora: Almudena Guerrero Lara

Grado: Ingeniería Geomática y Topográfica

Directora: Andressa de Sousa Cardoso

Departamento de la directora: Ingeniería cartográfica, geodésica y fotogrametría

Codirectora: Lidia Ortega Alvarado

Departamento de la codirectora: Informática.

Fecha: 09/09/2024

Licencia CC





Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Dña. Andressa de Sousa Cardoso y Dña. Lidia Ortega Alvarado, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: "Trazabilidad y análisis de calidad de agua que abastece a un embalse a partir de imágenes multifuente. Caso pantano del Rumblar (Baños de la Encina, Jaén), que presenta Almudena Guerrero Lara, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2024

El alumno:

Los tutores:

Almudena Guerrero Lara

Andressa De Sousa Cardoso

Lidia Ortega Alvarado

Contenido

Resumen	1
MEMORIA	3
1. Introducción.....	4
1.1. Justificación.....	4
1.1.1. Justificación de la zona.	4
1.1.2. Justificación del método aplicado.	5
1.2. Objetivo.....	6
2. Marco teórico	7
2.1. Empleo de la teledetección para detectar aguas eutróficas.	7
2.1.1. Teledetección.....	7
2.1.2. Copernicus.	8
2.1.3. Análisis de aguas continentales.....	13
2.2. Análisis hidrográfico	19
2.2.1. Concepto análisis hidrográfico.	19
2.2.2. Método específico de análisis.	21
3. Materiales.....	23
3.1. Adquisición de imágenes.	23
3.2. Obtención del modelo digital de elevaciones.....	23
4. Metodología de procesamiento	25
4.1. Procesamiento de imágenes Sentinel-2.....	25
4.1.1. Selección y descarga de imágenes.....	25
4.1.2. Procesado en Google Earth Engine (GEE).....	27
4.2. Procesado para un análisis hidrográfico.	47
4.2.1. Selección y descarga modelo digital de superficie.	47

4.2.2. Procesado con QGis	52
5. Resultado.	63
6. Validación datos.....	74
7. Conclusiones.....	84
REFERENCIAS	87
ANEXOS	90
Anexo 1. Códigos de JavaScript en GEE	91
Anexo 2. Planos.....	106
2.1.- Mapa situación y emplazamiento	106
2.2.- Mapa pendientes en %	106
2.3.- Mapa dirección flujo del agua	106
2.3.- Red de dirección de flujo	106
2.4.- Índice NDVI Estacionario del Año 2023	106
2.5.- Índice GCI Estacionario del Año 2023.....	106
2.6.- Índice Chl-a Estacionario del Año 2023	106
Anexo 3. Límites de los contaminantes en el agua.....	116

Ilustraciones

Ilustración 1: Situación del embalse El Rumblar	5
Ilustración 2: Servicios Copernicus.	9
Ilustración 3: Bandas espectrales Sentinel-2.	11
Ilustración 4: Sentinel-2 en la misma órbita.....	12
Ilustración 5: Bandas espectrales de Sentinel 2	17
Ilustración 6: Gráfica de reflectancia de distintos cuerpos en distintas longitudes de onda ...	17
Ilustración 7: Dirección de flujo. 8 direcciones.....	22
Ilustración 8: Portal de Google Earth Engine.....	27
Ilustración 9: Pantalla principal de GEE.	28
Ilustración 10: Ventana Scripts.	28

Ilustración 11: Ventana Docs.	29
Ilustración 12: Ayuda de ejemplos de algoritmos.	30
Ilustración 13: Ventana Assets.	30
Ilustración 14: Ventana donde se escriben los comandos.	31
Ilustración 15: Ventana Inspector.	32
Ilustración 16: Ventana Consola.	33
Ilustración 17: Venta Visor.	34
Ilustración 18: Información datos Sentinel 2	35
Ilustración 19: Variables importadas.	35
Ilustración 20: Ejemplo del índice de imágenes usadas en la estación de invierno.....	40
Ilustración 21: Representación en color verdadero de la imagen que corresponde a la estación de la primavera GEE.....	44
Ilustración 22: Representación NDVI de la imagen de la primavera GEE.....	45
Ilustración 23: Representación GCI correspondiente con la estación de invierno GEE.	45
Ilustración 24: Representación Chla_a correspondiente con la estación de verano en GEE ...	46
Ilustración 25: hoja0884	47
Ilustración 26: Dirección de flujo del agua. Como se comporta el agua según las cotas.....	55
Ilustración 27: John G. Lyon 2003. GIS for Water Resources and Wathershed Management.	56
Ilustración 28:Olaya Ferrero, V. (2004). Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno.....	56
Ilustración 29: Comparación de altitudes tras la corrección del MDT.....	57
Ilustración 30: Valores del Ráster de Dirección de Flujo del agua.....	58
Ilustración 31: Malla de puntos regulares cada 500 metros	59
Ilustración 32: tabla atributos con el campo de ángulos asociados al campo de direcciones de flujo.....	61
Ilustración 33: Capa Shape indicando la dirección del flujo de agua cada 500m.....	62
Ilustración 34: Rango valores índice de vegetación.	69
Ilustración 35: Pendientes en %.....	71
Ilustración 36: Dirección del flujo de agua	72
Ilustración 37: Red de dirección de flujo del agua cada 500 metros.....	73

Esquemas

Esquema 1: Procesado de imágenes Sentinel-2.....	35
Esquema 2: Proceso de trabajo en QGis	53
Esquema 3: Flujo de trabajo para obtener el MDT de la zona de interés	54

Tablas

Tabla 1 Relaciones matemáticas empleadas para hallar la mejor correlación de la reflectividad con la concentración de clorofila-a. $R\lambda_i$ es la reflectividad en la longitud de onda λ_i	15
Tabla 2: En SAGA, como se representa el ángulo de la dirección del flujo del agua.	57
Tabla 3: Grados de la dirección del flujo de agua.	60
Tabla 4: Intervalos fechas para cada estación del año.	63
Tabla 5: Datos estadísticos obtenidos de aplicar distintos índices	64
Tabla 6: Datos análisis de las aguas del Embalse el Rumblar de cuatro muestras diferentes facilitado por Somajasa.	78
Tabla 7: Datos de temperatura y precipitación acumulada mensuales facilitados por la AEmet.	80
Tabla 8: Correlación entre el índice Chl-a y la Tempera.	81
Tabla 9: Correlación entre el índice NDVI y la Tempera.	81
Tabla 10: Correlación entre el índice GCI y la Tempera.	81

Códigos

Código 1: Código donde se define la variable de la zona de trabajo y la variable del intervalo de tiempo.....	36
Código 2: Código donde se establece el intervalo de tiempo para cada estación del año.	37
Código 3: Función para enmascarar nubes y cirros de la imágenes.....	38
Código 4: Selección de la colección de imágenes Sentinel-2 y aplicación de la mascara	39
Código 5: Código para la media de todas las imágenes y recorte de esta de la zona de interés.	40
Código 6: Código para calcular cada uno de los índices.....	42
Código 7: código con la paleta de colores establecido para cada uno de los índices.	43

Código 8: Visualización de los mapas de cada uno de los índices.....	44
--	----

Resumen

El embalse del Rumblar es un pantano (Coordenadas: 38°09'42"N 3°48'15"O) situado en una región de baja serranía, que se caracteriza por la alternancia de vegetación arbustiva y matorral cerca del río, así como por la presencia de áreas de cultivos y olivar de secano. Este entorno proporciona un paisaje variado y natural que, sin embargo, ha estado sujeto a niveles significativos de contaminación en sus aguas en años anteriores. Estos altos niveles de contaminación han planteado serios problemas para la calidad del agua del embalse, lo que ha llevado a la necesidad de realizar estudios detallados sobre su trazabilidad y calidad.

El presente estudio se enfoca en la trazabilidad y el análisis de la calidad del agua que abastece al embalse del Rumblar, localizado en Baños de la Encina, Jaén. Para ello, se utilizarán imágenes multifuente, principalmente las obtenidas de los satélites Sentinel-2. Estas imágenes proporcionan datos valiosos que permiten un análisis detallado y preciso del estado del agua del embalse.

Gracias a los avances en los software, se llevará a cabo una monitorización de la evolución de la calidad del agua mediante un software avanzado que realiza este trabajo en la nube, conocido como Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>). Este software permite el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos de manera eficiente y sin la necesidad de infraestructura local potente.

Se utilizarán técnicas de teledetección para recopilar información sobre la calidad del agua sin necesidad de contacto directo. A través del análisis de imágenes capturadas por sensores remotos, principalmente de los satélites Sentinel-2, se podrán detectar características físicas, químicas y biológicas del agua. Estas técnicas permiten una evaluación continua y detallada del estado del agua en el embalse.

Para evaluar la calidad del agua, se aplicarán diversos índices. Entre ellos, el índice de clorofila-a (Chl-a), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de clorofila verde (GCI) serán utilizados para determinar la concentración de algas y evaluar la calidad del agua. Estos índices son cruciales para identificar y cuantificar la presencia de algas y otros componentes biológicos que afectan la calidad del agua.

Además, se utilizará el Modelo Digital del Terreno (MDT) para analizar la topografía de la cuenca del embalse. Este modelo permitirá entender mejor la dirección del flujo del agua y los procesos hidrológicos que afectan al embalse, utilizando el método D8¹ para calcular la red de drenaje. Este enfoque integral permitirá una comprensión completa de la dinámica del agua en el embalse del Rumblar y ayudará a desarrollar estrategias para mejorar y mantener su calidad.

¹ O'Callaghan, John F., y David M. Mark. «The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data». *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28, n.o 3 (diciembre de 1984): 323-44. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)

MEMORIA

1. Introducción

1.1. Justificación

En esta sección, como indica el título, se justifican dos aspectos clave. En primer lugar, se detalla la elección de la zona de trabajo donde se llevará a cabo el estudio, explicando por qué se seleccionó esta área específica en lugar de otra. En segundo lugar, se justifica el método que se aplicará en el estudio, describiendo su idoneidad y relevancia para los objetivos planteados.

1.1.1. Justificación de la zona.

El agua es uno de los principales recursos naturales consumidos por la población, por lo que se somete a análisis constantes de calidad, especialmente cuando está destinada al consumo humano. En este contexto, el agua embalsada en los pantanos se somete a análisis periódicos de sus componentes. A menudo, se detecta una presencia significativa de nitratos que provienen de fincas agrícolas ubicadas en las cuencas de estos embalses.

Con la colaboración de Somajasa, Sociedad Mixta del Agua Jaén, S.A., se nos informa que en el embalse del Rumblar se han detectado alteraciones en los análisis del agua, posiblemente originadas por la actividad agrícola en las zonas circundantes al embalse El Rumblar. Por lo que el trabajo se va a desarrollar en este embalse.

El embalse del Rumblar es una estructura de almacenamiento ubicada en el curso del río Rumblar, en el municipio de Baños de la Encina, en la provincia de Jaén, al sur de España. Construido con una capacidad de 126 hm³, recibe contribuciones hídricas principales del propio río Rumblar (formado en el embalse mediante la unión del río Pinto y el río Grande), así como de los arroyos de Murquigüelo y las Higuieruelas. Además, el río Chico o del Renegadero, que confluye con el río Grande, también aporta aguas provenientes del río de la Campana. (Ilustración 1)

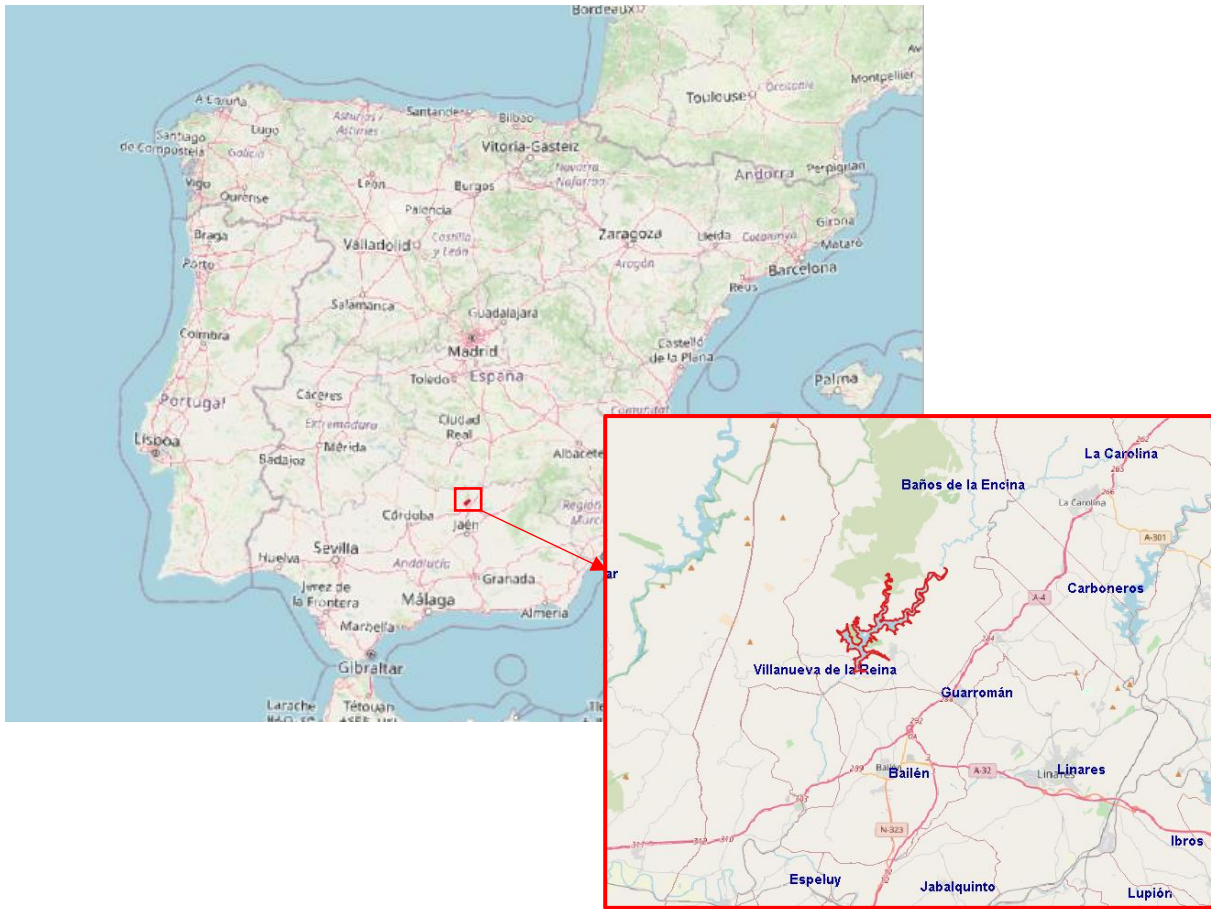


Ilustración 1: Situación del embalse El Rumblar

El entorno del embalse presenta un paisaje de baja serranía, caracterizado por la alternancia de vegetación arbustiva y de matorral en las proximidades del río, e incluye zonas de cultivos y olivar de secano.

1.1.2. Justificación del método aplicado.

La vegetación de la zona de estudio y especialmente los cultivos requiere, para su óptimo desarrollo, una combinación adecuada de elementos y factores ambientales específicos según sus necesidades. Sin embargo, el agricultor tiene influencia directa solo sobre algunos elementos, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, cobre, zinc, entre otros. En el caso del cultivo de olivar, los principales fertilizantes utilizados son el nitrógeno, fósforo y potasio, aplicados mediante la hoja, así como la fertilización nitrogenada y fosfórica en el suelo.

El uso indebido o el exceso de estos fertilizantes puede resultar en la contaminación por nitratos, con efectos negativos notables, tales como:

- Eutrofización de las aguas superficiales: El exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, entre otros, provoca un crecimiento acelerado de fitoplancton y otras especies de flora acuática. Esto desencadena trastornos en el equilibrio del ecosistema acuático, manifestándose en la coloración verdosa, verde-azulada, rojiza o parda del agua, dependiendo de la especie dominante en la floración. Se produce turbidez y aumento de materia en suspensión, lo que limita la penetración de la luz en capas más profundas. Además, se reduce el nivel de oxígeno disuelto, pudiendo llevar a situaciones de agotamiento o anoxia. Se generan malos olores debido a la emisión de metano y sulfuro de hidrógeno, y se observa un aumento en el volumen de fangos orgánicos en el lecho, entre otros efectos.
- Deterioro de la calidad del agua: Además de los problemas asociados con la eutrofización, si la concentración de nitratos supera los 50 mg/L, el agua no es apta para el consumo humano.

Por lo que, mediante la combinación de Imágenes multitemporales de Satélite, para detectar ese aumento de fitoplancton destacado por su clorofila tipo-a, y el método específico D8 para calcular la dirección del flujo del agua.

1.2. Objetivo

El propósito de este proyecto es crear una metodología que permita analizar la trazabilidad del agua de lluvia que desemboca en los pantanos, incluyendo la obtención de una respuesta espectral multitemporal del agua del embalse. Esto se realizará con el objetivo de detectar contaminantes de nitratos y determinar su origen. Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un caso de estudio específico en el embalse del Rumblar, ubicado en el municipio Baños de La Encina, en la provincia de Jaén.

2. Marco teórico

Se van a diferenciar dos enfoques: el primero se centrará en la detección de clorofila en aguas de embalses mediante herramientas de teledetección; el segundo consistirá en un análisis hidrográfico de la zona del embalse, evaluando sus características y calidad del agua.

2.1. Empleo de la teledetección para detectar aguas eutróficas.

Antes de comenzar a detectar aguas eutróficas mediante herramientas de teledetección, es esencial entender qué es la teledetección, de dónde obtenemos las imágenes y con qué tipo de material trabajaremos. La teledetección se refiere a la obtención de información sobre la superficie terrestre a través de sensores remotos, generalmente situados en satélites o aviones. Las imágenes utilizadas en estos estudios se obtienen de estos sensores y se procesan para analizar distintos parámetros del agua, como la presencia de clorofila y otros indicadores de eutrofización.

2.1.1. Teledetección

La teledetección es una técnica que se utiliza para recopilar información acerca de objetos, áreas o fenómenos sin entrar en contacto directo con ellos. Se basa en la captura y análisis de datos a distancia, generalmente mediante el uso de sensores remotos como satélites, aviones o drones. Estos sensores recopilan información sobre la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre, permitiendo la obtención de datos sobre características físicas, químicas o biológicas de la Tierra.

La teledetección tiene diversas aplicaciones en disciplinas como la meteorología, la agricultura, la gestión del medio ambiente, la cartografía, la monitorización de recursos naturales, la detección de cambios en el uso del suelo, y muchos otros campos. Permite obtener información detallada sobre grandes extensiones de territorio de manera eficiente y a menudo en tiempo real.

En resumen, la teledetección es una herramienta valiosa para la obtención de información sobre la Tierra y otros objetos celestes sin la necesidad de un contacto directo, utilizando tecnologías que capturan datos a distancia.

Existen dos categorías principales de sistemas de teledetección: los sensores activos y los pasivos.

Los sensores activos emiten la energía necesaria para escanear los objetos de estudio. Utilizando esta energía, el sensor mide la radiación reflejada por el objeto. Un ejemplo de este tipo de sistema de teledetección son los radares de tráfico.

Por otro lado, los sensores pasivos detectan la radiación emitida o reflejada por el objeto de estudio, como la radiación solar. Un ejemplo conocido de sensores pasivo son los infrarrojos.

Todos los sistemas de teledetección comparten componentes similares que realizan las tareas de observación y medición. Estos componentes incluyen:

- Sensor: Es una pieza, generalmente equipada con una cámara, que captura, codifica y transmite imágenes o datos del objeto de estudio.
- Centro de recepción: La información capturada se transmite al centro de recepción, que puede estar ubicado a distancias considerables del sensor. Aquí, la información se decodifica, procesa y corrige según sea necesario.
- Canal de distribución: Una vez que la información está procesada y corregida, se canaliza hacia la distribución, donde puede ser compartida. Los expertos o usuarios, dependiendo del tipo de información, interpretan y concluyen sobre los datos.

2.1.2. Copernicus.

En este punto conoceremos que es Copernicus, el cual, es un programa que constituye un proyecto coordinado y dirigido por la Comisión Europea, cuyo propósito es establecer una capacidad europea para la observación de la Tierra. Conocido anteriormente como Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad (GMES), este programa ofrece servicios de información basados en datos recopilados por satélites y en datos in situ, abarcando diversas áreas.

La Comisión Europea asume la coordinación y gestión del programa, contando con la colaboración de los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, así como agencias de la Unión Europea y la entidad Mercator Océan.

Se emplean extensas cantidades de datos globales provenientes de satélites y sistemas de medición terrestres, aéreos y marítimos. Estos datos se utilizan para proporcionar información que contribuya a mejorar la calidad de vida de la ciudadanía europea, siendo accesibles de manera gratuita y abierta para los usuarios. Los servicios de información generados como son la vigilancia atmosférica, vigilancia marítima, vigilancia terrestre, cambio climático, seguridad y emergencias (Ilustración 2) son valiosos para proveedores de servicios, administraciones públicas y otras organizaciones internacionales.



Ilustración 2: Servicios Copernicus.

Dentro de los servicios que nos proporciona Copernicus encontramos el de Vigilancia Terrestre. El cual, suministra información geográfica diversa, abarcando ocupación del suelo y sus modificaciones, uso del suelo, estado de la vegetación, ciclo del agua y variables de la energía superficial de la tierra. Esta información se ofrece a una amplia audiencia de usuarios en Europa y a nivel global, especialmente en el ámbito de las aplicaciones medioambientales terrestres.

Este servicio respalda aplicaciones en diversos campos, como ordenación territorial y urbana, gestión forestal y del agua, agricultura y seguridad alimentaria, conservación y restauración de la naturaleza, desarrollo rural, contabilidad ecosistémica, así como mitigación y adaptación al cambio climático, entre otros.

La ejecución conjunta de este servicio, en operación desde 2012, es responsabilidad de la Agencia Europea de Medio Ambiente y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea.

El Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus consta de cinco componentes principales:

El monitoreo sistemático de parámetros biofísicos genera principalmente una serie de productos biogeofísicos que ofrecen información calificada sobre el estado y la evolución de la superficie terrestre. Estos datos a nivel global se actualizan cada diez días con una resolución espacial intermedia y se complementan con una serie temporal a largo plazo. Estos productos se emplean para supervisar aspectos como la vegetación, los cultivos, el ciclo del agua, el balance energético y las variables de la criosfera terrestre.

La cartografía de la ocupación y uso del suelo produce clasificaciones detalladas de la ocupación del suelo en un contexto paneuropeo o mundial. A nivel paneuropeo, esta información se complementa con capas detalladas sobre las características de la cobertura del suelo, como impermeabilidad, bosques, prados, agua, humedad y pequeños elementos leñosos. A nivel mundial, la cartografía de la ocupación del suelo se ajusta al sistema modular y jerárquico de clasificación de la cubierta terrestre de la FAO.

La cartografía temática de "puntos calientes" tiene como objetivo proporcionar información más detallada sobre áreas de interés específicas, conocidas como puntos calientes. Dentro del contexto del Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus, los puntos calientes generalmente corresponden a desafíos medioambientales específicos.

Las imágenes y datos de referencia incluyen mosaicos de imágenes satelitales de alta y muy alta resolución, así como conjuntos de datos de referencia. Estos abarcan mosaicos de imágenes satelitales de misiones participantes que cubren Europa, así como la producción de mosaicos de imágenes Sentinel-2 a nivel mundial. Se añaden conjuntos de datos de referencia que ofrecen una cobertura paneuropea homogénea de aspectos geoespaciales clave, como hidrografía y elevación.

Además de los componentes mencionados, se está implementando una nueva iniciativa europea para monitorear movimientos del suelo, que medirá desplazamientos del terreno, como corrimientos y hundimientos, así como la deformación de las infraestructuras.

2.1.2.1 Sentinel-2

Los Satélites Sentinel constituyen una nueva flota diseñada específicamente para suministrar los datos e imágenes necesarios para el programa Copernicus de la Comisión Europea. Este programa singular de vigilancia ambiental está transformando de manera significativa nuestra gestión del entorno, nuestra comprensión y enfrentamiento de los impactos del cambio climático, y nuestra protección en la vida cotidiana.

Los Sentinel-2 están equipados con una innovadora cámara multispectral de alta resolución que abarca 13 bandas espectrales (Ilustración 3), ofreciendo una perspectiva única de la superficie terrestre y la vegetación. La combinación de alta resolución, nuevas capacidades espectrales y un amplio campo de visión de 290 kilómetros, junto con frecuentes sobrevuelos, brindará imágenes sin precedentes de la Tierra.

	SENTINEL 2	
	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - SWIR 1	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Ilustración 3: Bandas espectrales Sentinel-2.

La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y transmisión de datos óptimas. Cada cinco días, estos satélites cubrirán todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras.

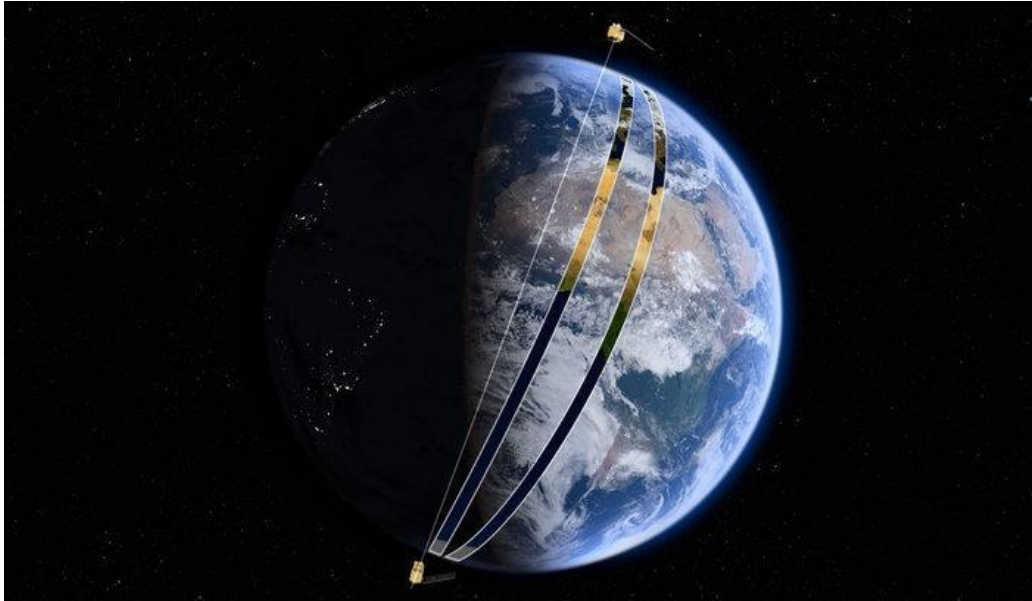


Ilustración 4: Sentinel-2 en la misma órbita.

La misión está destinada principalmente a proporcionar información valiosa para prácticas agrícolas y forestales, así como para gestionar la seguridad alimentaria. Las imágenes de los satélites se utilizarán para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido de agua, siendo esenciales para prever la producción de cosechas y otras aplicaciones relacionadas con la vegetación terrestre.

Además de supervisar el crecimiento de las plantas, Sentinel-2 puede cartografiar el estado y los cambios de la superficie terrestre, observar las selvas y alertar sobre la contaminación en lagos y aguas costeras. Las imágenes de inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos serán fundamentales para gestionar las consecuencias de estos desastres y contribuirán a las operaciones de ayuda humanitaria.

Sentinel-2A es el resultado de una estrecha colaboración entre la ESA, la Comisión Europea, la industria, proveedores de servicios y usuarios de datos. Diseñado y construido por un consorcio de 60 compañías liderado por Airbus Defence and Space, con el respaldo de la agencia espacial francesa CNES para optimizar la calidad de las imágenes y del Centro Aeroespacial Alemán DLR para mejorar la recuperación de datos mediante comunicaciones ópticas.

Con su cámara multiespectral y su amplia cobertura, la misión Sentinel-2 no solo asegura continuidad, sino que también amplía las capacidades de las misiones Spot francesa y Landsat

estadounidense. Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015, y Sentinel-2B en el primer trimestre de 2017. Una vez lanzados, la Comisión Europea asume la propiedad de los satélites.

2.1.3 Análisis de aguas continentales.

El estudio de aguas continentales a través de la teledetección permite estimar varios parámetros biofísicos de interés. En este caso, la clorofila-a se va a monitorear mediante imágenes Sentinel-2, ya que es un indicador crucial de la calidad del agua. La clorofila-a es un pigmento fotosintético presente en las algas y otras plantas acuáticas. Su concentración en el agua es un indicador directo de la biomasa fitoplanctónica, permitiendo así evaluar la calidad del agua. Altos niveles de clorofila-a suelen estar asociados con la eutrofización, un proceso que puede llevar a la proliferación de algas nocivas.

La eutrofización es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en un cuerpo de agua, lo que provoca un crecimiento explosivo de algas. Este fenómeno puede disminuir la calidad del agua, provocar la muerte de peces y otros organismos acuáticos, y generar problemas como la hipoxia (falta de oxígeno). Detectar la clorofila-a ayuda a monitorear y gestionar la eutrofización.²

El embalse del Rumblar es un embalse que también abastece de agua a la población. La proliferación de algas, especialmente las cianobacterias (algas verdeazuladas), puede producir toxinas peligrosas para la salud humana y animal. Detectar y controlar los niveles de clorofila-a es crucial para prevenir riesgos de salud pública asociados con el contacto y consumo de agua contaminada.

Se va a utilizar distintos índices como para determinar la clorofila tipo a, estos índices son:

Chl-a (Índice de clorofila tipo a)³

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)

GCI (Índice de Clorofila Verde)

² CMAOT. «Seguimiento de la calidad de aguas embalsadas». Accedido 17 de junio de 2024. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/seguimiento-de-la-calidad-de-aguas-embalsadas/20151.

³ Delegido et al., «Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO».

El índice de clorofila tipo a (Chl-a) se determina mediante un modelo empírico desarrollado para evaluar la clorofila-a en aguas continentales utilizando los futuros satélites Sentinel-2 y 3. Este modelo, elaborado por el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes de la Universidad de Valencia, ha sido validado con imágenes del sensor hiperespectral HICO a bordo de la Estación Espacial Internacional. Aunque el modelo analiza la respuesta de los sensores MSI y OLCI, en este estudio nos centraremos únicamente en el sensor MSI de Sentinel-2.

En este Laboratorio la determinación de las bandas y el modelo matemático óptimo para el Sentinel-2, se realizaron campañas de campo para tomar muestras de diversos lagos y medir los niveles de clorofila. Además, se utilizaron muestras de otro lago para la calibración y validación. Los datos de reflectividad obtenidos a partir de imágenes HICO se emplearon para validar el modelo calibrado propuesto.

La metodología utilizada consistió en aplicar varias relaciones matemáticas entre las reflectividades de diferentes bandas y diversos índices usados en la teledetección de la calidad del agua (Matthews, 2011), añadiendo otros índices y considerando las combinaciones de bandas aplicables al MSI del Sentinel-2. Las diferentes combinaciones de bandas se presentan en la Tabla 1.

No	Relación Matemática	Nombre
Modelos con 2 bandas		
A	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}}$	Cociente simple
B	$\frac{1}{R_{\lambda 1}} - \frac{1}{R_{\lambda 2}}$	Diferencia de inversas
C	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}$	Cociente de diferencia y suma tipo NDVI
Modelos con 3 bandas		
D	$\frac{R_{\lambda 1} R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de producto por banda
E	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2} R_{\lambda 3}}$	Cociente de banda por producto
F	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de diferencia por una banda
G	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de suma por una banda
H	$\left(\frac{1}{R_{\lambda 1}} - \frac{1}{R_{\lambda 2}} \right) \times R_{\lambda 3}$	Modelo tipo Dall'Olmo & Gitelson
Modelos con 4 bandas		
I	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} + R_{\lambda 4}}$	Cociente de sumas
J	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} + R_{\lambda 4}}$	Cociente de diferencia y suma
K	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} - R_{\lambda 4}}$	Cociente de diferencias
L	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} + \frac{R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Suma de 2 cocientes
M	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} - \frac{R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Diferencia de 2 cocientes
N	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Cociente de suma de 3 bandas por una

Tabla 1 Relaciones matemáticas empleadas para hallar la mejor correlación de la reflectividad con la concentración de clorofila-a. $R_{\lambda i}$ es la reflectividad en la longitud de onda λi .

Siguiendo el principio de parsimonia aplicado a la estadística⁴, que sugiere seleccionar la combinación más simple y reducida posible de variables explicativas en un modelo, el modelo

⁴ Burnham, *Model Selection and Multi-Model Inference*.

más recomendable para utilizar con el Sentinel-2 sería uno basado en las bandas más similares al modelo A. (Tabla 1)

Con el fin de aplicar el índice a un lago o embalse hipertrófico, los índices se han calibrado utilizando medidas de [Chl-a] y radiometría in situ. Así, se ha establecido el siguiente índice para determinar la clorofila tipo a (Chl-a) en aguas turbias.

$$(Chl - a) = 55.88 \times IS2 + 35.08$$

$$(Chl - a) \text{ se da en } \mu g/L$$

$$IS2 = \frac{R_{706}}{R_{490}} = \frac{B5}{B2}$$

Donde:

$B5$ = La reflectancia en la banda Red Edge 1.

$B2$ = La reflectancia en la banda del azul.

El uso de las bandas del "red edge" y del azul en el índice de clorofila tipo-a se basa en las propiedades espectrales específicas de la vegetación y su respuesta a diferentes longitudes de onda de luz.

La banda Red Edge (Red Edge1): Las bandas del "red edge" están situadas entre las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo cercano (Ilustración 5). Estas bandas son extremadamente sensibles a la concentración de clorofila en las plantas. La reflectancia en esta región del espectro aumenta significativamente con el contenido de clorofila, lo que la convierte en una excelente indicadora de la actividad fotosintética y la biomasa de la vegetación (Ilustración 6).

Banda Azul (Blue): La banda azul es utilizada porque la clorofila a y otras formas de clorofila tienen picos de absorción en la región azul del espectro. La luz azul es fuertemente absorbida por la clorofila (Ilustración 6), y esta característica es útil para diferenciar áreas con alta concentración de clorofila.

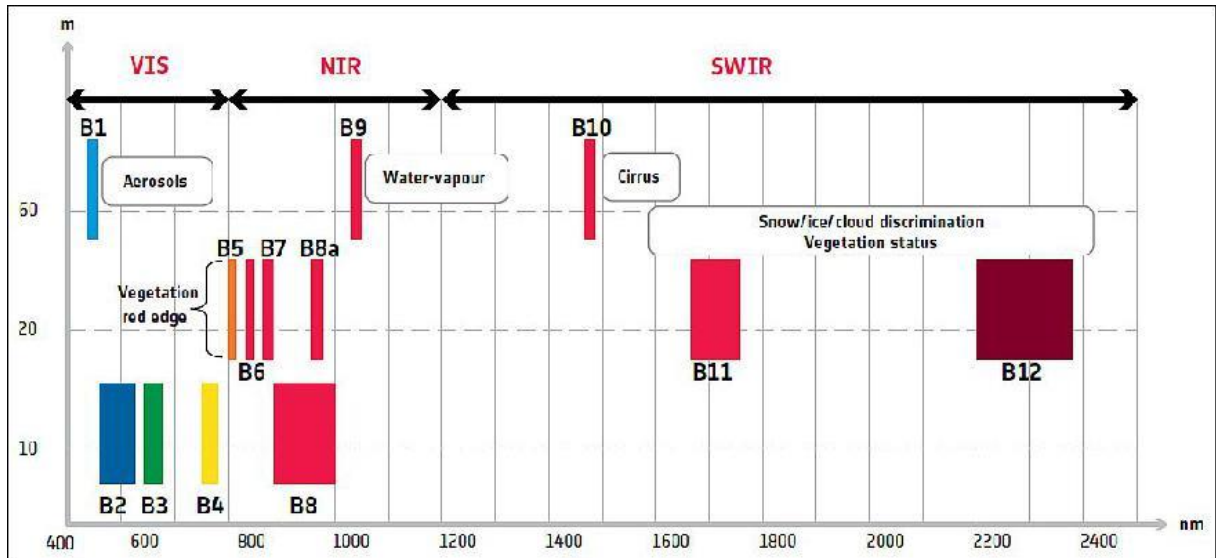


Ilustración 5: Bandas espectrales de Sentinel 2

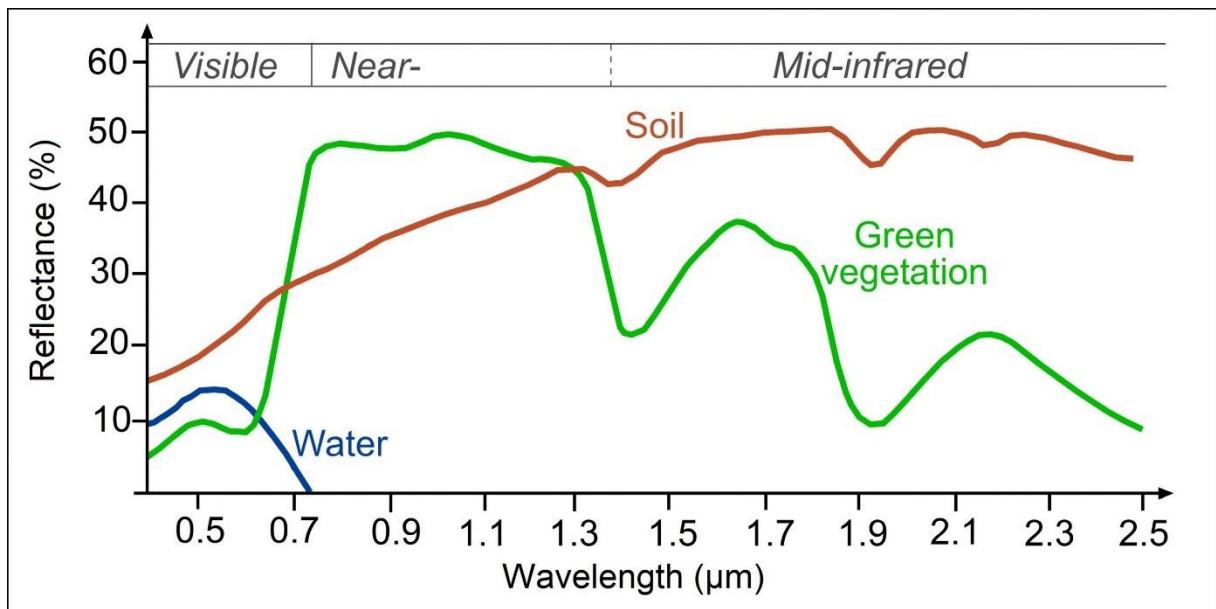


Ilustración 6: Gráfica de reflectancia de distintos cuerpos en distintas longitudes de onda

La combinación de las bandas "red edge" y azul en un índice específico para la clorofila tipo-a permite optimizar el contraste entre zonas con distintos niveles de clorofila. La banda azul aporta datos sobre la absorción de luz por la clorofila, lo que facilita la identificación de áreas con alta actividad fotosintética, mientras que la banda "red edge" ofrece información sobre la reflectancia vinculada a la estructura celular y el contenido de clorofila.

Otro de los índices que se aplicarán son el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el GCI (Índice de Clorofila Verde) en un modelo empírico para calcular la

clorofila tipo-a en aguas hipertróficas de embalses. Al combinar distintos índices, se obtiene una visión más completa y precisa de la concentración de clorofila tipo-a.

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Este índice es eficaz para detectar la densidad y la salud de la vegetación, proporcionando una medida general de la biomasa fitoplanctónica y la vegetación acuática.

Este índice aprovecha el contraste entre la fuerte absorción de la banda roja y la alta reflectancia de la banda NIR en la vegetación. Al hacer esto, el NDVI resalta las áreas con vegetación activa y permite distinguirlas claramente de otras superficies como el agua, el suelo desnudo y las áreas urbanas.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR = La reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

RED = La reflectancia en la banda del rojo.

El GCI (Índice de Clorofila Verde) es un índice más sensible a la presencia de clorofila, lo que lo hace ideal para detectar y cuantificar la biomasa de algas y plantas acuáticas. Se basa en el contraste entre la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del verde. Este contraste es crucial para detectar y cuantificar la clorofila en la vegetación, ya que las plantas con alta concentración de clorofila absorben fuertemente la luz en la banda verde y reflejan intensamente en la banda del infrarrojo cercano.

$$GCI = \frac{NIR}{GREEN} - 1$$

Donde:

NIR = La reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

GREEN = La reflectancia en la banda del verde.

La combinación de índices tiene los siguientes beneficios:

Visión Completa: Al combinar distintos índices, se puede capturar una gama más amplia de información sobre la vegetación y la calidad del agua, lo que resulta en una evaluación más robusta.

Detección Específica: Cada índice está diseñado para resaltar diferentes aspectos de la vegetación y la calidad del agua, proporcionando una mayor precisión en la detección y cuantificación de la clorofila tipo-a.

Análisis Detallado: La combinación de índices permite un análisis detallado de la vegetación y la biomasa fitoplanctónica, ayudando a identificar áreas problemáticas y a realizar un seguimiento efectivo de los cambios en la calidad del agua.

Esta combinación de índices es fundamental para mejorar la precisión y la calidad del análisis de clorofila tipo-a en aguas hipertróficas, lo que a su vez permite una mejor gestión y monitoreo de los embalses.

2.2. Análisis hidrográfico

Para realizar un análisis hidrográfico, primero debemos definir qué implica este tipo de análisis y el método que se utilizará. Este proceso se detallará en los siguientes apartados.

2.2.1. Concepto análisis hidrográfico.

El análisis hidrográfico es un proceso sistemático que implica la recopilación, interpretación y evaluación de datos relacionados con los recursos hídricos de una región específica. Este análisis se centra en el estudio de los cuerpos de agua, como ríos, arroyos, lagos, embalses y cuencas hidrográficas, así como en los procesos hidrológicos asociados, como la precipitación, la escorrentía, la infiltración, la evaporación y la recarga de acuíferos. En los cuales nos centraremos en el estudio de las zonas de drenaje y la escorrentía del agua.

El objetivo principal del análisis hidrográfico es comprender la distribución, el comportamiento y la calidad del agua en un área determinada, así como los factores que influyen en estos aspectos. Esto puede incluir la evaluación de la disponibilidad de agua, la calidad del agua, la erosión del suelo, los riesgos de inundación, la gestión de recursos hídricos y los impactos ambientales y sociales asociados con el uso y la gestión del agua.

El análisis hidrográfico utiliza una variedad de técnicas y herramientas, como la recolección de datos en campo, el uso de tecnología de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), modelos hidrológicos y análisis estadístico. Los resultados del análisis hidrográfico pueden utilizarse para informar la toma de decisiones en la planificación del uso del suelo, la gestión de cuencas hidrográficas, la gestión de riesgos de inundación, la conservación de recursos naturales y la protección del medio ambiente.

En este trabajo nos vamos a centrar El análisis hidrográfico de pendientes y drenaje de aguas es un proceso que implica el estudio detallado de la topografía de un área específica para comprender cómo el terreno afecta el movimiento del agua. Este análisis se centra en dos aspectos principales:

Pendientes: Se refiere a la inclinación del terreno en diferentes partes de la cuenca hidrográfica. El análisis de pendientes implica identificar y medir las variaciones en la elevación del terreno para determinar las áreas donde el agua tiende a fluir hacia abajo con mayor rapidez. Esto es crucial para comprender la dirección del flujo de agua y para prever áreas propensas a la erosión, la escorrentía y los posibles riesgos de inundación.

Drenaje de aguas: Se refiere al patrón de drenaje natural de un área, es decir, cómo el agua fluye y se acumula en la superficie terrestre. El análisis del drenaje de aguas implica identificar y mapear los cursos de agua, como ríos, arroyos y canales, así como las redes de drenaje natural, como los sistemas de arroyos y sus afluentes. Esto ayuda a comprender cómo se conectan los diferentes cuerpos de agua y cómo se distribuye el flujo de agua dentro de la cuenca hidrográfica.

En conjunto, el análisis hidrográfico de pendientes y drenaje de aguas proporciona información crucial para comprender la hidrología de un área, identificar áreas de donde proceden las aguas, y planificar medidas de gestión y conservación de los recursos hídricos. Este análisis se realiza típicamente utilizando herramientas como sistemas de información geográfica (SIG), modelos de elevación digital (DEM) y análisis de terreno.

2.2.2. Método específico de análisis.

Entre las características más destacadas que se pueden calcular de un Modelo Digital de Elevación (MDE) se encuentra la dirección de flujo, la cual describe cómo el agua se mueve a través de las celdas y, por lo tanto, afecta numerosas formulaciones y enfoques adicionales.

El comportamiento de una celda como unidad aislada en cuanto al flujo de agua se ve directamente influenciado por las celdas circundantes, ya que la relación entre la altura de cada una y la celda central indica la dirección del flujo. Esta dirección se fundamenta en el principio de que el agua siempre se desplaza hacia la menor pendiente posible, es decir, hacia la dirección de máxima inclinación.

El procedimiento implica calcular, a partir de la celda central, el patrón de movimiento del agua desde esa posición, un problema que puede abordarse de diversas maneras. El ráster de Dirección de Flujos se calcula utilizando el método FILL Sink Wand y Liu, el cual se basa en el método específico D8⁵.

El método D8 es una técnica que determina la dirección del flujo del agua en un Modelo Digital de Elevación (DEM). Este método se basa en la premisa de que el agua fluye cuesta abajo en la dirección de la pendiente más pronunciada en cada celda vecina. Su funcionamiento se puede resumir en los siguientes pasos:

Malla regular de celdas: El área de estudio se divide en una malla de celdas, donde cada celda tiene una elevación asociada.

Cálculo de pendientes: Para cada celda, se calcula la pendiente hacia las celdas vecinas. Esto se hace comparando la elevación de la celda actual con las elevaciones de las celdas vecinas y dividiendo por la distancia entre las celdas (generalmente la longitud del lado de la celda en el DEM). Se busca la diferencia de altura más grande entre la celda actual y sus vecinas.

Identificación de la dirección de flujo: La dirección de flujo se determina seleccionando la celda vecina con la pendiente más pronunciada. Esto significa que el agua fluye hacia la celda

⁵ O'Callaghan, John F., y David M. Mark. «The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data». *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28, n.o 3 (diciembre de 1984): 323-44. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)

vecina con la elevación más baja y la mayor pendiente. En el método D8, se consideran ocho direcciones posibles de flujo: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

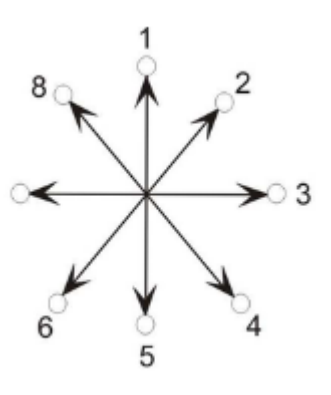


Ilustración 7: Dirección de flujo. 8 direcciones.

Asignación de dirección de flujo: Se asigna a cada celda una dirección de flujo basada en la dirección hacia la cual el agua fluiría desde esa celda, según lo determinado en el paso anterior. Por lo general, se utilizan codificaciones específicas para representar estas direcciones.

Construcción de una red de drenaje: Al aplicar este método a todas las celdas en el DEM, se puede construir una red de drenaje que representa cómo fluye el agua a través del terreno. Esta red de drenaje es útil para analizar la distribución del agua en el paisaje y para estudiar la morfología de las cuencas hidrográficas.

En resumen, el método D8 funciona al calcular la pendiente entre una celda y sus vecinas y luego asignar una dirección de flujo hacia la celda vecina con la pendiente más pronunciada. Esto se repite para todas las celdas en el DEM, lo que permite construir una red de drenaje completa.

3. Materiales.

El trabajo se basa en material previo, incluyendo una serie de imágenes capturadas por el sensor MSI del Sentinel-2 y un modelo de elevaciones de la zona de estudio. A continuación, se explica cómo se obtiene cada uno de estos elementos.

3.1 Adquisición de imágenes.

Las imágenes examinadas en este estudio son adquiridas por satélites de la serie Sentinel-2A y pertenecen al tipo de producto MSI (Instrumento Multiespectral). Estas imágenes contienen diversas bandas espectrales que proporcionan información adicional no captada por los receptores rojo, verde y azul (RGB) del ojo humano, permitiendo así obtener datos suplementarios. Su aplicación se extiende a la medición de la concentración de clorofila en el agua, facilitando la detección de posibles contaminaciones por organismos vegetales y la eutrofización, que implica la acumulación de residuos orgánicos y nutrientes, propiciando la proliferación de algas.

La categoría A en el satélite Sentinel-2 indica que el producto presenta reflectancia multiespectral referida al fondo de la atmósfera, además de estar ortorrectificado y geocodificado a UTM. Estas imágenes son proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA), que está desarrollando la familia de satélites conocida como Sentinel. El programa Copernicus utiliza estos productos para monitorear la superficie terrestre, y actualmente, hay dos constelaciones completas de satélites en órbita. A través del portal Copernicus Open Access Hub, es posible filtrar y seleccionar las imágenes satelitales necesarias, tanto en términos temporales como espaciales, y también especificar el tipo de producto de cada imagen.

3.2 Obtención del modelo digital de elevaciones.

El análisis emplea un modelo digital de elevaciones adquirido de la plataforma de descargas del CNIG (IGN). Dentro de las opciones disponibles ofrecidas por el Instituto Geográfico Nacional, el Modelo Digital de Superficies (MDS05) destaca como la elección más idónea para este estudio debido a sus características específicas. Este modelo digital de superficies corresponde a la primera cobertura y cuenta con una resolución de 5 metros entre cada punto de la malla.

El término "Modelo Digital de Superficies 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m" se refiere a un tipo particular de modelo digital de elevación (DEM) que abarca una región con una resolución espacial de 5 metros entre cada punto de la malla. A continuación, se detalla más sobre esta categoría:

Modelo Digital de Superficies (MDS): Representa digitalmente la topografía de una zona específica, almacenada generalmente en una base de datos, proporcionando datos sobre la elevación del terreno en cada punto de una cuadrícula digital.

1ª Cobertura: Indica que se trata de la primera versión del modelo para una región específica, pudiendo haber versiones posteriores con mayor detalle, precisión o distintas características.

Paso de malla de 5 m: Se refiere al tamaño de la cuadrícula o malla utilizada para dividir la región, donde cada punto de la malla representa una ubicación en el terreno con una elevación asociada. En este caso, la distancia entre puntos de la malla adyacente es de 5 metros.

Por lo tanto, un "Modelo Digital de Superficies 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m" proporciona información detallada sobre la topografía de una región específica con una resolución de 5 metros entre cada punto de elevación registrado en la malla digital. Este tipo de modelo es valioso en diversas aplicaciones, como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales, los estudios ambientales, entre otros.

El modelo utiliza el sistema de referencia de coordenadas (SRC) ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, mientras que en las Islas Canarias emplea REGCAN95 (ambos son compatibles con WGS84). La proyección UTM se aplica según el huso correspondiente en ambas áreas. Además, se utilizan alturas ortométricas.

La unidad de descarga son hojas del Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:50.000 (MTN50). Estos mapas son un conjunto detallado de mapas topográficos de España, producidos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

4. Metodología de procesamiento

Tal como indica el título, en este apartado se describe la metodología empleada en las dos áreas en las que se ha desarrollado el trabajo. La primera se enfoca en el procesamiento de imágenes de Sentinel-2, mientras que la segunda aborda el análisis hidrográfico basado en el modelo de elevaciones (MDE). Ambas secciones incluyen la selección y descarga de los datos necesarios, así como el procesamiento de estos mediante los programas correspondientes.

4.1 Procesamiento de imágenes Sentinel-2.

Para el procesamiento de imágenes, se desarrollan a continuación dos puntos: el primero corresponde a la selección y descarga de imágenes, donde se establecen los requisitos que deben cumplirse para ello; el segundo punto detalla cómo se llevará a cabo el procesamiento de las imágenes seleccionadas y el software que se emplea para ello.

4.1.1. Selección y descarga de imágenes.

Para este estudio se requerirán cuatro colecciones de imágenes Sentinel-2, cada una correspondiente a una estación del año. El período de estudio abarcará desde el inicio del invierno de 2022 hasta el final del otoño de 2023.

Para seleccionar las imágenes útiles, se han establecido varios parámetros, incluyendo la condición de que la cobertura de nubes no supere un cierto porcentaje del total de la imagen, fijado en este caso en un 20%.

El resultado de imágenes seleccionadas por cada estación es el siguiente:

Invierno (7 elementos)

Image COPERNICUS/S2/20221224T110359_20221224T110355_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230123T110249_20230123T110244_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230128T110321_20230128T110932_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230202T110159_20230202T110153_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230222T105949_20230222T110744_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230227T110011_20230227T110622_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230304T105849_20230304T110115_T30SVH (16 bands)

Primavera (6 elementos)

Image COPERNICUS/S2/20230329T105631_20230329T105928_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230408T105621_20230408T105923_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230418T105621_20230418T105911_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230423T105619_20230423T105914_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230513T105619_20230513T110726_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230617T105621_20230617T110817_T30SVH (16 bands)

Verano (15 elementos)

Image COPERNICUS/S2/20230622T105629_20230622T110502_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230627T105621_20230627T110712_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230702T105629_20230702T105830_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230707T105621_20230707T105914_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230712T105629_20230712T105830_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230717T105621_20230717T110706_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230722T105629_20230722T105831_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230727T105621_20230727T110753_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230801T105629_20230801T105834_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230806T105621_20230806T105928_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230816T105631_20230816T110544_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230821T105629_20230821T110322_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230831T105629_20230831T110145_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230905T105621_20230905T110749_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230920T105639_20230920T110329_T30SVH (16 bands)

Otoño (10 elementos)

Image COPERNICUS/S2/20230925T105801_20230925T110416_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20230930T105749_20230930T110147_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231005T105911_20231005T110128_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231010T105859_20231010T110442_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231015T110011_20231015T110621_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231114T110311_20231114T110922_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231119T110249_20231119T110243_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231124T110351_20231124T110957_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231214T110441_20231214T110444_T30SVH (16 bands)
Image COPERNICUS/S2/20231219T110359_20231219T110358_T30SVH (16 bands)

4.1.2. Procesado en Google Earth Engine (GEE).

4.1.2.1. Conocer Google Earth Engine (GEE).

- Registro para el uso de GEE JavaScript API

Para comenzar a utilizar la API de JavaScript de Google Earth Engine (GEE), el primer paso es visitar su sitio web y registrarse como usuario (<https://earthengine.google.com/>). Después de registrarse, hay que dirigirse a la esquina superior derecha y haz clic en la opción "Get Started". Luego, completa el formulario con todos los datos solicitados.

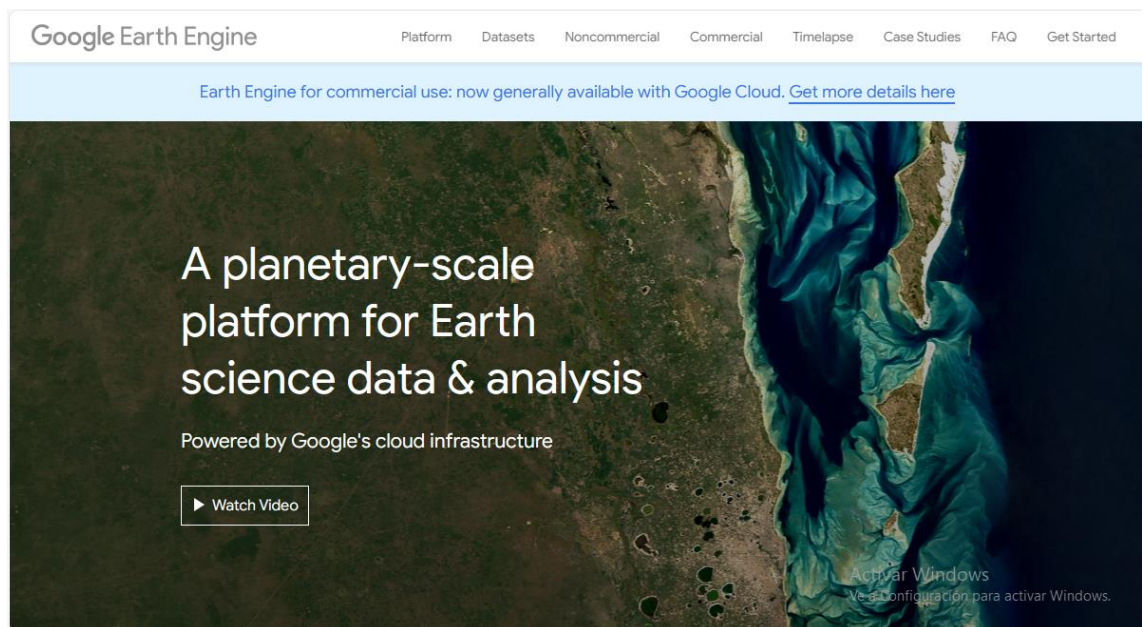


Ilustración 8: Portal de Google Earth Engine.

Una vez completado el registro, deberás esperar un tiempo variable (que puede ser desde minutos hasta días) para recibir una confirmación por correo electrónico de parte de GEE, indicando que la API está disponible para su uso.

Una vez que recibas la confirmación, podrás acceder a la API utilizando el siguiente enlace: <https://code.earthengine.google.com/>. Inicia sesión utilizando la cuenta de Google que registraste previamente.

- Elementos básicos de la interfaz gráfica

Una vez abierta la API de JavaScript, se observan cuatro pantallas: la pantalla de repositorios, la pantalla de rutinas, la pantalla de mapa y la pantalla de control. (Ilustración 9)

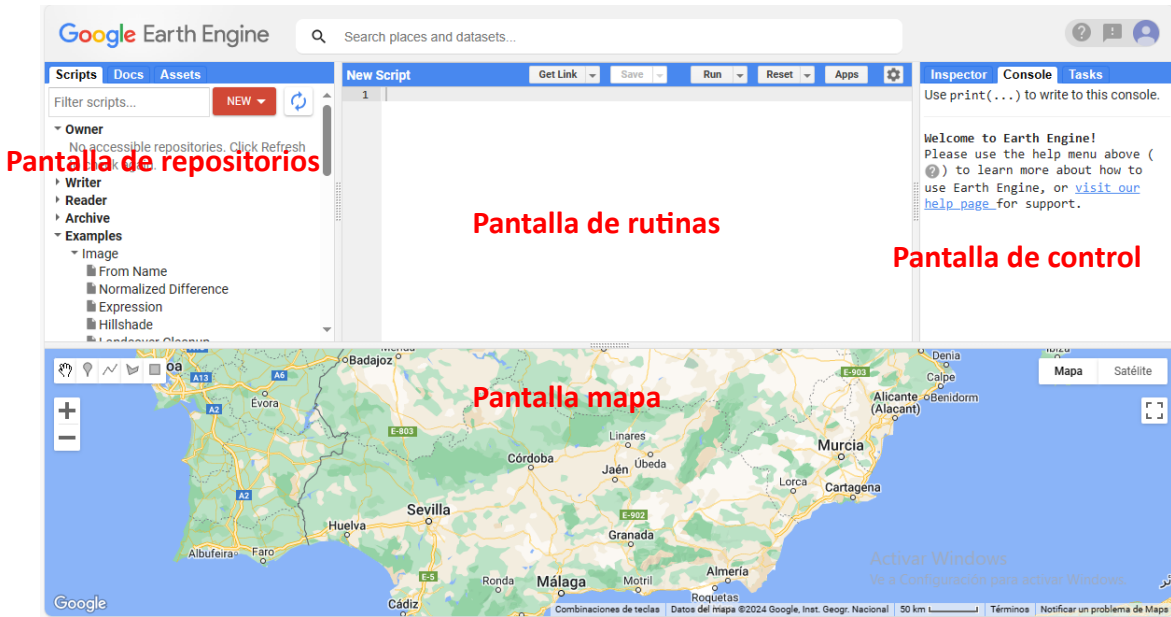


Ilustración 9: Pantalla principal de GEE.

Pantalla de repositorios.

Scripts

La sección de repositorios es el área designada para almacenar y estructurar las rutinas o scripts del usuario. En este espacio, es posible crear repositorios y carpetas con el fin de organizar los archivos de código.

En esta pantalla, se encuentran varias categorías, siendo las primeras tres empleadas para establecer diferentes niveles de acceso para diversos usuarios, como se observa en la Ilustración 10.

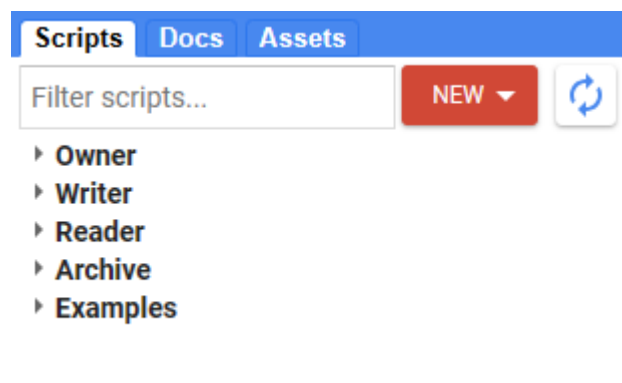


Ilustración 10: Ventana Scripts.

1. Owner (Propietario): en esta sección se guardan los códigos creados por el mismo usuario.
2. Writer (Editor): en este apartado se guardan códigos que pueden ser creados por otros usuarios, pero que estamos autorizados a modificar.
3. Reader (Lector): en esta parte aparecen códigos que otros usuarios nos han compartido, pero no estamos autorizados a modificar.
4. Examples (Ejemplos): se pueden consultar ejemplos de código para hacer algunas tareas específicas. Por ejemplo, existe un apartado específico para consultar las distintas maneras de enmascarar nubes utilizando diferentes colecciones de imágenes (por ejemplo: Landsat 4-7, Landsat 8-9, Sentinel-2, MODIS).
5. Archive (Archivo): se pueden guardar archivos de código que ya no se utilicen, pero que no se desea eliminar.

Docs (Documentos)

Esta sección proporciona una referencia completa de todos los métodos y algoritmos preprogramados y cargados en Google Earth Engine (GEE), como se muestra en la Ilustración 11. Cada método se presenta con información detallada sobre su función, los datos de entrada necesarios, el tipo de objeto que se genera como resultado, así como los argumentos específicos del método, tal como se describe en la Ilustración 12. Estos métodos están organizados por objetos del servidor (que se explican más adelante).

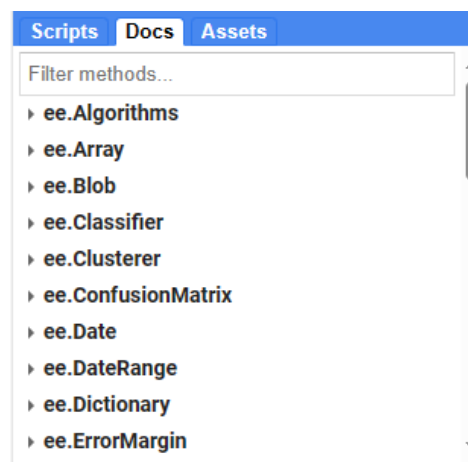


Ilustración 11: Ventana Docs.

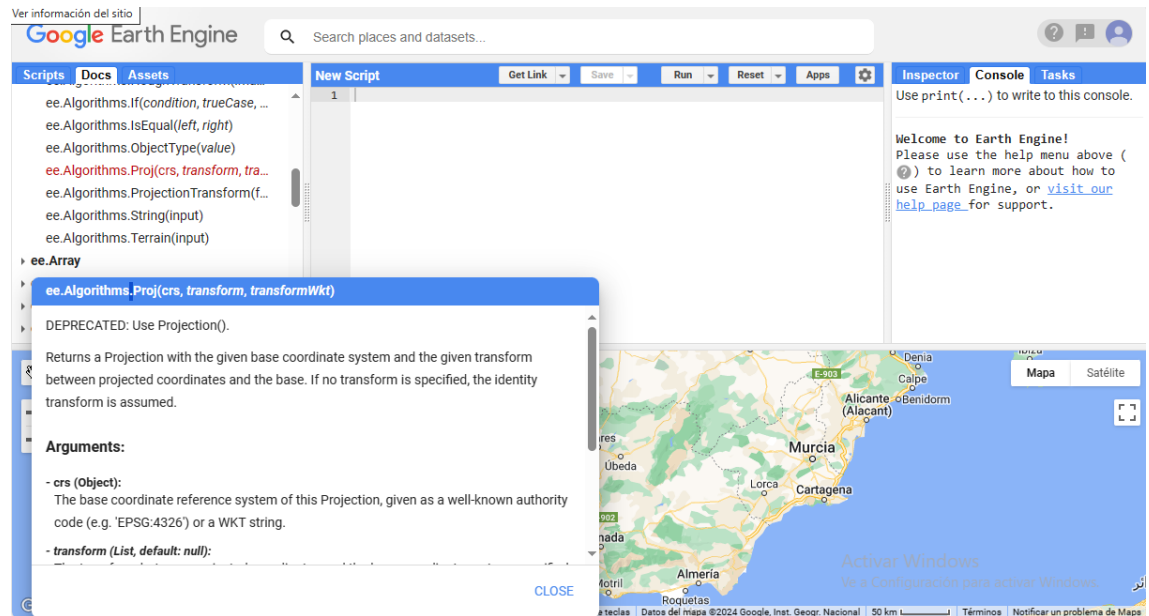


Ilustración 12: Ayuda de ejemplos de algoritmos.

Adicionalmente, la documentación cuenta con una función de búsqueda que permite consultar los métodos de manera eficiente.

Assets

Cuando se accede por primera vez a la sección de "Assets", es necesario crear una carpeta principal (Home Folder) para almacenar la información que se planea importar a Google Earth Engine (GEE). Se sugiere asignar a esta carpeta el nombre del usuario, como se muestra en la Ilustración 13.

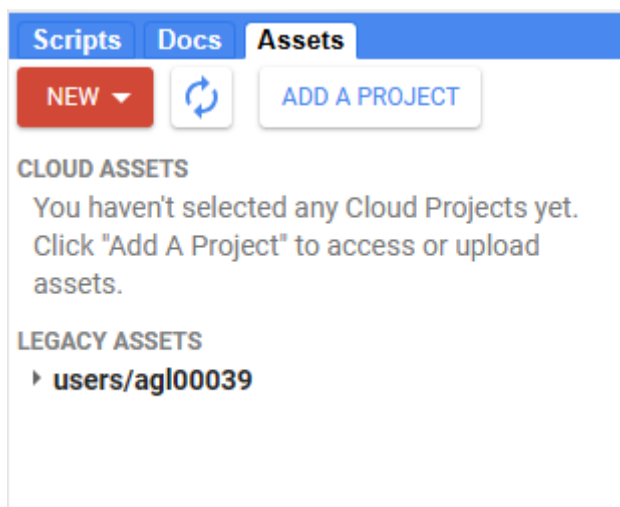


Ilustración 13: Ventana Assets.

En esta sección, el usuario tiene la posibilidad de cargar y almacenar su propia información para utilizarla en Google Earth Engine (GEE). Puede cargar archivos únicamente en formatos raster, vector (como archivos .shp con sus archivos auxiliares o un archivo .zip), o en formato de valores separados por comas

Pantalla de rutinas.

Esta ventana es el espacio destinado para escribir el código en JavaScript (Ilustración 14) y dispone de varios botones en la parte superior. El primero, "Get Link", permite compartir el código actual a través de un enlace. Además, al hacer clic en la flecha de despliegue (dentro de la opción "Manage Links"), se puede gestionar los enlaces activos, incluyendo la posibilidad de eliminar aquellos que ya no son necesarios.

A la derecha se ubica el botón "Save", el cual facilita la tarea de guardar el código en el que se está trabajando (Ilustración 14). Además, al hacer clic en la flecha desplegable, se puede acceder a la opción "Save as" para generar una copia del código con un nombre diferente.

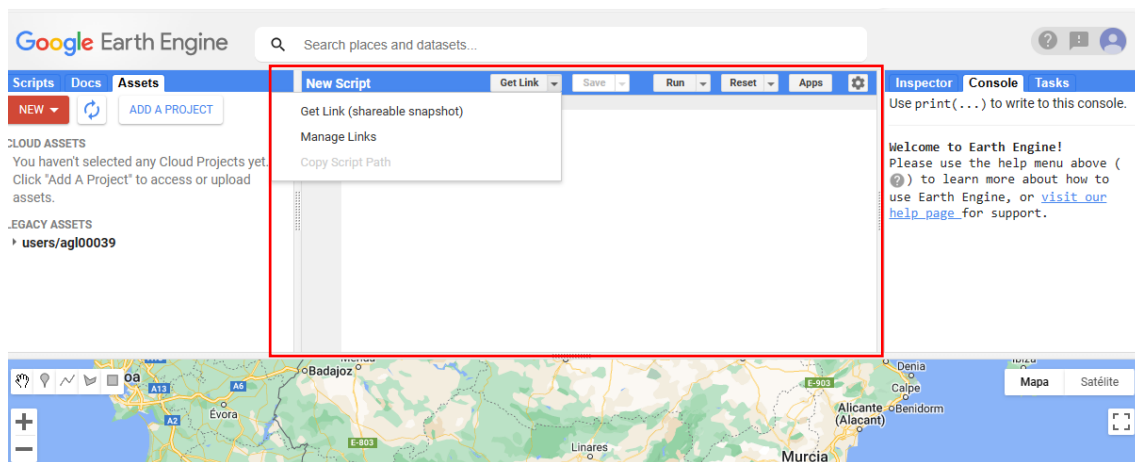


Ilustración 14: Ventana donde se escriben los comandos.

A continuación, se presenta el botón "Run", diseñado para ejecutar, de principio a fin, el código mostrado en la ventana de scripts. Al hacer clic en este botón, el código se envía a los servidores de Google y se lleva a cabo el procedimiento correspondiente. Justo a su derecha, se encuentra el botón "Reset", cuya función es borrar todo el código escrito en la ventana de scripts.

Seguido, está el botón "Apps", utilizado para crear aplicaciones a partir del código presente en la pantalla. Aunque la creación de aplicaciones no se aborda, este proceso implica

la generación de programas con una interfaz amigable, facilitando el uso del código para usuarios sin conocimientos en GEE. Para ver ejemplos de aplicaciones construidas en GEE, puede consultar el siguiente enlace: <https://www.earthengine.app/>.

Finalmente, en el botón de configuración (engranaje), se encuentran opciones para activar o desactivar líneas de código, resaltar sugerencias en la pantalla de scripts, o autocompletar símbolos como comillas simples ('), comillas dobles (""), paréntesis (()), corchetes ([]), y llaves ({}).

Pantalla de control.

La interfaz de control consta de tres pestañas: Inspector (inspector), Console (consola) y Tasks (tareas). Esta sección permite al usuario realizar consultas sobre la información en proceso o gestionar tareas de exportación de datos. A continuación, se proporciona una descripción de cada una de estas pestañas.

Inspector (inspector)

Facilita la consulta de los valores de las capas que están visibles en el mapa al hacer clic sobre un punto de interés.(Ilustración 15)

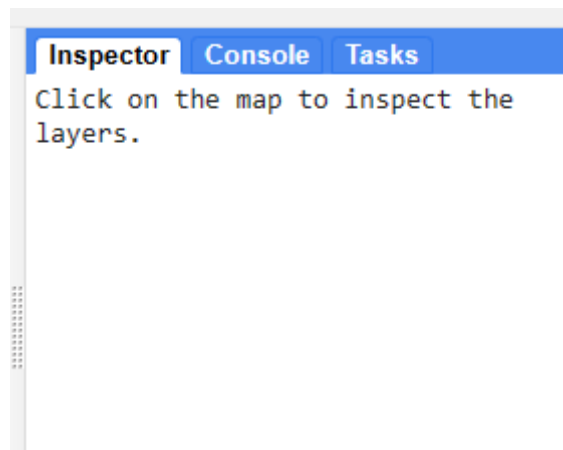


Ilustración 15: Ventana Inspector.

Console (consola)

La consola constituye la interfaz de comunicación con el servidor (Ilustración 16). En este espacio, se visualizan los errores que pueden surgir al ejecutar un código, así como la información proporcionada mediante la función print.

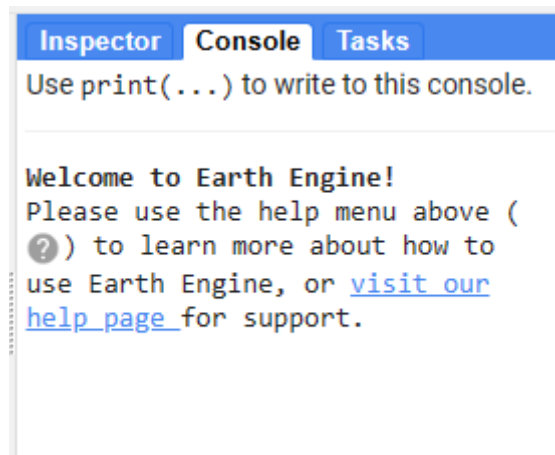


Ilustración 16: Ventana Consola.

Tasks (tareas)

En la pestaña de "Tasks", se exhiben las tareas exportadas mediante la función Export y brinda la capacidad de ejecutar el proceso de exportación al destino especificado por el usuario (ya sea Google Drive, assets, etc.). Además, esta pestaña ofrece varias funcionalidades:

- Mostrar las tareas listas para ejecutarse, mediante el botón "Run", el cual permite especificar detalles de la exportación.
- Presentar las tareas en curso, identificadas por un color gris.
- Indicar el tiempo empleado en la ejecución de una tarea.
- Notificar cuando se completa una tarea, representada en color azul.
- En caso de errores en algún objeto exportado, se marca la tarea en rojo.
- Al hacer clic sobre el signo de interrogación que aparece al colocar el cursor sobre una tarea, se obtiene información adicional, como la ubicación del archivo exportado o detalles sobre el error que pudo haber surgido durante la exportación.

Pantalla mapa.

En esta interfaz (Ilustración 17), se ofrece la posibilidad de realizar las siguientes acciones:

- Crear y visualizar puntos, polígonos, líneas o rectángulos.
- Visualizar información agregada mediante la función Map.addLayer.
- Incorporar un mapa base, eligiendo entre Google Maps o Google Earth.



Ilustración 17: Venta Visor.

4.1.2.2. Desarrollo proyecto en GEE.

Primero, se debe crear un proyecto. Luego, procedemos a importar las variables de entrada, como las imágenes del Sentinel-2 MSI (Ilustración 18): Instrumento Multiespectral, nivel-2A (ortorrectificadas y con reflectancia a nivel de superficie - BOA), es decir, imágenes corregidas atmosféricamente.

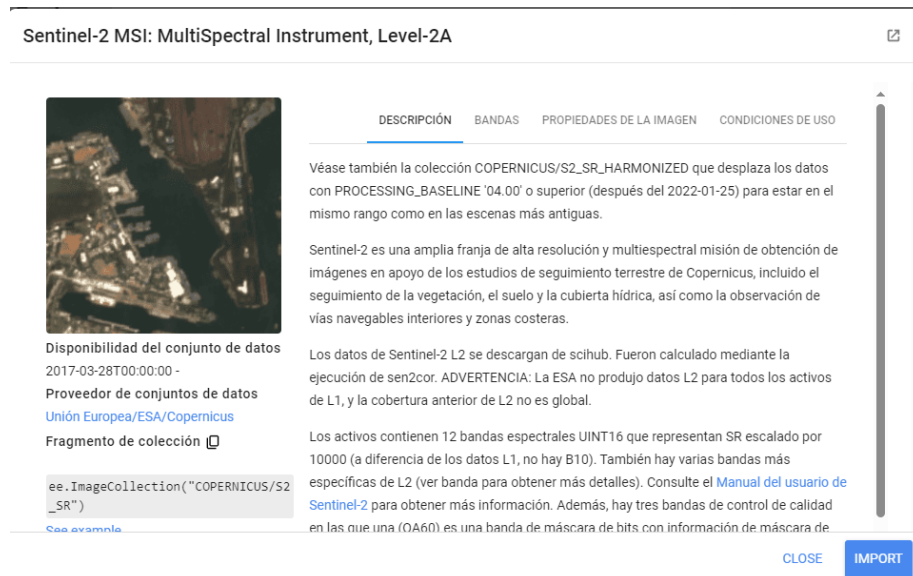


Ilustración 18: Información datos Sentinel 2

La otra variable es el polígono de la zona de estudio, que corresponderá a los límites de la cuenca del embalse del Rumbalar, obtenidos de la Sede Electrónica del Catastro. (Ilustración 19)

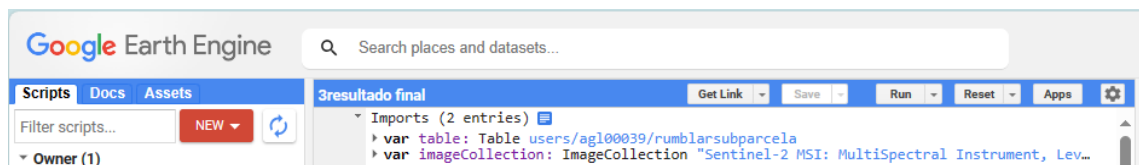
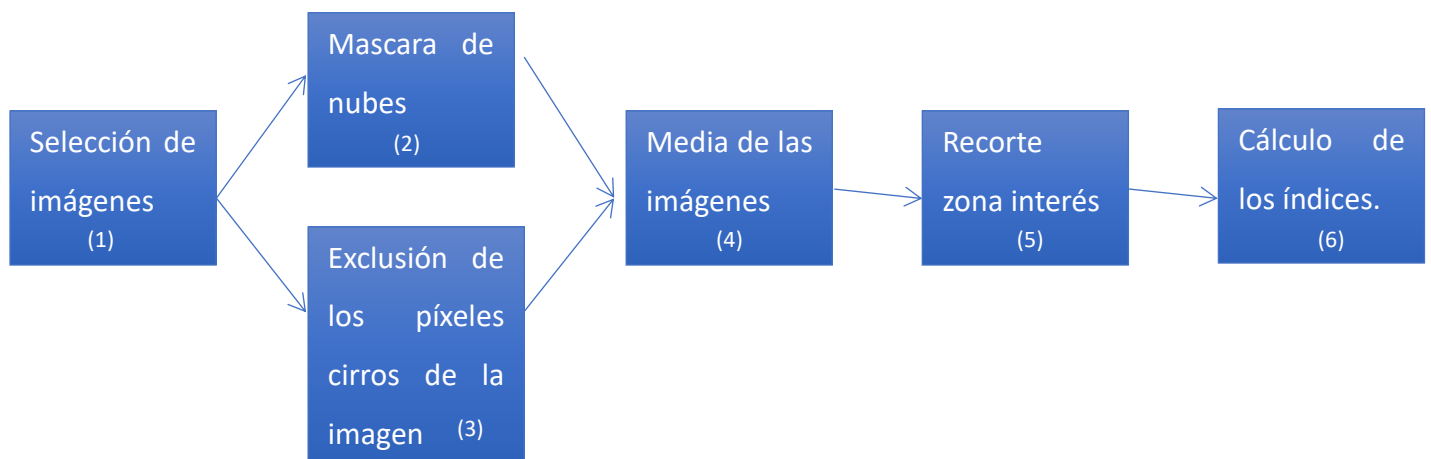


Ilustración 19: Variables importadas.

Una vez cargada toda la información, procedemos a escribir los códigos en lenguaje JavaScript para procesar las imágenes (Anexo 1), siguiendo el esquema de procesamiento establecido (Esquema 1).



Esquema 1: Procesado de imágenes Sentinel-2.

Para la selección de imágenes (1), lo primero que hacemos en la 'Pantalla de rutina' es definir las variables. Primero, establecemos la variable zona, que corresponderá al polígono de trabajo. Luego, definimos las variables de tiempo, especificando el año al que corresponderá el estudio. Dado que la estación de invierno abarca dos años diferentes, establecemos dos variables de tiempo para cubrir este período (Código 1).

```
//print('area', area);  
  
var zona = table;  
  
Map.centerObject(zona, 16);  
Map.addLayer(zona, {}, 'area');  
  
// Definimos variables de tiempo.  
  
var year2 = '2023'  
  
var year1= '2022'
```

Código 1: Código donde se define la variable de la zona de trabajo y la variable del intervalo de tiempo.

A continuación, se establecen los intervalos de tiempo correspondientes a cada estación del año, indicando día y mes, mientras que el año se define mediante la variable establecida anteriormente (Código 2).

```
//Primavera

var startdate1 = year2+'-03-20';

var enddate1 = year2+'-06-20';

//Verano

var startdate2 = year2+'-06-21';

var enddate2 = year2+'-09-22';

//Invierno

var startdate3 = year1+'-12-21';

var enddate3 = year2+'-03-19';

//Otoño

var year = '2023'

var startdate = year+'-09-23';

var enddate = year+'-12-20';


print(startdate1, enddate1);
print(startdate2, enddate2);
print(startdate3, enddate3);
print(startdate, enddate);
```

Imprimirá los valores correspondientes a esas variables,
ejemplo: **2023-01-01 2023-03-31**

Código 2: Código donde se establece el intervalo de tiempo para cada estación del año.

Entonces, las imágenes seleccionadas deben cumplir con un máximo de nubes establecido, que en este caso es del 20%. Aquellas imágenes dentro de cada periodo de tiempo establecido que superen este porcentaje son descartadas. Además, las imágenes

seleccionadas deben aplicar una máscara para excluir los píxeles identificados como nubes (2) y cirros (3) (Código 3).

Los cirros, en una imagen Sentinel-2, son un tipo de nube alta y delgada que se encuentra en la atmósfera superior. Estas nubes están compuestas principalmente de cristales de hielo y se presentan como filamentos blancos y finos en las imágenes satelitales.

Se enmascaran o excluyen los píxeles identificados como nubes y cirros en las imágenes Sentinel-2 porque estos elementos pueden distorsionar los datos de reflectancia de la superficie terrestre. Al eliminar estos píxeles, se mejora la precisión y calidad del análisis, permitiendo obtener información más fiable sobre el terreno y la vegetación.

```
//Función para enmascarar nubes y cirros de la imagen

function MascaraNubesS(image) {

  var qa = image.select('QA60');

  var RecorteNubesMascaraS = 1 << 10

  var RecorteCirrosMascaraS = 1 << 11

  var MascaraS = qa.bitwiseAnd(RecorteNubesMascaraS).eq(0)

    and(qa.bitwiseAnd(RecorteCirrosMascaraS).eq(0));

  return image.updateMask(MascaraS);}
```

Código 3: Función para enmascarar nubes y cirros de las imágenes.

```
// Colección Sentinel 2 y aplicación de la mascara.
```

```
var ColeccionSentinel1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
```

```
  filterDate(startdate1,enddate1)
```

```
  //.filterBounds(poligono1)
```

```
  filterBounds(zona)
```

```
  //.filterBounds(geometry)
```

```
  filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE' 'Less_Than' 20)
```

```
  map(MascaraNubesS);
```

Se seleccionan las imágenes de la zona de estudio dentro del período de tiempo establecido, el porcentaje de nubes máximo, y a cada una de ellas se le aplica la máscara de nube y cirros. Este proceso se repite para cada estación del año.

Código 4: Selección de la colección de imágenes Sentinel-2 y aplicación de la mascara

Una vez obtenida la colección de imágenes de cada período, se requiere una única imagen que será utilizada para el análisis. Por lo tanto, se calcula la media de cada colección de imágenes (4) y se recorta el área de interés (5). En este punto, se establece mediante el código el índice de las imágenes utilizadas en el proceso de la media (Ilustración 20). Esto nos permite conocer el nombre de cada imagen utilizada y los datos asociados a cada una de ellas, por si en algún momento necesitamos consultarlos. Por ejemplo, podemos verificar el porcentaje de nubes y cirros presentes en cada imagen para asegurarnos de que la selección se realizó correctamente.

```

var Vegetacion1 = ee.Image(ColeccionSentinel1.mean());

var Vegetacion1 = Vegetacion1.clip(zona); // media de todas las imágenes en 1 solo
producto y recorte de la zona de interés.

print 'Media imagenes primavera' Vegetacion1);

var cantidad1 = ColeccionSentinel1.size(); //cantidad de imágenes sentinel
seleccionadas según los filtros

print('Cantidad imagenes primavera',ColeccionSentinel1);

```

Código 5: Código para la media de todas las imágenes y recorte de esta de la zona de interés.

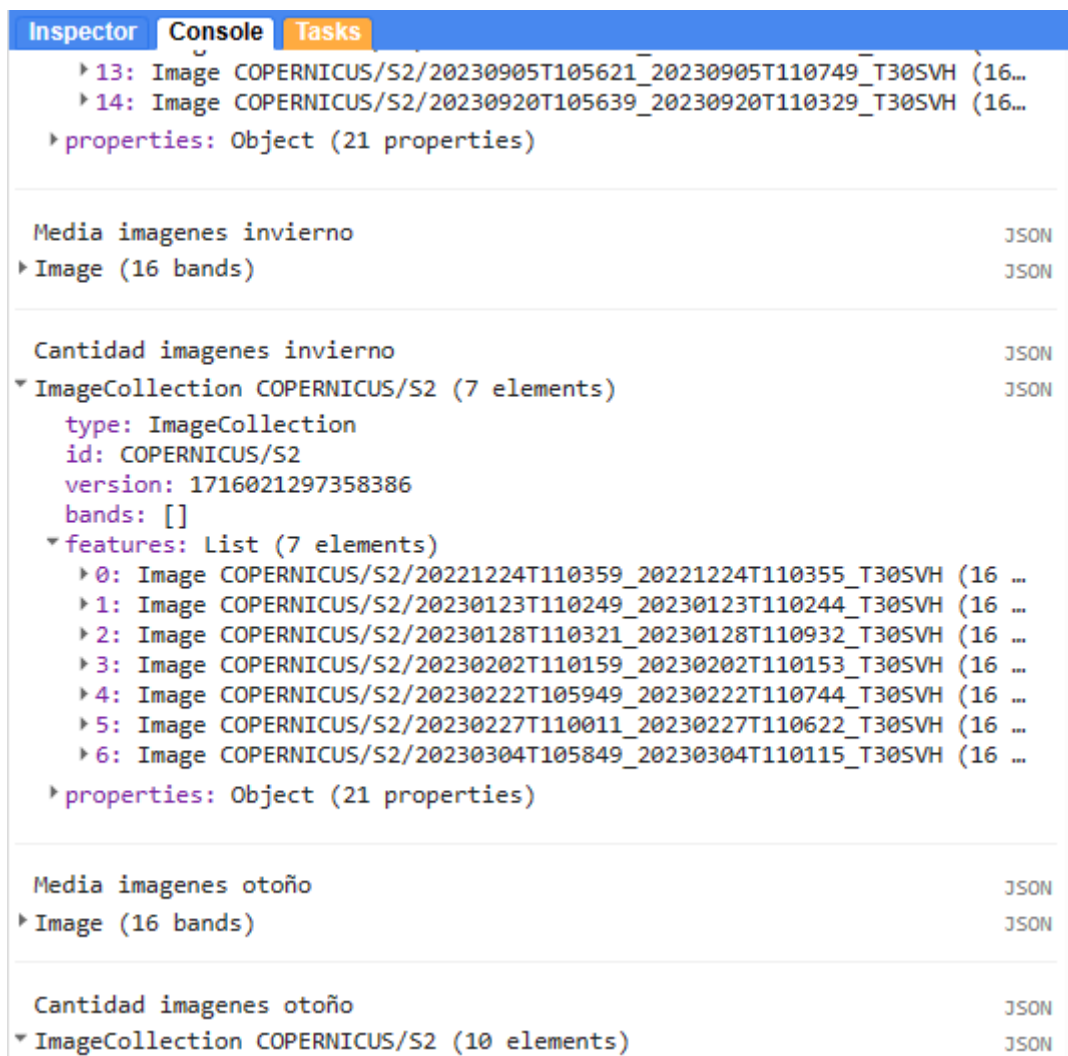


Ilustración 20: Ejemplo del índice de imágenes usadas en la estación de invierno.

A partir de ahora, con la imagen obtenida de la media de cada estación, calculamos los diferentes índices para detectar clorofila en el embalse (NDVI, GCI y Chl-a) (6). Para simplificar la referencia a la banda correspondiente de cada imagen, asignamos un nombre corto. De esta manera, al escribir la ecuación, evitamos errores y simplificamos la nomenclatura.

```
//Cálculo de índices para primavera

// NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

var NDVI1 = Vegetacion1.expression('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))', {

  'NIR': Vegetacion1.select('B8'),

  'RED': Vegetacion1.select('B4')});


// GCI (Green Chlorophyll Index)

var GCI1 = Vegetacion1.expression('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', {

  'NIR': Vegetacion1.select('B8'),

  'GREEN': Vegetacion1.select('B3')});


// Chla_a (Index for Hypertrophic Waters)

var Chla_a1 = Vegetacion1.expression('float (55.83*((RED_EDGE_1)/(BLUE))+35.08)', {

  'BLUE': Vegetacion1.select('B2'),

  'RED_EDGE_1': Vegetacion1.select('B5')});
```

Código 6: Código para calcular cada uno de los índices.

En Google Earth Engine (GEE), tenemos la opción de visualizar los resultados de los elementos calculados en la 'ventana de mapa'. Para ello, debemos establecer una paleta de colores para los diferentes índices. En esta paleta, los colores están determinados por códigos, y a continuación representarlos.

```
// Simbología NDVI

var color = {

  min: 0.0,

  max: 1.0,

  palette: [

    'FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901',

    '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201', '004C00', '023B01',

    '012E01', '011D01', '011301'

  ],

}; // Simbología Chla-a

var colorHWater = {

  min: 70

  max: 106

  palette: [

    'FEF9E7', 'FAD7A0', '5DADE2', '2E86C1', '21618C', '4A235A'

  ]

}; // Simbología GCI

var Simbologia = {max: 1, min: 0,

  palette: ['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',

    'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',

    '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']};
```

Código de las
paletas de colores
para cada uno de
los índices.

Código 7: código con la paleta de colores establecido para cada uno de los índices.

```

Map.addLayer (Vegetacion1, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0,
bands: ['B4','B3','B2']}, 'RGB color natural',0);

Map.addLayer (NDVI1, color 'NDVI_primavera',1);

Map.addLayer (GCI1, color, 'GCI_primavera',0);

Map.addLayer (Chla_a1, colorHWater, 'Chl_a_primavera',1);

```

Representación de cada uno de los elementos obtenidos con su paleta correspondiente.

Código 8: Visualización de los mapas de cada uno de los índices.

A continuación, se muestra un ejemplo del resultado de aplicar cada uno de los índices en el visor de GEE (Ilustración 21, Ilustración 22, Ilustración 23 e Ilustración 24). En este visor se visualiza el resultado de aplicar todos los códigos anteriores.

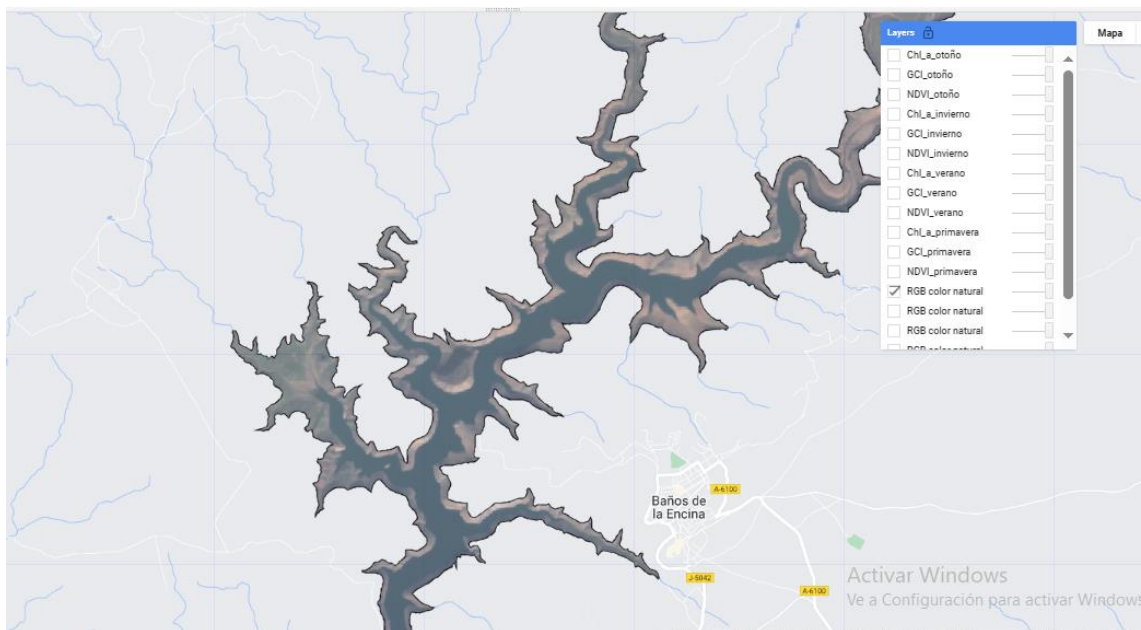


Ilustración 21: Representación en color verdadero de la imagen que corresponde a la estación de la primavera GEE.

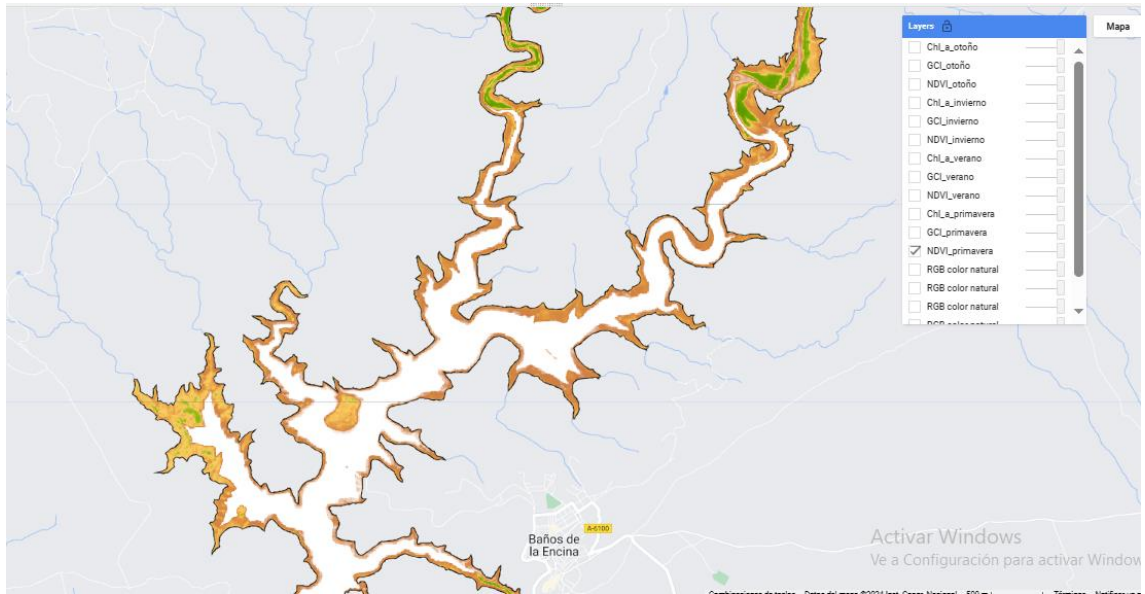


Ilustración 22: Representación NDVI de la imagen de la primavera GEE.

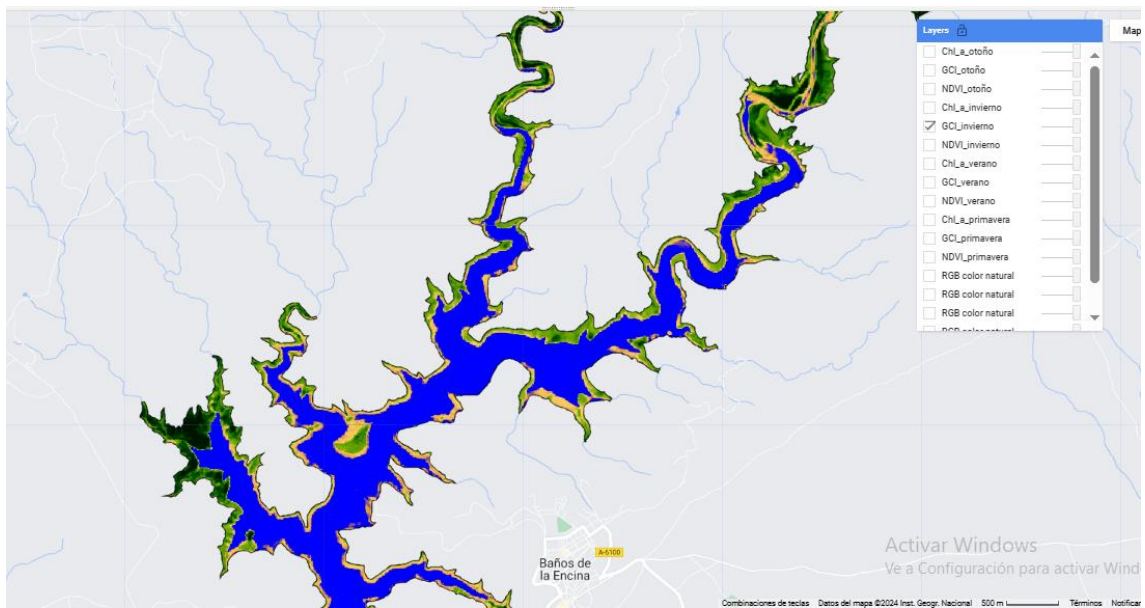


Ilustración 23: Representación GCI correspondiente con la estación de invierno GEE.

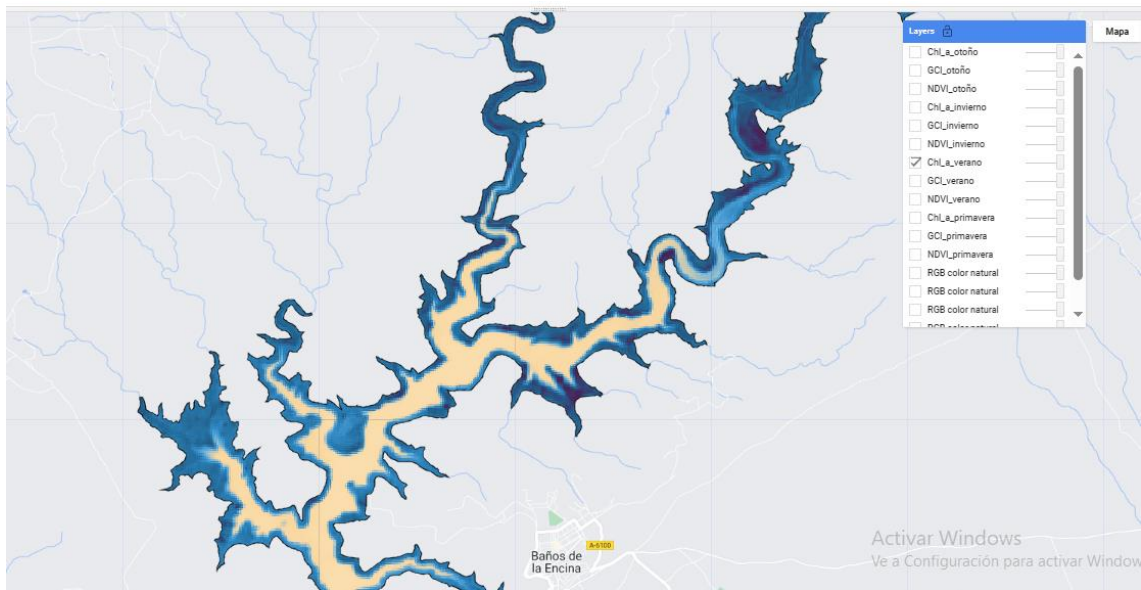


Ilustración 24: Representación Chla_a correspondiente con la estación de verano en GEE

Por último, nos queda exportar los datos de cada cálculo realizado. Para ello, debemos establecer el tipo de formato, la dimensión del píxel, la carpeta donde se van a descargar, la georreferenciación y una descripción. Los archivos recopilados serán visualizados a partir del Software QGIS.

```
Export.image.toDrive

image: NDVI3.float(),

description: 'NDVI_invierno_geotiff_'+year2,

scale: 10,

region: zona,

fileFormat: 'GeoTIFF',

crs 'EPSG:4326'

folder: 'gee_archivos',
```

Código de exportar un archivo
imagen

Código 9: Código para exporta los archivos.

4.2 Procesado para un análisis hidrográfico.

En esta sección, se explica cómo obtener y procesar los datos para realizar el análisis hidrográfico del área del embalse del Rumblar. En este proceso, se utilizará el Modelo Digital de Superficies (MDS05) generado a partir de nubes de puntos LIDAR de la primera Cobertura, con un paso de malla de 5 metros. Con Sistema Geodésico de Referencia (SGR): ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84). Proyección UTM en el huso correspondiente. Alturas ortométricas. Y el software QGis.

4.2.1 Selección y descarga modelo digital de superficie.

El modelo digital del terreno (MDT) se obtiene del centro de descargas del CNIG (IGN) (Ilustración 25) con una resolución de 5 metros. Dado que la zona de estudio abarca más de una hoja del MTN 50, se han descargado dos hojas para cubrir completamente el área de interés.

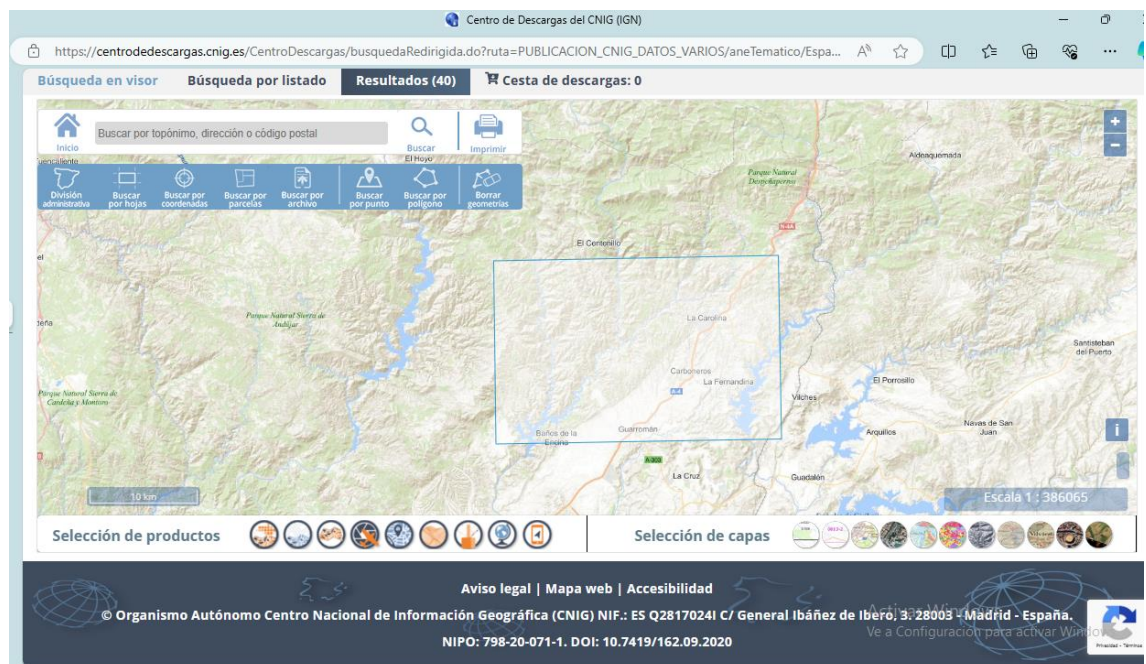
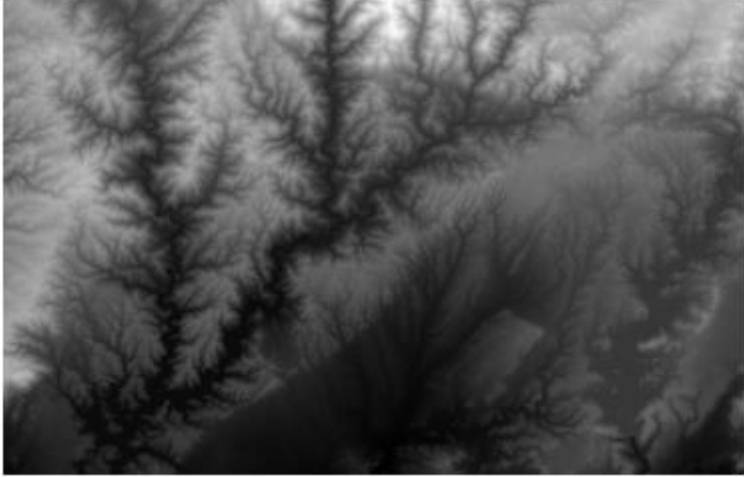


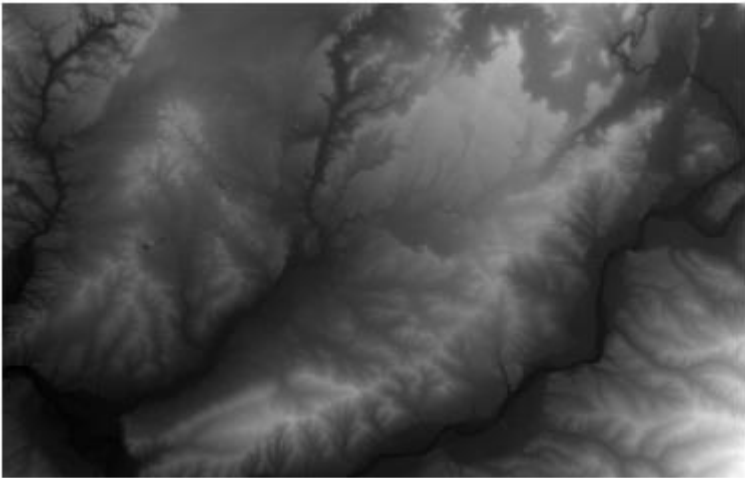
Ilustración 25: hoja0884

Información de las hojas descargadas:

PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_0884_LID	
	
Información del proveedor:	
Extensión	425117.5000000000000000,4 224377.5000000000000000 : 454532.5000000000000000,4 243202.5000000000000000
Anchura	5883
Altura	3765
Tipo de datos	Float32 - Número de coma flotante de 32 bits
Descripción del controlador de GDAL	GTiff
Metadatos del controlador de GDAL	GeoTIFF
Descripción del conjunto de datos	C:\Users\Almudena\Documents \TFG ALMUDENA\Datos_para_Qgis\ Descargas\MDE_5m\PNOA_MD T05_ETRS89_HU30_0884_LID.tif
Compresión	DEFLATE

Banda 1	• STATISTICS_APPROXIMATE=YES • STATISTICS_MAXIMUM=933.59802246094 • STATISTICS_MEAN=520.30733449151 • STATISTICS_MINIMUM=317.4469909668 • STATISTICS_STDDEV=114.79819077466 • STATISTICS_VALID_PERCENT=100 • Escala: 1 • Desplazamiento: 0
Más información	• AREA_OR_POINT=Point • X : 2942 • Y : 1883 • X : 1471 • Y : 942 • X : 736 • Y : 471
Dimensiones Origen	X: 5883 Y: 3765 Bandas: 1 425117.5000000000000000 0,4243202.5000000000000000
Tamaño de píxel	5,-5
Sistema de referencia de coordenadas (SRC):	
Nombre	EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zone 30N
Unidades	metros
Type	Proyectado
Método	Universal Transverse Mercator (UTM)
Celestial Body	Earth

Precisión	Based on <i>European Terrestrial Reference System 1989 ensemble</i> (EPSG:6258), which has a limited accuracy of at best 0.1 meters .
Referencia	Static (relies on a datum which is plate-fixed)

PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_0905_LID	
	
Información del proveedor:	
Extensión	424947.5000000000000000,4 205887.5000000000000000 : 454432.5000000000000000,4 224712.5000000000000000
Anchura	5897
Altura	3765
Tipo de datos	Float32 - Número de coma flotante de 32 bits
Descripción del controlador de GDAL	GTiff
Metadatos del controlador de GDAL	GeoTIFF

Descripción del conjunto de datos	C:\Users\Almudena\Documents\TFG ALMUDENA\Datos_para_Qgis\Descargas\MDE_5m\PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_0905_LID.tif
Compresión	DEFLATE
Banda 1	• STATISTICS_APPROXIMATE=YES • STATISTICS_MAXIMUM=669.80999755859 • STATISTICS_MEAN=353.87884572207 • STATISTICS_MINIMUM=218.22300720215 • STATISTICS_STDDEV=65.352057794822 • STATISTICS_VALID_PERCENT=100 • Escala: 1 • Desplazamiento: 0
Más información	• AREA_OR_POINT=Point • X : 2949 • Y : 1883 • X : 1475 • Y : 942 • X : 738 • Y : 471
Dimensiones Origen	X: 5897 Y: 3765 Bandas: 1 424947.50000000000000 0,4224712.5000000000000000
Tamaño de píxel	5,-5

Sistema de referencia de coordenadas (SRC):	
Nombre	EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zone 30N
Unidades	metros
Type	Proyectado
Método	Universal Transverse Mercator (UTM)
Celestial Body	Earth
Precisión	Based on <i>European Terrestrial Reference System 1989 ensemble</i> (EPSG:6258), which has a limited accuracy of at best 0.1 meters.
Referencia	Static (relies on a datum which is plate-fixed)

4.2.2. Procesado con QGis

4.2.2.1 Software QGIS

Para este propósito, se utilizará el software QGIS, que es un sistema de información geográfica de código abierto que permite visualizar, editar y analizar los datos espaciales. Este software permite una rápida y sencilla instalación de complementos, conocidos como plugins en inglés, que están disponibles en un repositorio en la nube. Estos plugins son desarrollados por una comunidad extensa, incluyendo los propios desarrolladores del programa. Esto nos permite instalar complementos que nos ayudarán en el análisis hidrográfico del área del embalse del Rumblar.

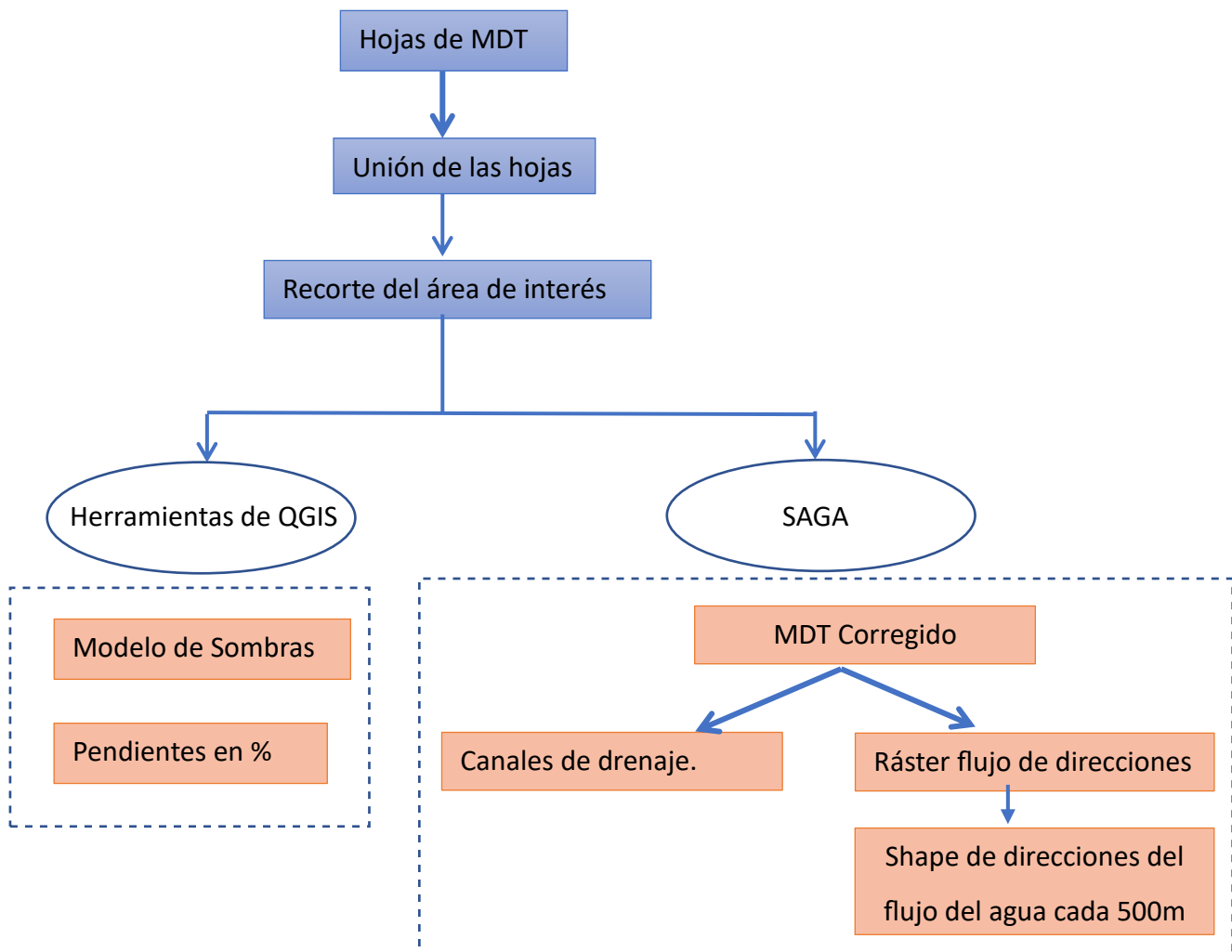
Antes de comenzar a trabajar en QGIS, es importante identificar los plugins necesarios y asegurarse de que estén instalados. En este caso, se requiere el complemento SAGA.

El complemento SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) para QGIS es una herramienta que ofrece una amplia gama de algoritmos y herramientas para el análisis geoespacial. SAGA proporciona funciones avanzadas para el procesamiento y análisis de datos geográficos, que incluyen análisis de terreno, interpolación, análisis hidrológico, clasificación de imágenes, análisis de series temporales, entre otros.

Entre las capacidades del complemento SAGA se encuentran la generación de modelos digitales de elevación (MDE), análisis de pendientes, delineación de cuencas hidrográficas, análisis de visibilidad, clasificación de imágenes satelitales, entre otros.

4.4.2.2 Procesado en QGIS.

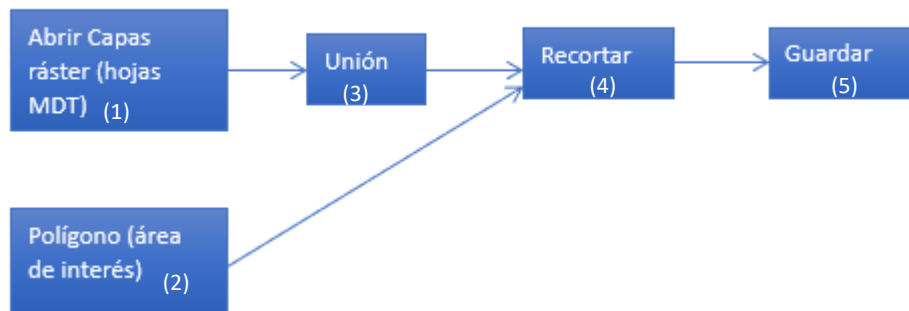
A continuación, se explica el proceso de trabajo en QGIS.(Esquema 2)



Esquema 2: Proceso de trabajo en QGIS

En primer lugar, se cargan las hojas de MDT (1) y un polígono (2) correspondientes a la zona de interés. En este caso particular, la extensión deseada no está completamente cubierta por una sola hoja, sino que se requiere la descarga de dos hojas específicas. Por lo tanto, es

esencial unificar (3) estas dos hojas para facilitar su procesamiento posterior y así obtener la información necesaria. Dado el considerable tamaño de las hojas, se realiza un recorte (4) para eliminar la información superflua, conservando únicamente el área de interés, que en este contexto es el embalse de El Rumblar.



Esquema 3: Flujo de trabajo para obtener el MDT de la zona de interés

A partir del MDT recortado, se procede a su procesamiento de dos maneras diferentes: utilizando las herramientas integradas de QGIS y también mediante el plugin SAGA. Ambos enfoques tienen como objetivo obtener productos finales distintos que serán fundamentales para realizar un análisis hidrográfico detallado de la zona.

Herramientas integradas en QGIS.

Utilizando las herramientas integradas en QGIS, se ha calculado el modelo de sombras y el modelo de pendientes en porcentaje.

Plugin SAGA.

A partir de este complemento, el primer paso implica obtener un Modelo Digital de Terreno (MDT) corregido. Este MDT corregido servirá como la base fundamental para el desarrollo del resto del trabajo. La corrección es necesaria debido a que los Modelos Digitales del Terreno, ya sea mediante interpolación u obtenidos de fuentes globales libres, deben ser evaluados y ajustados antes de extraer parámetros morfométricos e hidrológicos.

Durante la generación de modelos digitales, es común encontrar artefactos, zonas sin datos, o errores, que pueden afectar la representación precisa del terreno y obstaculizar la

aplicación de modelos hidrológicos. Además, es posible que el área de estudio solo cubra una parte del MDT o requiera de modelos más antiguos.

Es crucial evaluar el sistema de coordenadas y realizar ajustes posicionales sobre el área de estudio, como se haría con cualquier otro dato geoespacial. Esta fase de corrección garantiza la fiabilidad y precisión del MDT para su posterior análisis hidrológico.

En el proceso, seguimos el esquema de flujo indicado en QGIS (Ilustración 26). En primer lugar, se procede a rellenar los píxeles vacíos mediante interpolación partiendo del MDT de la zona de interés recortado. Esto implica completar áreas sin datos, corregir errores del MDT debidos a la presencia de nieve o sombras del relieve. Posteriormente, abordamos la corrección de depresiones, una de las mayores dificultades para la utilidad del MDT en análisis hidrológicos.

La corrección de estas depresiones se asigna el sentido del flujo del agua. Por ejemplo, en la siguiente matriz 3x3 en el que simboliza una extracción de una imagen de nueve píxeles, se muestra mediante flechas direccionales el sentido que tomaría una escorrentía superficial de agua, desde el nivel superior hacia el inferior, esto es, desde la mayor hacia la de la menor cota.



Ilustración 26: Dirección de flujo del agua. Como se comporta el agua según las cotas

Los sumideros son depresiones artificiales en el MDT, causadas por el método y proceso de creación de este. Se trata de fosas que se forman cuando los píxeles circundantes tienen una altura mayor, lo que impide el flujo en cualquier dirección y evita que el agua drene hacia la salida de la cuenca.

El algoritmo de corrección puede proceder de dos formas: elevando el valor de elevación del píxel o disminuyendo los valores de sus vecinos. Hay algunos algoritmos que incluye ambos.

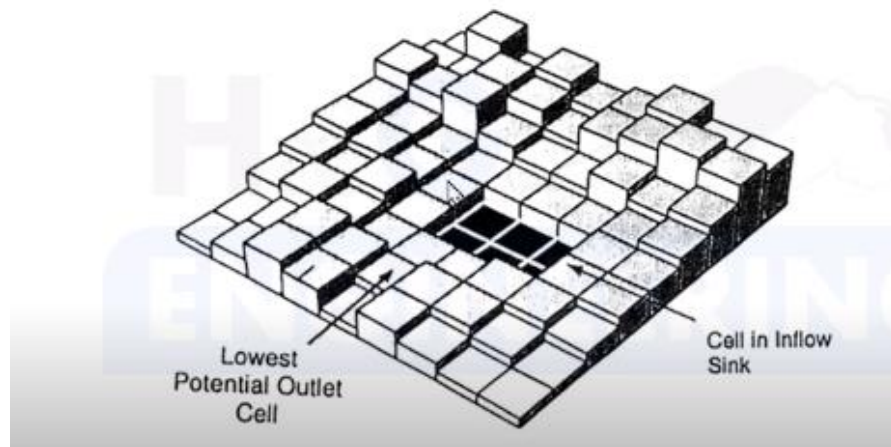


Ilustración 27: John G. Lyon 2003. *GIS for Water Resources and Watershed Management*.

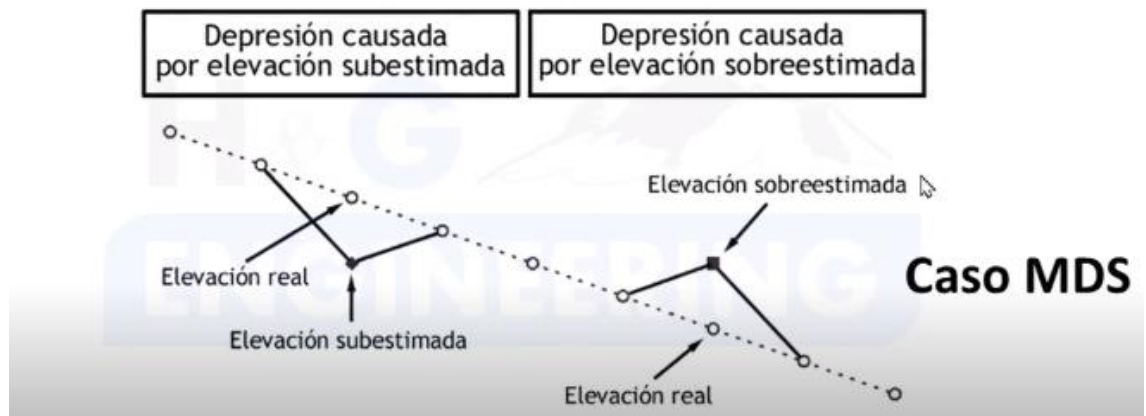


Ilustración 28: Olaya Ferrero, V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno*.

El propósito de la corrección es asegurar un flujo constante, lo que implica la contribución de todas las celdas del Modelo Digital del Terreno (MDT). En nuestro caso, hemos empleado el algoritmo "Remove Sink" y hemos aprovechado las herramientas de SAGA dentro de QGIS. De entre las diversas opciones disponibles, hemos seleccionado "Fill Wang y Liu".

El resultado ha sido un ráster que, al compararlo con el ráster original, revela modificaciones en la altitud máxima. Sin embargo, estas modificaciones son mínimas en este caso. (Ilustración 29)

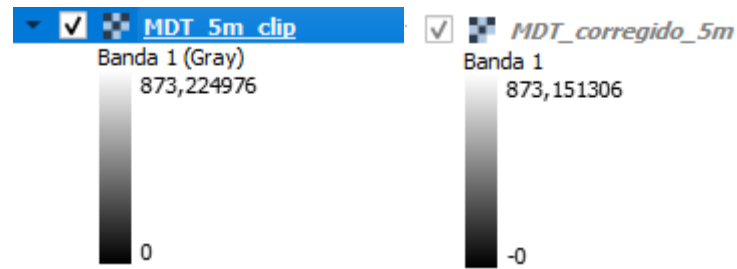


Ilustración 29: Comparación de altitudes tras la corrección del MDT.

El Ráster de Dirección de Flujos se calcula directamente utilizando el método Fill Sink Wang y Liu. Este método asigna valores del 0 al 7, donde cada valor representa el sentido de del flujo del agua (Tabla 2). Sin embargo, al observar el resultado en QGIS, notamos la presencia de elementos con el valor -1 (Ilustración 30) Estos elementos corresponden a las zonas planas donde el agua no sigue ninguna dirección específica y tiende a acumularse.

Norte (N)	0	Noreste (NE)	1
Este (E)	2	Sureste (SE)	3
Sur (S)	4	Suroeste (SO)	5
Oeste	6	Noroeste	7

Tabla 2: En SAGA, como se representa el ángulo de la dirección del flujo del agua.

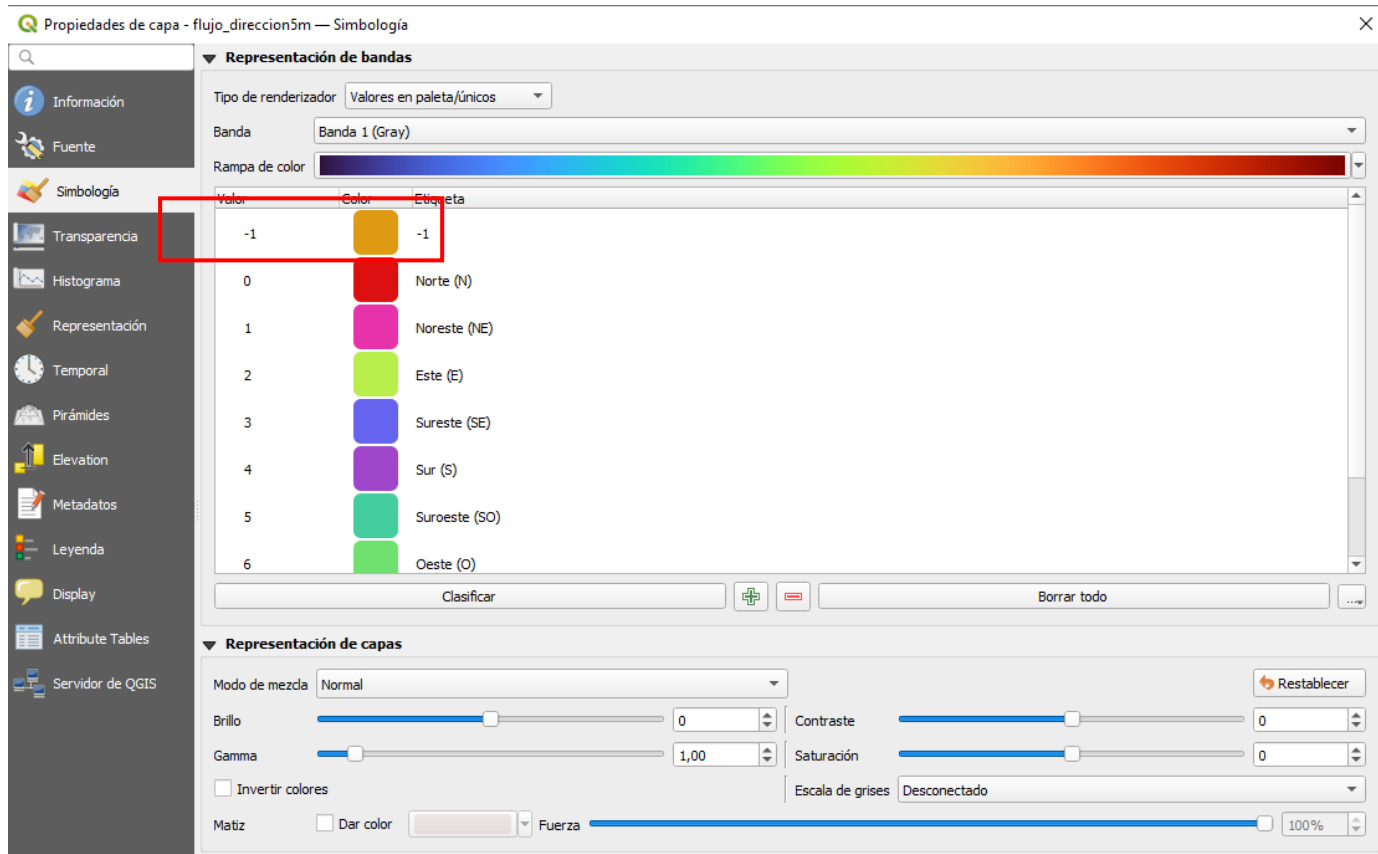


Ilustración 30: Valores del Ráster de Dirección de Flujo del agua

Para trazar el flujo del agua en QGIS, comenzamos seleccionando la opción vectorial en las herramientas de investigación. A continuación, creamos una red de puntos regulares. Es importante notar que estos puntos están inicialmente en coordenadas geográficas (grados),

por lo que necesitamos cambiar el sistema de referencia de WGS84 a una proyección UTM zona 30.

Configuramos los puntos para que tengan un espaciado de 500 metros (Ilustración 31). Aunque se consideró reducir el espaciado para obtener una mayor densidad de puntos, esto resultó en un exceso de ruido visual en el resultado final.

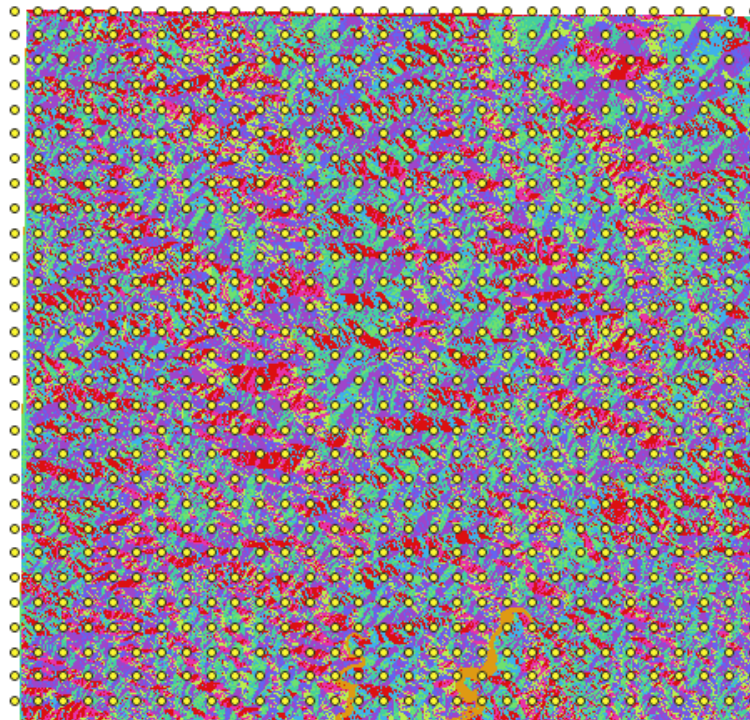


Ilustración 31: Malla de puntos regulares cada 500 metros

A continuación, asignamos valores a los puntos utilizando el ráster previamente calculado, el Ráster de Dirección de Flujo. Para esto, utilizamos una herramienta de QGIS llamada Point Sampling Tool, que nos permite asociar el ráster de flujo a los puntos regulares, lo que resulta en una nueva capa de formas que representa la Dirección del Flujo del agua. Al abrir la tabla de atributos, encontramos valores que van de -1 a 7, indicando la dirección del flujo del agua. Sin embargo, es necesario asociar estos valores con los ángulos respectivos.

Para representar la dirección del flujo en la capa vectorial, seleccionamos un símbolo de flecha en la opción de simbología. La rotación por defecto es de 0 grados, lo que corresponde al valor 0, que indica el norte. Los ángulos se ajustan en incrementos que no son exactamente de 45 grados, por lo que recurrimos a la calculadora de campos en la tabla de atributos de la capa vectorial (

Tabla 3).

Etiqueta	Valor	Grados	Etiqueta	Valor	Grados
Norte (N)	0	0°	Noreste (NE)	1	45°
Este (E)	2	90°	Sureste (SE)	3	149°
Sur (S)	4	180°	Suroeste (SO)	5	222°
Oeste	6	323°	Noroeste	7	270°

Tabla 3: Grados de la dirección del flujo de agua.

Generamos un campo adicional denominado "Dirección de Ángulos", de tipo numérico. Empleamos operaciones lógicas para asignar los ángulos apropiados, siguiendo esta formulación. Esto produce una tabla de atributos con dos campos, estableciendo la relación entre la dirección del flujo y los ángulos de la orientación de las pendientes (Ilustración 32)

CASE

WHEN "direcc_fluj" = 0 THEN 0

WHEN "direcc_fluj" = 1 THEN 45

WHEN "direcc_fluj" = 2 THEN 90

WHEN "direcc_fluj" = 3 THEN 149

WHEN "direcc_fluj" = 4 THEN 180

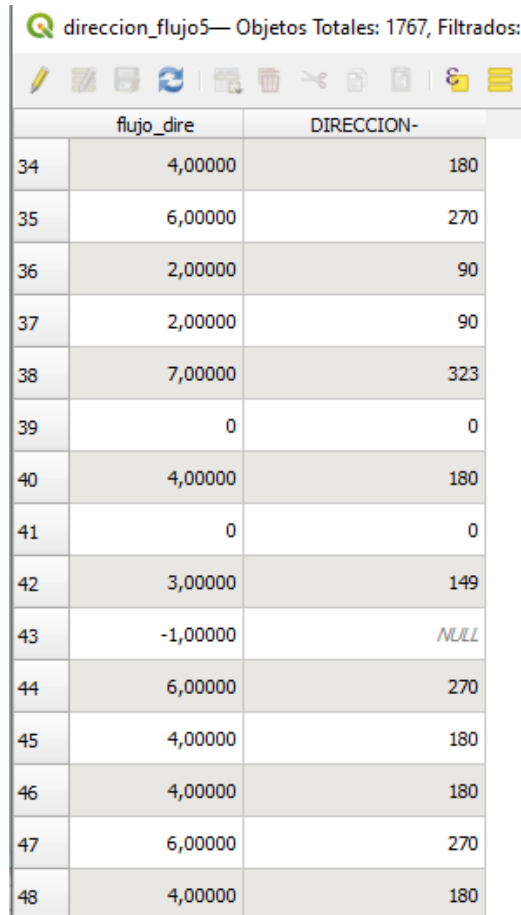
WHEN "direcc_fluj" = 5 THEN 222

WHEN "direcc_fluj" = 6 THEN 323

WHEN "direcc_fluj" = 7 THEN 270

END

Q direccion_flujo5— Objetos Totales: 1767, Filtrados:



	flujo_dire	DIRECCION-
34	4,00000	180
35	6,00000	270
36	2,00000	90
37	2,00000	90
38	7,00000	323
39	0	0
40	4,00000	180
41	0	0
42	3,00000	149
43	-1,00000	NULL
44	6,00000	270
45	4,00000	180
46	4,00000	180
47	6,00000	270
48	4,00000	180

Ilustración 32: tabla atributos con el campo de ángulos asociados al campo de direcciones de flujo.

Para representar el icono en función del campo "Dirección de Ángulos", regresamos a la configuración de la simbología y especificamos que se ajuste según este campo en grados (Ilustración 33).

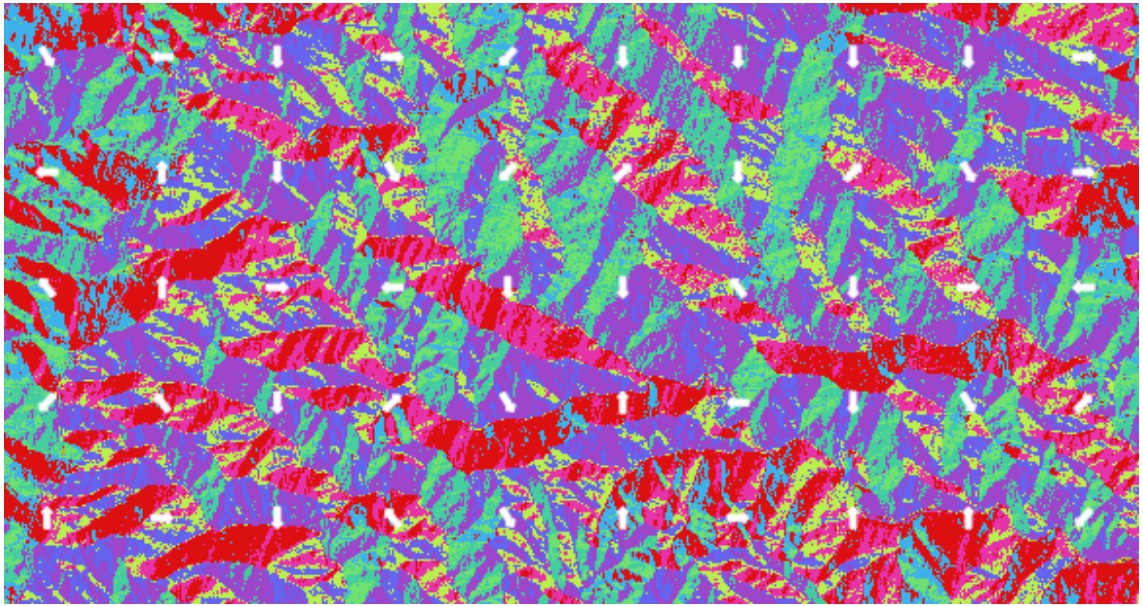


Ilustración 33: Capa Shape indicando la dirección del flujo de agua.

5. Resultado.

Después de realizar todas las operaciones necesarias para obtener los datos para una evaluación del estado del agua de la zona del embalse del Rumblar, incluyendo el análisis hidrográfico, se ha obtenido lo siguiente:

A partir de imágenes Sentinel-2

Para disponer de datos comparativos, se han seleccionado las distintas estaciones del año, siendo 2023 el año de estudio (Tabla 4).

	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Año 2023	21-12-2022/	20-03-2023/	21-06-2023/	23-09-2023/
	19/03/2023	20/06/2023	22/09/2023	20/12/2023

Tabla 4: Intervalos fechas para cada estación del año.

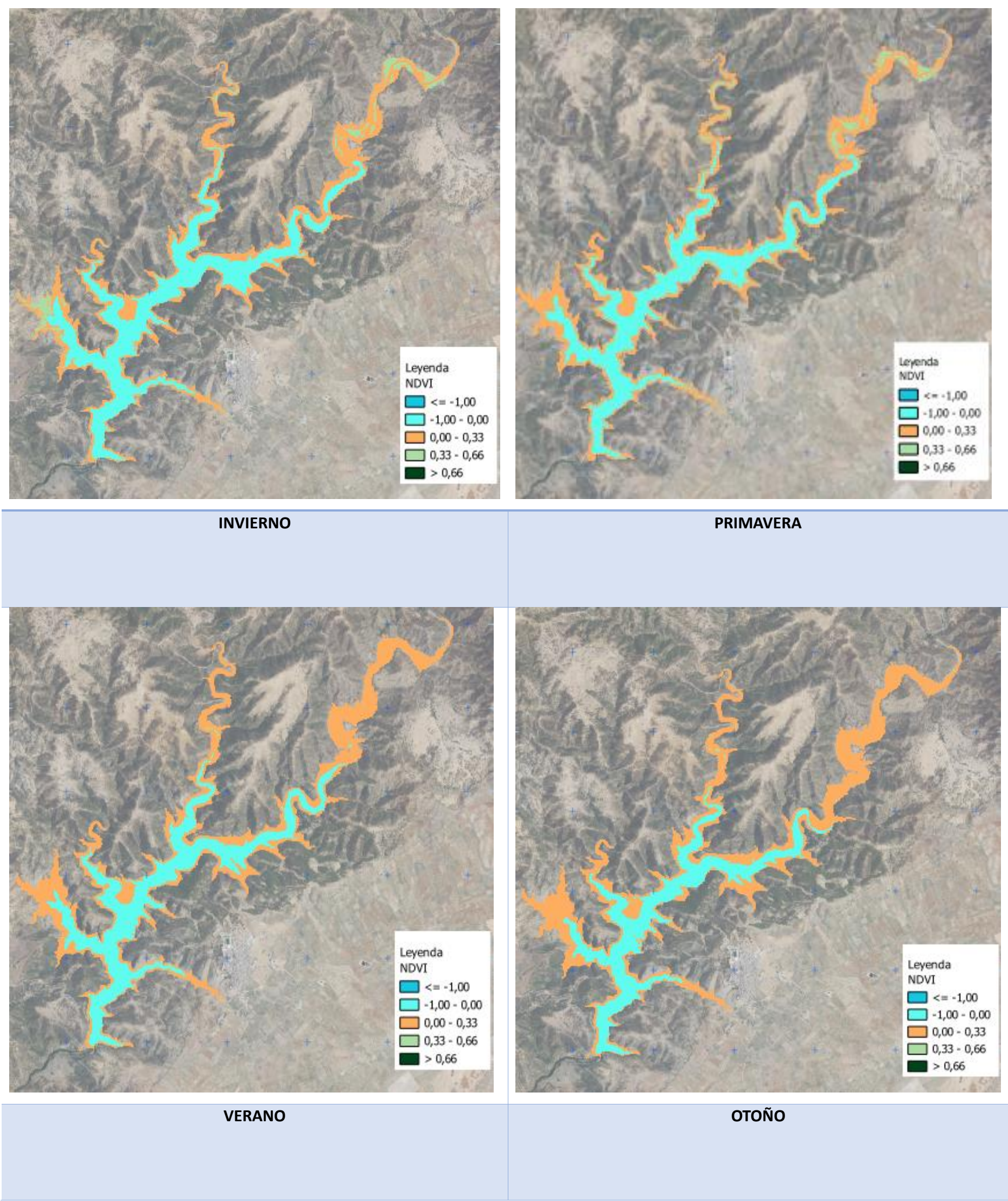
El análisis se ha realizado sobre imágenes correspondientes a cuatro etapas diferentes, representando las cuatro estaciones del año. Esta decisión se tomó debido a las variaciones de temperatura en cada estación. Por lo tanto, se obtuvieron datos aplicando los índices NDVI, GCI y Chl-a (índices que detectan la clorofila) a la imagen resultante del promedio de las imágenes de cada estación. Los datos obtenidos corresponden a la Tabla 5.

		STATISTI CS_MAXI MUM	STATISTI CS_MEA N	STATISTI CS_MINI MUM	STATISTI CS_STDD EV	STATISTI CS_VALID _PERCEN T
Invierno	Chl-a	111,29	87,66	75,23	6,61	11,73
	NDVI	0,26	0,03	-0,10	0,09	0,37
	GCI	0,64	0,01	-0,27	0,22	0,37
Primavera	Chl-a	112,75	88,75	74,46	11,09	11,73
	NDVI	0,50	0,06	-0,10	0,12	11,73
	GCI	0,72	0,11	-0,26	0,26	0,37
Verano	Chl-a	111,38	89,42	75,10	9,35	11,73
	NDVI	0,47	0,02	-0,06	0,06	11,73
	GCI	0,62	0,16	-0,06	0,12	0,37
Otoño	Chl-a	103,83	88,83	77,82	6,76	0,37
	NDVI	0,41	0,05	-0,10	0,11	11,73
	GCI	0,66	0,13	-0,12	0,16	0,37

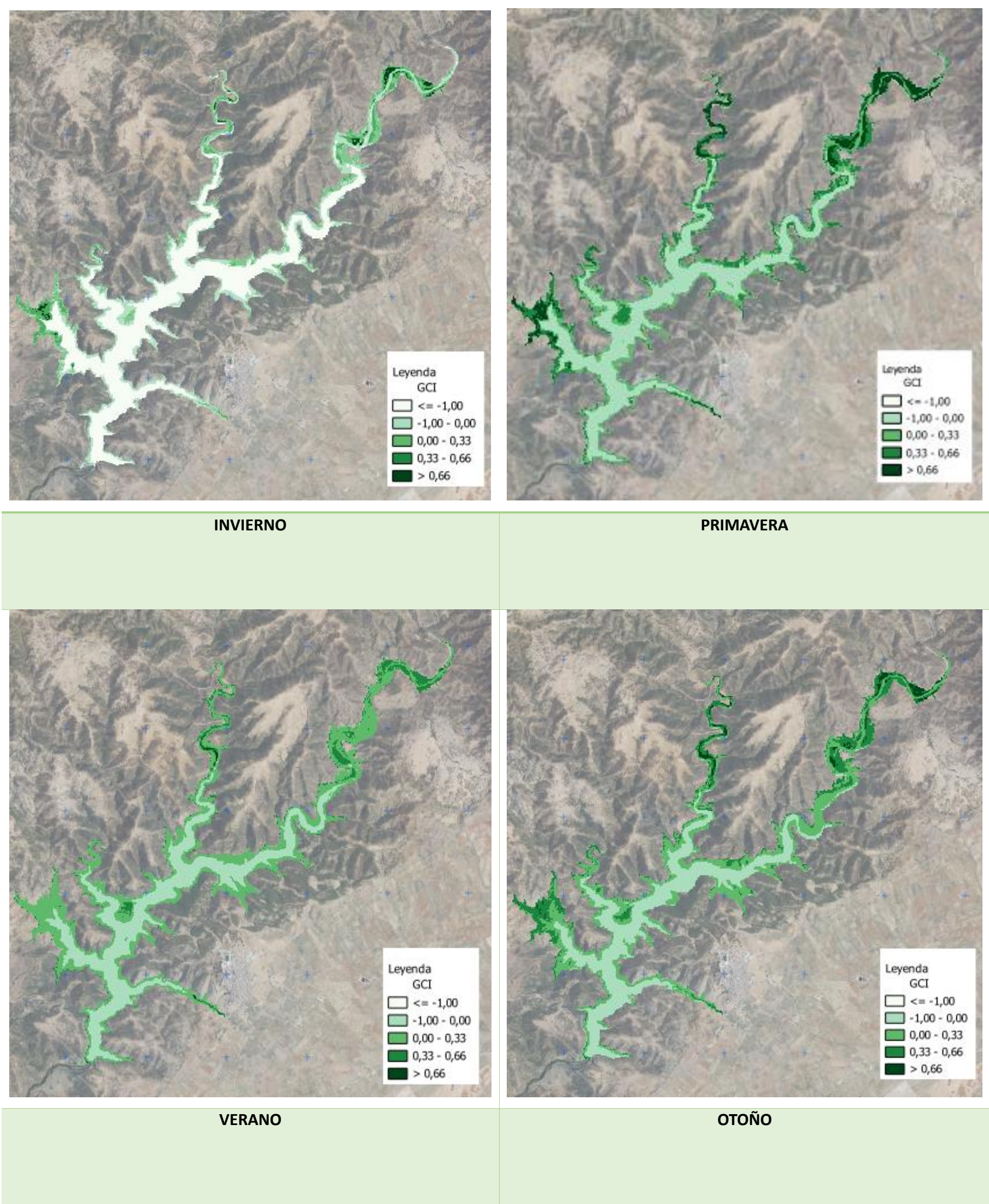
Tabla 5: Datos estadísticos obtenidos de aplicar distintos índices

Gráficamente, estos datos se presentan en las figuras siguientes a modo de ejemplo, mientras que en el Anexo 2 se incluyen los planos correspondientes a esta información.

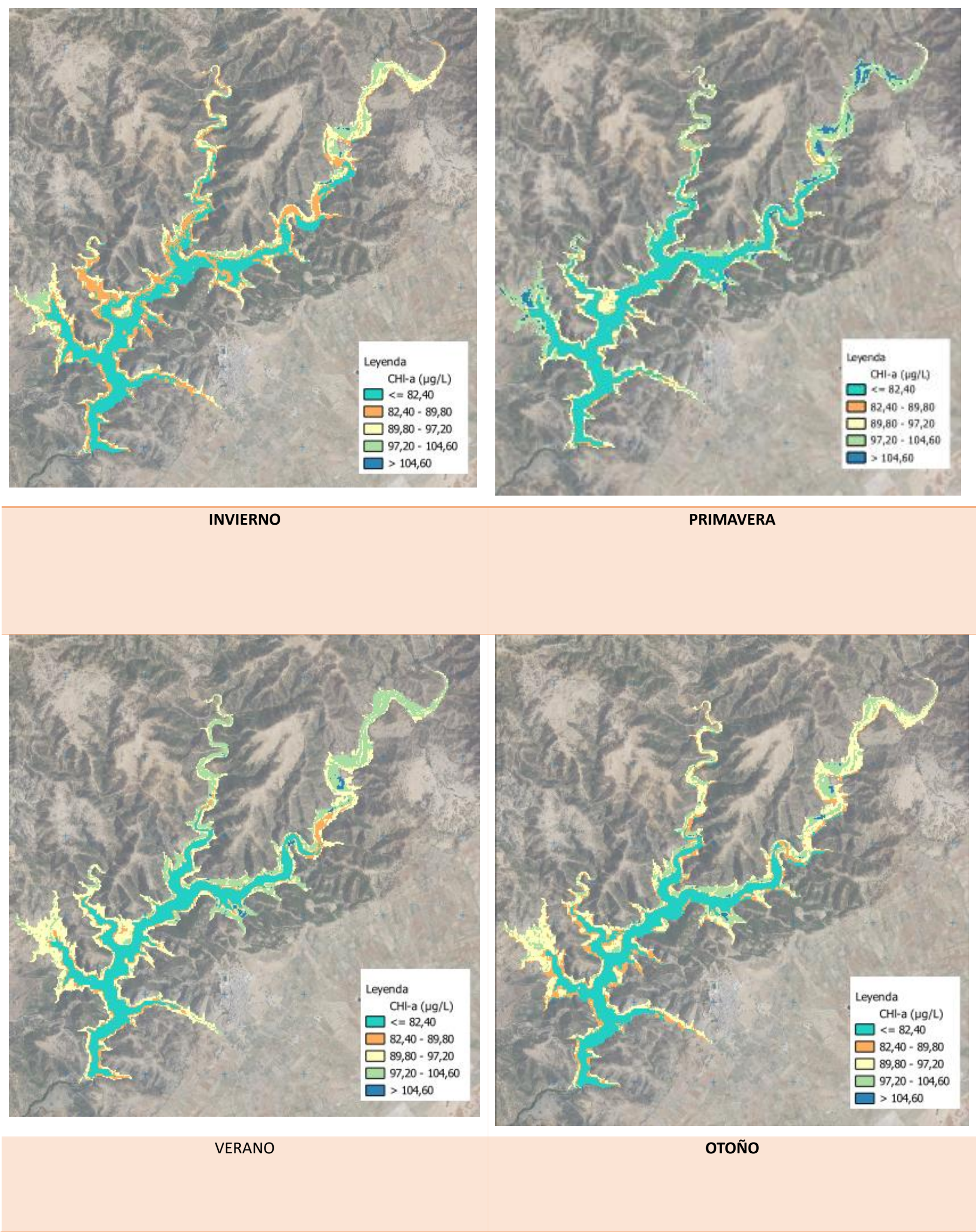
Ilustraciones de los Valores del Índice de Vegetación NDVI Calculado en Cada Estación del Año 2023



Ilustraciones de los Valores del Índice de Vegetación GCI Calculado en Cada Estación del Año 2023.

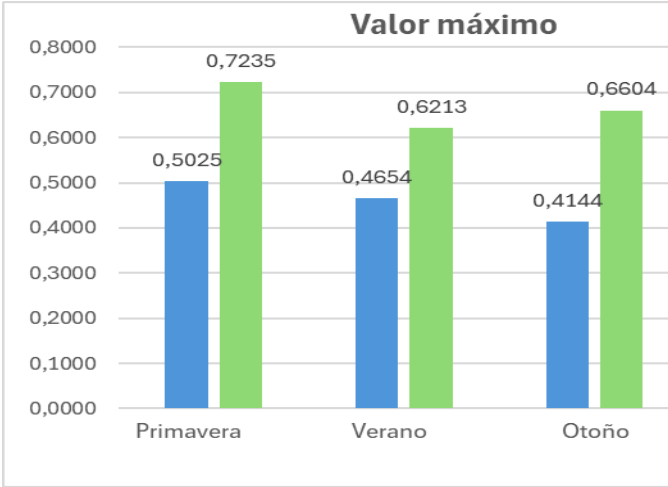


Ilustraciones de los Valores de clorofila del Índice Chl-a Calculado en Cada Estación del Año *del 2023*

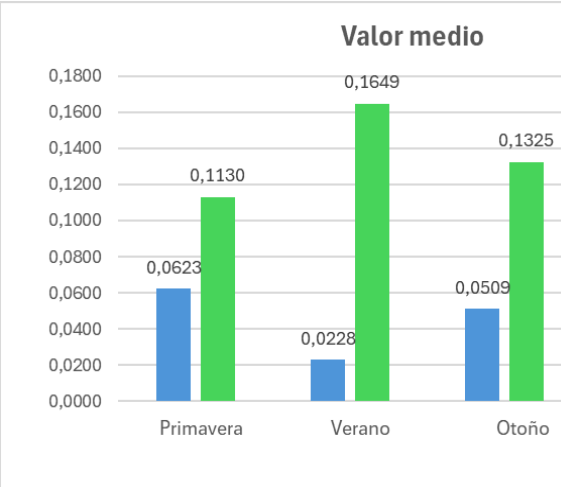


Para tener una mejor perspectiva de los valores se ha representado en las siguientes gráficas:

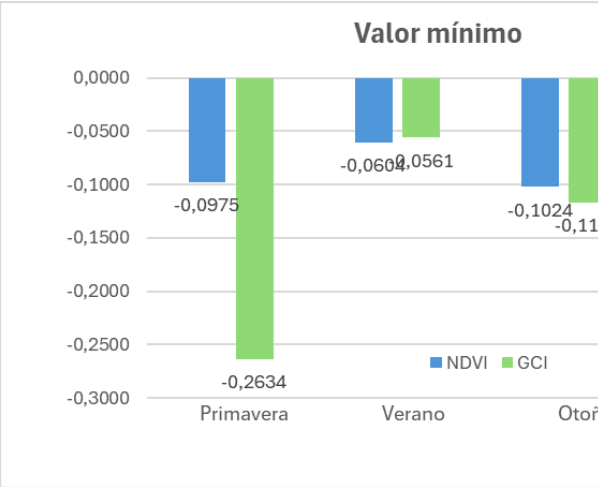
Valores comparativos de los índices NDVI y GCI



Gráfica 1: Valores máximos comparativos de los índices NDVI y GCI

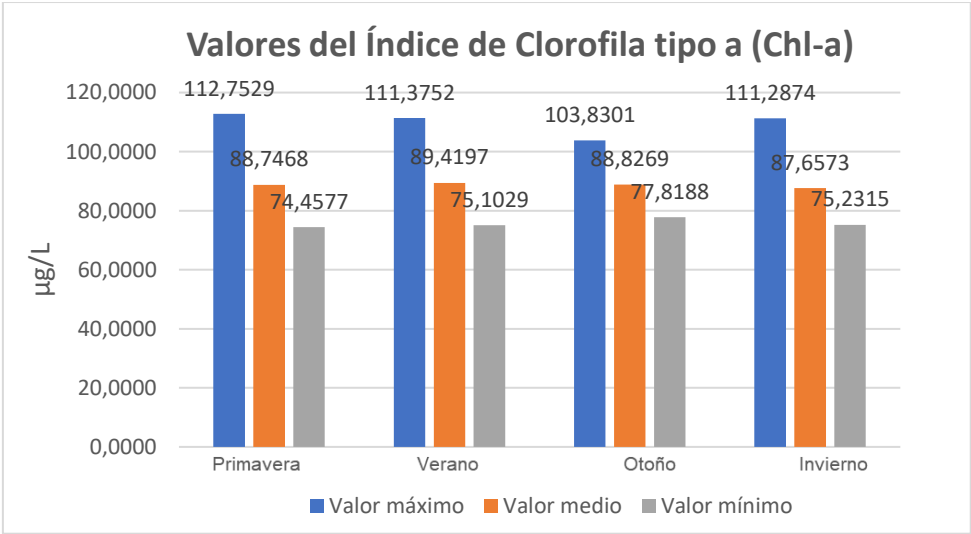


Gráfica 2: Valores medios comparativos de los índices NDVI y GCI



Gráfica 3: Valores mínimos comparativos de los índices NDVI y GCI

Valores índice clorofila tipo a.



Gráfica 4: Valores máximos, medios y mínimos del índice de clorofila tipo a.

Para comprender los datos de la Tabla 5 y las gráficas, es esencial considerar que los valores de los índices NDVI y GCI se establecen en un rango de -1 a 1, como se muestra en la Ilustración 35, mientras que los valores de Chl-a representan la concentración de clorofila en el agua, medida en $\mu\text{g/L}$.

Aunque ambos índices se utilizan para determinar la cantidad de clorofila, el GCI y Chl-a proporcionan una medida más directa de la clorofila, mientras que el NDVI ofrece una visión general de la densidad y salud de la vegetación, con mayores valores indicando una mayor presencia de clorofila. En este estudio, se emplean estos índices para determinar la presencia de clorofila de algas en la superficie del agua del embalse, con una resolución de 10 metros por píxel.

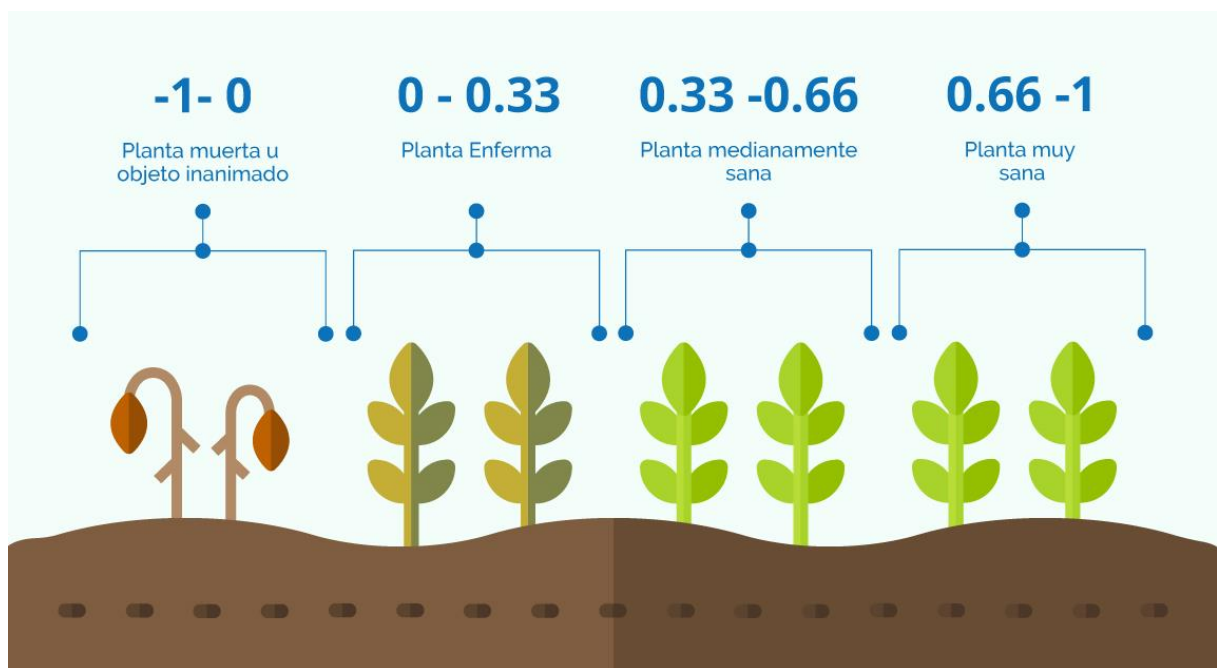


Ilustración 34: Rango valores índice de vegetación

.(<https://www.bing.com/images/blob?bcid=qKY6LSIp-HgH44uVxiXX198IOVlq.....2M>)

Hay que resaltar que el índice NDVI ha detectado clorofila principalmente en la orilla del agua, lo que permite identificar claramente la superficie del agua mediante los valores negativos de cada píxel. Aunque el NDVI no está específicamente diseñado para identificar

cuerpos de agua, estos pueden distinguirse con cierta claridad cuando la superficie no está excesivamente cubierta por vegetación.

Además, los valores más altos del NDVI corresponden a la zona árida del embalse, debido a que la cuenca no está completamente llena, detectándose en esa área una pequeña cobertura vegetal. Observando la evolución de los valores máximos de este índice, se puede apreciar que reflejan el desarrollo normal de la clorofila en la vegetación, alcanzando su punto máximo en primavera y disminuyendo hasta el invierno, cuando se registran los valores más bajos.

En cuanto al índice GCI, se ha observado un incremento tanto en los valores medios como en los máximos de cada estación. Este índice, debido a las bandas que utiliza en su fórmula (banda del verde y del infrarrojo cercano), tiene mayor sensibilidad en la franja del verde, lo que hace que la detección de clorofila sea más precisa y el incremento más notable.

Analizando las estaciones del año, se observa que, en verano, con el aumento de la temperatura, hay un incremento significativo de clorofila en el agua, mientras que, en invierno, con la disminución de las temperaturas, estos valores bajan al mínimo. Las aguas eutróficas se producen cuando se combinan ciertos factores, como el aumento de la temperatura y un exceso de nitratos, creando un caldo de cultivo ideal para el crecimiento de algas. Por lo tanto, los datos obtenidos corresponden lógicamente a las variaciones estacionales.

El índice de clorofila-a (Chl-a) se utiliza para medir los niveles de clorofila tipo a en un cuerpo de agua, lo que permite evaluar la presencia excesiva de algas, un indicador potencial de contaminación. El agua se considera no apta para el consumo humano cuando los niveles de clorofila superan los 50 mg/L.

Al analizar la gráfica de este índice, en particular la media de los valores registrados durante el año de estudio, se observa que el valor promedio es de 0.16 µg/L (microgramos por litro). Este valor es prácticamente insignificante, ya que las concentraciones preocupantes de clorofila se cuantifican en miligramos por litro, considerándose un riesgo para la salud cuando superan los 50 mg/L.

Al considerar los tres índices analizados, se concluye que el embalse del Rumblar presenta concentraciones bajas tanto de clorofila como de nitratos. Los datos obtenidos a partir de

imágenes Sentinel-2, con bandas de resolución de 10 metros en el espectro visible, indican que el agua del embalse es apta para el consumo humano.

A partir del MDT

Partiendo del **Modelo Digital del Terreno (MDT)**, se realizó un análisis hidrográfico de la zona, trazando el recorrido del agua que se acumula en el embalse. El primer mapa (Ilustración 35) obtenido muestra las pendientes del terreno en %, proporcionando una visión clara de cómo el terreno contribuye al flujo de agua en la cuenca.

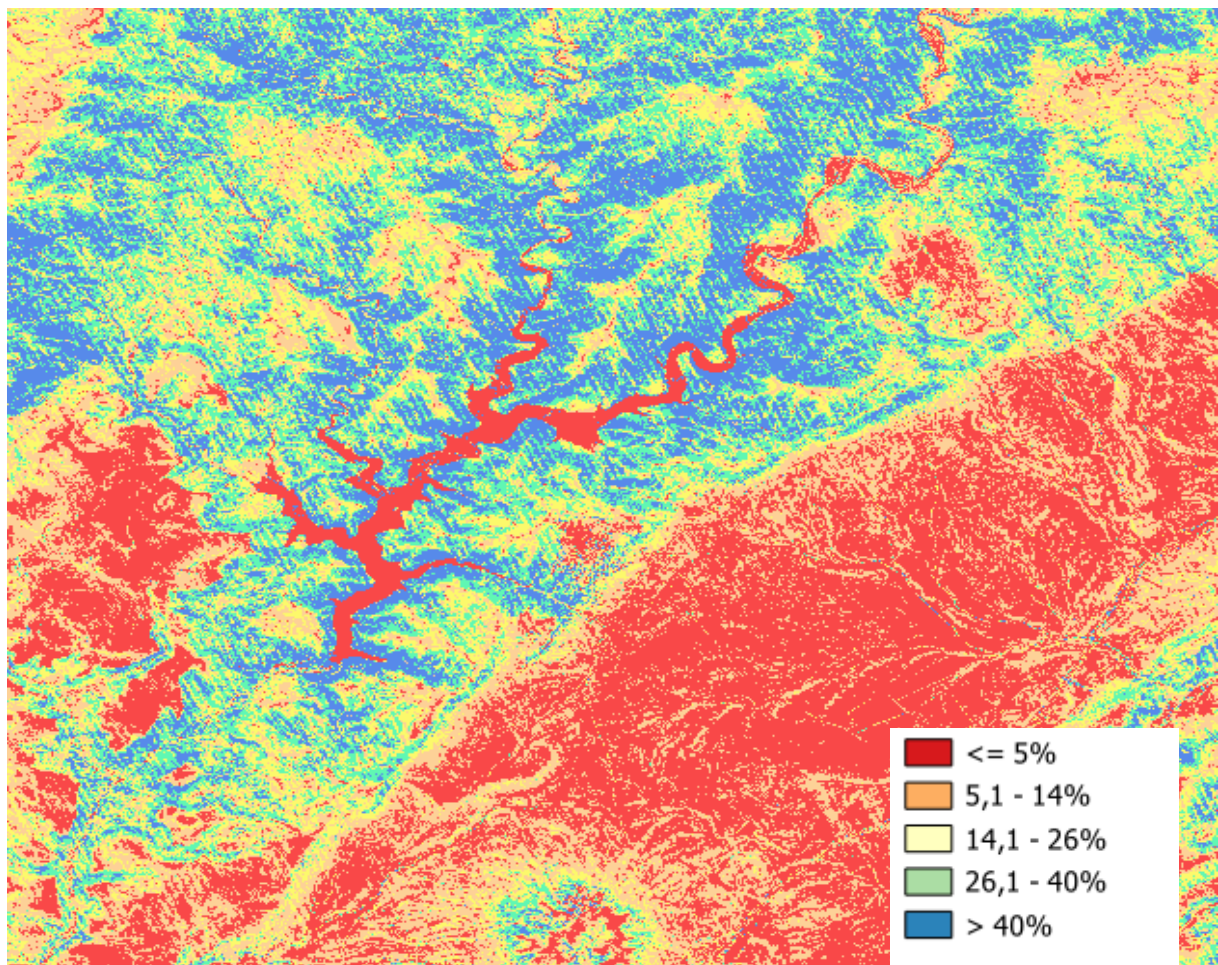


Ilustración 35: Pendientes en %

En el segundo mapa (Ilustración 36), se detalla la dirección del flujo del agua en cada uno de los píxeles del área de estudio. Esta información es crucial para entender el movimiento del agua en la cuenca y cómo diferentes factores del terreno influyen en el recorrido del agua hacia el embalse.

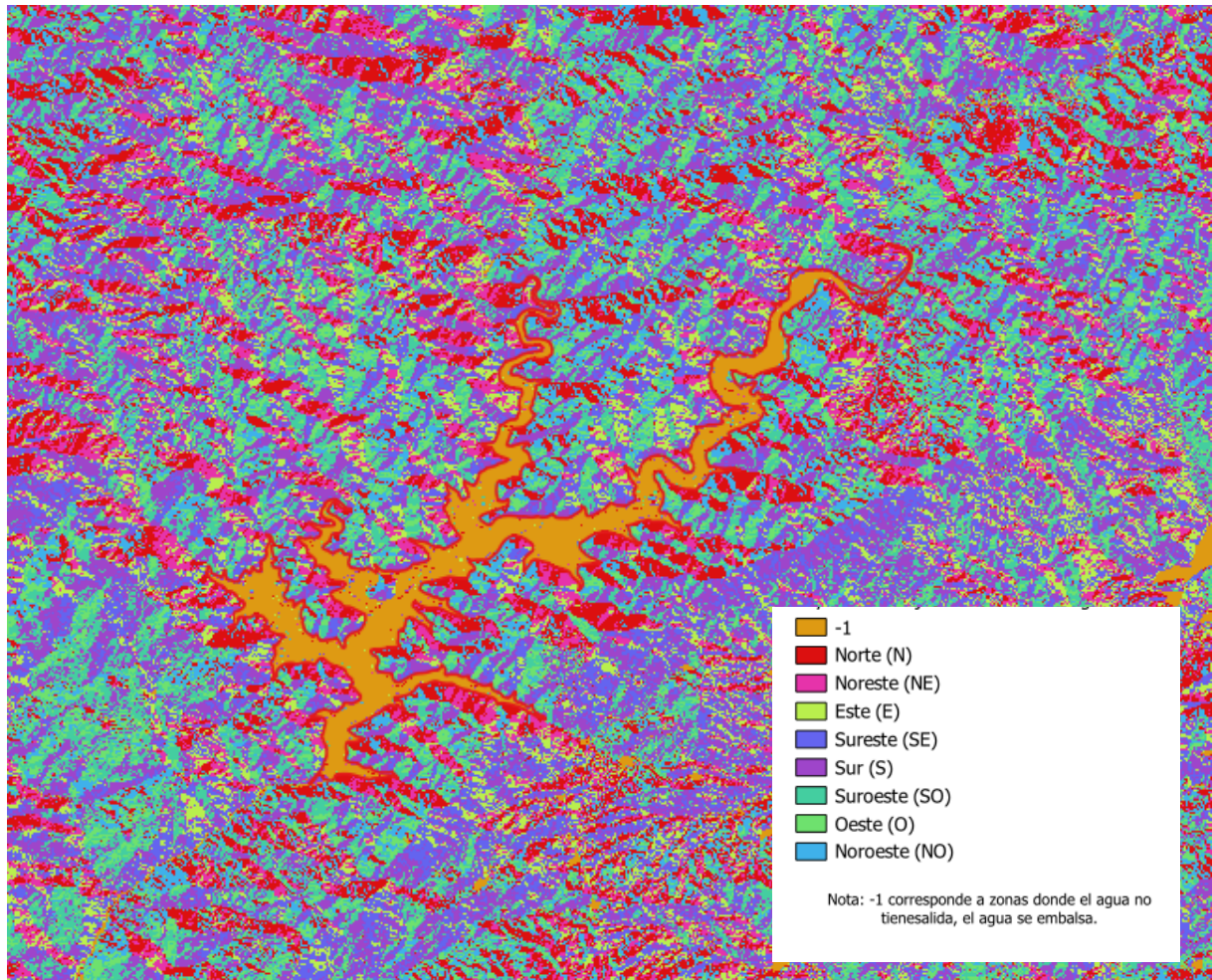


Ilustración 36: Dirección del flujo de agua

Finalmente, un tercer mapa (Ilustración 36) ilustra una red de flujo del agua, mostrando la dirección del flujo cada 500 metros. Este mapa ofrece una visión más amplia del comportamiento del agua en la zona, permitiendo analizar cómo el agua se distribuye y fluye a lo largo de la cuenca en su recorrido hacia el embalse.

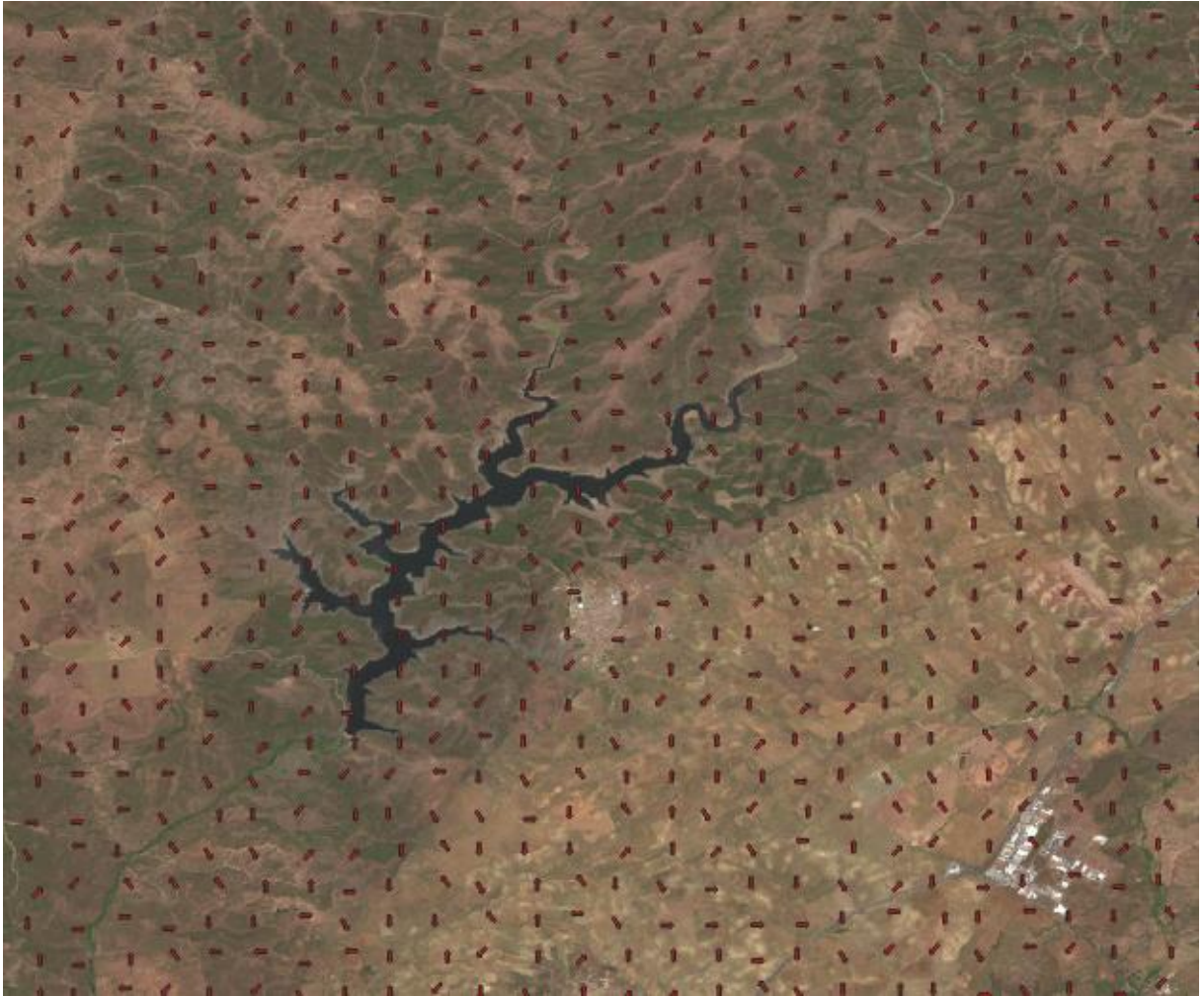


Ilustración 37: Red de dirección de flujo del agua cada 500 metros

6. Validación datos.

En este apartado se validarán los datos obtenidos del análisis del embalse mediante imágenes Sentinel-2, que corresponden con el apartado Resultados. Además, se utilizarán otras fuentes de datos, como los proporcionados por Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la temperatura y los facilitados por la empresa Somajasa, Sociedad Mixta del Agua Jaén, S.A, relativos a los análisis de las muestras de agua del embalse el Rumblar.

Para entender cómo los parámetros analizados del agua del embalse el Rumblar por Somajasa pueden afectar el desarrollo de clorofila a, es crucial identificar aquellos que influyen directamente en la calidad del agua, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones favorables para el crecimiento de algas. A continuación, se presenta una evaluación de los parámetros más relevantes:

Nutrientes Principales

Nitratos y Nitritos

Nitratos: Son una fuente clave de nitrógeno, un nutriente esencial para el crecimiento de las algas y, por donde, para la producción de “clorofila a”.

Nitritos: Aunque menos abundantes que los nitratos, también contribuyen al suministro de nitrógeno.

Amonio

Amonio: Es una forma de nitrógeno que las algas pueden usar directamente para su crecimiento. Su presencia en cantidades significativas puede promover la proliferación de algas.

Sulfatos

Sulfatos: Pueden servir como una fuente secundaria de azufre para las algas, aunque generalmente no son un factor limitante.

Parámetros de Calidad del Agua

pH

pH: Afecta la disponibilidad de nutrientes y la salud de los organismos fotosintéticos. Un pH óptimo del agua para el crecimiento de algas suele ser ligeramente básico, generalmente en un rango de 7.5 a 8.5. Aunque las algas pueden crecer en un amplio rango de pH, un entorno moderadamente básico tiende a ser ideal para su desarrollo.

Conductividad

Conductividad a 20 °C: Indica la cantidad de iones disueltos en el agua. Aunque no afecta directamente la “clorofila a”, puede reflejar la presencia de nutrientes y otros compuestos químicos.

Turbidez

Turbidez: La turbidez alta puede reducir la penetración de luz, limitando la fotosíntesis y la producción de “clorofila a”.

Color

Color: Similar a la turbidez, un color elevado puede indicar la presencia de materia orgánica disuelta que reduce la claridad del agua, afectando la fotosíntesis.

Contaminantes y Tóxicos

Metales Pesados

Mercurio, Cobre, Niquel, Cromo, Manganeseo, Cadmio, Antimonio, Hierro, Plomo, Arsénico, Selenio: La presencia de estos metales en altas concentraciones puede ser tóxica para las algas y reducir su crecimiento y producción de clorofila a.

Pesticidas y Contaminantes Orgánicos

Suma de Plaguicidas, Endosulfan Alfa/Beta, Hexaclorobenzeno, Lindano, etc. Muchos de estos compuestos son tóxicos para las algas y otros organismos acuáticos, inhibiendo su crecimiento y producción de clorofila a.

4. Parámetros Fisicoquímicos

Carbono Orgánico Total (TOC)

TOC: Indica la cantidad de materia orgánica disponible en el agua. Una alta concentración puede proporcionar una fuente de nutrientes para las algas, favoreciendo la producción de clorofila a.

Alcalinidad Total

Alcalinidad Total: Afecta la capacidad de amortiguación del agua y puede influir en la estabilidad del pH, lo que a su vez afecta la disponibilidad de nutrientes y la salud de las algas.

Otros Parámetros Relevantes

Oxidabilidad

Oxidabilidad: Es una medida de la materia orgánica biodegradable en el agua. Una alta oxidabilidad puede indicar una mayor disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de algas.

Cloruros y Fluoruros

Cloruros: Pueden afectar la salinidad del agua y, en concentraciones elevadas, pueden ser tóxicos para ciertas especies de algas.

Fluoruros: Similar a los cloruros, pueden influir en la calidad del agua y afectar la salud de las algas.

Factores Menos Directos

Escherichia coli, Coliformes, Enterococos, Clostridium perfringens: La presencia de estos indicadores de contaminación fecal no afecta directamente a la clorofila a, pero indica la calidad del agua y la posible presencia de nutrientes que podrían favorecer el crecimiento algal.

Carbonatos y Bicarbonatos: Pueden influir en la alcalinidad y el pH del agua.

A continuación, en la siguiente Tabla 6 se muestra el análisis realizado por Somajasa de distintas muestras tomadas en cada estación del año (Invierno, Primavera, Verano y Otoño).

	Punto Muestreo	AJ-RUMBLAR-SALIDA DEPÓSITO ETAP RUMBLAR		
	Fecha Muestreo	Fecha Muestreo	Fecha Muestreo	Fecha Muestreo
	04/01/2023	12/04/2023	12/07/2023	19/10/2023
Parámetro	Resultado	Resultado	Resultado	Resultado
ENDOSULFAN BETA	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
OXIDABILIDAD	3.6	3.7	1.6	2.1
SUMA PLAGUICIDAS	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
HEXACLOROBENZENO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
4,4'-DDE	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
4,4'-DDD	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
ENDOSULFAN SULFATO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
1,2-DICLOROETANO	< 2.0	< 0.50	< 0.50	< 0.50
ENDOSULFAN ALFA	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
GAMMA-HCH (LINDANO)	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
BETA-HCH	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
ISODRIN	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
BENCENO	< 0.50	< 0.30	< 0.30	< 0.30
HEPTACLORO	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
CLOROFORMO	14	11	12	23
BROMODICLOROMETANO	< 5.0	< 5.0	< 5.0	6.5
DIBROMOCOLOROMETANO	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0
BROMOFORMO	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0
SUMA MÍNIMA TRIHALOMETANOS	14	11	12	30
TRICLOROETENO	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0
TETRACLOROETENO	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0
TETRACLOROETENO+TRICLOROETENO	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0
MERCURIO	< 0.50	< 0.30	< 0.30	< 0.30
BORO	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10
CARBONO ORGANICO TOTAL (TOC)	2.9	2.2	2.5	2.7
CLORUROS	9.8	10	10	11
COBRE	< 0.0010	0.0014	0.0062	0.0013
* CLORO LIBRE RESIDUAL	1.0	1.0	1.0	0.90
* OLOR	1	1	1	1
* SABOR	1	1	1	1
pH	8.04	6.71	7.21	7.36
CONDUCTIVIDAD a 20 ° C	241	266	244	249

TURBIDEZ	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20
COLOR	< 5	< 5	< 5	< 5
AMONIO	< 0.050	< 0.050	< 0.050	< 0.050
NITRITOS	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
ALFA-HCH	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
FLUORURO	0.10	< 0.10	0.11	0.11
ENDRIN	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
NITRATOS	< 1.0	1.2	1.5	1.3
SULFATOS	61	64	63	57
BENZO(A)PIRENO	< 0.0050	< 0.0030	< 0.0030	< 0.0030
INDENO(1,2,3-CD)PIRENO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
BENZO(B)FLUORANTENO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
BENZO(G,H,I)PERILENO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
BENZO(k)FLUORANTENO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
SUMA HIDROC. AROM. POLICICLICOS	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
ALDRIN	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
DIELDRIN	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
HEPTACLORO EPOXIDO (A + B)	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
CIANUROS TOTALES	< 20	< 20	< 20	< 20
Rcto. aerobios totales a 22 °C	< 1	1	< 1	< 1
Clostridium perfringens	< 1	< 1	< 1	< 1
ENTEROCOCOS	< 1	< 1	< 1	< 1
COLIFORMES	< 1	< 1	< 1	< 1
ALUMINIO	< 50	< 20	27	36
INDICE DE Langelier	-0.47	-1.8	-1.2	-1.0
CALCIO	24.6	24.9	24.0	24.8
CARBONATOS	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0
BICARBONATOS	61	56	61	75
NIQUEL	< 1.0	< 1	< 1	< 1.0
Escherichia coli	< 1	< 1	< 1	< 1
CROMO	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ALCALINIDAD TOTAL	50	46	50	61
MANGANESO	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
CADMIO	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010
ANTIMONIO	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
HIERRO	< 50	< 20	< 20	< 20
PLOMO	< 1.0	< 0.36	< 0.36	< 0.36
ARSENICO	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1.0
SELENIO	< 1.0	< 0.30	< 0.30	< 0.30
SODIO	8.0	8.1	7.9	8.1
* MCPA		< 0.031	< 0.030	< 0.030

Tabla 6: Datos análisis de las aguas del Embalse el Rumblar de cuatro muestras diferentes facilitado por Somajasa.

Para identificar los parámetros de calidad del agua que están por encima de sus límites establecidos, primero es necesario conocer los límites normativos para cada sustancia en agua de embalse. Estos límites pueden variar según las regulaciones locales, nacionales o internacionales. En general, los límites se establecen para garantizar la seguridad y la calidad del agua potable.

Para determinar cuándo los valores de los contaminantes en el agua se consideran anormales, se han empleado los estándares establecidos por la Unión Europea. Los límites máximos recomendados para los contaminantes específicos que analiza la empresa Somajasa en aguas destinadas al consumo humano se recogen en el Anexo 3. Límites de los contaminantes en el agua. Esta información ha sido obtenida a través de la plataforma EUR-Lex([Derecho de la UE - EUR-Lex \(europa.eu\)](http://eur-lex.europa.eu)) y corresponde con la *DIRECTIVA (UE) 2020/2184 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano*⁶.

Según los límites anteriormente establecidos, se ha detectado un pequeño exceso de varios de los elementos analizados en la Tabla 6 que puede contribuir al aumento de algas en el agua de un embalse, estos elementos son:

Oxidabilidad:

Cloroformo y Trihalometanos (THM)

Nitratos

Aluminio

En conjunto, estos factores crean un ambiente propicio para el crecimiento descontrolado de algas en un embalse. Las floraciones algales pueden no solo alterar la estética y el olor del agua, sino también afectar negativamente la calidad del agua y la vida acuática al consumir oxígeno y liberar toxinas. Además, pueden tener impactos negativos en la potabilización del agua y requerir costosas medidas de tratamiento para mitigar sus efectos.

⁶Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE), 435 OJ L § (2020). <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/spa>.

Para la obtención de datos de temperatura, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), a través de las diversas estaciones climatológicas distribuidas por todo el territorio nacional, nos proporciona esta información. La estación más cercana a nuestra zona de estudio es la estación meteorológica de Bailén. A continuación, se detalla toda la información de esta estación meteorológica y la distancia que hay hasta Baños de la Encina, municipio donde está ubicado el embalse el Rumblar.

Baños de la Encina (altitud: 418 m)

Latitud: 38° 10' 16" N - Longitud: 3° 46' 27" O -

Zona de avisos: Morena y Condado

Estación más cercana

Ind. climatológico: 5281X - Altitud (m): 345

Latitud: 38° 5' 35" N - Longitud: 3° 46' 57" O

Municipio: Bailén (Jaén) –

A una distancia de 8.72 km (datos aemet)

Los datos recogidos en el intervalo de tiempo que va desde septiembre del 2022 hasta diciembre del 2023 se recogen en la siguiente tabla, Tabla 7.

	Temperatura (°C)			Precipitación acumulada (l/m ²)
	Medía	Mínima	Máxima	
sep-22	24,04	11,05	38,6	11,4
oct-22	21,37	10,8	32,7	10
nov-22	14,3	3,9	26,2	20,6
dic-22	12,18	3,7	21,8	149,6
ene-23	8,66	-1,6	19,5	24,2
feb-23	10,47	-0,3	26	21,6
mar-23	14,88	-1	29,4	28,8
abr-23	20,2	8,3	36,2	0
may-23	20,92	11,5	32,6	46,4
jun-23	26,03	14,9	41,4	10,4
jul-23	30,37	19,1	43,1	0
ago-23	30,28	17,6	42,2	0,4
sep-23	23,82	13,4	37,6	24
oct-23	20,16	10,1	36,5	66,8
nov-23	13,29	3,6	23,8	17,4
dic-23	8,91	-0,3	19,3	24

Tabla 7: Datos de temperatura y precipitación acumulada mensuales facilitados por la AEmet.

Si combinamos la temperatura por estación con los valores obtenidos al aplicar cada uno de los índices, podemos evaluar si existe una correlación entre el aumento de la temperatura y un mayor crecimiento de algas.

Chl-a	Valor clorofila tipo a (µg/L)			Temperatura (°C)		
	Máxima	Mínima	Media	Medía	Mínima	Máxima
Invierno	111,29	75,23	87,66	11,34	-0,97	24,97
Primavera	112,75	74,46	88,75	22,38	11,57	36,73
Verano	111,38	75,10	89,42	28,16	16,70	40,97
Otoño	103,83	77,82	88,83	14,12	4,47	26,53

Tabla 8: Correlación entre el índice Chl-a y la Temperatura.

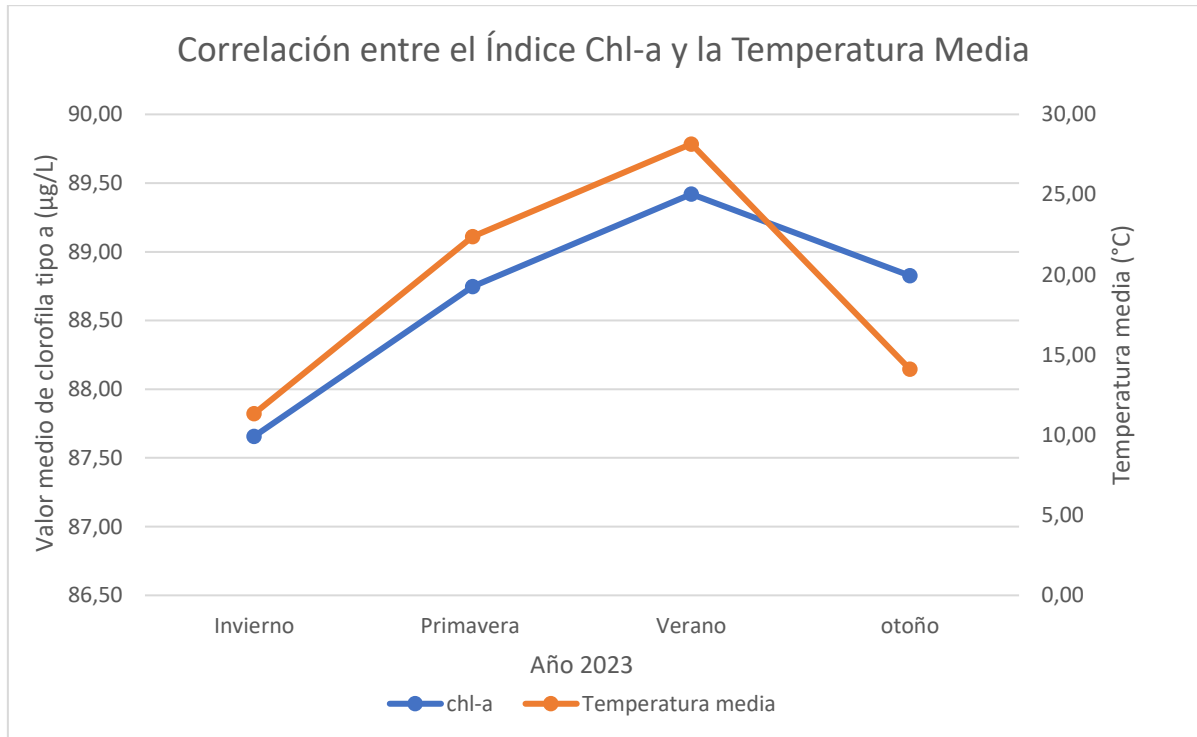
NDVI	Valor del estado de la vegetación			Temperatura (°C)		
	Máxima	Mínima	Media	Medía	Mínima	Máxima
Invierno	0,26	-0,10	0,03	11,34	4,47	26,53
Primavera	0,50	-0,10	0,06	22,38	-0,97	24,97
Verano	0,47	-0,06	0,02	28,16	11,57	36,73
Otoño	0,41	-0,10	0,05	14,12	16,70	40,97

Tabla 9: Correlación entre el índice NDVI y la Temperatura.

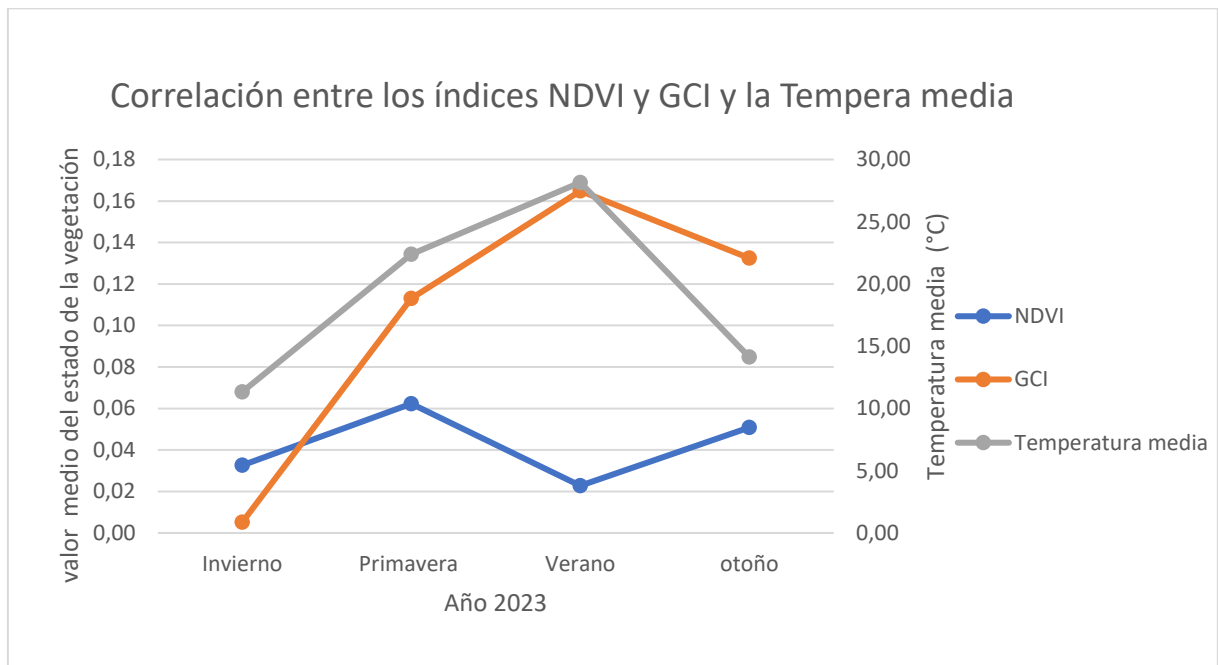
GCI	Valor del estado de la vegetación			Temperatura (°C)		
	maxima	minima	media	Medía	Mínima	Máxima
Invierno	0,64	-0,27	0,01	11,34	4,47	26,53
Primavera	0,72	-0,26	0,11	22,38	-0,97	24,97
Verano	0,62	-0,06	0,16	28,16	11,57	36,73
Otoño	0,66	-0,12	0,13	14,12	16,70	40,97

Tabla 10: Correlación entre el índice GCI y la Temperatura.

Las siguientes gráficas muestran la relación entre la temperatura media de cada estación en 2023 y los niveles promedio de clorofila o el estado de la vegetación en cada una de ellas.



Gráfica 5: Correlación de los valores medios entre el índice Chl-a y la tempera media.



Gráfica 6: Correlación de los valores medios entre el índice NDVI y GCI y la tempera media.

Al analizar la gráfica de correlación entre el Índice Chl-a y la temperatura media (Gráfica 5), se observa que a medida que aumenta la temperatura, también lo hace la concentración de clorofila, alcanzando su punto máximo en verano.

En la siguiente gráfica (Gráfica 6), que muestra la correlación entre los índices NDCVI y GCI con la temperatura media, se aprecia que el índice GCI es más sensible para detectar clorofila, reflejando valores más altos en comparación con el NDVI. Este último, el NDVI, se enfoca más en la vigorosidad de la vegetación. Según los resultados discutidos en la Sección 5, el NDVI detecta clorofila principalmente en la orilla del embalse, sin registrar concentraciones significativas en el agua del embalse. Esto se debe a que la vegetación terrestre no responde de la misma manera a las temperaturas elevadas que la vegetación acuática. Mientras que la vegetación terrestre tiende a secarse o a perder clorofila (volviéndose amarilla) en verano, lo que provoca un descenso en los valores detectados por el NDVI, los otros índices sí captan la presencia de clorofila en el agua, aunque en cantidades mínimas.

La correlación entre la temperatura de cada estación y los valores detectados por los distintos índices (NDVI, GCI y Chl-a) se mantiene, teniendo en cuenta cómo la vegetación responde a las temperaturas según su entorno. Sin embargo, al considerar el pico más alto de clorofila en el agua, que ocurre en verano, y correlacionarlo con los datos de laboratorio, se observa que ciertos elementos alterados se registran en enero, no coincidiendo con el pico estacional de clorofila. Al analizar la tabla de lluvias, se observa que antes de la toma de muestras, hubo meses lluviosos, lo que probablemente causó un arrastre de sedimentos y materia orgánica al embalse. Este exceso de nutrientes, combinado con el aumento de la temperatura, conduce a un fenómeno de eutrofización, un enriquecimiento excesivo de nutrientes en el agua que provoca un crecimiento descontrolado de algas. Por lo tanto, todos los datos obtenidos apuntan a un aumento de algas en el embalse del Rumbiar.

7. Conclusiones.

Este trabajo ha sido desarrollado en el pantano el Rumblar (Baños de la Encina, Jaén) combinando datos obtenidos mediante teledetección con imágenes multifuente y análisis hidrográfico, lo que proporciona una visión integral de la dinámica del embalse. Esta perspectiva es fundamental para diseñar estrategias de gestión sostenible. Resulta crucial implementar un monitoreo continuo de la calidad del agua, complementando el análisis de imágenes satelitales con muestreos in situ, para identificar y prevenir problemas de contaminación de manera eficiente.

El uso de herramientas como Google Earth Engine (GEE), que mediante programación en lenguaje JavaScript ha permitido procesar imágenes del satélite Sentinel-2 con una resolución de 10 metros, ha sido clave para obtener la mayor cantidad de información posible gracias a la precisión de estas imágenes. Además, la aplicación del método D8 ha demostrado ser muy valiosa en la interpretación y monitoreo tanto ambiental como geoespacial, brindando beneficios específicos para el análisis y la gestión de recursos hídricos, cada una con su propio alcance y ventajas.

El análisis del embalse del Rumblar revela hallazgos clave que permiten comprender tanto la dinámica del ecosistema acuático como la calidad del agua a lo largo del año. Las concentraciones de clorofila tipo-a, detectadas mediante imágenes satelitales y validadas con análisis de laboratorio, se mantuvieron muy por debajo de los niveles considerados peligrosos para el consumo humano. Esto sugiere la ausencia de un crecimiento excesivo de algas o problemas de eutrofización, lo cual es un indicador positivo de la salud del cuerpo de agua. Los bajos niveles de clorofila-a observados son consistentes con una actividad fotosintética limitada, lo que indica que los niveles de nutrientes, como nitratos, nitritos y amonio, se mantienen dentro de los rangos adecuados para evitar la proliferación excesiva de fitoplancton. Sin embargo, se observaron fluctuaciones que, aunque no representan un riesgo inmediato, requieren un monitoreo constante para prevenir desequilibrios futuros.

Adicionalmente, se identificaron variaciones estacionales en los índices de vegetación, como el NDVI y el GCI, con un aumento significativo en primavera y verano, correlacionado directamente con el incremento de las temperaturas durante esos meses. Estas variaciones reflejan un patrón natural de crecimiento de la vegetación acuática y algas, influenciado por

factores climáticos, donde las temperaturas más elevadas favorecen una mayor actividad fotosintética.

En cuanto a la calidad del agua, los análisis de laboratorio confirmaron que los niveles de contaminantes, como metales pesados y pesticidas, se mantuvieron dentro de los límites seguros, sin representar un riesgo significativo para la salud humana o el ecosistema. Aunque se detectaron concentraciones bajas de ciertos compuestos tóxicos, estos no constituyen un peligro inmediato, pero destacan la importancia de mantener un monitoreo constante para evitar su acumulación a largo plazo.

El estudio también resalta la importancia de parámetros como el pH, la conductividad y la turbidez, que tienen un impacto directo en la capacidad del embalse para sostener una vida acuática saludable y en la producción de clorofila. La estabilidad de estos parámetros a lo largo del año confirma que el embalse se encuentra en buenas condiciones generales.

Asimismo, se halló una correlación positiva entre los índices de vegetación obtenidos a través de imágenes satelitales, como el NDVI y el GCI, y los valores de calidad del agua proporcionados por Somajasa en sus análisis de laboratorio. Estos resultados preliminares avalan la fiabilidad del uso de imágenes satelitales para monitorear la salud del embalse, en concordancia con los datos obtenidos mediante muestras físicas. Sin embargo, se sugiere continuar con este enfoque mixto para lograr un monitoreo más detallado y prevenir posibles fluctuaciones o riesgos en el futuro.

Desde una perspectiva hidrográfica, el análisis del modelo digital del terreno (MDT) permitió trazar la dirección del flujo de agua y delimitar zonas de la cuenca con distintas pendientes. Esta información resulta fundamental para entender la distribución de nutrientes y sedimentos en el embalse, ya que las corrientes influyen en la acumulación de estos elementos, lo que puede favorecer el crecimiento de algas en áreas específicas. También se identificaron puntos de entrada de agua y sedimentos que pueden representar posibles fuentes de contaminación o aportes de materia orgánica.

Por lo tanto, la combinación de análisis hidrográficos y teledetección ofrece importantes beneficios para una gestión más eficiente del agua. El uso de imágenes satelitales permite un monitoreo continuo de la calidad del agua, facilitando la detección temprana de posibles

problemas. Un análisis integral de la calidad y trazabilidad del agua es esencial para desarrollar estrategias sostenibles en la gestión de los recursos hídricos. Además, identificar las fuentes de contaminación y aplicar las medidas correctivas adecuadas contribuye de manera significativa a la protección del ecosistema acuático. Mantener la calidad del agua en condiciones óptimas es crucial para garantizar un suministro seguro de agua potable, lo que impacta directamente en la salud pública. Asimismo, es fundamental mantener un monitoreo regular de los parámetros clave para prevenir desequilibrios y asegurar la sostenibilidad del ecosistema a largo plazo. La correlación entre las condiciones climáticas y los índices de vegetación subraya la importancia de integrar datos meteorológicos en la gestión del recurso hídrico, junto con la implementación de medidas preventivas para controlar la entrada de nutrientes y contaminantes. Además, los programas de educación ambiental pueden sensibilizar a las comunidades locales sobre la relevancia de preservar la calidad del agua.

REFERENCIAS

- «2312-Informe_SE_dic_2023.pdf». Accedido 2 de julio de 2024. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/2312-Informe_SE_dic_2023.pdf.
- Burnham, Kenneth P. *Model Selection and Multi-Model Inference : A Practical Information-Theoretic Approach*. New York : Springer, 2002. <http://archive.org/details/modelselectionmu0000burn>.
- CMAOT. «Seguimiento de la calidad de aguas embalsadas». Accedido 17 de junio de 2024. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/seguimiento-de-la-calidad-de-aguas-embalsadas/20151.
- Delegido, J., C. Tenjo, A. Ruiz-Verdú, R. Peña, y J. Moreno. «Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO». *Revista de Teledetección* 0, n.º 41 (12 de junio de 2014): 37. <https://doi.org/10.4995/raet.2014.2295>.
- Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE), 435 OJ L § (2020). <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/spa>.
- dokumen.tips. «(PDF) Possibilities of Discriminating Tropical Secondary Succession in Amazônia Using Hyperspectral and Multiangular CHRIS/PROBA Data». Accedido 17 de junio de 2024. <https://dokumen.tips/documents/possibilities-of-discriminating-tropical-secondary-succession-in-amazonia.html>.
- «Estación meteorológica Bailén.» Accedido 19 de junio de 2024. <https://x-y.es/aemet/est-5281X-bailen>.
- Ferrero, Víctor Olaya. «Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno», s. f.
- Gibson, George, Robert Carlson, Jonathan Simpson, Eric Smeltzer, Jeroen Gerritson, Steven Chapra, Steven Heiskary, Jack Jones, y Robert Kennedy. «Nutrient Criteria Technical Guidance Manual Lakes and Reservoirs», s. f.
- Google Docs. «Teledetección Aplicada al Monitoreo de Concentración de Clorofila-a Con Landsat 8 .pdf». Accedido 17 de junio de 2024. https://drive.google.com/file/d/1sYDmozM29sU0PUAVdNNVEYmqwXwQe1v9/view?usp=embed_facebook.
- «Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th Edition, Incorporating the 1st Addendum». Accedido 17 de junio de 2024. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- Lyon, John G., ed. *GIS for Water Resource and Watershed Management*. London: CRC Press, 2002. <https://doi.org/10.4324/9780203217917>.
- Meteorología, Agencia Estatal de. «Jaén: Jaén - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España». Accedido 17 de junio de 2024. <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.
- . «Valores climatológicos normales - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España». Accedido 17 de junio de 2024. <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?k=and>.

- O'Callaghan, John F., y David M. Mark. «The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data». *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28, n.º 3 (diciembre de 1984): 323-44. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0).
- Roberto. «Cálculo del índice FAI para la identificación de algas». *Gis&Beers* (blog), 2 de octubre de 2020. <https://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-fai-la-identificacion-algas/.«rumblar.pdf»>. Accedido 2 de julio de 2024. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/agencia_andaluza_agua/gestion/patrimonio_hidraulico_publico/inventario_balsas/rumblar.pdf.
- Smith, Val H., y David W. Schindler. «Eutrophication Science: Where Do We Go from Here?» *Trends in Ecology & Evolution* 24, n.º 4 (abril de 2009): 201-7. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>.
- Wurtsbaugh, Wayne A., Hans W. Paerl, y Walter K. Dodds. «Nutrients, Eutrophication and Harmful Algal Blooms along the Freshwater to Marine Continuum». *WIREs Water* 6, n.º 5 (septiembre de 2019): e1373. <https://doi.org/10.1002/wat2.1373>.

ANEXOS

Anexo 1. Códigos de JavaScript en GEE

```
//print('area', area);

var zona = table;

Map.centerObject(zona, 16);

Map.addLayer(zona, {}, 'area');

// Definimos variables de tiempo.

var year2 = '2023'

var year1= '2022' ;

//Primavera

var startdate1 = year2+'-03-20';

var enddate1 = year2+'-06-20';

//Verano

var startdate2 = year2+'-06-21';

var enddate2 = year2+'-09-22';

//Invierno

var startdate3 = year1+'-12-21';

var enddate3 = year2+'-03-19';

//Otoño

var year = '2023'

var startdate = year+'-09-23';

var enddate = year+'-12-20';
```

```
print(startdate1, enddate1);
```

```
print(startdate2, enddate2);
```

```
print(startdate3, enddate3);
```

```
print(startdate, enddate);
```

```
//Función para enmascarar nubes y cirros de la imagen
```

```
function MascaraNubesS(image) {
```

```
    var qa = image.select('QA60');
```

```
    var RecorteNubesMascaraS = 1 << 10;
```

```
    var RecorteCirrosMascaraS = 1 << 11;
```

```
    var MascaraS = qa.bitwiseAnd(RecorteNubesMascaraS).eq(0)
```

```
        .and(qa.bitwiseAnd(RecorteCirrosMascaraS).eq(0));
```

```
    return image.updateMask(MascaraS);}
```

```
// Colección Sentinel 2 y aplicación de la mascara.
```

```
var ColeccionSentinel1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
```

```
    .filterDate(startdate1, enddate1)
```

```
    // .filterBounds(poligono1)
```

```
    .filterBounds(zona)
```

```
    // .filterBounds(geometry)
```

```
    .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 20)
```

```
.map(MascaraNubesS);
```

```
var ColeccionSentinel2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
```

```
.filterDate(startdate2,enddate2)
```

```
//.filterBounds(poligono1)
```

```
.filterBounds(zona)
```

```
//.filterBounds(geometry)
```

```
.filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 20)
```

```
.map(MascaraNubesS);
```

```
var ColeccionSentinel3 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
```

```
.filterDate(startdate3,enddate3)
```

```
//.filterBounds(poligono1)
```

```
.filterBounds(zona)
```

```
//.filterBounds(geometry)
```

```
.filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 20)
```

```
.map(MascaraNubesS);
```

```
var ColeccionSentinel = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
```

```
.filterDate(startdate,enddate)
```

```
//.filterBounds(poligono1)
```

```
.filterBounds(zona)
```

```
//.filterBounds(geometry)
```

```
.filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 20)

.map(MascaraNubesS);

var Vegetacion1 = ee.Image(ColeccionSentinel1.mean());

var Vegetacion1 = Vegetacion1.clip(zona); // media de todas las imágenes en 1 solo producto

print('Media imagenes primavera',Vegetacion1);

var cantidad1 = ColeccionSentinel1.size(); //cantidad de imágenes sentinel seleccionadas
segun los filtros

print('Cantidad imagenes primavera',ColeccionSentinel1);

var Vegetacion2 = ee.Image(ColeccionSentinel2.mean());

var Vegetacion2 = Vegetacion2.clip(zona); // media de todas las imagenes en 1 solo producto

print('Media imagenes verano',Vegetacion2);

var cantidad2 = ColeccionSentinel2.size(); //cantidad de imagenes sentinel seleccionadas
segun los filtros

print('Cantidad imagenes verano',ColeccionSentinel2);

var Vegetacion3 = ee.Image(ColeccionSentinel3.mean());

var Vegetacion3 = Vegetacion3.clip(zona); // media de todas las imagenes en 1 solo producto

print('Media imagenes invierno',Vegetacion3);

var cantidad3 = ColeccionSentinel3.size(); //cantidad de imagenes sentinel seleccionadas
segun los filtros

print('Cantidad imagenes invierno',ColeccionSentinel3);
```

```
var Vegetacion = ee.Image(ColeccionSentinel.mean());

var Vegetacion = Vegetacion.clip(zona); // media de todas las imagenes en 1 solo producto

print('Media imagenes otoño',Vegetacion);

var cantidad = ColeccionSentinel.size(); //cantidad de imagenes sentinel seleccionadas segun
los filtros

print('Cantidad imagenes otoño',ColeccionSentinel);

//Cálculo de índices para primavera

    // NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

var NDVI1 = Vegetacion1.expression('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))', {

    'NIR': Vegetacion1.select('B8'),

    'RED': Vegetacion1.select('B4')});

    // GCI (Green Chlorophyll Index)

var GCI1 = Vegetacion1.expression ('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', {

    'NIR': Vegetacion1.select ('B8'),

    'GREEN': Vegetacion1.select ('B3')});

    // Chla_a (Index for Hypertrophic Waters)

var Chla_a1 = Vegetacion1.expression ('float (55.83*((RED_EDGE_1)/(BLUE))+35.08)',{

    'BLUE': Vegetacion1.select ('B2'),

    'RED_EDGE_1': Vegetacion1.select ('B5')});

//Cálculos de índices para verano
```

```
// NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
```

```
var NDVI2 = Vegetacion2.expression('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))', {  
  
  'NIR': Vegetacion2.select('B8'),  
  
  'RED': Vegetacion2.select('B4')}});
```

```
// GCI (Green Chlorophyll Index)
```

```
var GCI2 = Vegetacion2.expression ('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', {  
  
  'NIR': Vegetacion2.select ('B8'),  
  
  'GREEN': Vegetacion2.select ('B3')}});
```

```
// Chla_a (Index for Hypertrophic Waters)
```

```
var Chla_a2 = Vegetacion2.expression ('float (55.83*((RED_EDGE_1)/(BLUE))+35.08)',{  
  
  'BLUE': Vegetacion2.select ('B2'),  
  
  'RED_EDGE_1': Vegetacion2.select ('B5')}});
```

```
//Cálculos de índices para invierno
```

```
// NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
```

```
var NDVI3 = Vegetacion3.expression('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))', {  
  
  'NIR': Vegetacion3.select('B8'),  
  
  'RED': Vegetacion3.select('B4')}});
```

```
// GCI (Green Chlorophyll Index)
```

```
var GCI3 = Vegetacion3.expression ('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', {
```

```

'NIR': Vegetacion3.select ('B8'),

'GREEN': Vegetacion3.select ('B3')));

// Chla_a (Index for Hypertrophic Waters)

var Chla_a3 = Vegetacion3.expression ('float (55.83*((RED_EDGE_1)/(BLUE))+35.08)',{

'BLUE': Vegetacion3.select ('B2'),

'RED_EDGE_1': Vegetacion3.select ('B5')));

//Cálculos de índices para otoño

// NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

var NDVI = Vegetacion.expression('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))', {

'NIR': Vegetacion.select('B8'),

'RED': Vegetacion.select('B4')));

// GCI (Green Chlorophyll Index)

var GCI = Vegetacion.expression ('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', {

'NIR': Vegetacion.select ('B8'),

'GREEN': Vegetacion.select ('B3')));

// Chla_a (Index for Hypertrophic Waters)

var Chla_a = Vegetacion.expression ('float (55.83*((RED_EDGE_1)/(BLUE))+35.08)',{

'BLUE': Vegetacion.select ('B2'),

'RED_EDGE_1': Vegetacion.select ('B5')));

```

// Simbologia NDVI

```

var color = {
  min: 0.0,
  max: 1.0,
  palette: [
    'FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901',
    '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201', '004C00', '023B01',
    '012E01', '011D01', '011301'
  ],
};

```

// Simbologia Chla-a

```

var colorHWater = {
  min: 70,
  max: 106,
  palette: [
    'FEF9E7', 'FAD7A0', '5DADE2', '2E86C1', '21618C', '4A235A'
  ],
};

```

// Simbología GCI

```

var Simbologia = {max: 1, min: 0, // IMPORTANTE variar rangos en funcion del indice
  palette: ['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',
    'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',
    '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']};

```

// Representación de índices de vegetación

```
Map.addLayer (Vegetacion1, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']}, 'RGB  
color natural',0);
```

```
Map.addLayer (Vegetacion2, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']}, 'RGB  
color natural',0);
```

```
Map.addLayer (Vegetacion3, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']}, 'RGB  
color natural',0);
```

```
Map.addLayer (Vegetacion, {max: 4000.0, min: 0.0, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']}, 'RGB  
color natural',0);
```

```
Map.addLayer (NDVI1, color, 'NDVI_primavera',1);
```

```
Map.addLayer (GCI1, color, 'GCI_primavera',0);
```

```
Map.addLayer (Chla_a1, colorHWater, 'Chl_a_primavera',1);
```

```
Map.addLayer (NDVI2, color, 'NDVI_verano',1);
```

```
Map.addLayer (GCI2, Simbologia, 'GCI_verano',0);
```

```
Map.addLayer (Chla_a2, colorHWater, 'Chl_a_verano',0);
```

```
Map.addLayer (NDVI3, color, 'NDVI_invierno',1);
```

```
Map.addLayer (GCI3, Simbologia, 'GCI_invierno',0);
```

```
Map.addLayer (Chla_a3, colorHWater, 'Chl_a_invierno',1);
```

```
Map.addLayer (NDVI, color, 'NDVI_otoño',1);
```

```
Map.addLayer (GCI, Simbologia, 'GCI_otoño',0);
```

```
Map.addLayer (Chla_a, colorHWater 'Chl_a_otoño',1);
```

```
//exportar img otoño
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: NDVI.float(),  
  
  description: 'NDVI_otono_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: GCI.float(),  
  
  description: 'GCI_otono_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: Chla_a.float(),  
  
  description: 'Chl_a_otono_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

//exportar en IMG primavera

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: NDVI1.float(),  
  
  description: 'NDVI_primavera_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({
```

```
image: GCI1.float(),  
  
description: 'GCI_primavera_geotiff_'+year2,  
  
scale: 10,  
  
region: zona,  
  
fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
crs: 'EPSG:4326',  
  
folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
image: Chla_a1.float(),  
  
description: 'Chl_a_primavera_geotiff_'+year2,  
  
scale: 10,  
  
region: zona,  
  
fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
crs: 'EPSG:4326',  
  
folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

//Exportar en IMG verano

```
Export.image.toDrive({  
  
image: NDVI2.float(),  
  
description: 'NDVI_verano_geotiff_'+year2,
```

```
scale: 10,  
  
region: zona,  
  
fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
crs: 'EPSG:4326',  
  
folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: GCI2.float(),  
  
  description: 'GCI_verano_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: Chla_a2.float(),  
  
  description: 'Chl_a_verano_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',
```

```
crs: 'EPSG:4326',  
  
folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

//Exportar IMG de invierno

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: NDVI3.float(),  
  
  description: 'NDVI_invierno_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  
  image: GCI3.float(),  
  
  description: 'GCI_invierno_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

```
});
```

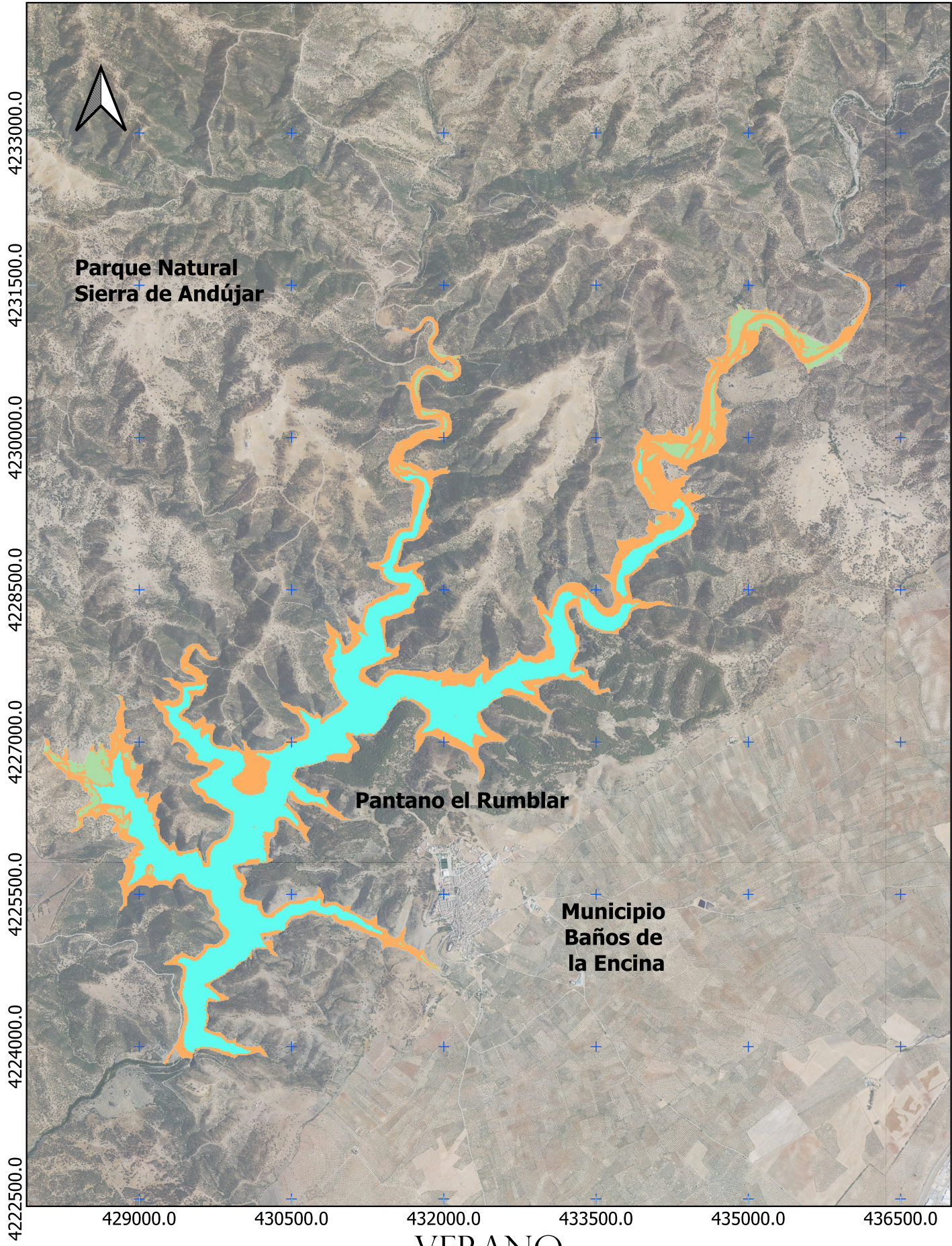
```
Export.image.toDrive({  
  
  image: Chla_a3.float(),  
  
  description: 'Chl_a_invierno_geotiff_'+year2,  
  
  scale: 10,  
  
  region: zona,  
  
  fileFormat: 'GeoTIFF',  
  
  crs: 'EPSG:4326',  
  
  folder: 'gee_archivos',  
  
});
```

Anexo 2. Planos

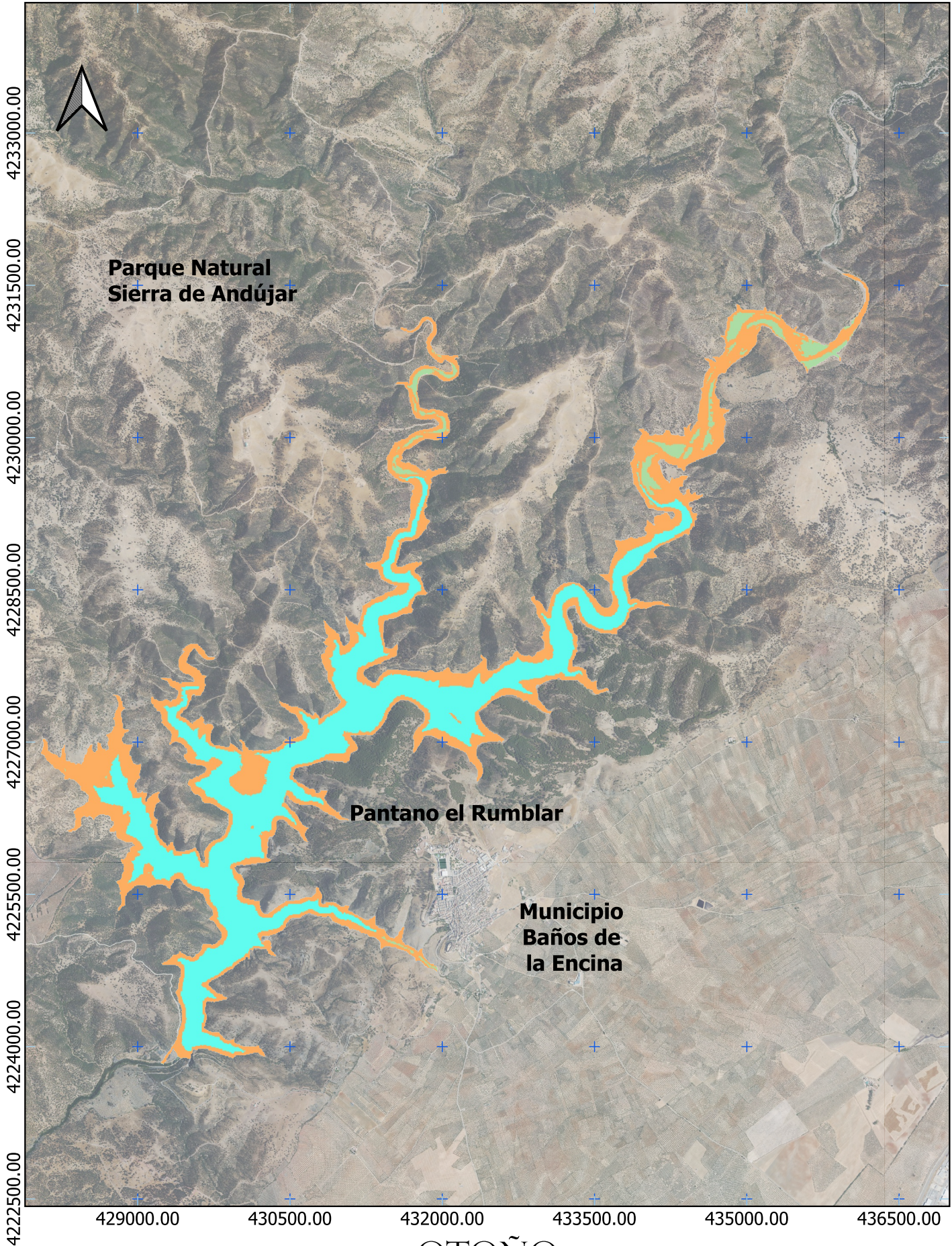
- 2.1.- Mapa situación y emplazamiento
- 2.2.- Mapa pendientes en %
- 2.3.- Mapa dirección flujo del agua
- 2.3.- Red de dirección de flujo
- 2.4.- Índice NDVI Estacionario del Año 2023
- 2.5.- Índice GCI Estacionario del Año 2023
- 2.6.- Índice Chl-a Estacionario del Año 2023

ÍNDICE NDVI ESTACIONARIO DEL AÑO 2023

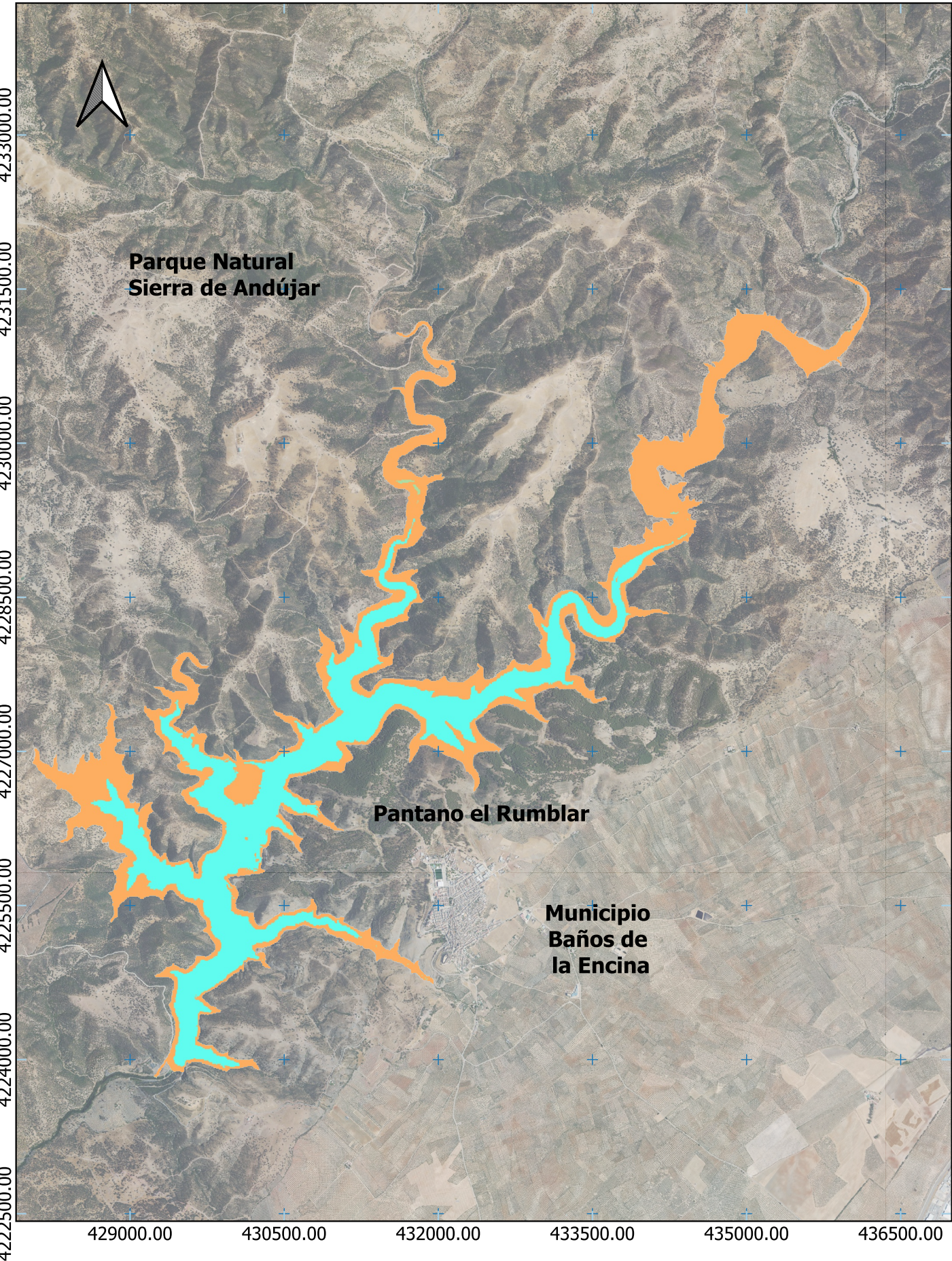
INVIERNO



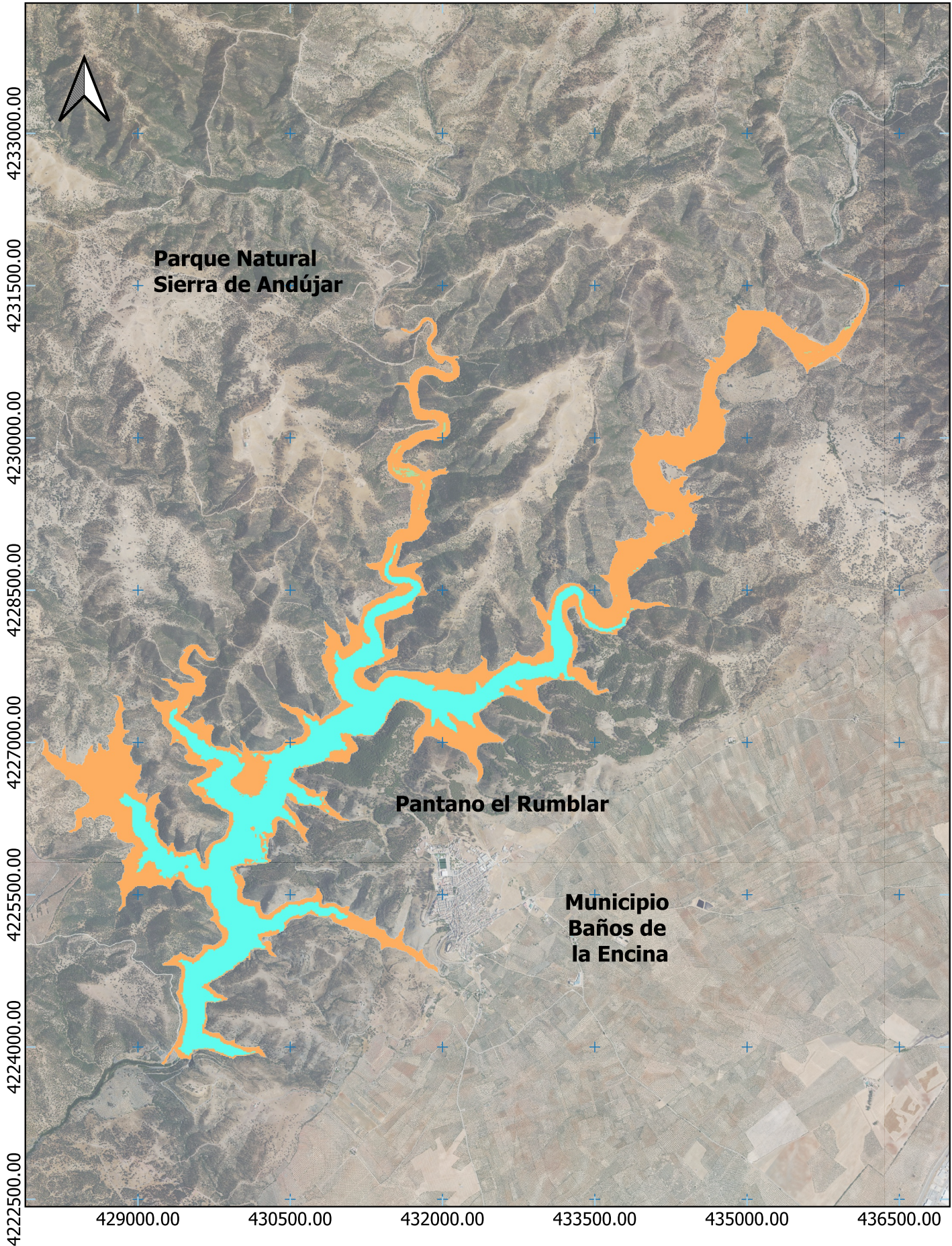
PRIMAVERA



VERANO



OTOÑO



Leyenda NDVI

- <= -1,00
- 1,00 - 0,00
- 0,00 - 0,33
- 0,33 - 0,66
- 0,66 - 1,00

750 0 750 1.500 2.250 3.000 3.750 m

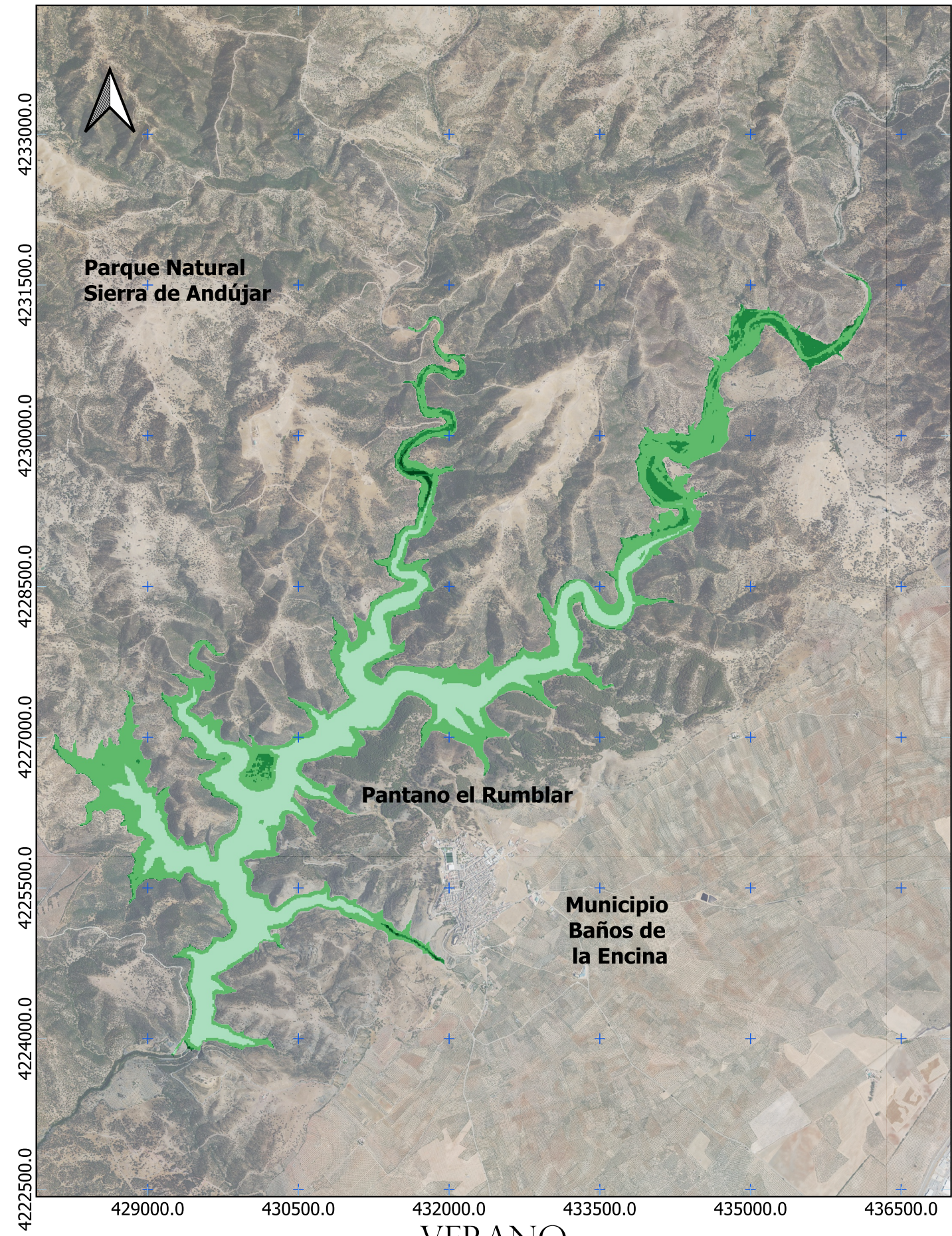
Escala 1:50.000

SISTEMA DE REFERENCIA DE COORDENADAS (SRC):
EPSG:4326 - WGS 84 - GEOGRAPHIC
PROJECT CRS: EPSG:25830 ETRS89/ UTM ZONE 30N

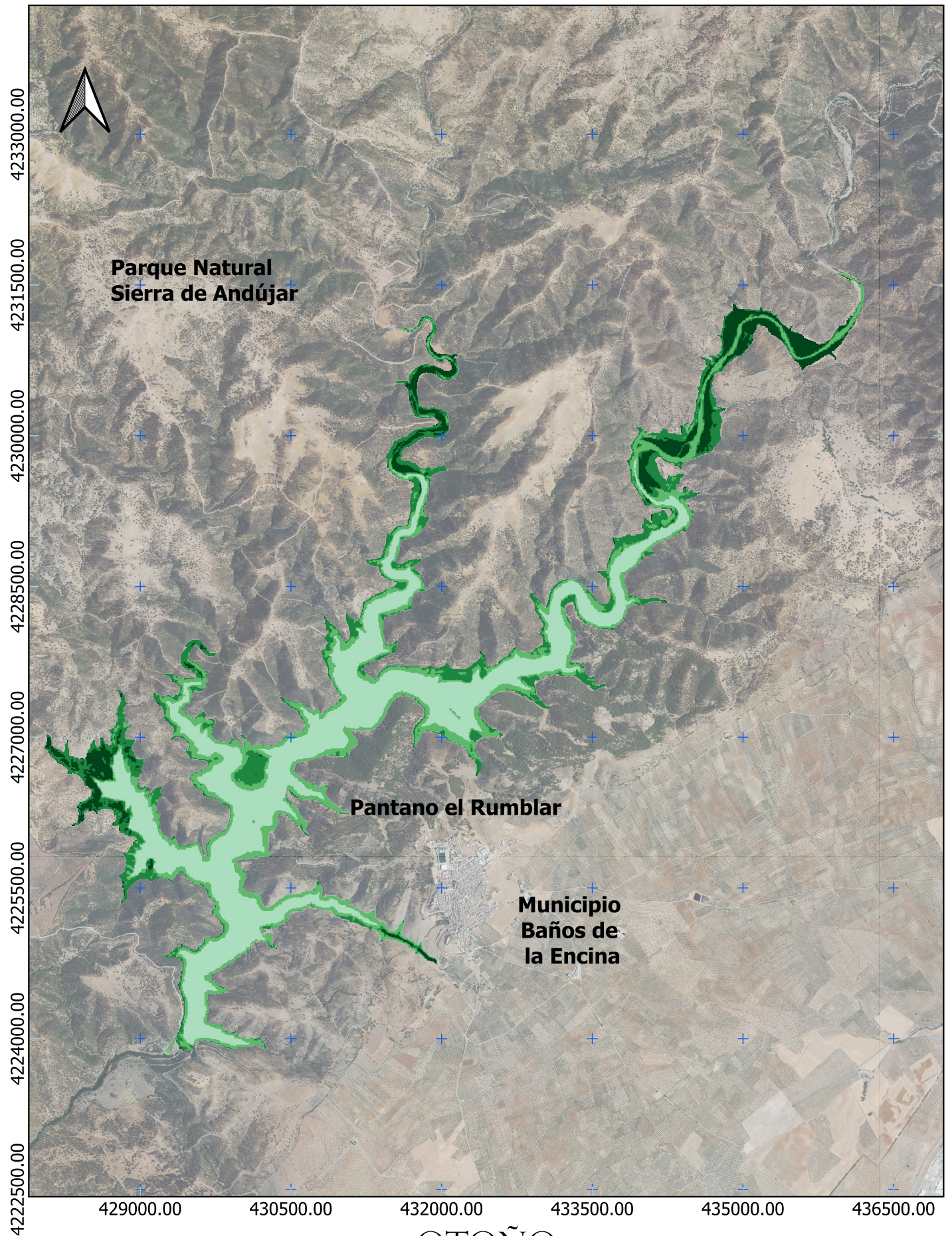
TÍTULO: ÍNDICE NDVI ESTACIONARIO DEL AÑO 2023
AUTOR: ALMUDENA GUERRERO LARA
TRABAJO FIN DE GRADO: TRAZABILIDAD Y ANÁLISIS DE AGUA
QUE ABASTECE A UN EMBALSE A PARTIR DE IMÁGENES
MULTIFUENTE. CASO PANTANO RUMBLAR (BAÑOS DE LA
ENCINA, JAÉN)
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN.
UNIVERSIDAD DE JAÉN.
SEPTIEMBRE DEL 2024

ÍNDICE GCI ESTACIONARIO DEL AÑO 2023

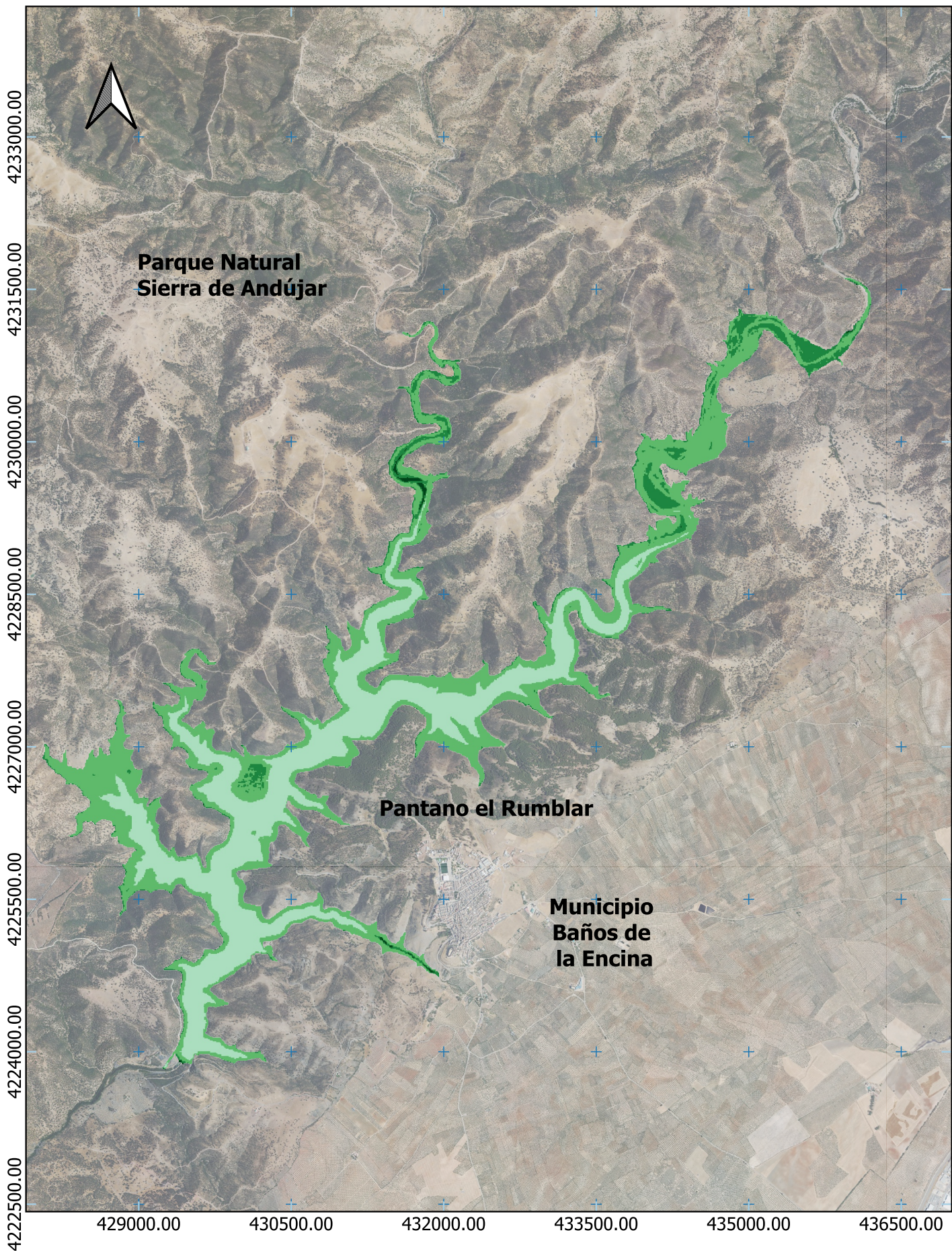
INVIERNO



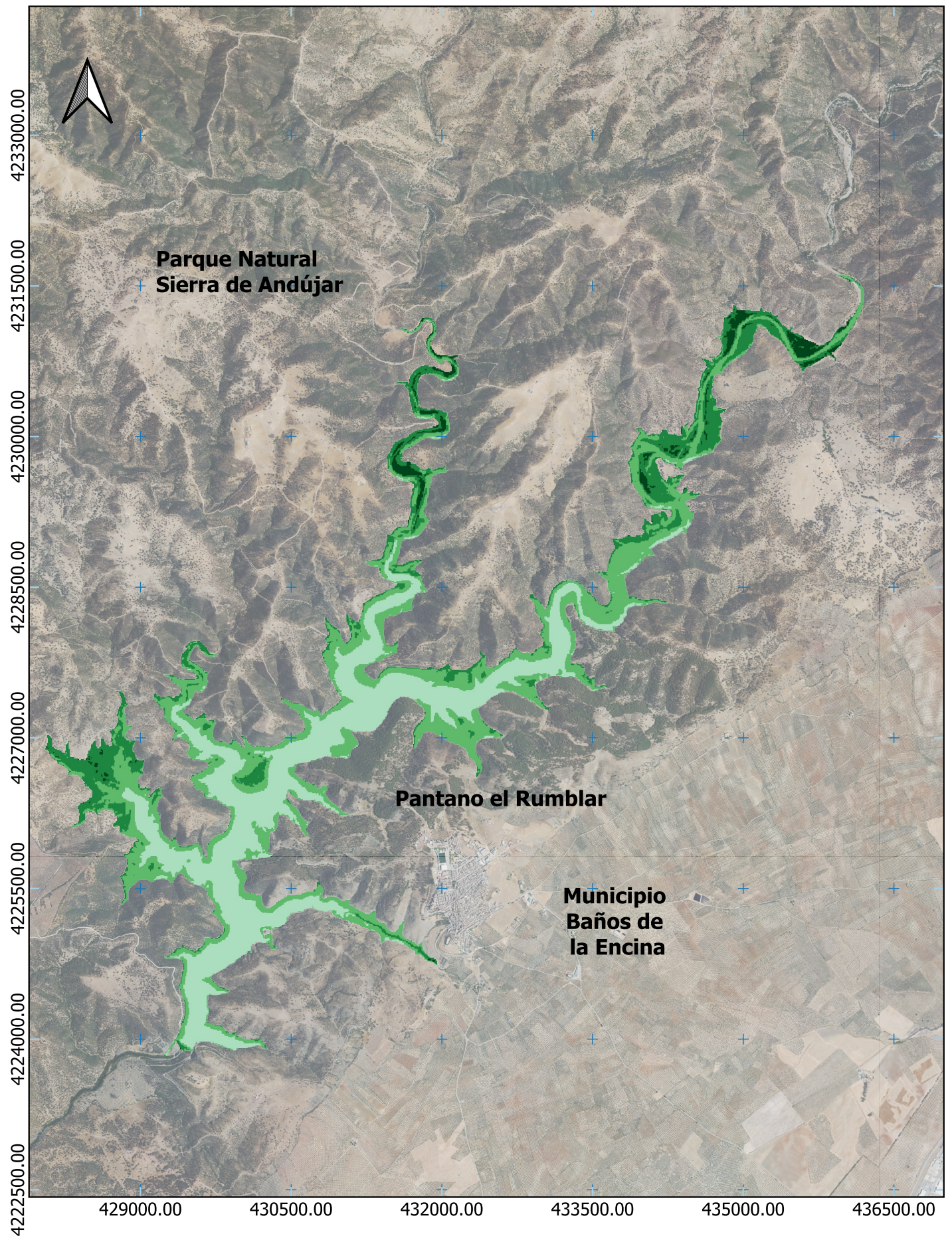
PRIMAVERA



VERANO



OTOÑO



Leyenda GCI

- $\leq 0,02$
- $0,02 - 0,37$
- $0,37 - 0,71$
- $0,71 - 1,06$
- $> 1,06$

750 0 750 1.500 2.250 3.000 3.750 m

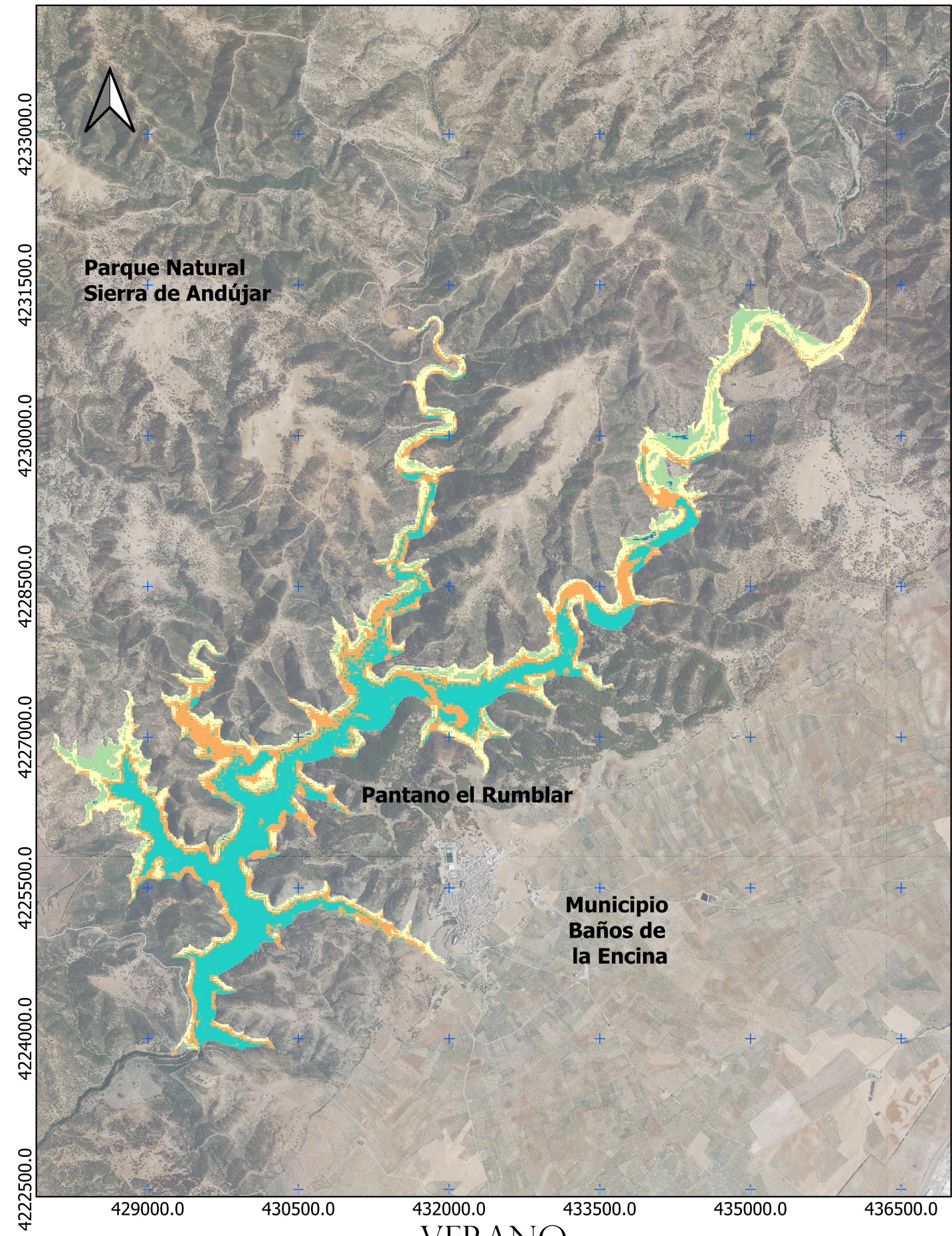
Escala 1:50.000

SISTEMA DE REFERENCIA DE COORDENADAS (SRC):
EPSG:4326 - WGS 84 - GEOGRAPHIC
PROJECT CRS: EPSG:25830 ETRS89/ UTM ZONE 30N

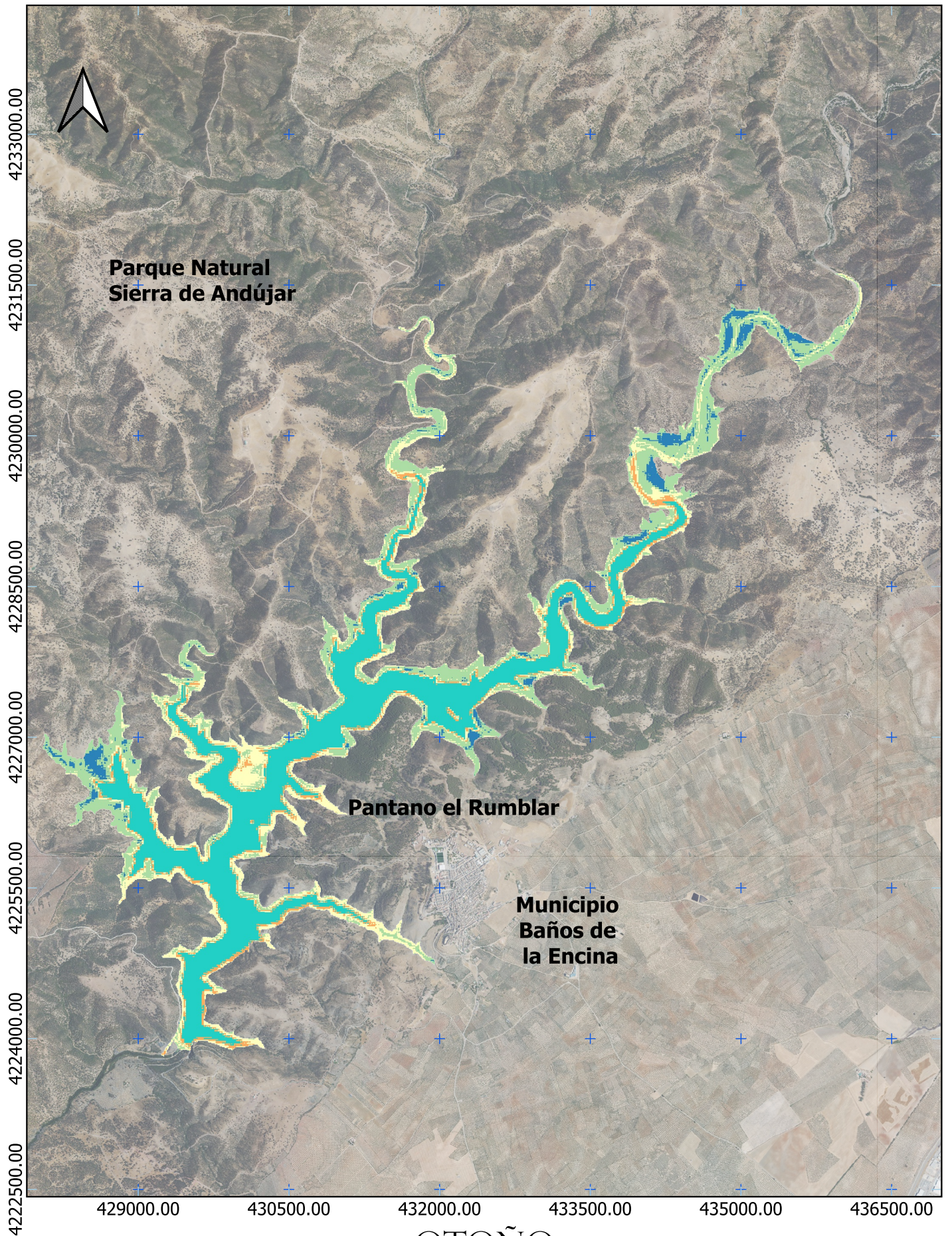
TÍTULO: ÍNDICE GCI ESTACIONARIO DEL AÑO 2023
AUTOR: ALMUDENA GUERRERO LARA
TRABAJO FIN DE GRADO: TRAZABILIDAD Y ANÁLISIS DE AGUA
QUE ABASTECE A UN EMBALSE A PARTIR DE IMÁGENES
MULTIFUENTE. CASO PANTANO RUMBLAR (BAÑOS DE LA
ENCINA, JAÉN)
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN.
UNIVERSIDAD DE JAÉN.
SEPTIEMBRE DEL 2024

ÍNDICE CHL-A ESTACIONARIO DEL AÑO 2023

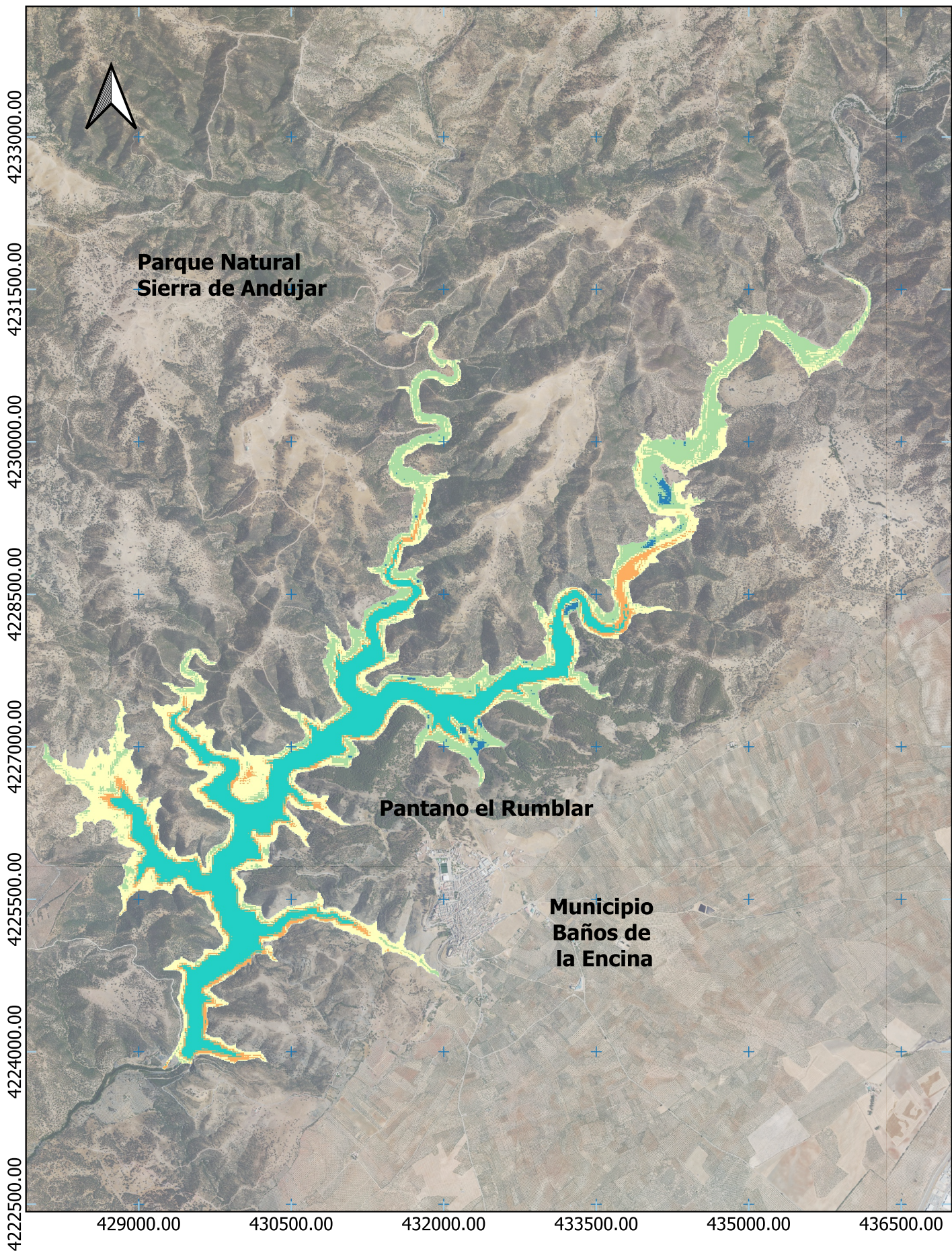
INVIERNO



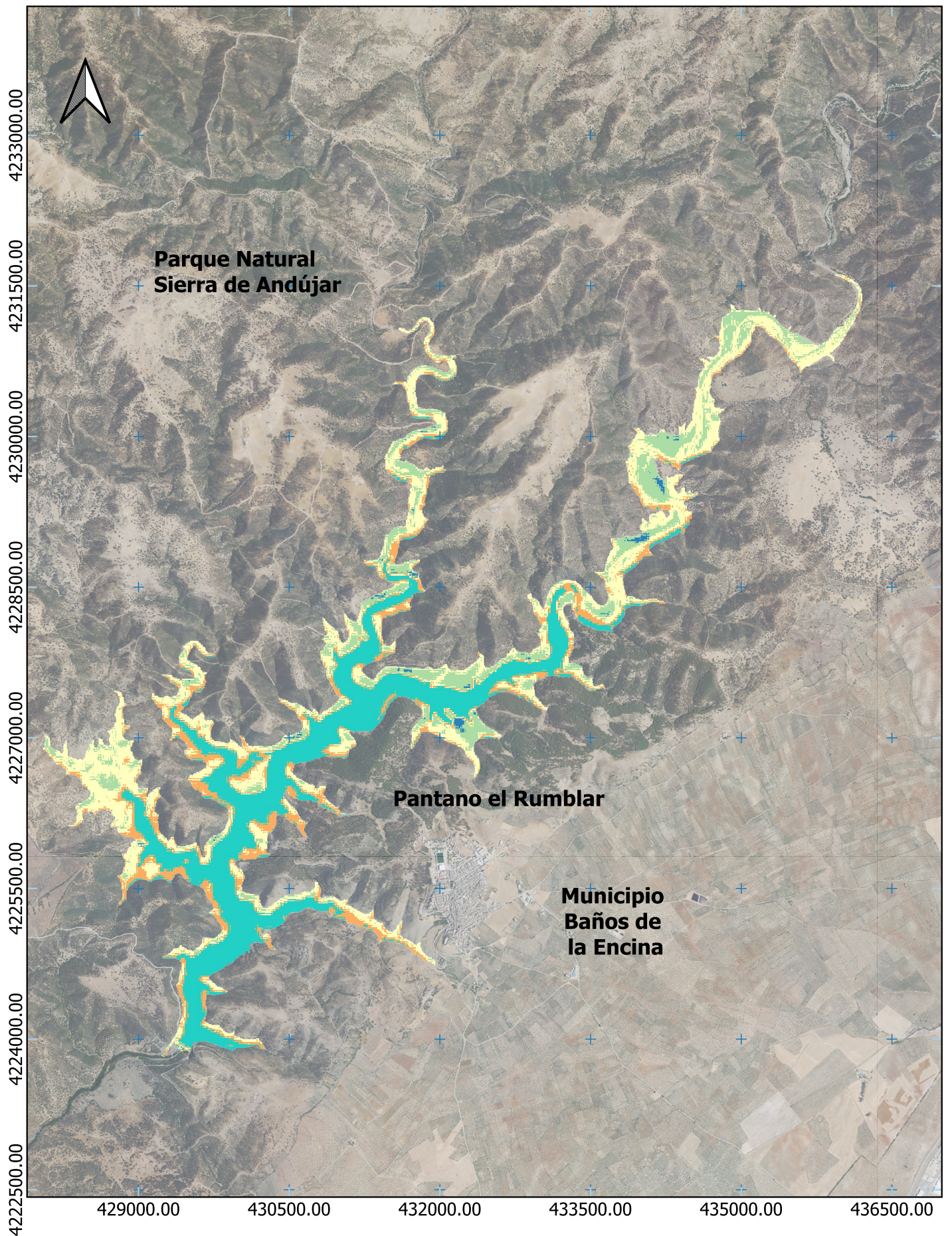
PRIMAVERA



VERANO



OTOÑO



Leyenda Chl-a (µm/L)

- <= 82,40
- 82,40 - 89,80
- 89,80 - 97,20
- 97,20 - 104,60
- > 104,60

750 0 750 1.500 2.250 3.000 3.750 m

Escala 1:50.000

SISTEMA DE REFERENCIA DE COORDENADAS (SRC):
EPSG:4326 - WGS 84 - GEOGRAPHIC
PROJECT CRS: EPSG:25830 ETRS89/ UTM ZONE 30N

TÍTULO: ÍNDICE CHL-A ESTACIONARIO DEL AÑO 2023
AUTOR: ALMUDENA GUERRERO LARA
TRABAJO FIN DE GRADO: TRAZABILIDAD Y ANÁLISIS DE AGUA
QUE ABASTECE A UN EMBALSE A PARTIR DE IMÁGENES
MULTIFUENTE. CASO PANTANO RUMBLAR (BAÑOS DE LA
ENCINA, JAÉN)
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN.
UNIVERSIDAD DE JAÉN.
SEPTIEMBRE DEL 2024

Anexo 3. Límites de los contaminantes en el agua.

Para determinar cuándo los valores de los contaminantes en el agua se consideran anormales, se emplean los estándares establecidos por la Unión Europea. A continuación, se presentan los límites máximos recomendados para los contaminantes específicos que analiza la empresa Somajasa en aguas destinadas al consumo humano. Esta información ha sido obtenida a través de la plataforma EUR-Lex, que es una herramienta esencial para acceder a la legislación y otros documentos oficiales de la Unión Europea. EUR-Lex proporciona una amplia variedad de recursos y herramientas que facilitan la búsqueda y acceso a la información jurídica en múltiples idiomas, promoviendo la transparencia y la accesibilidad de la normativa de la UE.

Contaminantes Orgánicos e Inorgánicos

Endosulfán Beta: Límite no especificado directamente, pero los plaguicidas individuales suelen tener un límite de **0,10 µg/L** y la suma total de plaguicidas no debe superar los **0,50 µg/L**

Oxidabilidad: Se considera un indicador de la calidad orgánica del agua. No debe exceder los **5 mg/L O₂**.

Suma de Plaguicidas: No debe exceder los **0,50 µg/L** en total.

Hexaclorobenceno: Límite máximo de **0,01 µg/L**.

4,4'-DDE y 4,4'-DDD: Estos son productos de degradación del DDT y tienen un límite individual de **0,10 µg/L** cada uno, incluido en la suma total de plaguicidas.

Endosulfán Sulfato: Similar a otros plaguicidas, debe ser menor a **0,10 µg/L**.

1,2-Dicloroetano: Límite máximo de **3,0 µg/L**

Endosulfán Alfa: Igual que otros plaguicidas, no debe superar **0,10 µg/L**.

Gamma-HCH (Lindano): Límite de **0,10 µg/L**

Beta-HCH: También debe estar por debajo de **0,10 µg/L**.

Isodrin: Límite máximo de **0,01 µg/L**

Benceno: No debe superar **1,0 µg/L**

Heptacloro: Límite de **0,03 µg/L**

Cloroformo: Límite máximo de **30 µg/L**

Bromodiclorometano: Parte de la suma de trihalometanos, no debe superar los **100 µg/L** en total.

Dibromoclorometano: Igual que bromodiclorometano, no debe superar el límite total de **100 µg/L** para trihalometanos.

Bromoformo: También incluido en la suma de trihalometanos con el mismo límite de **100 µg/L**.

Suma mínima de Trihalometanos: El límite es **100 µg/L**.

Tricloroeteno: Límite máximo de **10 µg/L**.

Tetracloroeteno: También tiene un límite de **10 µg/L**.

Tetracloroeteno + Tricloroeteno: La suma de ambos no debe superar los **10 µg/L** en total

Metales y Otros Elementos

Mercurio: No debe exceder **1,0 µg/L**

Boro: Límite de **1,0 mg/L**

Carbono Orgánico Total (TOC): Se utiliza para evaluar la calidad orgánica, y no debe exceder los **4 mg/L**

Cloruros: No debe superar los **250 mg/L** para evitar problemas de sabor y corrosión.

Cobre: Límite máximo de **2,0 mg/L**

Cloro Libre Residual: Debe estar entre **0,2 mg/L y 0,5 mg/L** para garantizar la desinfección sin causar efectos adversos.

Olor y Sabor: El agua debe estar libre de olores y sabores desagradables perceptibles.

pH: Debe estar entre **6,5 y 9,5**

Conductividad a 20°C: Límite de **2500 μ S/cm**

Turbidez: No debe exceder los **1,0 NTU**

Color: No debe ser superior a **15 mg/L Pt/Co.**

Amonio: Límite máximo de **0,50 mg/L**

Nitritos: No debe superar **0,50 mg/L**

Alfa-HCH: Límite de **0,01 μ g/L**

Fluoruro: Límite máximo de **1,5 mg/L**

Endrin: Límite de **0,01 μ g/L**

Nitratos: No deben exceder **50 mg/L**.

Sulfatos: Límite máximo de **250 mg/L**

Benzo(a)pireno: Límite de **0,010 µg/L**

Indeno(1,2,3-cd)pireno: Límite en la suma de hidrocarburos aromáticos policíclicos **0,10 µg/L**.

Benzo(b)fluoranteno: Parte de la suma de hidrocarburos aromáticos policíclicos con el mismo límite.

Benzo(g,h,i)perileno: Incluido en la suma de hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Benzo(k)fluoranteno: También parte de la suma de hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Suma de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos: No debe superar los **0,10 µg/L** en total

Aldrin: Límite de **0,03 µg/L**

Dieldrin: Igual que Aldrin, límite de **0,03 µg/L**.

Heptacloro Epóxido (A + B): No debe exceder **0,03 µg/L**

Cianuros Totales: Límite máximo de **50 µg/L**

Recuento de Aerobios Totales a 22°C: No debe superar los **100 UFC/mL** en agua potable.

Clostridium perfringens: Límite máximo de **1 UFC/100 mL**

Enterococos: No deben estar presentes en **100 mL** de agua

Coliformes: No deben estar presentes en **100 mL** de agua

Aluminio: Límite máximo de **0,20 mg/L**

Índice de Langelier: Se utiliza para evaluar la corrosividad del agua; debe estar equilibrado para evitar corrosión o incrustaciones.

Calcio: No hay un límite específico, pero suele mantenerse por debajo de **200 mg/L** para evitar la dureza del agua.

Carbonatos y Bicarbonatos: No hay límites específicos, pero se mantienen para equilibrar el pH.

Níquel: Límite máximo de **20 µg/L**

Escherichia coli: No debe estar presente en **100 mL** de agua

Cromo: Límite máximo de **25 µg/L**

Alcalinidad Total: Generalmente no especificada, pero se monitorea para equilibrar el pH y la corrosividad del agua.

Manganeso: Límite máximo de **0,05 mg/L**

Cadmio: Límite de **5 µg/L**

Antimonio: No debe exceder **10 µg/L**

Hierro: Límite de **0,20 mg/L**