

Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

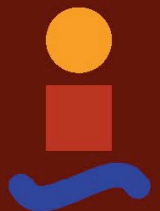
Influencia de las variables climáticas en el proceso
de contaminación del Mar Menor (Murcia)

Autor: Alejandro Tercero Villaseca

Tutor: Emilio Ramírez Juidias

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Influencia de las variables climáticas en el proceso de contaminación del Mar Menor (Murcia)

Autor:

Alejandro Tercero Villaseca

Tutor:

Emilio Ramírez Juidias

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Máster: Influencia de las variables climáticas en el proceso de contaminación del Mar Menor
(Murcia)

Autor: Alejandro Tercero Villaseca

Tutor: Emilio Ramírez Juidias

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

A Dios, por el camino.

*Por sus paisajes, sus silencios,
sus senderos... También por sus
cuestas. Pero, sobre todo, por la
compañía. En especial, la de mi
querido abuelo, D. Antonio
Villaseca Hinestrosa.*

Agradecimientos

A mis profesores, a mi familia, a mis amigos, a mis compañeros: Pedro Gutiérrez, María Pernas y Leonor Gonzalo. Gracias a ellos, ha merecido la pena.

Alejandro Tercero Villaseca

Sevilla, 2024

Resumen

La teledetección ha sido una herramienta valiosa para analizar la evolución de la contaminación en el Mar Menor. Los satélites de observación proporcionan imágenes detalladas y específicas, útiles para estudios. Además, los visores web gratuitos amplían el acceso a datos geoespaciales.

Comparar imágenes de distintas fechas es fundamental para detectar cambios. Las firmas espectrales permiten identificar características específicas, como la presencia de algas. La temperatura en la superficie acuática se ha mantenido constante con el clima mediterráneo.

La alta concentración de nutrientes y la proliferación de algas afectan la calidad del agua por eutrofización. El Mar Menor, dada su biodiversidad única, requiere protección.

Abstract

Teledetection has been a valuable tool for analyzing pollution evolution in the Mar Menor. Observation satellites provide detailed and specific images useful for studies. Additionally, free web viewers enhance access to geospatial data.

Comparing images from different dates is crucial for detecting changes. Spectral signatures allow identifying specific features, such as algae presence. Surface water temperature remains consistent with the Mediterranean climate.

High nutrient concentration and algae proliferation negatively impact water quality through eutrophication. Given its unique biodiversity, the Mar Menor requires protection.

Índice

Agradecimientos	8
Resumen	10
Abstract	12
Índice	13
Índice de Tablas	14
Índice de Figuras	16
Índice de Gráficas	17
1 Introducción	1
2 Justificación y Objetivos	3
3 Área de Estudio	4
3.1 <i>Características medioambientales</i>	4
3.2 <i>Topografía y Usos del Suelo</i>	6
3.3 <i>Hidrografía</i>	6
3.4 <i>Geología e hidrogeología</i>	8
3.5 <i>Climatología</i>	9
3.6 <i>Dinámica Marina</i>	9
3.7 <i>Biodiversidad</i>	10
4 MATERIALES Y METODOS	11
4.1 <i>Índice térmico</i>	12
4.2 <i>Datos de temperatura</i>	19
4.3 <i>Firma espectral</i>	26
4.4 <i>Mancha en el Mar Menor</i>	32
4.4.1 <i>Obtención de imágenes satélite</i>	32
4.4.2 <i>Pretratamiento de las imágenes satélite</i>	33
4.4.3 <i>Aplicación de índice y comparación entre imágenes</i>	34
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES	36
5.1 <i>Temperatura</i>	36
5.2 <i>Evolución de la Clorofila</i>	43
6 CONCLUSIONES	70
Referencias	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los puntos de estudio	12
Tabla 2. Valores de la Banda termal en el punto 1.	13
Tabla 3. Valores de la Banda termal en el punto 2.	13
Tabla 4. Valores de la Banda termal en el punto 3.	14
Tabla 5. Valores de la Banda termal en el punto 4.	14
Tabla 6. Valores de la Banda termal en el punto 5.	15
Tabla 7. Valores de la Banda termal en el punto 6.	15
Tabla 8. Valores de la Banda termal en el punto 7.	16
Tabla 9. Valores de la Banda termal en el punto 8.	16
Tabla 10. Valores de la Banda termal en el punto 9.	17
Tabla 11. Valores de la Banda termal en el punto 10.	17
Tabla 12. Valores de la Banda termal en el punto 11.	18
Tabla 13. Valores de la Banda termal en el punto 12.	18
Tabla 14. Valores de la temperatura en el punto 1.	19
Tabla 15. Valores de la temperatura en el punto 2.	20
Tabla 16. Valores de la temperatura en el punto 3.	20
Tabla 17. Valores de la temperatura en el punto 4.	21
Tabla 18. Valores de la temperatura en el punto 5.	21
Tabla 19. Valores de la temperatura en el punto 6.	22
Tabla 20. Valores de la temperatura en el punto 7.	22
Tabla 21. Valores de la temperatura en el punto 8.	23
Tabla 22. Valores de la temperatura en el punto 9.	23
Tabla 23. Valores de la temperatura en el punto 10.	24
Tabla 24. Valores de la temperatura en el punto 11.	24
Tabla 25. Valores de la temperatura en el punto 12.	25
Tabla 26. Temperatura media mensual de la zona por año	25
Tabla 27. Temperatura media por trimestres en la zona y periodo de estudio	26
Tabla 28. Temperatura media en la zona de estudio por año	26
Tabla 29. Temperatura media en periodo y zona de estudio	26
Tabla 30. Bandas de la firma espectral	27
Tabla 31. Valores de PPR para los diferentes puntos y meses de estudio	28
Tabla 32. Valores de PPR cribados	29
Tabla 33. Tipo de clorofila en funcion del valor de PPM	30

Tabla 34. Tipo de clorofila presente por mes y punto	31
Tabla 35. PPR de los diferentes tipos de clorofila en función del tiempo [16]	31
Tabla 36. Fecha de las imagenes obtenidas para la caracterización de la mancha en Mar Menor	32
Tabla 37. Longitud de onda y resolución de las bandas del Sentinel 2A	33
Tabla 38. Superficie medida en Km ² de la mancha en las diferentes imágenes	33
Tabla 39. Temperatura media mensual de la zona por año	36
Tabla 40. Temperatura media por trimestres en la zona y periodo de estudio	36
Tabla 41. Muestras para el ANOVA (Temperatura, °C)	42
Tabla 42. Resultados del Análisis de Varianza de un factor	43
Tabla 43. Coordenadas geográficas de los puntos de estudio	44
Tabla 44. Valores de PPR significativos por mes y punto	45
Tabla 45. Tipo de clorofila en funcion del valor de PPM	46
Tabla 46. Tipo de clorofila presente por mes y punto	46
Tabla 47. PPR de los diferentes tipos de clorofila en función del tiempo [16]	47
Tabla 48. Bandas de la firma espectral	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Localización del Mar Menor. Elaboración propia.	4
Figura 3-2. Espacios Portegidos del Mar Menor. Fuente: Wikipedia.	5
Figura 3-3 Localización de las Golas del Mar Menor. Elaboración propia.	6
Figura 3-4. Ramblas vertientes al Mar Menor. Elaboración Propia.	7
Figura 3-5. Ramblas del Campo de Cartagena. Fuente: I.T.I. Mar Menor	8
Figura 4-1. Localización de los puntos de estudio	11
Figura 4-2. Titular del diario digital <i>Murcia Plaza</i>	32
Figura 4-3. Imagen Landslat Sentinel 2-A del 14/08/2019 en que se aprecia la mancha en el Mar Menor	32
Figura 4-4. Proceso seguido para la medida de la superfcie de la mancha	34
Figura 4-5. Imágenes consideradas para la caracterización de la mancha.	35

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Firma espectral en el punto 6 en Junio de 2019	27
Gráfica 2. Evolución del PPR por meses y puntos	30
Gráfica 3. Temperatura media mensual por año	37
Gráfica 4. Temperaturas medias mensuales en el punto 1 (2019-2022)	38
Gráfica 5. Temperaturas medias mensuales en el punto 2 (2019-2022)	38
Gráfica 6. Temperaturas medias mensuales en el punto 3 (2019-2022)	38
Gráfica 7. Temperaturas medias mensuales en el punto 4 (2019-2022)	39
Gráfica 8. Temperaturas medias mensuales en el punto 5 (2019-2022)	39
Gráfica 9. Temperaturas medias mensuales en el punto 6 (2019-2022)	39
Gráfica 10. Temperaturas medias mensuales en el punto 7 (2019-2022)	40
Gráfica 11. Temperaturas medias mensuales en el punto 8 (2019-2022)	40
Gráfica 12. Temperaturas medias mensuales en el punto 9 (2019-2022)	40
Gráfica 13. Temperaturas medias mensuales en el punto 10 (2019-2022)	41
Gráfica 14. Temperaturas medias mensuales en el punto 11 (2019-2022)	41
Gráfica 15. Temperatura media trimestral (2019-2022) en la zona de estudio	42
Gráfica 16. Evolución del PPR por meses y puntos	45
Gráfica 17. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 MAR-20	50
Gráfica 18. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 MAR-20	50
Gráfica 19. Figura 1. Espectros de reflectividad del agua limpia y del agua turbia	51
Gráfica 20. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 MAR-20	51
Gráfica 21. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 SEP-20	52
Gráfica 22. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 SEP-20	52
Gráfica 23. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 SEP-20	53
Gráfica 24. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 5 SEP-20	53
Gráfica 25. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 SEP-20	54
Gráfica 26. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 SEP-20	54
Gráfica 27. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 SEP-20	55
Gráfica 28. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 9 SEP-20	55
Gráfica 29. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 10 SEP-20	56
Gráfica 30. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 SEP-20	56
Gráfica 31. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 DIC-20	57
Gráfica 32. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 DIC-20	57
Gráfica 33. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 DIC-20	58
Gráfica 34. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 FEB-21	58
Gráfica 35. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 FEB-21	59
Gráfica 36. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 FEB-21	59

Gráfica 37. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 FEB-21	60
Gráfica 38. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 JUN-21	60
Gráfica 39. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 JUN-21	61
Gráfica 40. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 JUN-21	61
Gráfica 41. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 JUN-21	62
Gráfica 42. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 JUN-21	62
Gráfica 43. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 DIC-21	63
Gráfica 44. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 DIC-21	63
Gráfica 45. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 DIC-21	63
Gráfica 46. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 5 DIC-21	64
Gráfica 47. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 DIC-21	64
Gráfica 48. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 11 DIC-21	65
Gráfica 49. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 DIC-21	65
Gráfica 50. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 ENE-22	66
Gráfica 51. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 ENE-22	66
Gráfica 52. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 ENE-22	67
Gráfica 53. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 9 ENE-22	67
Gráfica 54. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 DIC-22	68
Gráfica 55. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 DIC-22	68
Gráfica 56. Comparación evolución PPR - Temperatura	69

1 INTRODUCCIÓN

"Somos nosotros los primeros interesados en dejar un planeta habitable para la humanidad que nos sucederá. Es un drama para nosotros mismos, porque esto pone en crisis el sentido del propio paso por esta tierra".

- Papa Francisco -

El Mar Menor, ubicado en la región de Murcia, España, es un ecosistema marino de gran importancia ecológica y económica.

A lo largo de las décadas, este ecosistema ha experimentado un deterioro significativo debido a la contaminación provocada por diversas actividades humanas, como la agricultura intensiva, el turismo masivo y la urbanización descontrolada [1]. Estos factores han contribuido al aumento de nutrientes, la proliferación de algas nocivas y la disminución de la calidad del agua en el Mar Menor.

Para comprender y cuantificar la evolución de esta contaminación, es fundamental contar con herramientas de monitoreo eficientes. En este sentido, la teledetección espacial se presenta como una opción factible y poderosa para llevar a cabo este análisis.

En 1957, con lanzamiento del satélite Sputnik por la Unión Soviética (URSS), se consigue por primer a vez obtener información del campo electromagnético de la Tierra y de las capas altas de la atmósfera terrestre y enviarlas a la Tierra. Desde entonces, ha aumentado no solo el nivel tecnológico de los satélites sino el número de estos en órbita, situándose en el entorno de los 3500 satélites en funcionamiento en la actualidad [2].

Dependiendo de su funcionalidad, los satélites pueden ser de comunicación, meteorológicos, militares o los de observación, permitiendo estos últimos la teledetección espacial, y constituyendo, por tanto, la principal fuente de información de este trabajo.

La teledetección espacial se refiere al uso de sensores remotos a bordo de satélites para adquirir información sobre la superficie terrestre, incluidos cuerpos de agua como el Mar Menor. Los sensores capturan la radiación electromagnética reflejada o emitida por la Tierra en diferentes longitudes de onda. Esta radiación es sensible a características y propiedades de los objetos y fenómenos presentes en la superficie. Así, esta técnica permite obtener imágenes y datos de manera continua y a gran escala, cubriendo áreas extensas y proporcionando información en distintas longitudes de onda.

La aplicación de la teledetección en el estudio de la contaminación acuática presenta varias ventajas: permite obtener datos de manera no invasiva y a distancia, lo que evita perturbar el ecosistema del Mar Menor durante la recolección de información, y proporciona una cobertura temporal y espacial amplia, lo que facilita el seguimiento a largo plazo de la evolución de la contaminación en el área de estudio.

La teledetección espacial se puede definir, por tanto, como la técnica que consiste en adquirir información sobre la superficie terrestre o acuática utilizando sensores remotos ubicados en satélites o plataformas espaciales. Estos sensores recopilan datos en forma de imágenes y mediciones de diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, que luego son procesados y analizados para obtener información sobre características y fenómenos terrestres [3].

El uso de esta técnica permite obtener una visión amplia y sistemática de la Tierra desde una perspectiva espacial.

Esta técnica se utiliza en diversos campos, como la monitorización ambiental, la gestión de recursos naturales, la agricultura, la climatología, entre otros.

La información recopilada a través de la teledetección incluye imágenes satelitales de alta resolución espacial, imágenes multiespectrales que capturan la radiación reflejada o emitida por la superficie terrestre, datos de temperatura, humedad, precipitación, entre otros parámetros. Estos datos se utilizan para analizar y monitorear cambios en el entorno, como deforestación, cambios en el uso del suelo, calidad del agua, contaminación atmosférica, entre otros.

La principal ventaja de la aplicación de técnicas de teledetección es la utilización de información “invisible” o no apreciable al ojo humano. En el estudio de fenómenos naturales esta información “no visible” puede ser crucial, pues la luz infrarroja tiene una estrecha relación con el agua y con las plantas, permitiendo su utilización para una identificación más eficiente de zonas con agua, vegetación, y los cambios en estas, que pueden no detectarse con la luz visible.

Por otra parte, actualmente se han desarrollado técnicas que no solo se basan en la observación de las imágenes en sus distintas bandas espectrales, sino que permiten operar con ellas para obtener una información mucho más empírica y fiable de la superficie observada.

Se trata de los índices, combinaciones algorítmicas de bandas que permiten cuantificar características de la zona de estudio. Estos índices pueden, por ejemplo, cuantificar la cantidad de clorofila existente en la zona, de manera que se puede ver la ubicación de la vegetación e incluso la salud de esta.

En resumen, la teledetección espacial se presenta como una herramienta efectiva y factible para el análisis de la evolución de la contaminación en el Mar Menor. Su capacidad para proporcionar datos continuos y a gran escala, así como la posibilidad de integrarlos con variables ambientales, brinda una perspectiva integral y precisa de la dinámica de la contaminación en el ecosistema acuático.

2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El cambio climático, lejos de suponer un tema obsoleto, se ha convertido en uno de las principales preocupaciones de la sociedad, tal y como demuestran numerosos estudios sociológicos y, sin ninguna duda, en el principal problema medioambiental a medio y largo plazo de nuestro planeta.

Con origen antropológico o no, es indiscutible que existen numerosas pruebas de su existencia y evolución, tales como el aumento de nivel de los océanos, la merma del volumen de hielo en los océanos, o cambios en el comportamiento de algunas especies vegetales y animales. Otros aspectos indicativos de su celeridad, como el aumento de las temperaturas tanto acuáticas como terrestres, la periodicidad menguante de eventos extremos y el empeoramiento de la calidad del agua, pueden relacionarse directamente con la contaminación.

Todo ello tiene un impacto directo en el ser humano, por lo que se hace necesario estudiar y comprender en origen lo que está ocurriendo, con el fin de tomar decisiones responsables de cara a revertir y paliar la situación y sus consecuencias.

En el caso que nos ocupa, el Mar Menor sufre en primer plano muchas de las consecuencias de la contaminación, contribuyendo así a la aceleración del cambio climático y constituyendo un claro ejemplo de los efectos de este y de la proliferación descontrolada de la contaminación. Esta situación, incluso siendo recurrente su presencia y denuncia en los medios de comunicación, no siempre se ha tomado en serio, lo que ha agravado las consecuencias en la laguna.

El presente estudio tiene como objetivo el estudio de la contaminación acuática en el Mar Menor entre enero del año 2019 y diciembre del año 2022, mediante un mapeo de temperaturas de la zona, su relación con las corrientes existentes en las lagunas, y la aplicación de índices a imágenes satelitales. Estos índices, como el Plant Pigment Ratio (PPR), permitirán evaluar y monitorear los niveles de contaminación en el área de estudio [4].

La utilización de imágenes satelitales en combinación con índices específicos de contaminación acuática permite cuantificar y mapear la distribución espacial de la contaminación en el Mar Menor a lo largo del tiempo. Además, al integrar estos datos con series temporales de variables ambientales, como es la temperatura, y otros datos característicos, es posible identificar posibles relaciones entre los factores ambientales y los niveles de contaminación.

En este sentido, también se pretende abordar en este documento la existencia de una mancha en la zona de estudio, cuya existencia se documenta a principios del año 2019, y que aparece de forma recurrente en la laguna, caracterizándola a partir de imágenes satélites y aplicación de índices, tratando su posible evolución a corto plazo.

3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este trabajo académico es el Mar Menor, una laguna costera de aproximadamente 135 km² de extensión [7]. Está situada en la región de Murcia, España. Se encuentra en la parte sureste de la península ibérica, junto al Mar Mediterráneo. Geográficamente, está ubicado entre la península de La Manga al este y el litoral de la costa de Murcia al Oeste.



Figura 3-1. Localización del Mar Menor. Elaboración propia.

3.1 Características medioambientales

El Mar Menor alberga una rica biodiversidad y una amplia variedad de ecosistemas en su entorno, incluyendo praderas de fanerógamas marinas y hábitats de importancia para especies migratorias [8]. Sin embargo, debido a la presión humana y la contaminación, estos ecosistemas han sufrido daños significativos, lo que ha llevado a una disminución en la biodiversidad y una pérdida de servicios ecosistémicos en el Mar Menor.

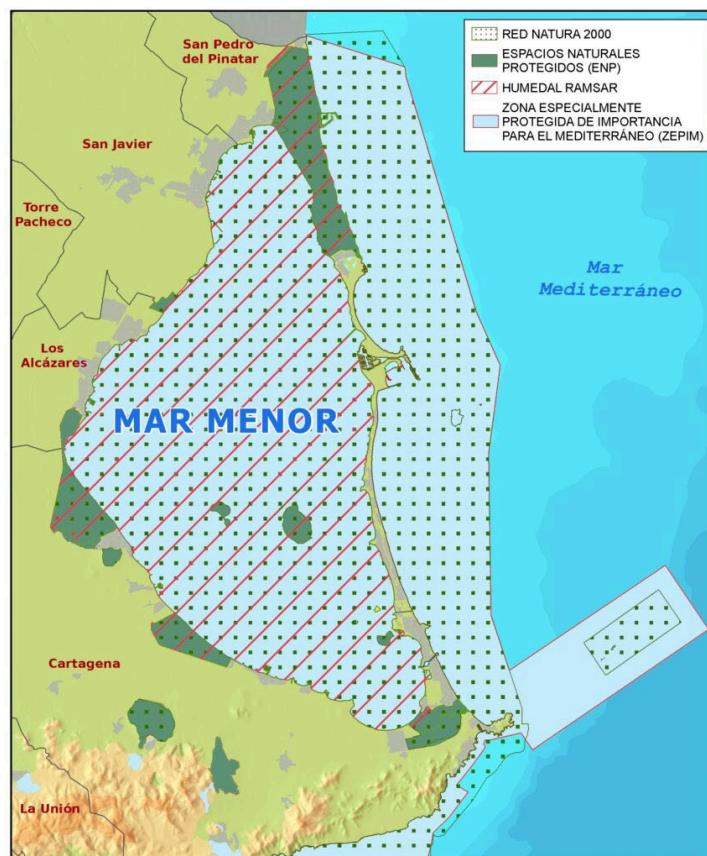


Figura 3-2. Espacios Protegidos del Mar Menor. Fuente: Wikipedia.

El lugar cuenta con varias figuras de protección ambiental aprobadas, además de otras catalogaciones también relevantes relacionadas con su interés geológico y ecosistémico. Entre estas destaca su clasificación como espacio protegido Red Natura 2000, siendo designado como Zona Especial de Conservación y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Dentro de esta ZEPA se encuentra también el Paisaje Protegido "Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor".

Por otro lado, es Zona Especialmente Protegida de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM), con denominación "Área del Mar Menor y zona oriental mediterránea de la costa de la Región de Murcia", en aplicación del Convenio para la Protección del Mar Mediterráneo contra la Contaminación de Barcelona desde el año 2001.

Por último, una pequeña parte, Salinas de Rasall, es Parque Regional de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila declarado por la Ley Regional 4/1992, de 30 de julio, de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia.

Además, el 3 de Octubre de 2022 se publicó en el Boletín Oficial del Estado (BOE) la Ley para el reconocimiento de personalidad jurídica a la laguna del Mar Menor y su cuenca. Esta ley reconoce al Mar Menor como un "sujeto de derechos", incluyendo no sólo la zona donde está situada la laguna costera, sino también a los acuíferos que se conectan con ella y que pueden afectar a su "estabilidad ecológica". Los cuatro derechos que reconoce son el derecho a existir y a evolucionar naturalmente, a la protección, a la conservación y a la restauración.

Entre otros aspectos, con esta ley se obliga a realizar estudios periódicos sobre el estado del ecosistema del Mar Menor, analizar los riesgos actuales y posibles, y restringir las actividades que puedan conducir a la extinción de especies y la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales y prohibir o limitar la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio biológico del Mar Menor [9].

3.2 Topografía y Usos del Suelo

La topografía del Mar Menor es relativamente llana, con una altitud media cercana al nivel del mar. La laguna está separada del Mar Mediterráneo por La Manga del Mar Menor, que actúa como una barrera natural. Esta formación divide la laguna del mar abierto y ha influido en su dinámica y ecología.

Es una laguna salada de aguas someras, con una profundidad máxima de alrededor de 7 metros y una profundidad media de aproximadamente 3.5 metros.

En cuanto al uso del suelo, la región que rodea el Mar Menor ha experimentado un desarrollo turístico significativo en las últimas décadas. En consecuencia, se han establecido complejos hoteleros, urbanizaciones y campos de golf en sus inmediaciones, lo que ha planteado desafíos para la conservación del ecosistema de la laguna [10].

3.3 Hidrografía

El mar menor es la laguna salada más extensa de Europa, con una costa que se extiende a lo largo de 73 km. Está conectada al Mar Mediterráneo a través de canales o "golas," que permiten el intercambio de agua y la renovación de sus contenidos. Sin embargo, debido a su relativa cerrazón, las condiciones hidrodinámicas pueden variar significativamente y afectar la calidad del agua.



Figura 3-3 Localización de las Golas del Mar Menor. Elaboración propia.

La cuenca hidrográfica del Mar Menor comprende 1.300 km² y abarca parte del Campo de Cartagena (900 km²).

La red de drenaje está constituida por ramblas y cauces con canales discontinuos. Entre estas ramblas se

encuentran:

- **Rambla de El Albuji3n:** principal colector de las aguas del Campo de Cartagena, ocupa una superficie de cuenca de 441.3 km², atravesando pr3cticamente toda la llanura y siendo la que m3s caudal aporta.
- **Rambla de Los Alc3zares:** su cauce es algo difuso, pero se puede seguir desde la vertiente sur de la sierra de Escalona.
- **Rambla Miranda:** desemboca al norte del Cabezo del Carmol3 y tiene una longitud de 8 km aproximadamente.
- **Rambla de El Beal:** la m3s importante de la vertiente meridional.
- **Rambla de Ponce:** de corto recorrido.
- **Rambla de Carrasquilla:** desemboca entre Los Nietos y Punta Las Lomas.



Figura 3-4. Ramblas vertientes al Mar Menor. Elaboraci3n Propia.

El Campo de Cartagena est3 constituido por varias ramblas que desembocan directamente en el Mar, sin conexi3n. Se trata de un sistema de ramblas que funcionan por separado e integran unidades espec3ficas de drenaje.

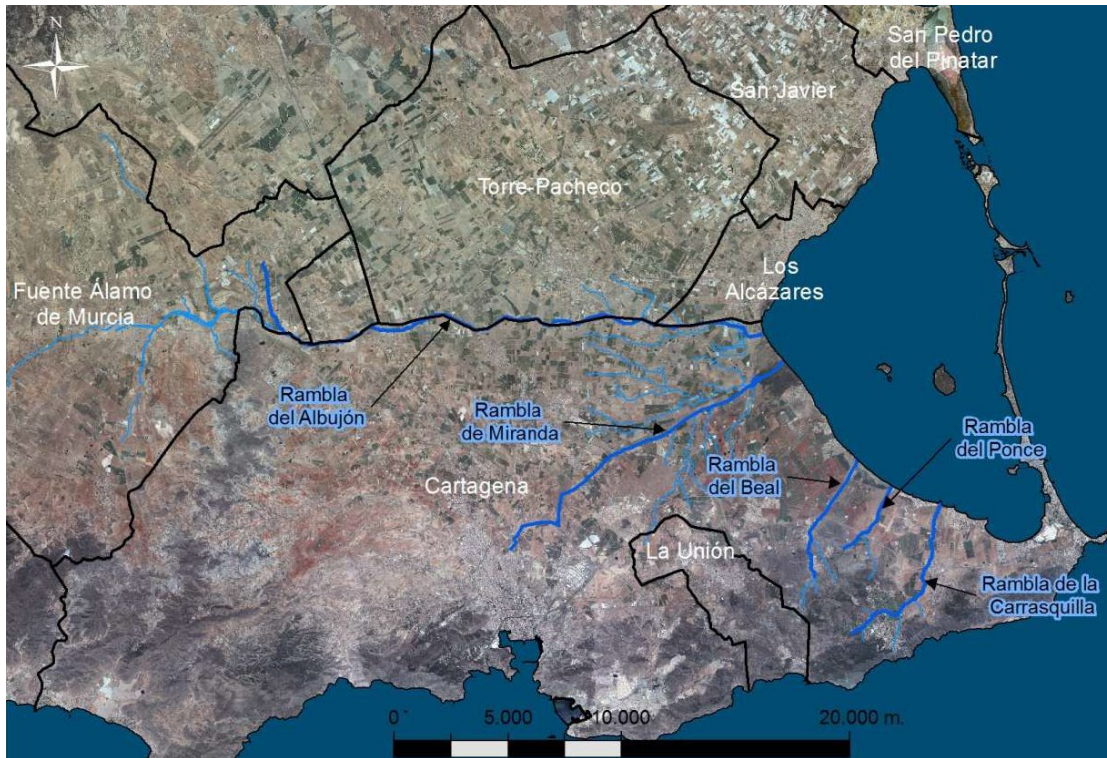


Figura 3-5. Ramblas del Campo de Cartagena. Fuente: I.T.I. Mar Menor

En los últimos años, el Mar Menor ha enfrentado problemas ambientales, como la proliferación de algas nocivas y la eutrofización [11], debido a la acumulación de nutrientes en sus aguas, provenientes en parte de la actividad agrícola y turística en su cuenca.

3.4 Geología e hidrogeología

La formación del Mar Menor está estrechamente vinculada a la geología de la región. La laguna se originó hace aproximadamente 5.000 años debido a la elevación del nivel del mar durante el Holoceno, que inundó una depresión preexistente. La zona circundante está compuesta principalmente de materiales sedimentarios, como arenas y limos, con afloramientos de rocas sedimentarias más antiguas en áreas cercanas [12].

En su interior, se encuentran cinco islas de origen volcánico: La isla del Barón, Perdiguera, Ciervo, Sujeto y Redonda. La formación actual de la laguna es el resultado de las corrientes marinas que han transportado y depositado sedimentos y arenas en su litoral a lo largo del Cuaternario. Esto creó un brazo que cerró parcialmente la bahía, conocido como La Manga.

En cuanto a la hidrogeología, el Mar Menor se encuentra en una zona con un alto nivel freático y la interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales es relevante para el equilibrio hidrológico de la laguna. El conocimiento de los flujos de agua subterránea es fundamental para comprender los procesos que afectan la calidad del agua en el Mar Menor.

El Campo del Mar Menor se compone por cuatro unidades hidrogeológicas, que son:

- Triásico de Carrascoy
- Sierra de Cartagena-Portman
- Campo de Cartagena
- Mazarrón

De estas cuatro unidades, tan sólo la unidad del Campo de Cartagena presenta relación hidráulica con el Mar Menor. Esta unidad ocupa 1440 km² y está formada por tres masas de agua: , Campo de Cartagena, Triásico de las Victorias (sector sobreexplotado y sin conexión directa con el Mar Menor) y Cabo Roig (desconectado

hidráulicamente del resto y conectado al Mar Mediterráneo).

Cartagena comprende los siguientes niveles acuíferos [14]:

-Acuífero Cuaternario en el nivel superior. Este nivel acuífero recibe los retornos de riegos, con alta concentración salina y de nutrientes, y es el que presenta una conexión hidráulica más clara con el Mar Menor.

-Acuífero Plioceno: no se puede descartar una cierta comunicación con el Mar Menor.

-Acuífero Andaluciense: sin evidencias de una conexión directa con el Mar Menor.

-Acuífero Tortoniense: sin evidencias de una conexión directa con el Mar Menor.

Existen conexiones entre los distintos acuíferos, laterales de origen natural, y verticales, inducidas por obras de captación mal ejecutadas, que permiten el paso de agua desde los acuíferos superiores (recursos de peor calidad al recibir retornos de riegos e intrusión marina histórica) a los inferiores.

El acuífero del Cuaternario es el único que se comunica directamente con el Mar Menor. En los años 70 y debido a que se encontraba sobreexplotado, se produjo una intrusión marina pero a partir de los años 80, con la llegada del agua del trasvase TAJO-SEGURA se invirtió la dinámica y comenzó la salida del agua subterránea al mar, lo que genera problemas ambientales por las elevadas concentraciones significativas de fertilizantes y pesticidas que presenta el acuífero, procedente de la agricultura intensiva.

3.5 Climatología

El Mar Menor se encuentra en una región de clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves y veranos cálidos y secos. Las temperaturas medias anuales son moderadas, lo que contribuye a que la laguna sea un destino turístico popular durante todo el año. La influencia del mar modera las temperaturas en sus alrededores.

Sin embargo, el cambio climático también ha impactado la región, manifestándose en fenómenos meteorológicos más extremos, como sequías prolongadas y episodios de lluvias intensas, lo que puede afectar la calidad del agua y la salud del ecosistema del Mar Menor [13].

Si bien, no existen estudios detallados acerca de la influencia de las variables climatológicas en los rasgos ambientales del Mar Menor, así como el nivel de significancia de la variación climatológica en los procesos de contaminación de la zona.

3.6 Dinámica Marina

En general, podemos considerar el Mar Menor como un sistema captador de sedimentos. El ritmo de sedimentación es función del clima, amplitud mareal y de la dinámica de la costa.

En lo que respecta a las entradas y salidas de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo, tal como se mencionaba con anterioridad en este documento, son tres los lugares por los que se establece la comunicación: el área de las Encañizadas, que incluye el canal del Ventorrillo y La Torre, el canal de El Estacio (ensanchado artificialmente en 1976) y la gola de Marchamalo, totalmente artificial y menos activa que las anteriores golas.

El sistema de comunicación entre ambos mares está dirigido por el Mediterráneo. Las mareas de la zona, aunque con amplitudes pequeñas, producen desniveles entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo que generan las corrientes en el canal de El Estacio y en el resto. Cuando el Mediterráneo está más bajo que el Mar Menor se vacía la laguna y viceversa. También son factores que influyen en la circulación: la presión atmosférica, los vientos, las dimensiones de la laguna y la geometría de los canales. Al menos cada 24 horas hay un flujo de entrada y otro de salida, de duración variable [15].

Volumétricamente, la importancia de El Estacio, es mucho mayor que la del resto de canales.

El modelo de circulación de las aguas en el interior de la laguna, propuesto por Pérez Ruzafa (1989) y modificado por Díaz del Río (1990), muestra un sentido de giro antihorario, es decir, de entrada por los canales más septentrionales y de salida por los canales del sur. De hecho, el agua de la zona norte tiende a ser menos salina que la del sur, aunque esta situación no puede generalizarse en el tiempo y en el espacio. El agua de la laguna se

renueva totalmente cada año y medio.

El Mar Menor presenta una dinámica diferente a la del Mar Mediterráneo. Está mucho más influenciado por el continente y al comportarse como una cuenca de concentración, su salinidad es mayor, aunque su evolución puede diferenciarse en dos etapas. La primera hasta 1975 y la segunda, desde esta fecha hasta la actualidad.

En 1976 se produce la apertura de la gola de El Estacio que ha rebajado los contenidos en sales, característicos desde la época de mayor aislamiento (53‰) hasta los actuales, en un proceso que se ha denominado “mediterraneización” y que ha provocado multitud de cambios en las comunidades biológicas de la laguna.

3.7 Biodiversidad

La ribera y humedales asociados a la laguna del Mar Menor constituyen el hábitat de comunidades y especies de alto interés ecológico, como la vegetación de saladares.

Algunas especies marinas y terrestres son de enorme importancia biológica por ser endémicas o estar en peligro de extinción, tal y como se señala en el inventario ecológico del Mar Menor, elaborado por el Canal del Mar Menor.

Entre las aves se encuentran la gaviota de Audouin, *Larus audouinii*, y los charrancitos comunes, *Sternula albifrons*.

Entre las especies vegetales más reseñables destacan el Chumberillo de lobo, *Caralluma europaea*, y la zanahoria marítima, *Echinophora spinosa*.

De las especies presentes en el medio submarino, destacan el fartet, *Aphanius iberus*, en serio peligro de extinción y el caballito de mar, *Hippocampus guttulatus*, que está en peligro crítico dentro de la laguna. Otra especie de importancia biológica por su escasez es la nacra, *Pinna nobilis*, un molusco bivalvo de gran tamaño.

Entre las especies vegetales a destacar encontramos la seba, *Cymodocea nodosa*, una planta subacuática.

4 MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se describen los datos y herramientas que se emplearon en el estudio. Estos son, por un lado, las series temporales del índice de térmico y de las temperaturas en el área y periodo de estudio, y por otro, las firmas espectrales de diferentes puntos del área de estudio, obtenidos mediante los visores EO Browser (en el caso del índice térmico y la firma espectral), y EOS Land Viwer, de donde se obtuvieron los datos de temperatura en grados centígrados.

A partir de estos datos se desarrolló un análisis estadístico que permitió obtener la evolución de la temperatura en la superficie del agua a lo largo del periodo de estudio (2019-2022), así como se llevó a cabo un análisis de componentes principales para identificar tendencias y aspectos relevantes de la serie temporal.

Para abordar el estudio con precisión, se escogieron doce puntos diferentes dentro de la zona de estudio, en los que se obtuvieron los datos. Con esta malla de puntos se pretendió abordar con precisión la diferencia de valores dentro de la propia zona de estudio.

Estos puntos, cuyas coordenadas pueden consultarse en la tabla 1, son los siguientes:



Figura 4-1. Localización de los puntos de estudio

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los puntos de estudio

ID	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
	LATITUD	LONGITUD
1	377.911	-0.7814
2	377.485	-0.8212
3	377.490	-0.7848
4	377.504	-0.7519
5	377.178	-0.8384
6	377.178	-0.8072
7	377.178	-0.7749
8	377.194	-0.7484
9	376.776	-0.8089
10	376.765	-0.7728
11	376.768	-0.7402
12	376.531	-0.7481

4.1 Índice térmico

Se obtuvieron los valores de la banda termal en los doce puntos mencionados, a lo largo del periodo de estudio (2019-2020), obtenidos en serie temporal a partir de los datos disponibles de la colección las imgenes satélites Landsat 8-9 de nivel 2 (183 imágenes). Esta colección incluye las imgenes del satélite Landsat 8 y las del satélite Landsat 9 (lanzado más recientemente). Ambos satélites cuentan con sensores térmicos infrarojos (TIRS), por lo que, además de proporcionar una cobertura estacional de la masa terrestre mundial, proporcionan reflectancia superficial y temperatura de brillo superficial corregidas atmosféricamente. Los datos de nivel 2 de la colección 2 están disponibles desde febrero de 2013 para Landsat 8 y desde enero de 2022 para Landsat 9.

Se obtuvieron, para cada punto, los siguientes datos, en valores medios de la banda termica:

- Valores del índice térmico para cada punto, de un total de 183 imágenes.
- Media mensual del periodo de estudio (Enero de 2019-Diciembre de 2022)
- Media Trimestral del periodo de estudio
- Media anual del periodo de estudio

Cabe mencionar que se realizó una criba de datos, eliminado aquellos con un valor negativo, ya que suponían datos inválidos al representar datos de imágenes en las que la nubosidad impedía la obtención de datos fiables, y que, por tanto, restarían verosimilitud en la obtención de resultados.

En las siguientes tablas se puede consultar los datos medios, obtenidos a partir de los datos de las 183 imágenes.

Tabla 2. Valores de la Banda termal en el punto 1.

1	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,3435E+16	1,4788E+16	1,2753E+16	1,4805E+16
Trim.1	1,0055E+16	1,5274E+16	1,0652E+16	1,5015E+16
ene	1,1969E+16	2,1931E+16	4,6701E+15	1,8815E+16
feb	8,5676E+15	9,8569E+15	1,0076E+16	1,0455E+16
mar	9,4855E+15	4,9008E+15	1,721E+16	0
Trim.2	1,3691E+16	1,7832E+16	1,4246E+16	1,0805E+16
abr	9,9083E+15	1,8086E+16	1,4661E+16	5,8623E+15
may	8,2313E+15	1,4994E+16	1,4795E+16	1,3691E+16
jun	1,9677E+16	2,0542E+16	1,301E+16	1,1626E+16
Trim.3	1,9145E+16	1,2085E+16	1,5709E+16	2,1905E+16
jul	1,9518E+16	9,666E+15	1,5513E+16	2,0546E+16
ago	2,0167E+16	2,978E+15	1,0927E+16	2,4953E+16
sep	1,7286E+16	2,6029E+16	1,949E+16	1,9712E+16
Trim.4	1,033E+16	1,3518E+16	9,3781E+15	1,2615E+16
oct	1,2842E+16	1,413E+16	1,8563E+16	1,2304E+16
nov	6,869E+15	1,9344E+16	4,4796E+15	1,4582E+16
dic	1,0497E+16	9,9928E+15	9,7866E+15	1,0134E+16

Tabla 3. Valores de la Banda termal en el punto 2.

2	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,33456E+16	1,72943E+16	1,13881E+16	1,49394E+16
Trim.1	1,15854E+16	1,27859E+16	1,10691E+16	1,03731E+16
ene	9,10594E+15	8,05534E+15	5,17387E+15	1,03485E+16
feb	1,20825E+16	1,04032E+16	1,07052E+16	8,84907E+15
mar	1,42284E+16	2,58212E+16	1,73282E+16	1,42696E+16
Trim.2	1,17889E+16	2,28827E+16	1,94779E+16	1,73629E+16
abr	9,24717E+14	1,83274E+16	9,50515E+15	1,08408E+16
may	8,07691E+15	2,09308E+16	2,13034E+16	1,5029E+16
jun	2,0005E+16	2,71123E+16	2,67125E+16	2,45883E+16
Trim.3	1,61016E+16	1,94336E+16	7,69274E+15	1,67678E+16
jul	2,11641E+16	2,28241E+16	1,13499E+16	1,78881E+16
ago	9,77063E+15	1,795E+16	1,22226E+16	1,52296E+16
sep	1,7793E+16	1,48777E+16	6,38172E+14	1,70451E+16
Trim.4	1,37278E+16	1,3838E+16	9,82537E+15	1,36277E+16
oct	1,38983E+16	1,88705E+16	9,16763E+12	1,40462E+16
nov	1,55286E+16	1,06081E+16	1,66878E+16	1,47483E+16
dic	1,15858E+16	1,04204E+16	7,21961E+15	1,12143E+16

Tabla 4. Valores de la Banda termal en el punto 3.

3	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,24351E+16	1,1869E+16	1,4344E+16	1,4374E+16
Trim.1	6,72421E+15	5,1439E+15	1,04E+16	1,2731E+16
ene	5,92434E+15	8,529E+15	3,6288E+15	9,8586E+15
feb	1,03111E+16	4,6128E+15	1,0653E+16	1,1994E+16
mar	3,93723E+15	2,2897E+15	1,6919E+16	1,634E+16
Trim.2	1,30366E+16	8,8742E+15	1,6709E+16	1,5114E+16
abr	9,6112E+15	9,0022E+15	1,6153E+16	1,3566E+16
may	1,58573E+16	8,6027E+15	2,0005E+16	1,442E+16
jun	1,36414E+16	9,0175E+15	1,3969E+16	1,7356E+16
Trim.3	1,75777E+16	1,8138E+16	2,0362E+16	1,5367E+16
jul	2,58175E+16	2,3231E+16	1,5108E+16	9,7315E+15
ago	2,92873E+15	1,6552E+16	1,975E+16	1,7087E+16
sep	2,39867E+16	1,4632E+16	2,6228E+16	1,9282E+16
Trim.4	1,2402E+16	1,5318E+16	9,9054E+15	1,4285E+16
oct	1,25107E+16	1,368E+16	1,0568E+16	1,5445E+16
nov	1,33927E+16	1,9286E+16	9,0275E+15	1,3709E+16
dic	1,13026E+16	1,2989E+16	1,0121E+16	1,37E+16

Tabla 5. Valores de la Banda termal en el punto 4.

4	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,3255E+16	1,4778E+16	1,0848E+16	1,3822E+16
Trim.1	1,0472E+16	1,3052E+16	6,6697E+15	1,635E+16
ene	9,2717E+15	1,1107E+16	2,4713E+15	2,2301E+16
feb	1,1346E+16	9,858E+15	7,9919E+15	1,265E+16
mar	1,0908E+16	2,1735E+16	9,5458E+15	4,7684E+15
Trim.2	1,6575E+16	1,5189E+16	1,3085E+16	1,0467E+16
abr	1,0089E+16	9,1413E+15	8,3456E+15	8,9042E+15
may	2,3761E+16	1,2573E+16	1,4952E+16	1,6612E+16
jun	1,4428E+16	2,0828E+16	1,5025E+16	5,4945E+15
Trim.3	1,3881E+16	2,2205E+16	1,6491E+16	2,1374E+16
jul	8,6352E+15	2,902E+16	2,6977E+16	2,194E+16
ago	1,6503E+16	1,6477E+16	1,0466E+16	2,2073E+16
sep	1,7379E+16	1,43E+16	1,3145E+16	1,9336E+16
Trim.4	1,2574E+16	9,9774E+15	6,1473E+15	8,5289E+15
oct	1,929E+16	1,4824E+16	2,0265E+14	9,0128E+15
nov	5,3433E+15	1,0492E+15	9,5948E+15	7,1957E+15
dic	9,9864E+15	9,5947E+15	5,6721E+15	9,6817E+15

Tabla 6. Valores de la Banda termal en el punto 5.

5	2019	2020	2021	2022
<i>MEAN</i>	1,5741E+16	1,6994E+16	1,3289E+16	1,6323E+16
Trim.1	9,1277E+15	1,5795E+16	1,2597E+16	1,189E+16
ene	9,2531E+15	7,9996E+15	2,4153E+16	1,0201E+16
feb	1,3252E+16	1,4618E+16	2,7202E+15	1,0079E+16
mar	4,8361E+15	3,3153E+16	1,1477E+16	2,2331E+16
Trim.2	1,8446E+16	1,7429E+16	1,4722E+16	1,7762E+16
abr	9,7374E+15	5,5067E+15	9,1241E+15	1,1297E+16
may	2,1433E+16	1,9701E+16	1,9639E+16	1,5702E+16
jun	1,9814E+16	2,1118E+16	1,2944E+16	2,467E+16
Trim.3	2,0482E+16	2,2708E+16	1,3229E+16	2,4571E+16
jul	1,5495E+16	2,2778E+16	1,7894E+16	2,5915E+16
ago	2,2473E+16	3,021E+16	1,0296E+15	2,9758E+16
sep	2,4477E+16	1,5066E+16	1,7715E+16	1,4441E+16
Trim.4	1,4106E+16	1,3066E+16	1,2785E+16	9,8646E+15
oct	1,7765E+16	1,3114E+16	2,3413E+16	1,1962E+16
nov	8,822E+15	1,9503E+16	1,1717E+16	4,9753E+15
dic	1,2072E+16	9,7987E+15	7,1244E+15	1,3527E+16

Tabla 7. Valores de la Banda termal en el punto 6.

6	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,27919E+16	1,2981E+16	1,45871E+16	1,40579E+16
Trim.1	1,13874E+16	8,05769E+15	6,16791E+15	7,74123E+15
ene	1,18412E+16	8,25692E+15	5,40369E+15	7,9404E+15
feb	9,30813E+15	1,04731E+16	9,23867E+15	6,64275E+15
mar	1,28616E+16	1,46371E+13	4,63023E+15	9,79034E+15
Trim.2	1,38677E+16	1,66267E+16	2,06816E+16	1,25329E+16
abr	9,63032E+15	1,12406E+16	1,72496E+16	8,72301E+15
may	1,57187E+16	9,28415E+15	1,93035E+16	1,3522E+16
jun	1,41355E+16	2,66624E+16	2,61809E+16	1,45249E+16
Trim.3	1,74758E+16	1,82699E+16	2,29357E+16	2,18718E+16
jul	1,57052E+15	2,15919E+16	2,00885E+16	2,62754E+16
ago	2,82605E+16	1,50578E+16	3,00102E+16	1,574E+16
sep	2,43034E+16	1,48381E+16	2,04771E+16	2,33631E+16
Trim.4	6,76235E+15	9,04275E+15	6,19125E+15	1,33298E+16
oct	5,71889E+15	8,94521E+15	2,34341E+15	1,37684E+16
nov	9,40398E+15	1,05863E+15	1,20687E+16	1,42859E+16
dic	6,20762E+15	1,31324E+16	9,19857E+14	1,11283E+16

Tabla 8. Valores de la Banda termal en el punto 7.

7	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,45554E+16	1,401E+16	1,3674E+16	1,5237E+16
Trim.1	9,56934E+15	7,2419E+15	5,9891E+15	8,2347E+15
ene	1,18189E+16	6,0951E+15	2,653E+14	8,1768E+15
feb	4,80363E+15	8,8313E+15	9,3636E+15	8,5221E+15
mar	1,13356E+16	7,0614E+15	7,5554E+15	7,7188E+15
Trim.2	1,33897E+16	1,2166E+16	1,8248E+16	1,7248E+16
abr	9,64916E+15	1,0394E+16	8,6933E+15	1,0944E+16
may	1,44178E+16	1,7544E+16	1,936E+16	2,2378E+16
jun	1,42317E+16	7,6742E+15	2,6135E+16	1,7487E+16
Trim.3	1,87313E+16	1,9579E+16	1,8247E+16	1,888E+16
jul	2,69441E+16	2,1831E+16	2,1343E+16	1,6998E+16
ago	2,26922E+16	1,9861E+16	1,1662E+16	1,9976E+16
sep	2,49975E+15	1,4651E+16	2,009E+16	2,0198E+16
Trim.4	1,67815E+16	1,6256E+16	1,0821E+16	1,4661E+16
oct	1,87645E+16	1,7884E+16	1,1963E+16	1,5763E+16
nov	1,56287E+16	1,9295E+16	1,5521E+16	1,3836E+16
dic	1,11547E+16	1,311E+16	5,5491E+15	1,3971E+16

Tabla 9. Valores de la Banda termal en el punto 8.

8	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,6246E+16	1,2434E+16	1,4493E+16	1,5151E+16
Trim.1	1,1515E+16	7,6528E+15	1,6089E+16	1,3038E+16
ene	1,1991E+16	5,4179E+15	1,6012E+16	8,8025E+15
feb	1,3077E+16	1,0633E+16	2,6719E+16	1,0676E+16
mar	9,3197E+15	0	9,0538E+15	2,6856E+16
Trim.2	1,7142E+16	1,2477E+16	7,8176E+15	1,4659E+16
abr	1,7656E+16	7,9573E+14	9,5313E+14	8,9043E+15
may	1,4675E+16	1,0322E+16	7,8194E+15	1,3548E+16
jun	1,8735E+16	2,0472E+16	1,4679E+16	2,0086E+16
Trim.3	1,9521E+16	1,8947E+16	2,2699E+16	1,9107E+16
jul	2,747E+16	2,2284E+16	2,1657E+16	1,805E+16
ago	2,0486E+16	1,6519E+16	1,9629E+16	2,0435E+16
sep	7,6328E+15	1,4699E+16	2,6042E+16	1,8965E+16
Trim.4	1,6647E+16	1,0527E+16	9,5189E+15	1,3699E+16
oct	2,3846E+16	1,5684E+16	1,0567E+16	1,1803E+16
nov	7,7648E+15	1,9258E+15	9,3922E+15	2,0931E+16
dic	1,1131E+16	9,67E+15	9,1532E+15	6,1666E+15

Tabla 10. Valores de la Banda termal en el punto 9.

9	2019	2020	2021	2022
<i>MEAN</i>	1,4288E+16	1,1641E+16	1,6022E+16	1,2721E+16
Trim.1	8,8289E+15	7,6684E+15	1,3384E+16	9,5809E+15
ene	1,2014E+16	3,7748E+15	9,7147E+15	9,6971E+15
feb	1,0413E+16	1,4866E+16	8,1047E+15	1,0229E+16
mar	2,4703E+15	8,258E+15	1,8127E+16	7,5536E+15
Trim.2	1,9935E+16	1,469E+16	1,2862E+16	1,5017E+16
abr	1,8324E+16	5,8409E+15	1,7076E+16	9,9847E+15
may	2,1189E+16	1,8756E+16	8,5982E+15	1,5265E+16
jun	1,9488E+16	1,5048E+16	1,5045E+16	1,8543E+16
Trim.3	1,8757E+16	1,098E+16	2,4242E+16	1,587E+16
jul	2,1292E+16	1,5002E+16	2,7684E+16	2,1016E+16
ago	2,2981E+16	1,2054E+16	3,051E+16	1,952E+16
sep	9,7462E+15	1,3241E+15	1,61E+16	1,3907E+15
Trim.4	8,59E+15	1,2365E+16	1,019E+16	8,9669E+15
oct	7,4279E+15	1,9147E+16	2,2225E+16	4,8662E+15
nov	1,5024E+16	1,0676E+16	7,7303E+15	1,0942E+16
dic	4,4799E+15	6,4275E+15	5,4449E+15	1,3674E+16

Tabla 11. Valores de la Banda termal en el punto 10.

10	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,55963E+16	1,3604E+16	1,17014E+16	1,54233E+16
Trim.1	1,05403E+16	9,63888E+15	1,22461E+16	9,21985E+15
ene	6,01107E+15	1,23206E+16	9,56019E+14	6,99745E+15
feb	1,31888E+16	7,32233E+15	1,44164E+16	1,19808E+16
mar	1,39307E+16	3,54518E+15	1,57207E+16	1,00959E+16
Trim.2	1,62398E+16	1,55269E+16	1,00662E+16	1,82318E+16
abr	1,58727E+16	9,28125E+15	1,53785E+16	1,39253E+16
may	1,31724E+16	7,90385E+15	3,88232E+15	1,5547E+16
jun	1,95825E+16	2,62727E+16	1,40299E+16	2,41466E+16
Trim.3	2,07045E+16	2,02444E+16	1,28054E+16	1,85722E+16
jul	1,49844E+16	2,31806E+16	1,48018E+16	1,25823E+16
ago	2,31391E+16	1,19785E+16	1,04034E+16	2,02971E+16
sep	2,50853E+16	2,6771E+16	1,26106E+16	2,64673E+16
Trim.4	1,40077E+16	8,48046E+15	1,13903E+16	1,36439E+16
oct	1,89491E+16	9,6616E+15	1,87774E+16	1,13101E+16
nov	7,68295E+15	1,06621E+16	9,55307E+15	1,88304E+16
dic	1,04494E+16	6,2085E+15	7,0652E+15	1,12449E+16

Tabla 12. Valores de la Banda termal en el punto 11.

11	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	5,0333E+17	4,7439E+17	4,7843E+17	9,512E+17
Trim.1	6,59008E+16	9,9859E+16	7,4378E+16	1,0764E+17
ene	3,70373E+16	8,1006E+16	1,7598E+16	5,2605E+16
feb	2,70991E+16	1,8842E+16	2,6734E+16	4,6715E+16
mar	1,76444E+15	1,0167E+13	3,0046E+16	8,3152E+15
Trim.2	1,37248E+17	1,0968E+17	9,0565E+16	3E+17
abr	1,9342E+16	2,1603E+16	3,3088E+16	3,6321E+16
may	6,20079E+16	6,0185E+16	5,4795E+16	1,2053E+17
jun	5,58981E+16	2,7892E+16	2,6816E+15	1,4315E+17
Trim.3	1,74544E+17	1,2533E+17	2,3777E+17	2,9532E+17
jul	3,82021E+16	6,5756E+16	8,1729E+16	1,1267E+17
ago	8,85699E+16	6,3118E+15	8,9637E+16	1,0112E+17
sep	4,77723E+16	5,3264E+16	6,6404E+16	8,1528E+16
Trim.4	1,25637E+17	1,3952E+17	7,5715E+16	2,4824E+17
oct	7,5909E+16	6,0358E+16	2,2831E+16	1,1894E+17
nov	3,05259E+16	3,8665E+16	3,045E+16	7,4153E+16
dic	1,92024E+16	4,0501E+16	2,2435E+16	5,5155E+16

Tabla 13. Valores de la Banda termal en el punto 12.

12	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	1,4268E+16	1,3766E+16	1,2979E+16	1,5303E+16
Trim.1	1,0419E+16	1,1772E+16	7,6969E+15	1,1828E+16
ene	1,2107E+16	1,0709E+16	6,4864E+15	1,6167E+16
feb	5,6474E+15	1,206E+15	1,4083E+15	5,9432E+15
mar	1,6586E+16	3,7157E+16	1,5196E+16	1,1354E+16
Trim.2	1,5822E+16	8,8167E+15	1,1481E+16	1,1427E+16
abr	9,6876E+15	8,2113E+15	1,647E+16	9,209E+15
may	1,4925E+16	9,3431E+15	6,0803E+15	6,506E+15
jun	1,9787E+16	8,5929E+15	1,4594E+16	1,8011E+16
Trim.3	1,549E+16	2,0268E+16	1,9339E+16	2,2678E+16
jul	2,1004E+16	2,323E+16	2,1388E+16	2,5725E+16
ago	1,4737E+16	2,0106E+16	2,0882E+16	1,6583E+16
sep	9,1398E+15	1,4588E+16	1,6133E+16	2,649E+16
Trim.4	1,5325E+16	1,426E+16	1,0454E+16	1,5806E+16
oct	2,3189E+16	1,289E+16	1,2492E+16	1,7354E+16
nov	1,1857E+16	1,9309E+16	1,1144E+16	1,9198E+16
dic	4,8011E+15	1,3105E+16	8,5725E+15	8,0078E+15

4.2 Datos de temperatura

Se obtuvieron los datos de temperatura, en grados centígrados, en los doce puntos mencionados, a lo largo del periodo de estudio (2019-2020), obtenidos a partir de los datos disponibles de la colección las imágenes satélites con menos de un 75% de nubosidad de Landsat 8 en el visor EOS Land Viwer 2 (179 imágenes).

En este caso, las imágenes solo proceden de Landsat 8, que cuenta con sensores térmicos infrarrojos (TIRS), por lo que, además de proporcionar una cobertura estacional de la masa terrestre mundial, proporcionan reflectancia superficial y temperatura de brillo superficial corregidas atmosféricamente.

Se obtuvieron, para cada punto, los siguientes datos, en valores medios de la temperatura en superficie:

- Valores de la temperatura para cada punto, de un total de 179 imágenes.
- Media mensual de temperatura del periodo de estudio (Enero de 2019-Diciembre de 2022)
- Media Trimestral de temperatura del periodo de estudio
- Media anual de temperatura del periodo de estudio

Como se indicaba, se realizó una criba de datos, teniendo en cuenta únicamente aquellas imágenes en las que la nubosidad era inferior al 75%, con el objetivo de la obtención de datos fiables, y que, por tanto, aportarían verosimilitud en la obtención de resultados.

En las siguientes tablas (14-25) se puede consultar los datos medios, obtenidos a partir de los datos de las 179 imágenes:

Tabla 14. Valores de la temperatura en el punto 1.

1	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	19,670	19,815	19,771	21,074
Trim.1	12,303	11,821	11,624	11,368
ene	11,676	10,999	7,586	10,789
feb	11,341	15,224	10,076	12,064
mar	14,214	4,901	17,210	12,085
Trim.2	23,183	22,596	21,257	22,398
abr	17,919	18,086	14,661	16,379
may	23,539	20,356	21,953	21,860
jun	25,549	27,092	26,810	27,452
Trim.3	25,627	28,570	27,903	27,979
jul	25,407	29,236	28,225	28,818
ago	26,941	29,780	29,627	28,485
sep	24,168	26,029	26,290	25,753
Trim.4	17,061	16,426	14,106	18,590
oct	23,824	18,684	18,563	20,119
nov	12,420	19,344	15,118	20,407
dic	10,498	12,711	9,787	13,572

Tabla 15. Valores de la temperatura en el punto 2.

2	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,654	19,921	19,760	20,600
Trim.1	12,590	12,123	12,076	12,719
ene	11,869	11,135	8,195	13,162
feb	12,083	15,191	10,706	11,479
mar	14,228	9,498	17,328	14,270
Trim.2	23,551	22,883	21,787	23,017
abr	18,091	18,328	17,587	16,635
may	23,995	20,931	21,303	23,125
jun	25,947	27,112	26,713	27,695
Trim.3	27,657	28,102	26,962	26,655
jul	28,044	29,580	24,867	29,836
ago	29,603	27,102	30,358	27,650
sep	24,548	26,647	26,512	21,009
Trim.4	18,855	16,613	14,502	17,551
oct	24,154	18,871	9,156	17,101
nov	15,529	19,347	20,682	20,763
dic	11,586	12,989	9,827	13,518

Tabla 16. Valores de la temperatura en el punto 3.

3	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,013	19,543	19,256	20,554
Trim.1	12,989	11,851	11,800	11,677
ene	11,989	11,085	7,829	9,859
feb	14,242	14,706	10,654	11,994
mar	12,653	9,101	16,919	16,340
Trim.2	22,972	22,303	20,706	22,376
abr	17,558	18,147	16,153	16,266
may	23,312	20,066	20,004	22,118
jun	25,423	26,620	26,312	27,216
Trim.3	26,580	28,727	26,943	27,484
jul	25,818	29,284	25,505	29,342
ago	29,287	29,959	29,816	26,257
sep	23,987	26,382	26,228	26,071
Trim.4	17,611	16,359	13,703	18,057
oct	23,929	18,267	20,443	18,481
nov	13,393	19,286	13,020	20,468
dic	11,303	12,989	10,121	13,700

Tabla 17. Valores de la temperatura en el punto 4.

4	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	19,674	20,016	19,880	20,857
Trim.1	12,088	14,786	10,730	13,033
ene	11,825	11,107	7,087	12,644
feb	11,346	15,059	7,992	12,650
mar	13,428	21,735	17,110	15,350
Trim.2	23,345	22,110	21,384	22,399
abr	17,916	18,285	16,478	16,550
may	23,761	19,488	21,087	21,706
jun	25,747	26,644	26,735	27,478
Trim.3	26,425	28,477	27,458	27,666
jul	26,446	29,021	26,977	29,890
ago	28,016	30,053	29,562	26,595
sep	24,276	25,815	26,242	25,383
Trim.4	17,023	15,860	16,741	18,495
oct	23,488	17,489	20,265	20,148
nov	13,096	19,167	13,665	19,912
dic	9,987	12,578	18,055	13,480

Tabla 18. Valores de la temperatura en el punto 5.

5	2019	2020	2021	2022
<i>MEAN</i>	19,960	20,634	20,273	21,247
Trim.1	12,426	16,913	16,773	13,145
ene	11,831	11,111	26,672	11,353
feb	11,288	21,685	10,438	11,980
mar	14,736	21,361	13,208	22,331
Trim.2	22,992	23,772	20,933	22,151
abr	19,616	21,729	17,252	15,583
may	21,431	20,614	19,639	21,530
jun	25,850	27,952	26,554	27,697
Trim.3	27,563	28,200	27,035	28,733
jul	27,985	29,552	28,272	30,321
ago	29,455	28,776	23,761	29,758
sep	24,477	24,921	28,563	24,414
Trim.4	16,845	14,791	15,151	19,264
oct	20,825	16,513	18,723	21,221
nov	14,687	16,735	18,023	20,804
dic	12,124	12,098	10,492	13,699

Tabla 19. Valores de la temperatura en el punto 6.

6	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,360	19,948	19,695	20,318
Trim.1	12,508	12,712	12,303	9,317
ene	11,841	11,067	11,694	9,820
feb	13,041	14,265	9,239	8,422
mar	12,862	14,637	14,753	9,790
Trim.2	22,218	22,572	20,682	21,899
abr	17,556	18,733	17,250	13,780
may	21,281	20,401	19,303	22,832
jun	25,487	26,662	26,181	27,172
Trim.3	26,978	28,279	27,423	28,446
jul	27,701	28,294	26,539	30,026
ago	28,261	29,710	30,010	29,990
sep	24,303	26,819	26,367	23,363
Trim.4	18,754	16,448	15,233	19,300
oct	23,713	18,358	23,434	21,617
nov	15,571	19,261	15,658	20,614
dic	12,021	13,133	9,199	13,272

Tabla 20. Valores de la temperatura en el punto 7.

7	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,281	19,167	18,794	20,560
Trim.1	12,030	11,481	10,234	12,129
ene	11,819	11,033	6,858	11,693
feb	13,006	13,553	9,364	11,928
mar	11,335	7,061	13,066	14,155
Trim.2	20,995	22,497	20,506	22,194
abr	17,500	18,513	16,598	15,969
may	18,441	20,370	19,360	22,378
jun	25,298	26,615	26,135	26,701
Trim.3	27,419	25,533	27,258	27,366
jul	26,944	29,132	27,428	27,359
ago	29,709	19,861	28,851	29,194
sep	24,998	26,843	25,893	25,183
Trim.4	19,831	16,257	14,279	18,281
oct	24,101	17,884	23,072	21,580
nov	15,629	19,296	15,521	17,306
dic	11,155	13,110	8,640	13,971

Tabla 21. Valores de la temperatura en el punto 8.

8	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	19,587	20,602	21,135	20,484
Trim.1	12,059	14,931	19,681	13,502
ene	11,991	11,215	20,798	11,554
feb	13,077	19,885	26,719	12,448
mar	11,130	22,382	14,245	19,805
Trim.2	19,998	17,334	20,882	21,626
abr	17,656	20,750	17,415	16,230
may	14,675	26,538	19,751	20,986
jun	25,161	28,610	26,047	26,313
Trim.3	26,823	29,003	27,516	27,098
jul	27,471	29,824	27,368	29,812
ago	27,520	26,610	29,679	24,914
sep	25,029	16,385	26,042	25,623
Trim.4	18,585	18,381	15,840	18,553
oct	23,846	19,259	21,144	19,625
nov	15,517	12,953	15,389	20,932
dic	11,132	12,988	13,751	13,110

Tabla 22. Valores de la temperatura en el punto 9.

9	2019	2020	2021	2022
<i>MEAN</i>	19,535	20,658	20,069	20,737
Trim.1	11,150	15,677	15,337	11,017
ene	12,014	14,382	9,715	11,422
feb	13,342	14,866	13,963	11,835
mar	7,075	19,077	18,126	7,554
Trim.2	22,658	21,553	21,788	22,150
abr	18,324	15,794	17,076	16,231
may	21,189	18,756	21,612	20,641
jun	26,295	27,231	26,763	28,098
Trim.3	27,889	28,434	27,173	28,526
jul	27,796	29,301	27,684	28,677
ago	30,106	28,447	30,510	29,776
sep	25,057	26,679	24,159	26,387
Trim.4	15,674	16,748	13,206	19,022
oct	21,596	19,147	22,225	21,550
nov	15,025	19,393	11,814	19,761
dic	4,480	13,027	9,050	13,674

Tabla 23. Valores de la temperatura en el punto 10.

10	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,264	21,104	18,196	20,276
Trim.1	12,916	17,821	13,967	11,714
ene	11,950	15,088	9,560	11,986
feb	13,189	14,474	14,417	11,981
mar	13,931	35,452	15,721	10,096
Trim.2	21,010	21,828	18,764	21,198
abr	15,873	19,096	15,379	13,925
may	20,234	18,750	16,083	20,732
jun	25,640	26,273	26,171	27,119
Trim.3	27,693	28,894	24,033	28,219
jul	27,533	29,130	27,250	28,316
ago	29,810	29,994	20,310	29,274
sep	25,085	26,771	23,608	26,467
Trim.4	18,209	15,666	13,919	18,061
oct	23,443	19,800	18,777	20,098
nov	15,501	19,305	13,535	18,830
dic	10,450	9,714	9,699	13,536

Tabla 24. Valores de la temperatura en el punto 11.

11	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	20,692	20,864	18,727	19,847
Trim.1	13,436	14,100	12,396	11,694
ene	12,030	10,757	8,799	12,147
feb	13,142	22,753	13,367	11,342
mar	16,689	10,167	15,023	11,161
Trim.2	22,250	22,308	16,386	22,380
abr	17,885	18,207	16,544	16,377
may	21,116	20,229	18,265	22,174
jun	25,567	26,437	13,408	27,088
Trim.3	27,229	28,943	26,694	25,779
jul	26,946	29,292	27,470	28,479
ago	29,697	30,019	29,879	22,711
sep	24,317	26,632	23,528	26,424
Trim.4	17,921	16,883	15,032	17,481
oct	23,410	19,457	23,213	19,999
nov	15,263	19,332	14,577	17,006
dic	9,601	13,085	10,186	13,789

Tabla 25. Valores de la temperatura en el punto 12.

12	2019	2020	2021	2022
<i>Media</i>	19,706	20,096	19,519	20,940
Trim.1	12,981	14,873	16,820	13,713
ene	12,107	10,709	21,180	16,167
feb	12,052	12,060	14,083	11,221
mar	16,586	37,157	15,196	11,354
Trim.2	22,014	22,314	19,973	21,490
abr	17,827	17,963	16,470	16,323
may	20,424	19,866	18,232	20,030
jun	25,699	26,939	26,087	26,826
Trim.3	26,599	25,632	26,574	28,795
jul	27,163	29,269	27,846	29,563
ago	28,190	20,106	30,104	29,436
sep	23,725	26,645	22,654	26,491
Trim.4	16,187	16,552	13,647	18,323
oct	23,189	18,621	22,926	20,178
nov	11,857	19,310	13,995	19,199
dic	8,681	13,106	8,573	13,762

Tomando el promedio de todos los puntos, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 26. Temperatura media mensual de la zona por año

Mes/Año	2019	2020	2021	2022
ene	11.912	11.641	12.658	11.957
feb	12.596	16.143	11.545	12.225
mar	13.239	17.711	16.212	13.842
abr	17.810	18.636	16.766	16.250
may	21.116	20.530	20.241	22.120
jun	25.638	27.015	25.449	27.303
jul	27.104	29.243	27.312	28.795
ago	28.883	27.535	28.236	27.896
sep	24.497	25.547	24.657	24.625
oct	23.293	18.529	19.682	20.252
nov	14.457	18.561	14.946	19.015
dic	10.251	13.306	11.176	14.187

Tabla 27. Temperatura media por trimestres en la zona y periodo de estudio

TRIMESTRE	T (°C)
1	13,473
2	21,572
3	27,027
4	16,471

Tabla 28. Temperatura media en la zona de estudio por año

AÑO	T (°C)
2019	19,233
2020	20,366
2021	19,073
2022	19,872

Tabla 29. Temperatura media en periodo y zona de estudio

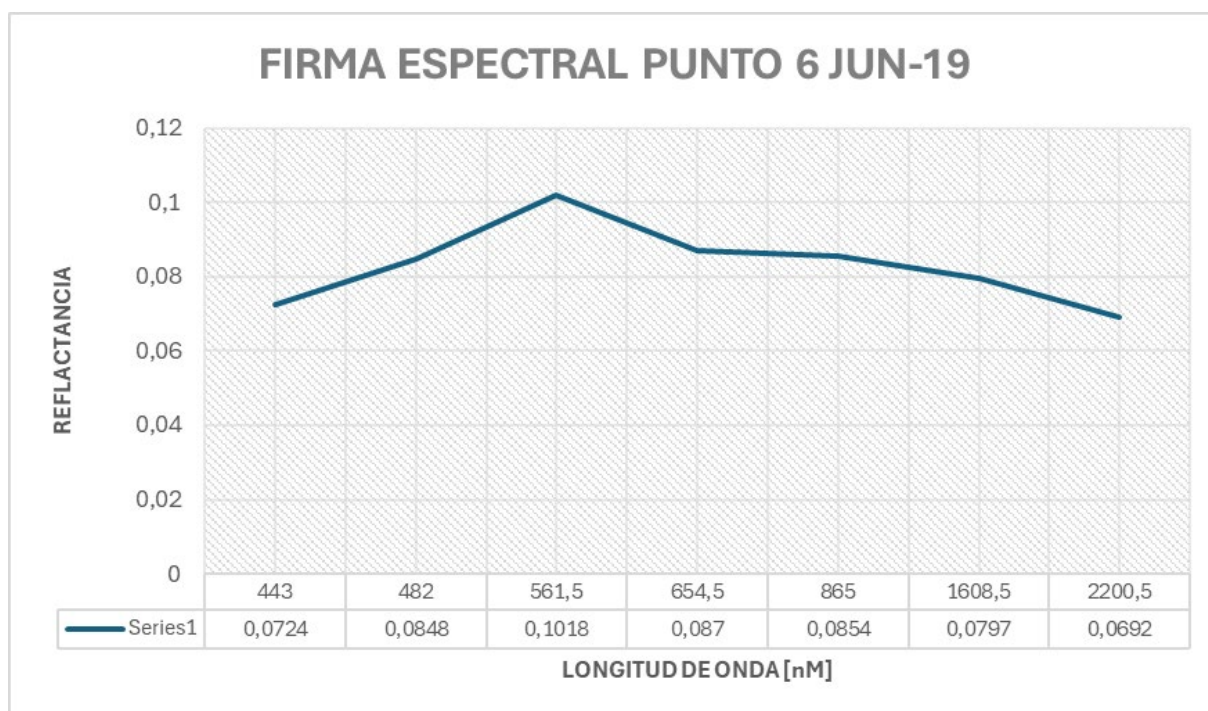
T (°C)
19,636

4.3 Firma espectral

La firma espectral nos permite diferenciar tipos de superficies, como el agua, la tierra o la vegetación, debido a que cada una de ellas reflejan la radiación de manera distinta en varias bandas. Esta radiación reflejada, en función de la longitud de onda, configura la firma espectral.

Así, por ejemplo, la reflexión en las bandas rojo (3) e infrarrojo cercano (4) es mayor en las áreas vegetales que en áreas de tierra sin vegetación, donde es prácticamente insignificante.

En el caso que nos ocupa, se ha recogido la firma espectral de imágenes del sensor OLI (Operational Land Imager) del satélite Landsat 8, para cada uno de los doce puntos, de forma mensual durante el periodo de estudio. De esta forma, se obtienen 48 firmas espectrales para cada punto, resultado un total de 576 firmas espectrales de la zona.



Gráfica 1. Firma espectral en el punto 6 en Junio de 2019

Los datos obtenidos, así como la representación gráfica de semestral en cada punto de la firma espectral durante el periodo de estudio, pueden ser consultadas en el Apéndice 1 “Datos de firma Espectral”.

Las bandas recogidas en las firmas espectrales obtenidas fueron:

Tabla 30. Bandas de la firma espectral

BANDA		LONGITUD DE ONDA DE ONDA [nm]
B01	Costera/Aerosol	443
B02	Azul	482
B03	Verde	561,5
B04	Roja	654,5
B05	Infrarrojo cercano (NIR)	865
B06	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR-1)	1608,5
B07	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR-2)	2200,5

A partir de las 576 firmas espectrales recogidas, se pudo obtener el valor del Plant Pigment Ratio (PPR), índice que da cuenta de la concentración de clorofila, y que se obtiene cobianando las bandas Azul y Verde:

$$PPR [mol \cdot mol^{-1} \text{ Clorofila}] = \frac{B02 - B03}{B02 + B03}$$

Con estos valores, se pudo calcular la evolución de la clorofila presente a lo largo de los meses, dando cuenta de la evolución de la propia contaminación en los diferentes puntos.

Tabla 31. Valores de PPR para los diferentes puntos y meses de estudio

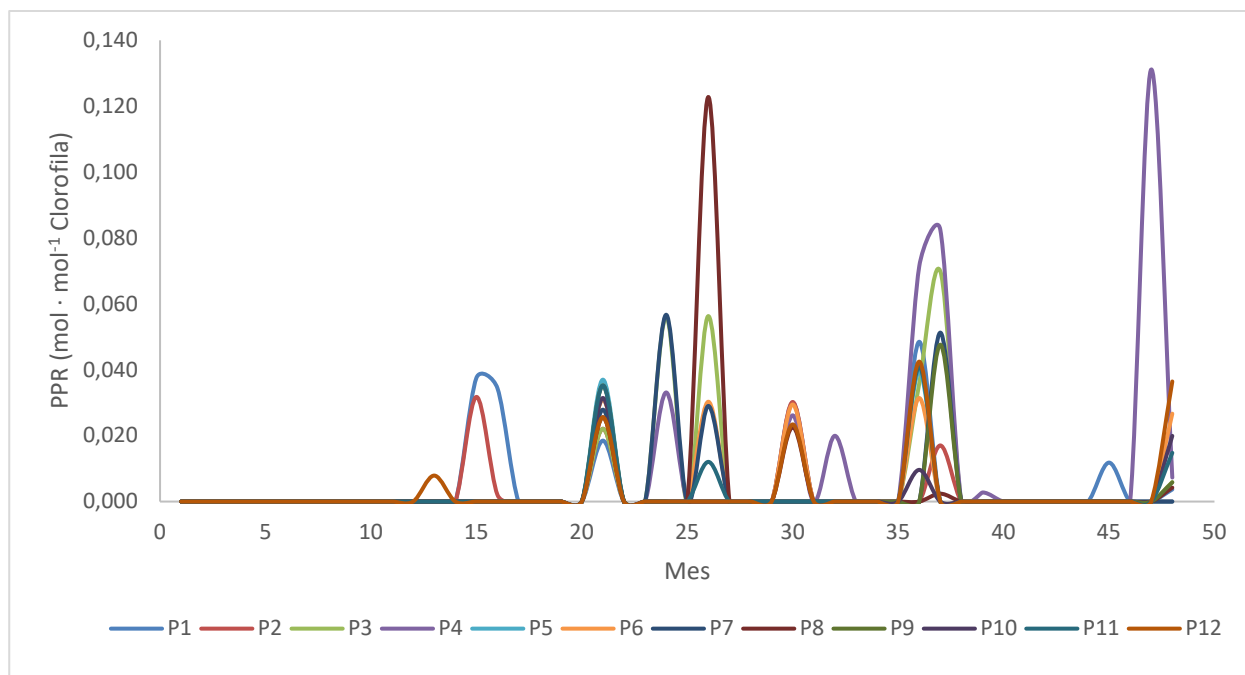
Mes/Punto	PPR (mol * mol ⁻¹ de Clorofila)											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
1	-0,188	-0,217	-0,054	-0,163	-0,110	-0,110	-0,037	-0,070	-0,208	-0,113	-0,032	-0,074
2	-0,182	-1,000	-0,347	-0,809	-0,443	-1,000	-0,171	-0,188	-0,653	-0,906	-0,213	-1,000
3	-0,182	-0,209	-0,143	-0,082	-0,279	-0,315	-0,147	-0,122	-0,464	-0,276	-0,179	-0,203
4	-0,702	-0,384	-1,000	-0,083	-0,311	-0,391	-0,769	-1,000	-0,472	-0,119	-0,570	-0,418
5	-0,253	-0,272	-0,262	-1,000	-0,579	-0,303	-0,190	-0,134	-0,256	-0,141	-0,189	-0,142
6	-0,201	-0,259	-0,103	-0,083	-0,075	-0,091	-0,108	-0,092	-0,092	-0,056	-0,091	-0,093
7	-0,527	-0,350	-0,212	-0,172	-0,300	-0,162	-0,185	-0,156	-0,521	-0,251	-0,426	-0,329
8	-0,407	-0,503	-0,712	-0,371	-0,460	-0,488	-0,304	-0,297	-0,498	-0,175	-0,386	-0,293
9	-0,407	-0,243	-0,492	-0,493	-0,266	-0,295	-0,485	-0,330	-0,269	-0,218	-0,249	-0,253
10	-0,402	-0,493	-0,194	-0,187	-0,596	-0,344	-0,260	-0,198	-0,345	-0,514	-0,248	-0,573
11	-1,000	-0,562	-0,614	-0,721	-0,721	-0,209	-0,617	-0,614	-0,511	-0,256	-0,548	-0,598
12	-0,389	-0,351	-0,478	-0,536	-0,451	-0,356	-0,461	-1,000	-0,750	-0,902	-0,902	-0,627
13	-0,192	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-0,288	-0,591	-0,324	-0,089	-0,010	-0,020	0,008
14	-0,013	-0,030	-0,073	-0,030	-0,089	-0,089	-0,097	-0,019	-0,017	-0,012	-0,023	-0,020
15	0,038	0,032	-0,321	-0,345	-0,557	-0,440	-0,398	0,000	-0,668	-1,000	-0,461	-0,373
16	0,034	0,002	-0,119	-0,105	-0,160	-1,000	-1,000	-0,292	-0,323	-0,219	-0,666	-0,123
17	-0,285	-0,427	-0,907	-1,000	-0,966	-0,962	-0,565	-1,000	-0,490	-0,228	-0,344	-0,422
18	-0,403	-0,349	-0,302	-0,542	-0,396	-0,355	-0,511	-0,442	-0,596	-0,138	-0,521	-0,300
19	-0,446	-0,805	-0,281	-0,374	-0,377	-0,608	-0,496	-0,420	-0,546	-1,000	-0,134	-0,357
20	-0,320	-0,299	-0,269	-0,177	-0,236	-0,238	-0,359	-0,249	-0,205	-0,104	-0,103	-0,137
21	0,018	0,022	0,022	0,031	0,037	0,031	0,028	0,026	0,035	0,031	0,035	0,026
22	-0,262	-0,459	-0,091	-0,090	-0,372	-0,204	-0,136	-0,087	-0,225	-0,160	-0,124	-0,149
23	-0,240	-0,245	-0,032	-0,085	-0,085	-0,115	-0,104	-0,037	-0,119	-0,094	-0,093	-0,280
24	-0,101	-0,060	0,056	0,033	-0,003	-0,003	0,057	-0,013	-0,070	-0,052	-0,041	-0,079
25	-0,133	-0,082	-0,004	-0,009	-0,064	-0,085	-0,046	-0,008	-0,142	-0,062	-0,033	-0,088
26	-0,148	-0,709	0,056	-0,019	-0,171	0,030	0,029	0,123	-0,224	-0,194	0,012	-0,150
27	-0,221	-0,274	-0,614	-0,973	-0,633	-0,683	-1,000	-1,000	-0,134	-0,318	-0,183	-0,609
28	-0,307	-0,394	-0,303	-0,315	-0,292	-0,293	-0,211	-0,296	-0,382	-0,385	-0,417	-0,440
29	-0,420	-0,239	-0,269	-0,561	-0,597	-0,475	-0,413	-0,339	-0,434	-0,026	-0,351	-0,417
30	0,030	0,030	-0,810	0,026	-0,809	0,029	-0,809	0,023	-0,809	-0,808	-0,808	0,023
31	-0,384	-0,520	-0,403	-0,320	-0,578	-0,319	-0,425	-0,436	-0,379	-0,368	-0,431	-0,375
32	-0,599	-1,000	-0,517	0,020	-0,511	-0,653	-0,625	-0,155	-0,605	-0,528	-1,000	-1,000
33	-0,791	-0,562	-0,221	-0,349	-0,203	-0,442	-0,513	-0,380	-0,688	-0,586	-0,475	-0,417
34	-0,052	-0,075	-0,255	-0,255	-0,249	-0,135	-0,287	-0,199	-0,273	-0,178	-0,161	-0,029
35	-0,146	-0,071	-0,034	-0,049	-0,346	-0,167	-0,108	-0,087	-0,333	-0,178	-0,136	-0,171
36	0,049	-1,000	0,036	0,071	0,039	0,031	-1,000	-0,221	-0,005	0,010	0,041	0,042
37	-0,099	0,017	0,070	0,082	-0,094	-0,043	0,051	0,002	0,048	-0,045	-0,005	-0,051
38	-0,165	-0,526	-0,299	-0,337	-0,322	-0,409	-0,291	-0,223	-0,463	-0,414	-0,277	-0,382
39	-0,007	-0,012	-0,010	0,003	-0,005	-0,004	-0,002	-0,006	-0,011	-0,028	-0,007	-0,001
40	-0,167	-0,187	-0,141	-0,133	-0,239	-0,255	-0,220	-0,195	-0,394	-0,560	-0,133	-0,431
41	-0,217	-0,126	-0,093	-0,142	-0,258	-0,299	-0,156	-0,158	-0,214	-0,117	-0,066	-0,098
42	-0,149	-0,305	-0,102	-0,103	-0,132	-0,104	-0,107	-0,107	-0,114	-0,072	-0,072	-0,097
43	-0,476	-0,187	-0,331	-0,296	-0,308	-0,350	-0,287	-0,223	-0,275	-0,329	-0,260	-0,190
44	-0,651	-0,247	-0,493	-1,000	-0,298	-0,441	-0,536	-0,549	-0,495	-0,327	-0,330	-0,482
45	0,012	-0,247	-0,320	-1,000	-0,152	-0,480	-0,256	-0,112	-0,220	-0,346	-0,887	-0,021
46	-0,291	-0,497	-0,309	-0,496	-0,255	-0,382	-0,983	-0,544	-0,558	-0,320	-0,494	-1,000
47	-0,245	-0,136	-0,127	0,131	-0,021	-0,290	-0,182	-0,153	-0,333	-0,316	-0,263	-0,021
48	0,004	-0,374	0,006	0,007	-0,005	0,027	-0,006	0,004	0,006	0,020	0,015	0,036

Dado que los valores negativos son indicadores de la no existencia de contaminación, estos fueron descartados, obteniendo:

Tabla 32. Valores de PPR cribados

	PPR (mol * mol-1 de Clorofila)											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,038	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,034	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,018	0,022	0,022	0,031	0,037	0,031	0,028	0,026	0,035	0,031	0,035	0,026
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,056	0,033	0,000	0,000	0,057	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,000	0,000	0,056	0,000	0,000	0,030	0,029	0,123	0,000	0,000	0,012	0,000
27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,030	0,030	0,000	0,026	0,000	0,029	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,023
31	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
32	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
34	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
35	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0,049	0,000	0,036	0,071	0,039	0,031	0,000	0,000	0,000	0,010	0,041	0,042
37	0,000	0,017	0,070	0,082	0,000	0,000	0,051	0,002	0,048	0,000	0,000	0,000
38	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
39	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
41	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
42	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
43	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
44	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
45	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
46	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
47	0,000	0,000	0,000	0,131	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
48	0,004	0,000	0,006	0,007	0,000	0,027	0,000	0,004	0,006	0,020	0,015	0,036

Que, de forma más sintética, y representado gráficamente, resulta:



Gráfica 2. Evolución del PPR por meses y puntos

Conocida la evolución del Plant Pigment Ratio (PPM) durante el periodo de estudio, se pudo determinar las posibles tipología de algas presentes en la zona, así como su evolución y correlación con datos como la temperatura.

Tabla 33. Tipo de clorofila en función del valor de PPM

Rango PPM [mol·mol ⁻¹]		Tipo de clorofila
Min.	Max.	
0,04	0,06	Neoxantina
0,05	0,09	β -coroteno
0,05	0,1	V+A+Z
0,022	0,09	Luteina

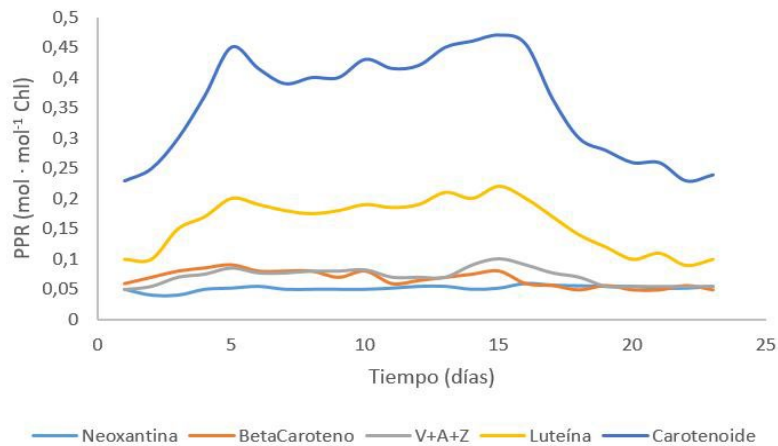
Esto es así ya que un determinado valor de PPM se relaciona con la existencia de un determinado tipo de clorofila, que a su vez es característica del tipo de alga presente, tal y como se puede consultar en la tabla 34. A partir de esto, se obtuvo la siguiente matriz, que señala el tipo de clorofila presente en cada mes y punto con valores positivos del índice PPM.

Tabla 34. Tipo de clorofila presente por mes y punto

Mes	15	16	21	24	26	30	36	37	48
P1	Luteina	Luteina				Luteina	Luteina Neoxantina		
P2	Luteina		Luteina			Luteina			
P3			Luteina	Luteina β -caroteno Neoxantina	Luteina β -caroteno Neoxantina		Luteina	Luteina β -caroteno V+A+Z	
P4			Luteina	Luteina		Luteina	Luteina β -caroteno V+A+Z	Luteina β -caroteno V+A+Z	
P5			Luteina				Luteina		
P6			Luteina		Luteina	Luteina	Luteina		Luteina
P7			Luteina	Luteina β -caroteno Neoxantina	Luteina			Luteina β -caroteno Neoxantina	
P8			Luteina		V+A+Z	Luteina			
P9			Luteina					Luteina Neoxantina	
P10			Luteina						
P11			Luteina				Luteina Neoxantina		
P12			Luteina			Luteina	Luteina Neoxantina		Luteina

Antes de comenzar con el análisis y discusión de los datos, se comprobó que la presencia de estas clorofilas no excedía los dos meses consecutivos, hecho que se ve respaldado por la edad de vida de este tipo de clorofila, que se establece en 23 días de media [16].

Tabla 35. PPR de los diferentes tipos de clorofila en función del tiempo [16]



4.4 Mancha en el Mar Menor

Otro objetivo de este estudio es la caracterización del fenómeno comúnmente denominado “mancha del Mar Menor”, el cual es recurrente durante lapsos de tiempo cortos (uno a dos meses) a lo largo de los años desde su aparición en el año 2019. Además, es recurrente su aparición en titulares y prensa, lo que lo ha convertido en un fenómeno de gran impacto social.



Figura 4-2. Titular del diario digital *Murcia Plaza*

El proceso que se siguió para la caracterización del fenómeno se describe en los siguientes puntos.



Figura 4-3. Imagen Landsat Sentinel 2-A del 14/08/2019 en que se aprecia la mancha en el Mar Menor

4.4.1 Obtención de imágenes satélite

Dado que se trata de un fenómeno aparentemente estacional y con una duración aproximadamente trimestral, se obtuvieron 5 imágenes satelitales Landsat Sentinel 2-A, con las siguientes fechas:

Tabla 36. Fecha de las imágenes obtenidas para la caracterización de la mancha en Mar Menor

Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Imagen 5
05/04/2023	25/04/2023	15/05/2023	25/05/2023	19/06/2023

Además del espectro visible de cada imagen, se descargaron igualmente los valores para cada Banda del Sentinel 2 A, con el objetivo de poder combinarlas para la obtención de índices.

Tabla 37. Longitud de onda y resolución de las bandas del Sentinel 2A

Sentinel-2 bands	Central wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 – Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 – Blue	0.490	10
Band 3 – Green	0.560	10
Band 4 – Red	0.665	10
Band 5 – Vegetation red edge	0.705	20
Band 6 – Vegetation red edge	0.740	20
Band 7 – Vegetation red edge	0.783	20
Band 8 – NIR	0.842	10
Band 8A – Vegetation red edge	0.865	20
Band 9 – Water vapour	0.945	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1.375	60
Band 11 – SWIR	1.610	20
Band 12 – SWIR	2.190	20

4.4.2 Pretratamiento de las imágenes satélite

A partir de la imagen del espectro visible, se procedió a un pretratamiento que potenciara la calidad de la misma, así como que nos permitiera la obtención de datos para la caracterización de la mancha.

En primer lugar, se recortaron las imágenes, se le aplicó un procesamiento ráster y por último, mediante la herramienta Band Rendering (min.-máx.) se potenciaron los bordes, permitiendo una mayor diferenciación de la zona de la mancha.

Con este pretratamiento, y mediante las herramientas de medición de QGis, se tomaron las medidas de la superficie de la mancha en las diferentes imágenes. Se obtuvo:

Tabla 38. Superficie medida en Km^2 de la mancha en las diferentes imágenes

Fecha	05/04/2023	25/04/2023	15/05/2023	25/05/2023	19/06/2023
S (km^2)	11.13	11.63	12.37	11.81	10.6

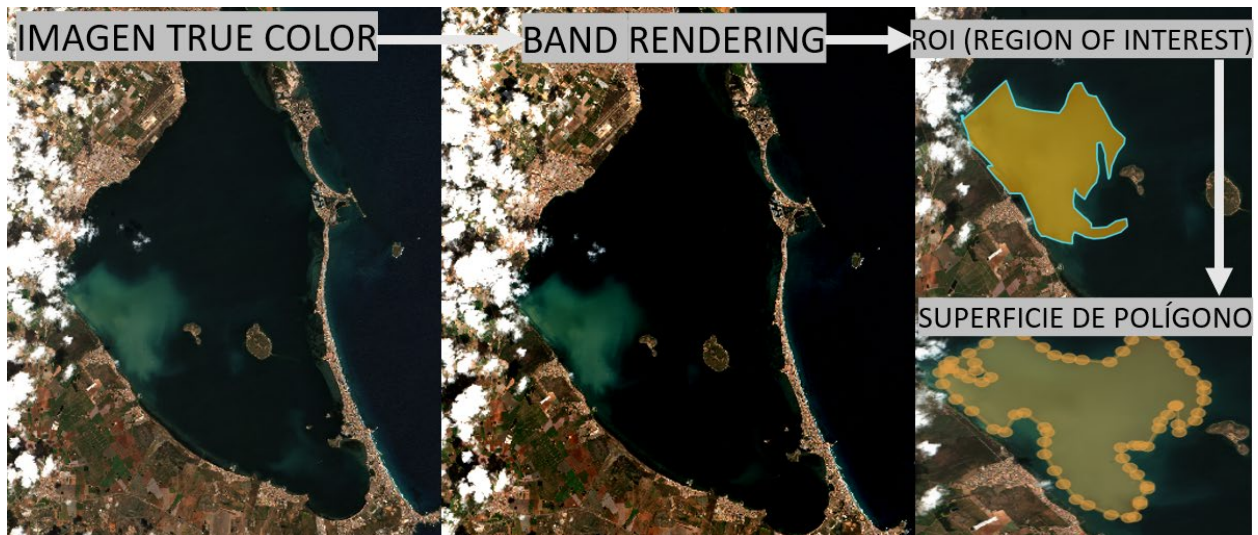


Figura 4-4. Proceso seguido para la medida de la superficie de la mancha

4.4.3 Aplicación de índice y comparación entre imágenes

Para cada una de las imágenes, se aplicaron los siguientes índices:

- **ÍNDICE DE COLOR DEL AGUA, *Water Color Index* (WCI)**, que combina los espectros visible y cercano del sensor Sentinel-2. Nos da la concentración de clorofila en el agua, lo que puede ser indicativo de presencia de algas, lo que a su vez indica la presencia de nutrientes. A mayor concentración de clorofila, mayor valor del índice.

$$WCI = \frac{B3 - B4}{B3 + B4}$$

- **ÍNDICE DE SUSPENSIÓN MATERIAL EN EL AGUA, *Water Suspended Material Index* (WSMI)**, que combina los espectros visible y cercano del sensor Sentinel-2. Indica la suspensión de materia en el agua (partículas), lo que puede indicar la presencia de sedimentos. El índice crece con la concentración de partículas.

$$WCI = \frac{B3 - B1}{B3 + B1}$$

- **ÍNDICE DE TRANSPARENCIA DEL AGUA, *Water Transparency Index* (WTI)**, que combina las bandas del infrarrojo cercano del sensor Sentinel-2. Indica la profundidad de penetración de la luz en el agua (transparencia del agua), a través de la atenuación de la luz en el infrarrojo cercano. El índice crece con la transparencia del agua.

$$WCI = \frac{B3 - B1}{B3 + B1}$$

- **ÍNDICE DE VEGETACIÓN EN AGUA, *Water Differential Vegetation Index* (WDVI)**, que combina las bandas del infrarrojo cercano y rojo. Indica la reflectancia de la banda infrarroja, que puede dar cuenta de masas de vegetación en el agua y el cambio de masas de agua. A mayor índice, mayor presencia de vegetación en el agua.

$$WDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

A partir de la calculadora raster que incorpora QGIS, pueden obtenerse los valores de los índices por píxeles de la imagen, para su posterior comparación entre imágenes. En este caso, se compararon los valores entre las dos imágenes consecutivas cronológicamente de las cinco estudiadas.

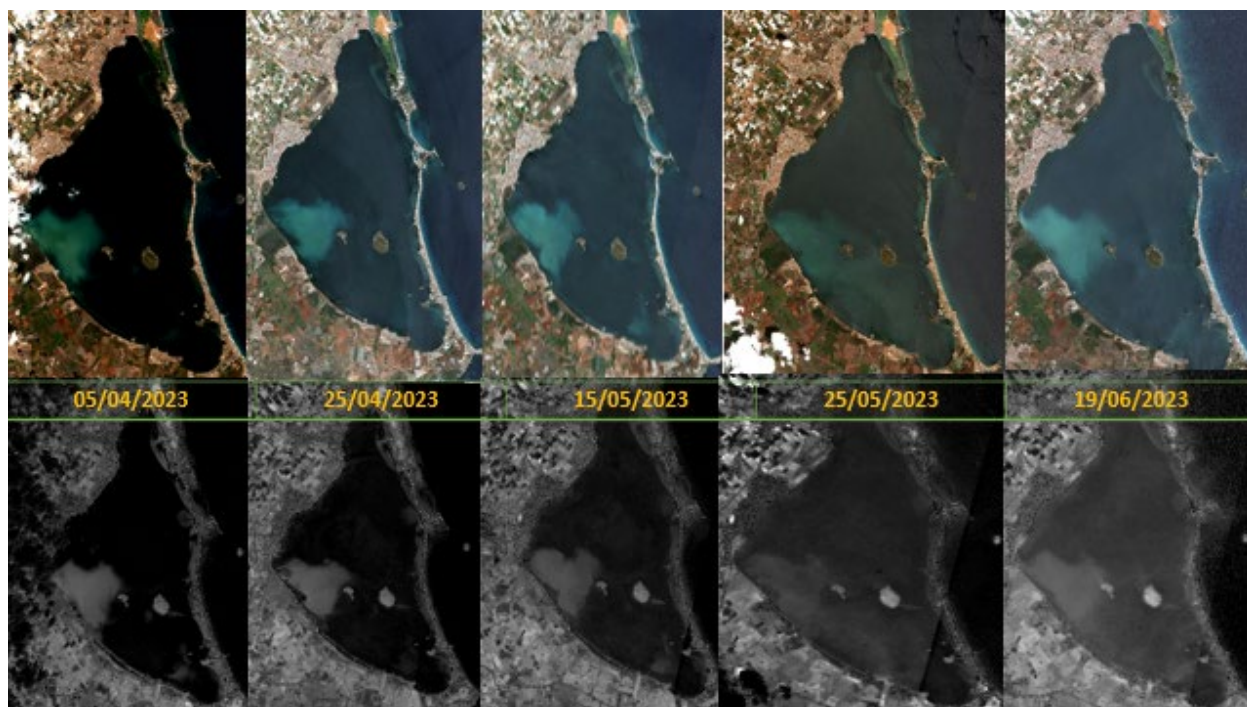


Figura 4-5. Imágenes consideradas para la caracterización de la mancha.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Temperatura

La temperatura media en la zona de estudio, durante el periodo de estudio, esto es, la temperatura media de los doce puntos obtenidas de las 179 imágenes Landsat 8 fue de 19,68 °C, 15,77 °C por debajo del valor máximo (35,45 °C), y 15,2 °C por encima de la temperatura mínima registrada (4,5 °C). Esto da cuenta de variaciones máximas de temperatura en el entorno de los 15°C, en periodos trimestrales.

La temperatura media mensual de la zona, por años, se muestra en la siguiente tabla:

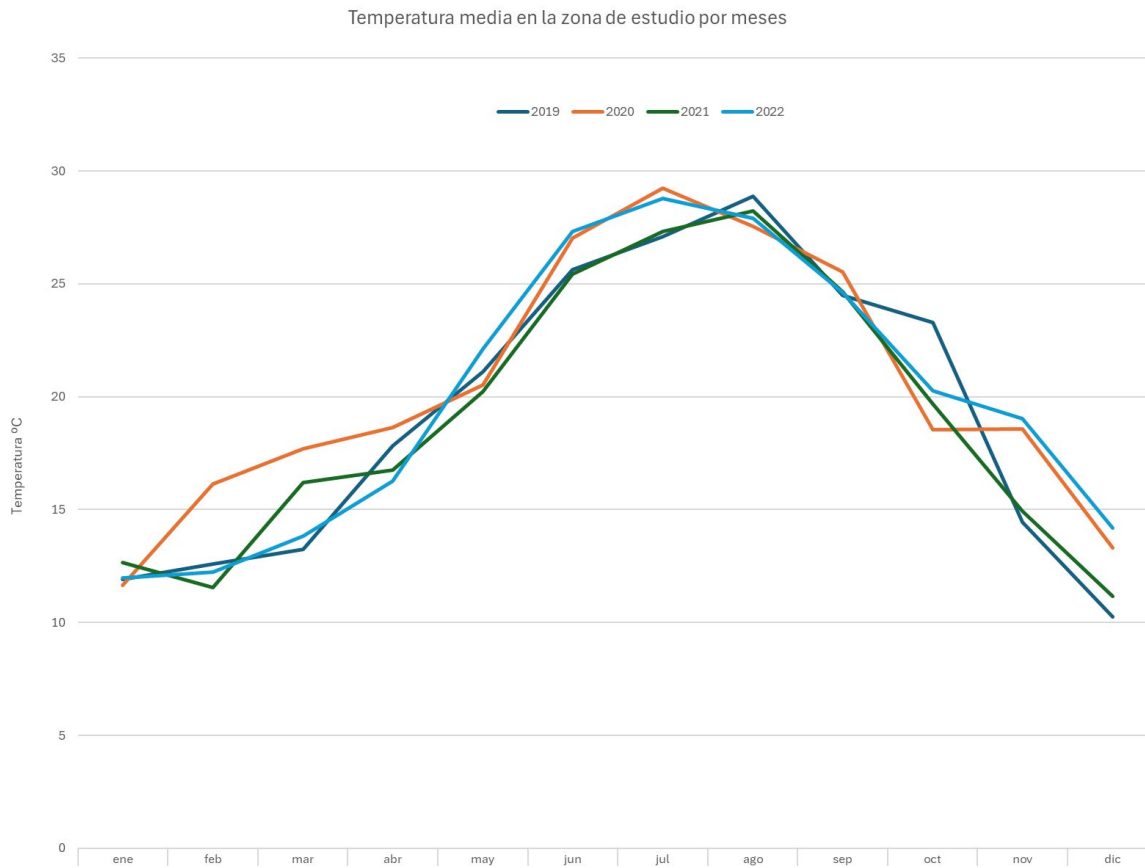
Tabla 39. Temperatura media mensual de la zona por año

Mes/Año	2019	2020	2021	2022
ene	11.912	11.641	12.658	11.957
feb	12.596	16.143	11.545	12.225
mar	13.239	17.711	16.212	13.842
abr	17.810	18.636	16.766	16.250
may	21.116	20.530	20.241	22.120
jun	25.638	27.015	25.449	27.303
jul	27.104	29.243	27.312	28.795
ago	28.883	27.535	28.236	27.896
sep	24.497	25.547	24.657	24.625
oct	23.293	18.529	19.682	20.252
nov	14.457	18.561	14.946	19.015
dic	10.251	13.306	11.176	14.187

Como puede apreciarse, la diferencia entre años consecutivos no supera en ningún caso los 5°C, lo que da cuenta que se trata de una zona con temperaturas estaciones recurrentes, sin observarse eventos que rompan la dinámica estacional, como puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 40. Temperatura media por trimestres en la zona y periodo de estudio

TRIMESTRE	T (°C)
1	13,473
2	21,572
3	27,027
4	16,471



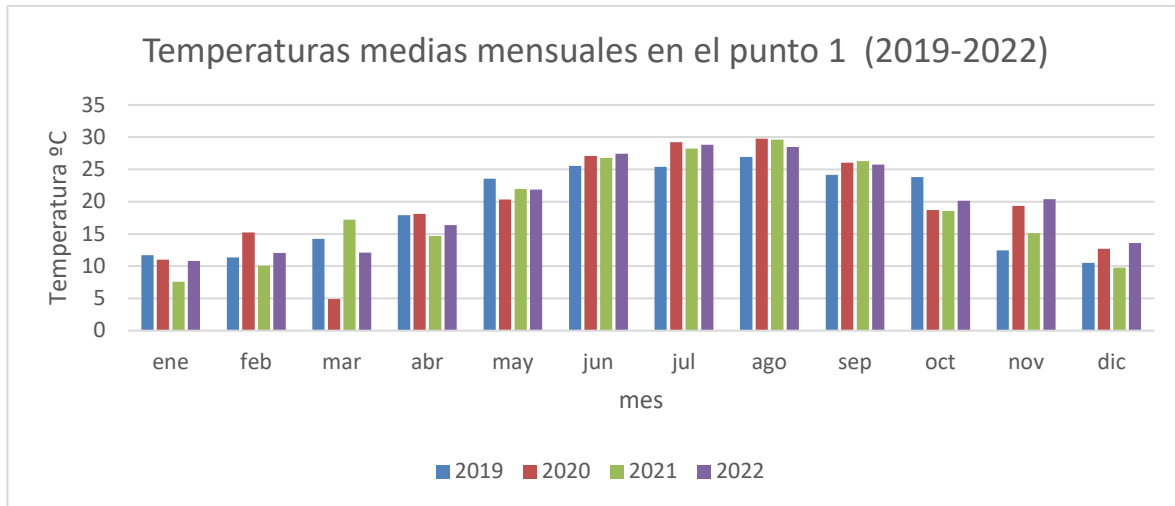
Gráfica 3. Temperatura media mensual por año

Analizando la zona por puntos, se observan temperaturas similares en todos ellos, dada su cercanía geográfica. A la hora de examinar estos datos, ha de tenerse en cuenta que estos provienen de 179 imágenes satélites tomados a lo largo de todo el periodo de estudio, por lo que un análisis pormenorizado carece de sentido, al existir la posibilidad de que existan meses con un único dato, y otro con varios, hecho que afecta notablemente a la verosimilitud de los valores medios.

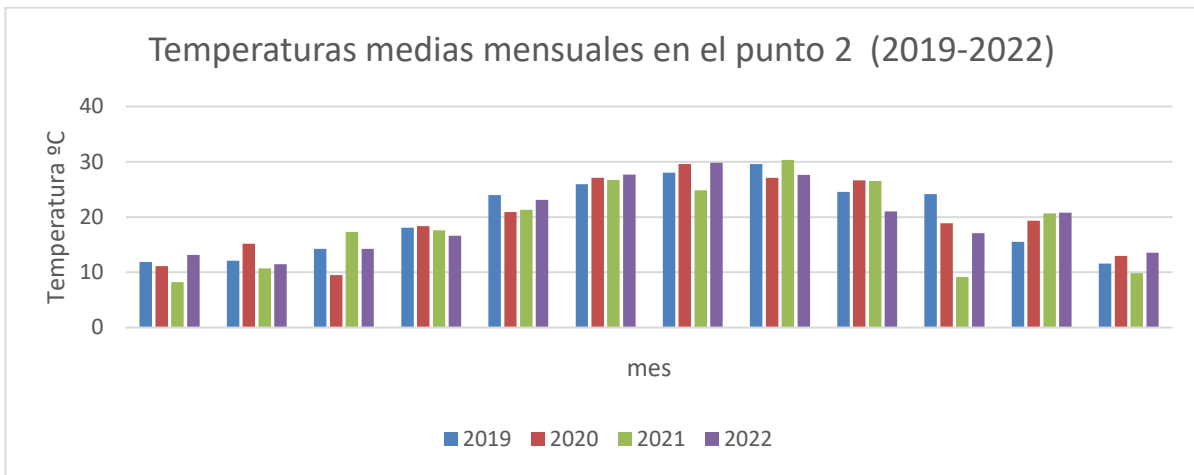
Al margen de esta nota, las mayores discrepancias de temperaturas entre puntos se observan entre los puntos 1 y 12, así como entre los puntos pegados a la costa interior (2,5,9), y los situados en la flecha (4,8,11). En las siguientes graficas se muestran las temperaturas medias por meses y puntos:



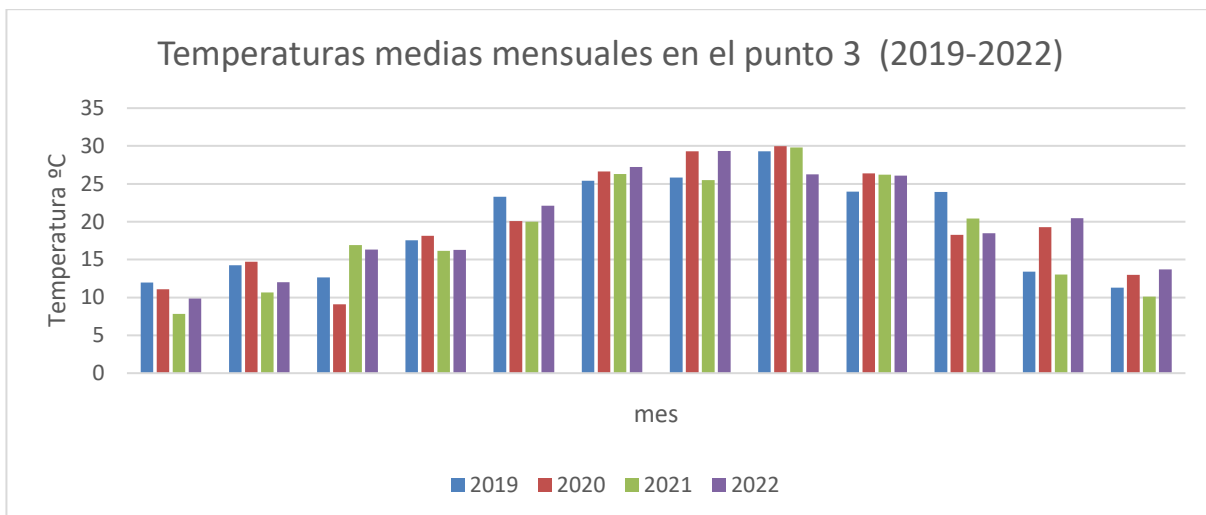
Ilustración 1. Puntos de la zona de estudio



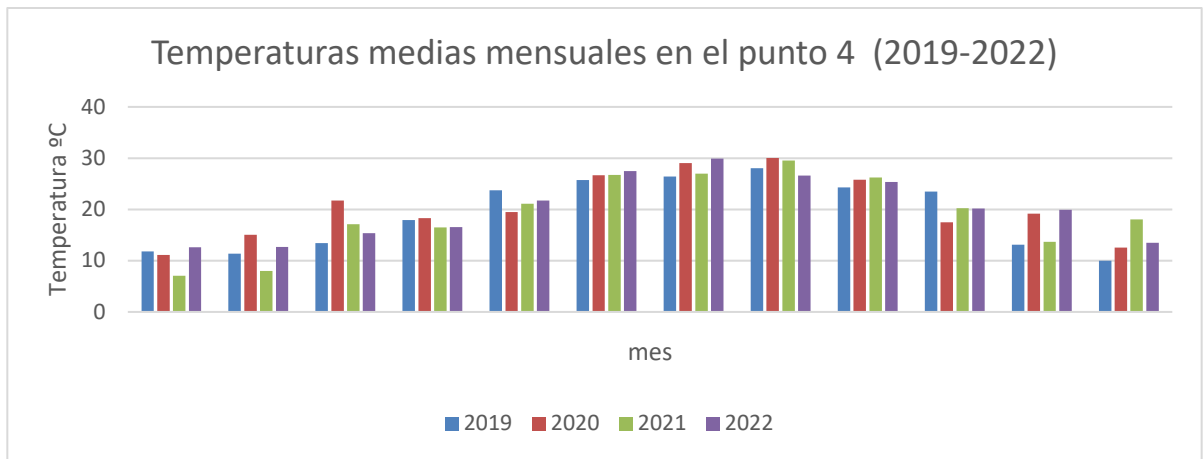
Gráfica 4. Temperaturas medias mensuales en el punto 1 (2019-2022)



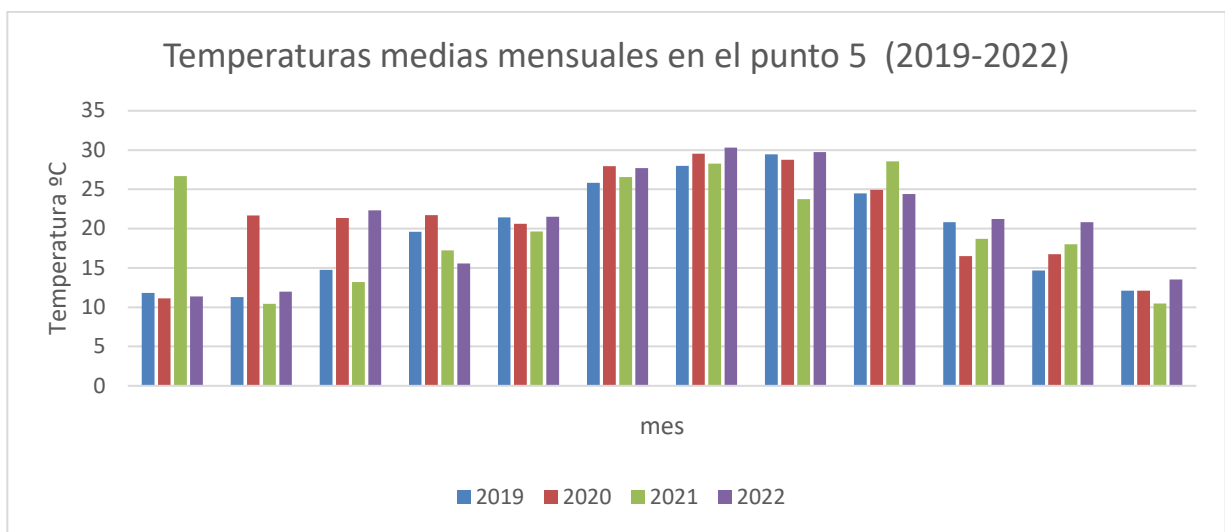
Gráfica 5. Temperaturas medias mensuales en el punto 2 (2019-2022)



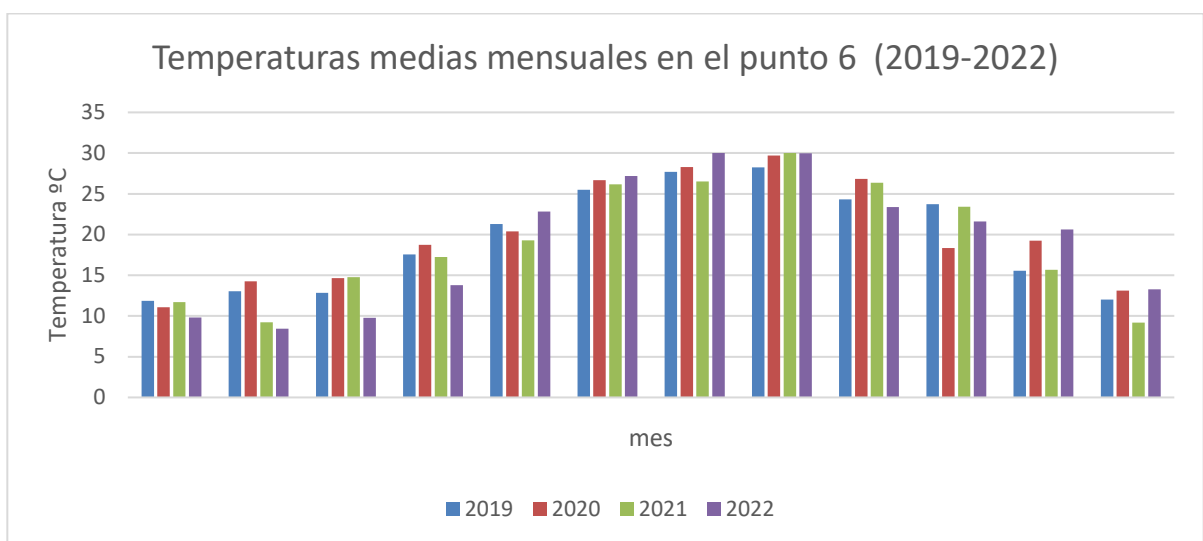
Gráfica 6. Temperaturas medias mensuales en el punto 3 (2019-2022)



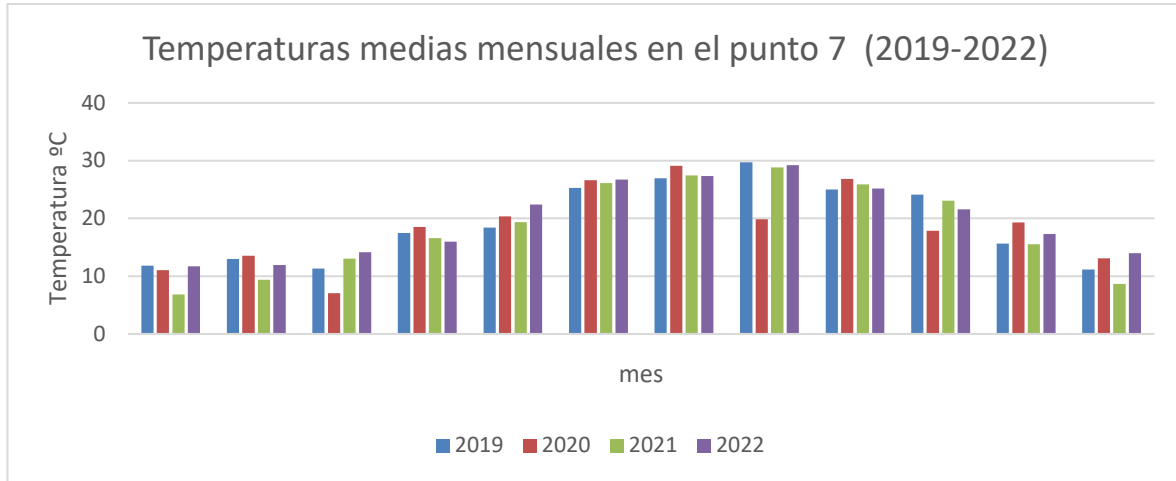
Gráfica 7. Temperaturas medias mensuales en el punto 4 (2019-2022)



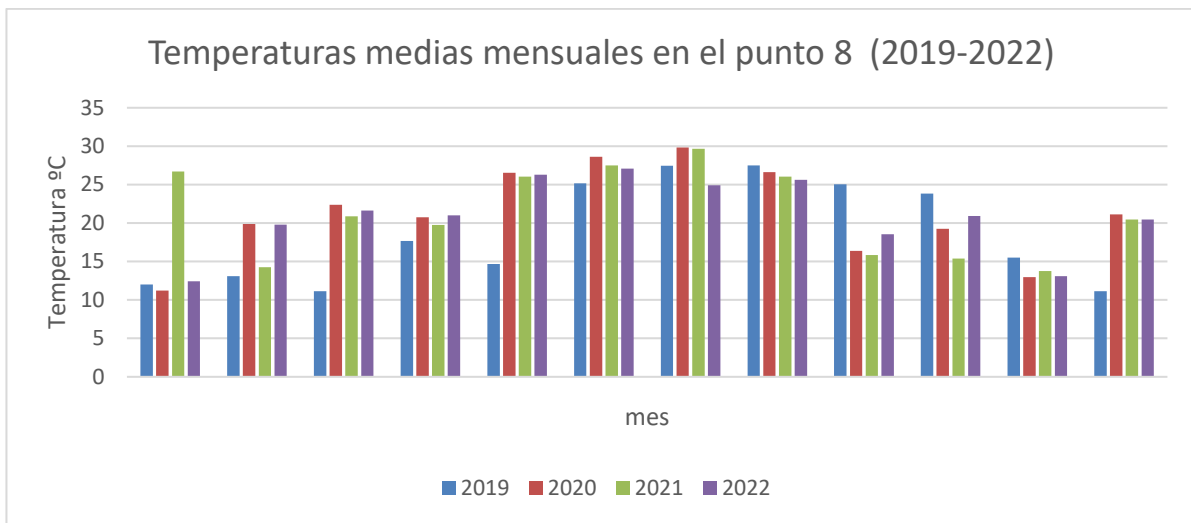
Gráfica 8. Temperaturas medias mensuales en el punto 5 (2019-2022)



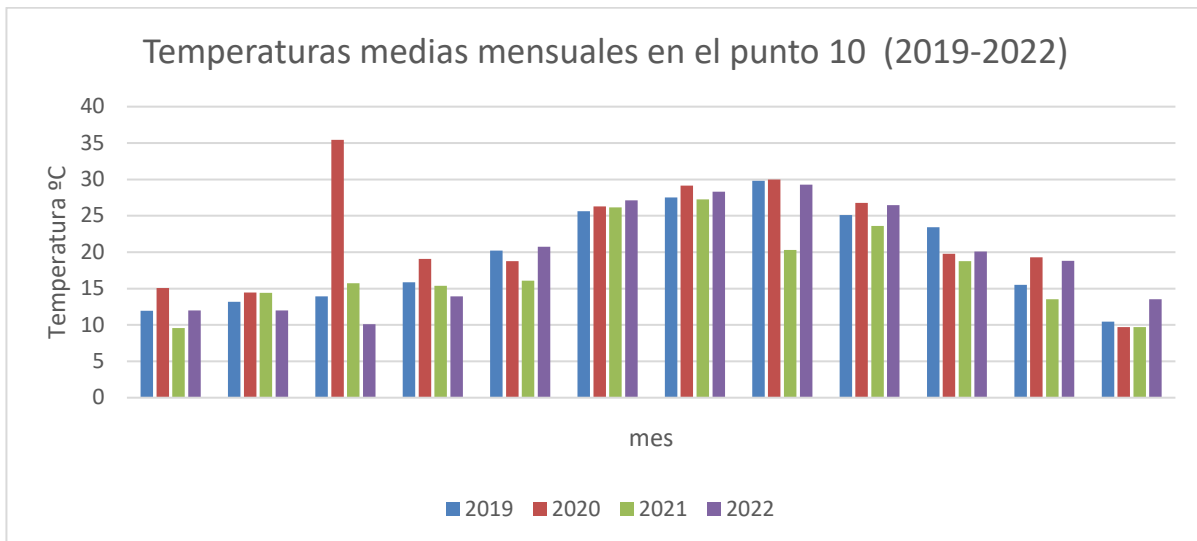
Gráfica 9. Temperaturas medias mensuales en el punto 6 (2019-2022)



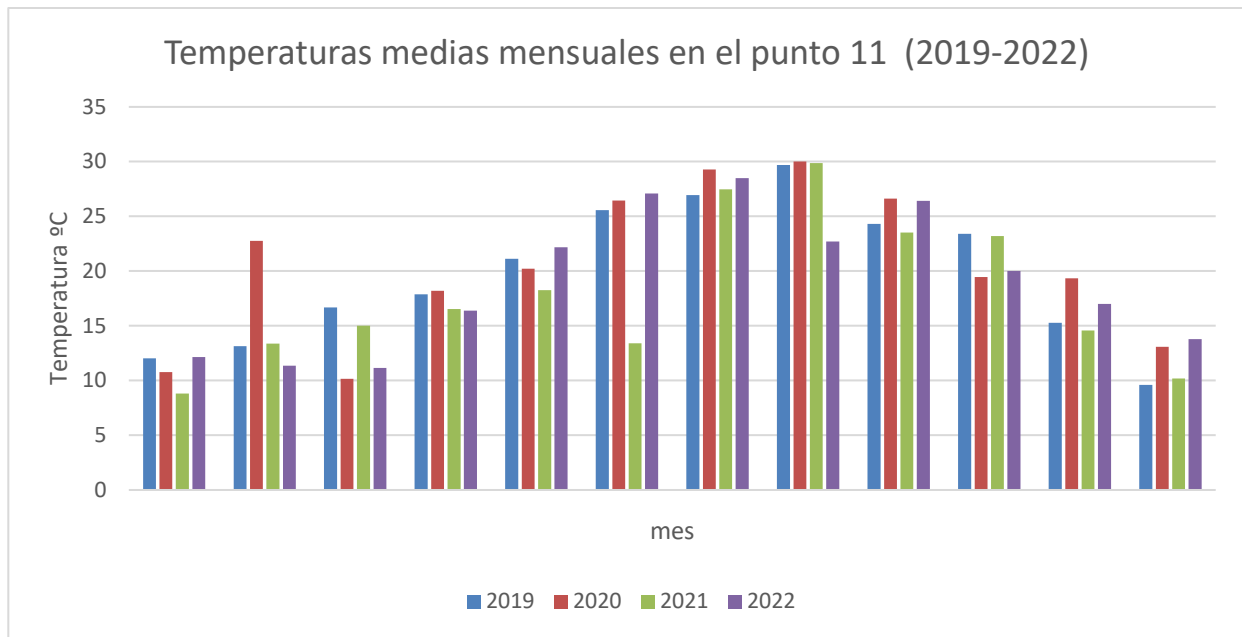
Gráfica 10. Temperaturas medias mensuales en el punto 7 (2019-2022)



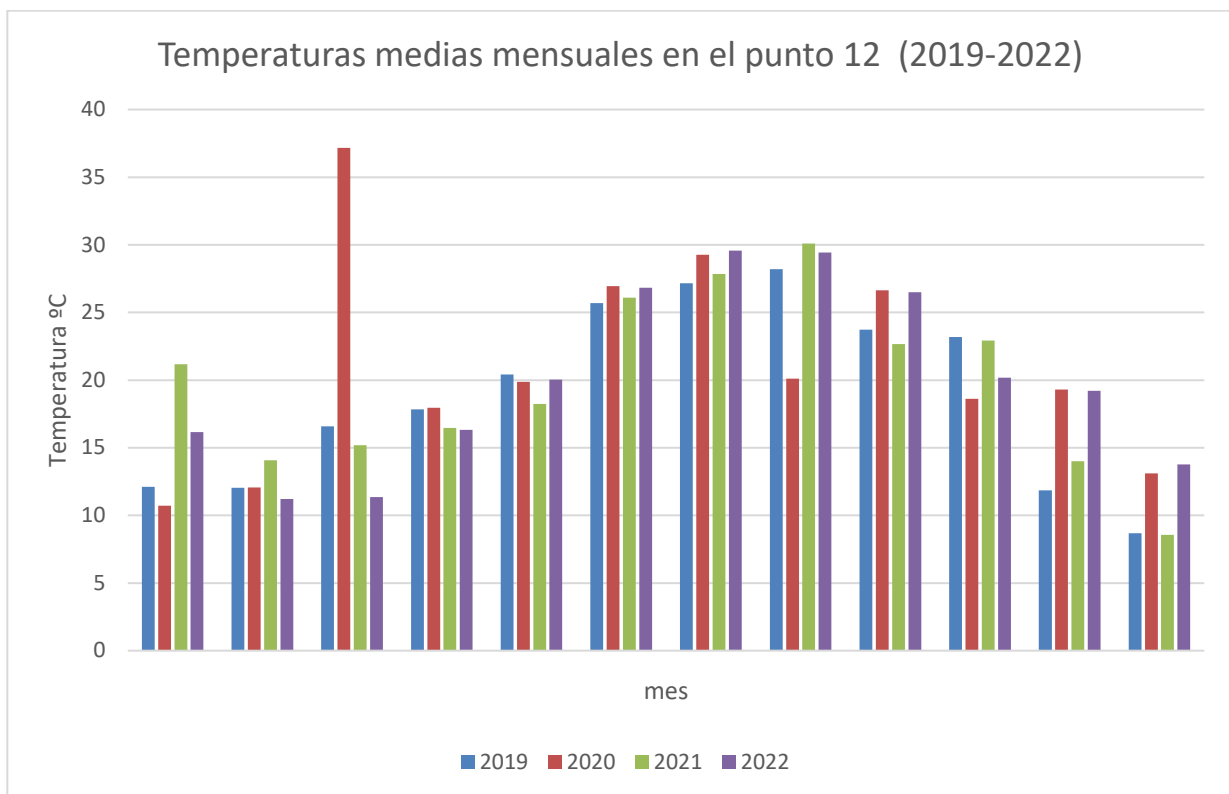
Gráfica 11. Temperaturas medias mensuales en el punto 8 (2019-2022)



Gráfica 12. Temperaturas medias mensuales en el punto 9 (2019-2022)

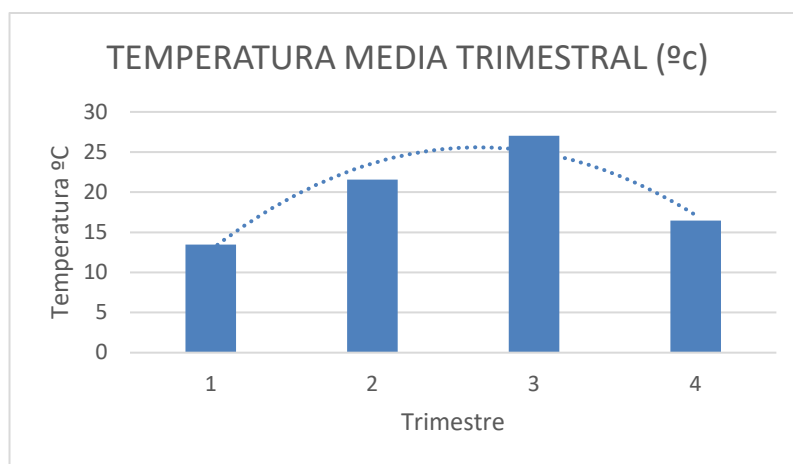


Gráfica 13. Temperaturas medias mensuales en el punto 10 (2019-2022)



Gráfica 14. Temperaturas medias mensuales en el punto 11 (2019-2022)

Como puede observarse, todos los puntos presenta una dinamica de temperatura estacional, alcanzando valores similares en los respectivos meses. Esta dinámica queda representada en la siguiente gráfica, con las medias de temperaturas trimestrales en los diferentes años:



Gráfica 15. Temperatura media trimestral (2019-2022) en la zona de estudio

Esta dinámica se repite de forma anual durante el período de estudio, sin observar cambios significativos, manteniendo en cada uno de los cuatro años valores medios de temperatura mensuales, trimestrales y anuales, similares.

Obtenidos y analizados los datos de temperatura, se pretende elaborar un análisis estadístico de componentes principales, en concreto, un Análisis de la Varianza de un factor (ANOVA). Se trata de una herramienta estadística que compara las medias de tres o más muestras independientes o correlacionado y determina si existe una diferencia significativa entre las medias de estos grupos.

Para llevar a cabo el Análisis, se utilizó la herramienta online VassarStats. En ella, se introdujeron como muestras independientes la temperatura media mensual de la zona en cada año, obteniendo una muestra para 2019, otra para 2020 y sendas para 2021 y 2022.

Tabla 41. Muestras para el ANOVA (Temperatura, °C)

Mes/Año	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
	2019	2020	2021	2022
ene	11.912	11.641	12.658	11.957
feb	12.596	16.143	11.545	12.225
mar	13.239	17.711	16.212	13.842
abr	17.810	18.636	16.766	16.250
may	21.116	20.530	20.241	22.120
jun	25.638	27.015	25.449	27.303
jul	27.104	29.243	27.312	28.795
ago	28.883	27.535	28.236	27.896
sep	24.497	25.547	24.657	24.625
oct	23.293	18.529	19.682	20.252
nov	14.457	18.561	14.946	19.015
dic	10.251	13.306	11.176	14.187

El análisis examina las diferencias entre las medias de los cuatro grupos de datos y nos dice si estas diferencias son significativas o simplemente producto del azar; nos ayuda a tomar decisiones basadas en datos al evaluar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas o simplemente fluctuaciones aleatorias.

En nuestro análisis, por tanto, existen cuatro muestras independientes y no ponderadas, asignándole el mismo peso estadístico a los cuatro años.

El análisis tiene como resultado la significancia, p , con diferentes interpretaciones en función de el valor obtenido:

- $p < 0.05$: Si el valor p obtenido en el ANOVA es menor que un nivel de significancia predefinido (0.05), podemos afirmar con confianza que al menos uno de los grupos tiene una media diferente de los demás, lo que sugiere que el factor en estudio tiene un efecto real y relevante en la variable de interés.
- $p \geq 0.05$: Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, no tenemos suficiente evidencia para afirmar que las medias son diferentes: Todo está dentro del margen de error y podría ser casualidad.

En conclusión, el ANOVA nos ayuda a descubrir si hay algo más allá del azar en nuestros datos y nos permite tomar decisiones informadas.

Los resultados de nuestro estudio se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 42. Resultados del Análisis de Varianza de un factor

Suma de cuadrados SS	Grados de Libertad GL	$MS = \frac{SS}{GL}$	Valor crítico F	Significancia P
12,8199	3	4,2733	0,1112	0,953106

Con el valor de significancia obtenido, se concluye que no existen diferencias significantes en las temperaturas de la zona y periodo de estudio. Si bien esto concluye que la temperatura no se ve afectada por la presencia de contaminación, al menos en el intervalo de tiempo estudiado – cuatro años-, no descarta su existencia ni su evolución a mayores o menores.

En este sentido, y llegados a este punto, se aborda el análisis de la evolución de la contaminación desde un prisma diferente, en concreto, desde la variación de la firma espectral e índice de pigmentación vegetal, que serán discutidos en el siguiente apartado.

Como se viene apuntando en este texto, los datos obtenidos de temperatura en la superficie del Mar Menor tienen su origen en imágenes satelitales, lo que acota notablemente las muestras de datos. Quizás, con mediciones tomadas sobre el terreno y con una periodicidad menor, pudieran obtenerse una evolución de la temperatura mucho más pormenorizadas que si diera cuenta de diferencias significativas.

En este punto de la discusión, se deja como camino a explorar el análisis de la temperatura en la superficie de agua, con datos recogidos en campo y con una periodicidad menor a los 5 días, periodicidad que, de media, presentan los datos aquí analizados.

5.2 Evolución de la Clorofila

A partir de la firma espectral obtenida en los diferentes puntos de las zona de estudio, de forma mensual, a lo largo de los años 2019, 2020, 2021 y 2022, se obtuvieron los valores del índice PPR (Plant Pigment Ratio), que miden la evolución de la clorofila y su tipología.

Las coordenadas de los puntos de estudio se recuerdan en la siguiente tabla:



Ilustración 2. Puntos de la zona de estudio

Tabla 43. Coordenadas geográficas de los puntos de estudio

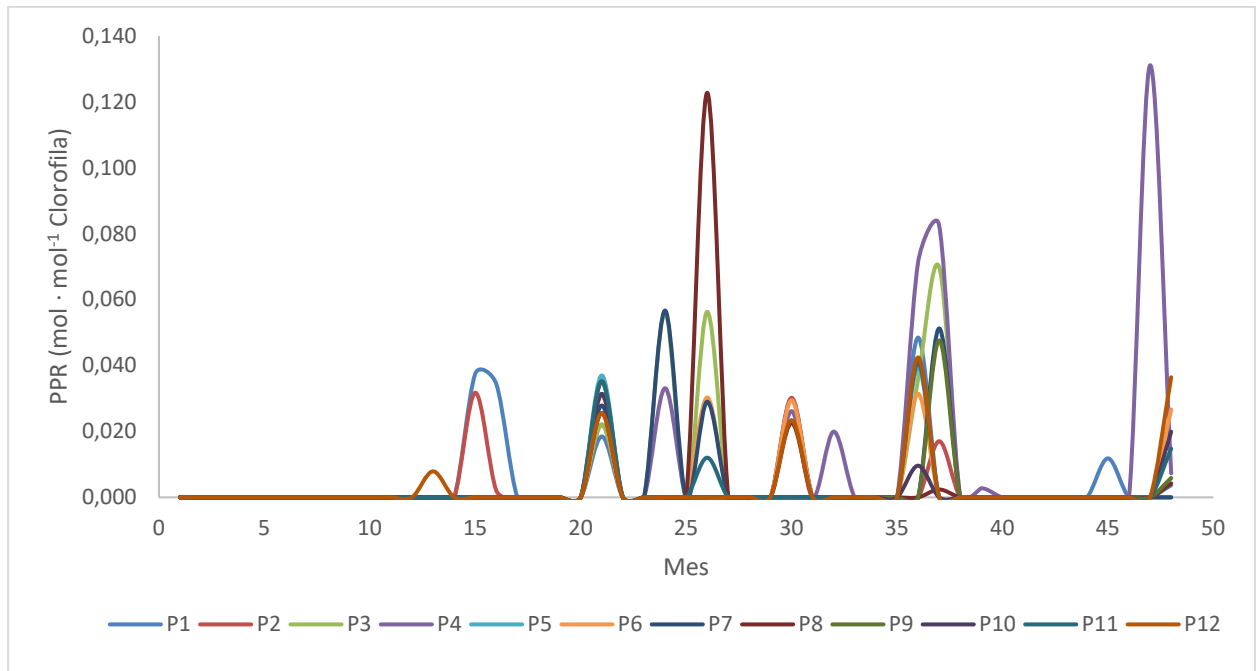
ID	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
	LATITUD	LONGITUD
1	377.911	-0.7814
2	377.485	-0.8212
3	377.490	-0.7848
4	377.504	-0.7519
5	377.178	-0.8384
6	377.178	-0.8072
7	377.178	-0.7749
8	377.194	-0.7484
9	376.776	-0.8089
10	376.765	-0.7728
11	376.768	-0.7402
12	376.531	-0.7481

A partir de los propios datos de PPR, se determinó en qué puntos y mes había evolución de la clorofila, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 44. Valores de PPR significativos por mes y punto

Mes	13	15	16	21	24	26	30	32	36	37	39	45	47	48
P1		0,038	0,034	0,018			0,030		0,049			0,012		0,004
P2		0,032	0,002	0,022			0,030			0,017				
P3				0,022	0,056	0,056			0,036	0,070				0,006
P4				0,031	0,033		0,026	0,020	0,071	0,082	0,003		0,131	0,007
P5				0,037					0,039					
P6				0,031		0,030	0,029		0,031					0,027
P7				0,028	0,057	0,029				0,051				
P8				0,026		0,123	0,023			0,002				0,004
P9				0,035						0,048				0,006
P10				0,031					0,010					0,020
P11				0,035		0,012			0,041					0,015
P12	0,008			0,026			0,023		0,042					0,036

Lo que, representado gráficamente:



Gráfica 16. Evolución del PPR por meses y puntos

Conocida la evolución del Plant Pigment Ratio (PPM) durante el periodo de estudio, se pudo determinar las posibles tipologías de algas presentes en la zona, así como su evolución y correlación con datos como la temperatura.

Tabla 45. Tipo de clorofila en función del valor de PPM

Rango PPM [$\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$]		Pigmento
Min.	Max.	
0,04	0,06	Neoxantina
0,05	0,09	β -coroteno
0,05	0,1	V+A+Z
0,022	0,09	Luteina

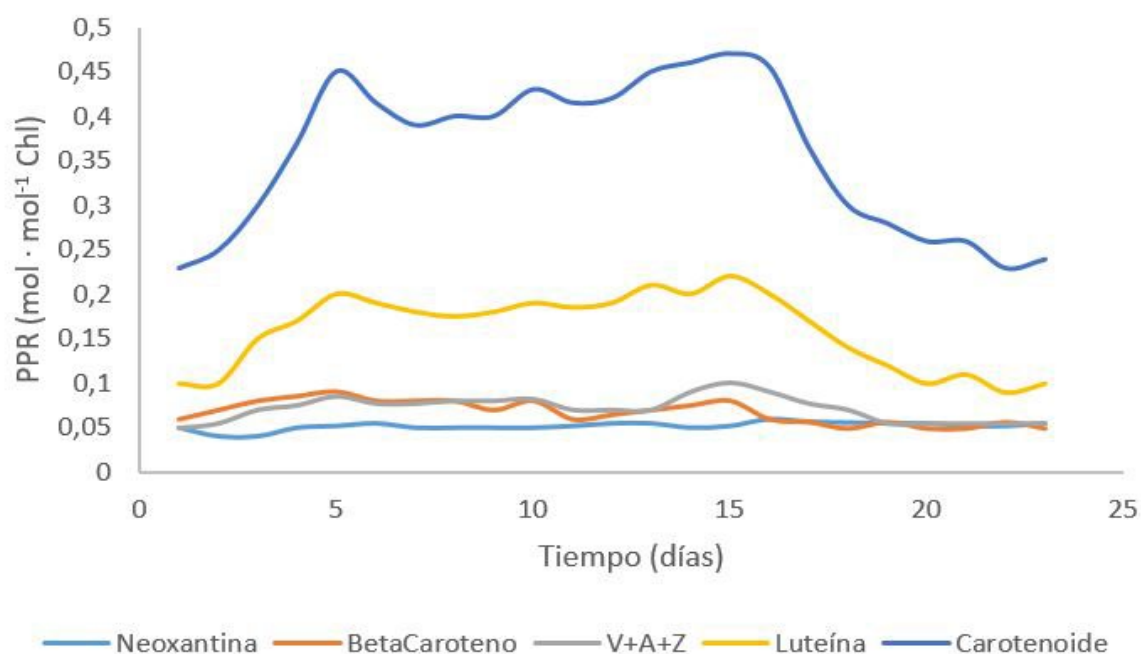
Esto es así ya que un determinado valor de PPM se relaciona con la existencia de un determinado tipo de pigmento, que a su vez es característico del tipo de alga presente, tal y como se puede consultar en la tabla 46. A partir de esto, se obtuvo la siguiente matriz, que relaciona el tipo de clorofila presente en cada mes y punto con valores positivos del índice PPM.

Tabla 46. Tipo de clorofila presente por mes y punto

Mes	15	16	21	24	26	30	36	37	48
P1	Luteina	Luteina				Luteina	Luteina Neoxantina		
P2	Luteina		Luteina			Luteina			
P3			Luteina	Luteina β -coroteno Neoxantina	Luteina β -coroteno Neoxantina		Luteina	Luteina β -coroteno V+A+Z	
P4			Luteina	Luteina		Luteina	Luteina β -coroteno V+A+Z	Luteina β -coroteno V+A+Z	
P5			Luteina				Luteina		
P6			Luteina		Luteina	Luteina	Luteina		Luteina
P7			Luteina	Luteina β -coroteno Neoxantina	Luteina			Luteina β -coroteno Neoxantina	
P8			Luteina		V+A+Z	Luteina			
P9			Luteina					Luteina Neoxantina	
P10			Luteina						
P11			Luteina				Luteina Neoxantina		
P12			Luteina			Luteina	Luteina Neoxantina		Luteina

Comprobándose además que la presencia de estas clorofilas no excedía los dos meses consecutivos, hecho que se ve respaldado por la edad de vida de este tipo de clorofila, que se establece en 23 días de media [16].

Tabla 47. PPR de los diferentes tipos de clorofila en función del tiempo [16]



El compuesto que más se observa en los resultados obtenidos es la Luteína, observada en 32 posiciones (punto/mes) perteneciente al grupo de las xantófilas. Se trata de un pigmento amarillo encontrado en plantas y algas.

El segundo compuesto más observado es el Neoxantina, con un total de 8 registros. Le sigue el β -caroteno, con 7 registros, y, por último, el compuesto A+V+Z (Anterosantina+Violasantina+Zeasantina), con un total de 4 registros.

El tipo de pigmento detectado supone su existencia en las células de estos organismos, así como su concentración, son características relacionadas con la nutrición de las algas, la calidad de su ambiente y la disponibilidad de luz solar.

Con el incremento de la concentración de elementos nutritivos en las aguas, se propicia un aumento de la actividad fotosintética, indicativa de la presencia de algas y fitoplancton. Esto tiene un impacto directo en la calidad del agua: el incremento de la vegetación implica un aumento de la turbidez del agua, lo que impide alcanzar ciertas profundidades a la radiación solar.

El incremento de la concentración de materia vegetal, unida al aumento de turbidez, crean condiciones anóxicas que provocan la muerte por asfixia de numerosas especies animales y vegetales, lo que provoca un descenso de la biodiversidad de la zona.

En este sentido, resulta relevante analizar la posible evolución de los pigmentos, para determinar qué tipo de alga se hace presente en los puntos y meses señalados.

En el Mar Menor, las especies de algas más abundantes son:

- *Caulerpa prolifera*: Esta alga verde es autóctona del Mediterráneo y forma densas praderas en los fondos arenosos y rocosos del Mar Menor.



Ilustración 3. Pradera de *Caulerpa prolifera* en el Mar Menor. Fuente: Canal del Mar menor

El *Caulerpa prolifera* prolifera con temperaturas superiores a los 10°C, siendo su reproducción más eficaz con temperaturas cálidas. Se trata de una especie invasora, que se ha expandido en el Mar Menor desde su dragado en los años 70, ocupando en la actualidad la mayor partes de los fondos de la laguna.

Si bien esta especie presenta clorofila, la *Caulerpa prolifera* contiene otros pigmentos, como la ficobilina y la fucoxantina, pero entre ellos no se encuentran los pigmentos detectados.

- *Chaetomorpha linum*: Se trata de un alga parda que no es exclusiva del Mar Menor, aunque su rápido crecimiento ha causado alarma en la zona.



Ilustración 4. *Chaetomorpha linum* Fuente: Canal del Mar menor

En este caso, el alga sí presenta el pigmento β -coroteno. El *Chaetomorpha linum* se reproduce en ambientes estuarios y con temperaturas suaves. Se trata de una especie invasora.

- *Laurecia obtusa*: Se trata de un alga roja muy abundante en aguas someras. Puede ser localmente abundante sobre todo en la cubeta norte y alrededor de las islas. Suele cubrir en abundancia fondos rocosos.



Ilustración 5. *Laurencia obtusa*. Fuente: Canal del Mar menor

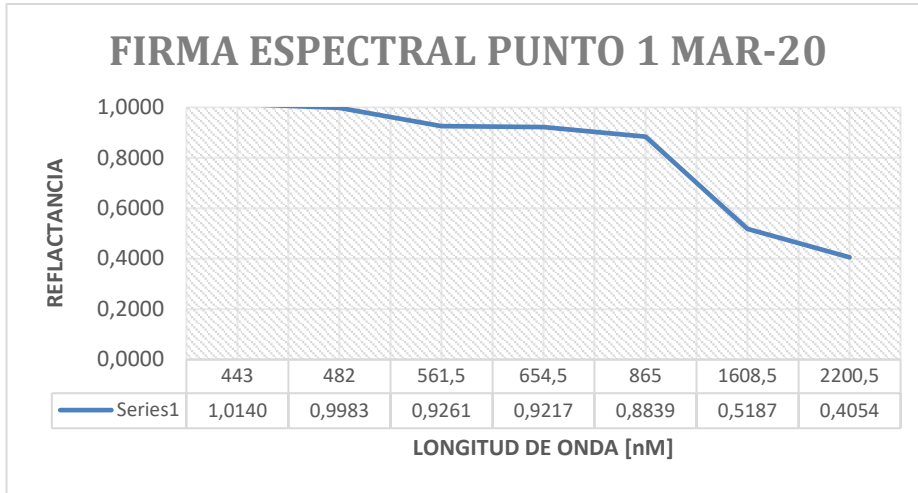
El β -caroteno, presente en esta especie de alga, es un pigmento naranja presente en diversas algas y plantas. Su relación con estas especies podría estar vinculada a funciones fotosintéticas, adaptaciones al ambiente acuático y protección contra el daño por luz. Además, también se encuentra en este alga el pigmento A+V+Z. [17]

Llegados a este punto, resulta probable que exista una cierta relación entre la variación de clorofila obtenida a través del PPR y la presencia de pigmentos y algas en el Mar Menor. Así, si observamos las firmas espectrales obtenidas en cada punto en los meses en los que se detecta la presencia de pigmentos, podremos cotejar los valores de reflectancia alcanzados para las longitudes de onda que capturan las algas.

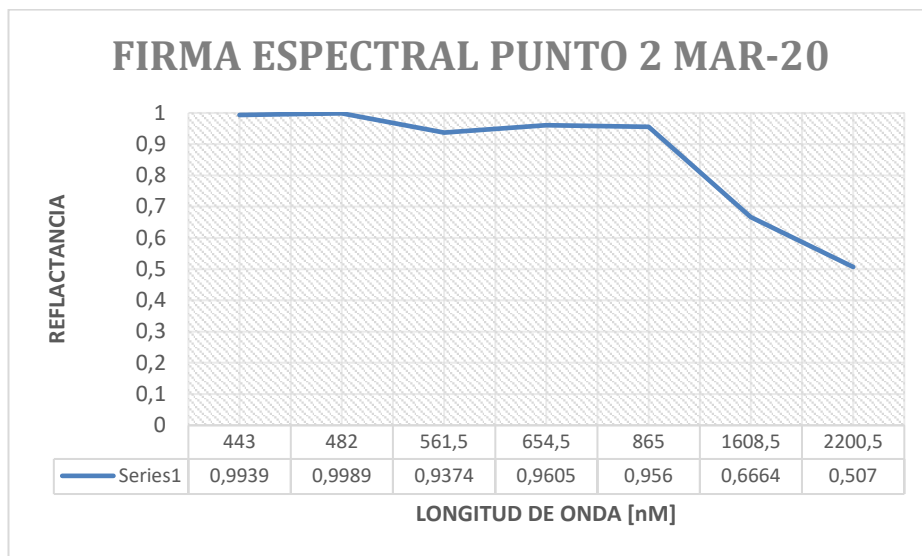
Tabla 48. Bandas de la firma espectral

BANDA		LONGITUD DE ONDA DE ONDA [nm]
B01	Costera/Aerosol	443
B02	Azul	482
B03	Verde	561,5
B04	Roja	654,5
B05	Infrarrojo cercano (NIR)	865
B06	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR-1)	1608,5
B07	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR-2)	2200,5

En el mes de marzo de 2020, se observan los siguientes espectros significativos:



Gráfica 17. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 MAR-20

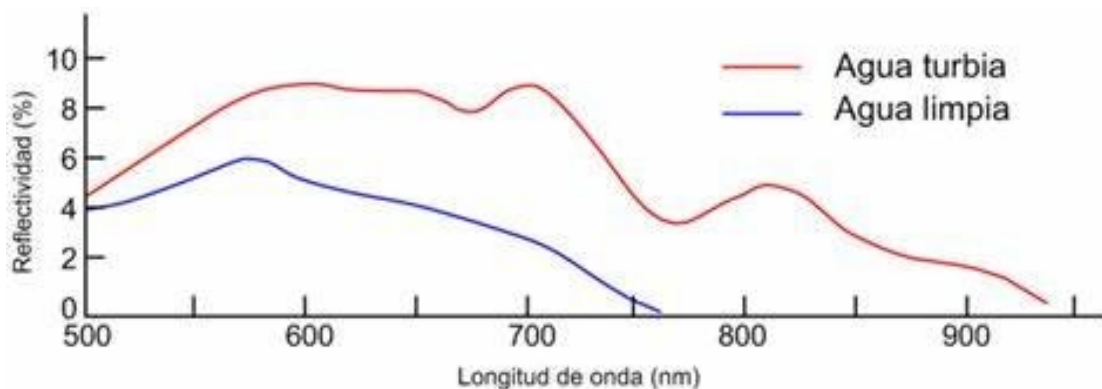


Gráfica 18. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 MAR-20

Tanto en el punto 1 como en el 2, se observa un espectro de valores elevados, que puede dar cuenta de la turbidez del agua. La temperatura media de este mes, según los datos recopilados, fue de 13, 83 °C.

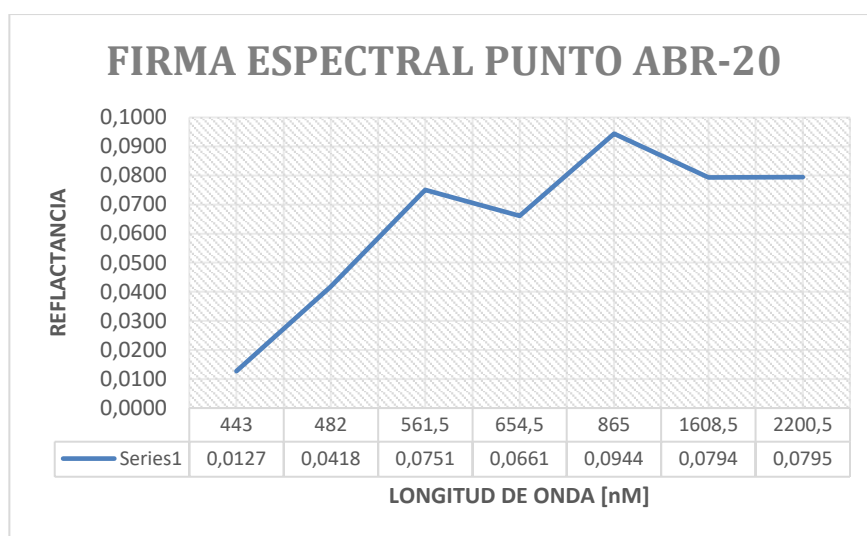
A cuenta del espectro observado, y dado que los puntos se encuentran en la franja norte de la zona de estudio, es posible que la turbidez del agua se deba a acumulación de algas en descomposición en las zona intermareal, próxima a las playas.

Todo esto cobra más congruencia si observamos las bajas temperaturas de meses anteriores.



Gráfica 19. Figura 1. Espectros de reflectividad del agua limpia y del agua turbia (Bartolucci et al., 1977). [18]

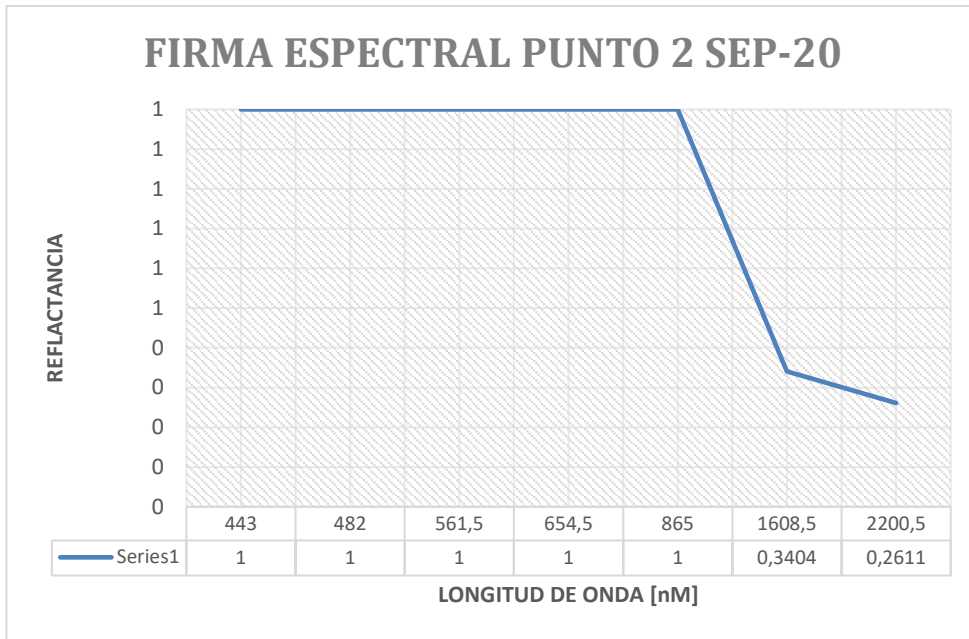
En el mes de Abril de 2020, por su parte, se observan valores significativos de PPR en el punto 1:



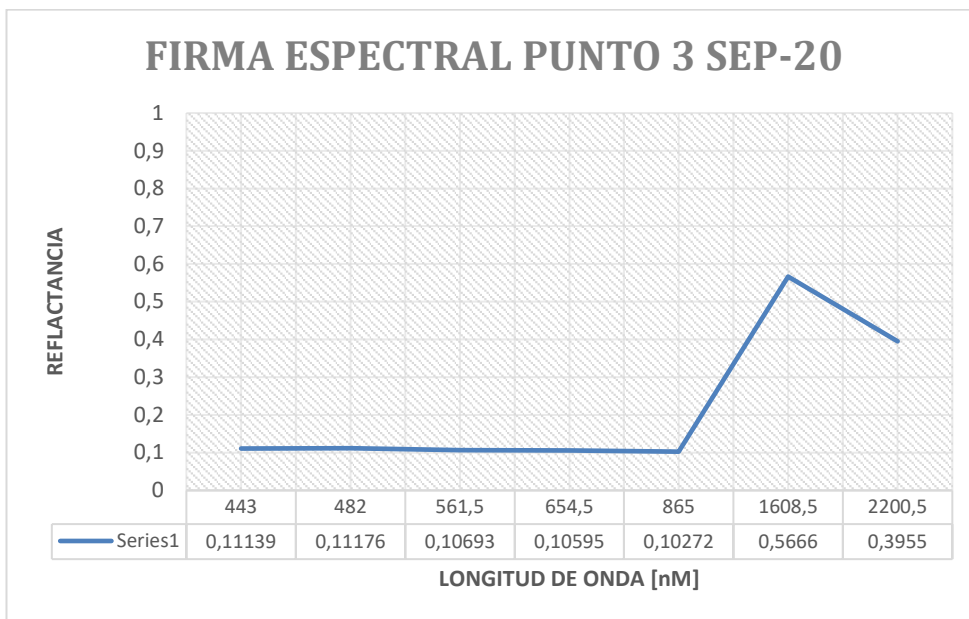
Gráfica 20. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 MAR-20

El espectro varía sustancialmente con respecto del mes anterior, en el mismo punto. La temperatura media registrada en la zona es de 17,66 °C. El aumento de la temperatura puede propiciar el afloramiento y reproducción de algas. En este sentido, se observa un pico de valor en la banda infrarroja cercana (NIR), así como en la banda verde. Esto puede deberse al crecimiento de población de *Chaetomorpha linum*, alga de rápido crecimiento y que presenta valores elevados de clorofila en su etapa de reproducción.

En el mes de septiembre 2020, la Luteina se detecta en todos los puntos de la zona excepto en el 1, con un espectro muy similar en todos ellos. La temperatura media de la zona en ese mes se sitúa en 24,67° C; si bien, sufre en descenso de casi 6 puntos con respecto al mes anterior.

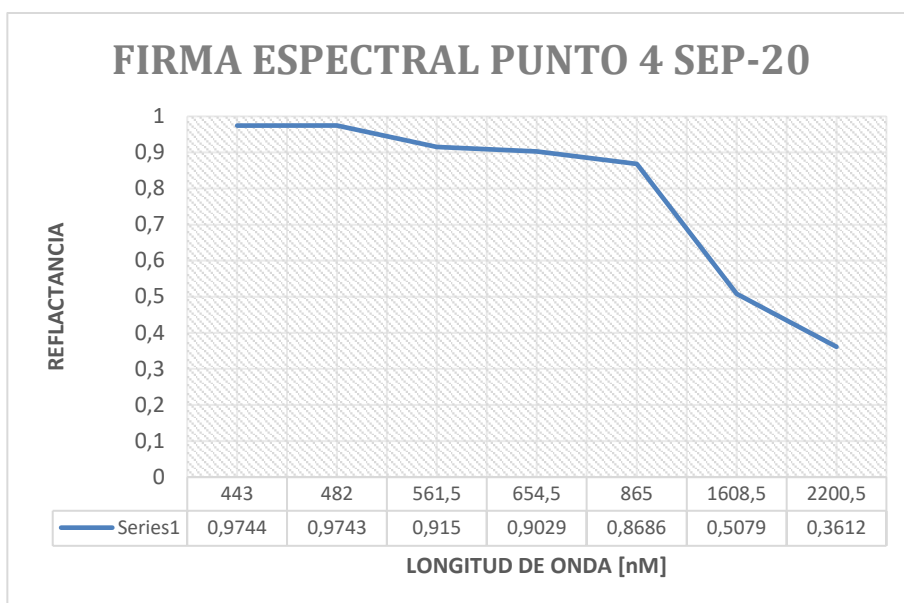


Gráfica 21. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 SEP-20

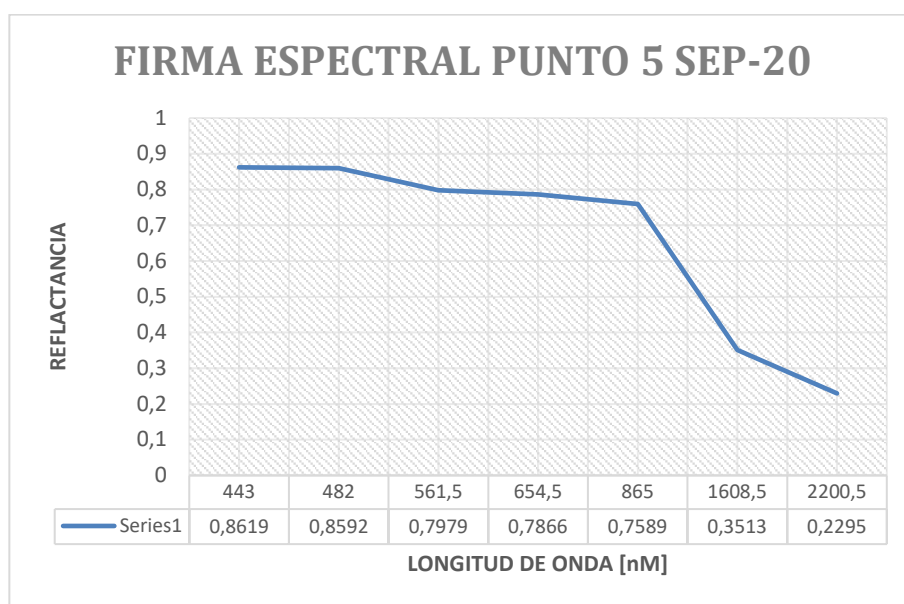


Gráfica 22. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 SEP-20

El espectro del punto 3 es el más disonante entre los recogidos para el mes de septiembre de 2020, alcanzando valores mucho más bajos en todas las bandas, excepto en la infrarroja cerca 1, donde presenta un pico. El punto 3 se sitúa en una de las zonas con batimetría más baja del Mar menor, siendo ese motivo por el cual puede responder de forma diferente al resto de puntos en cuanto a reflectancia nos referimos.



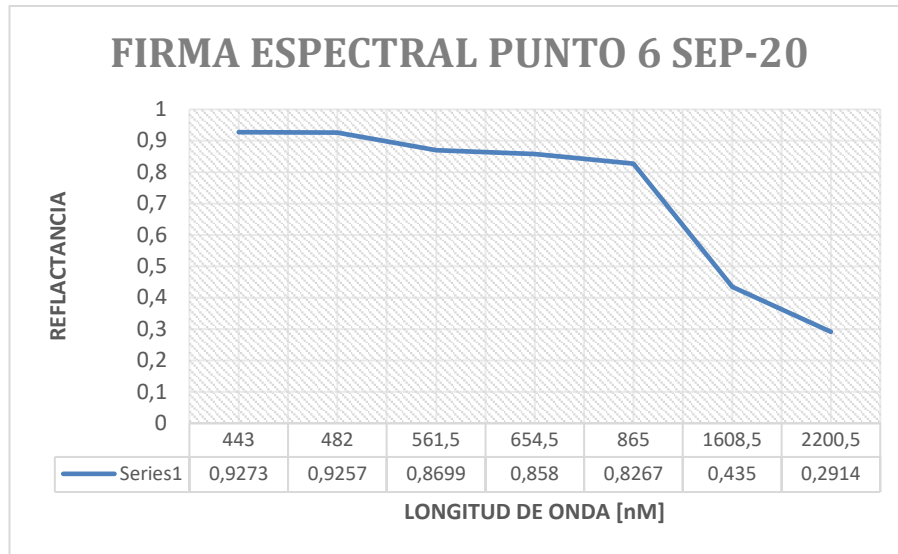
Gráfica 23.FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 SEP-20



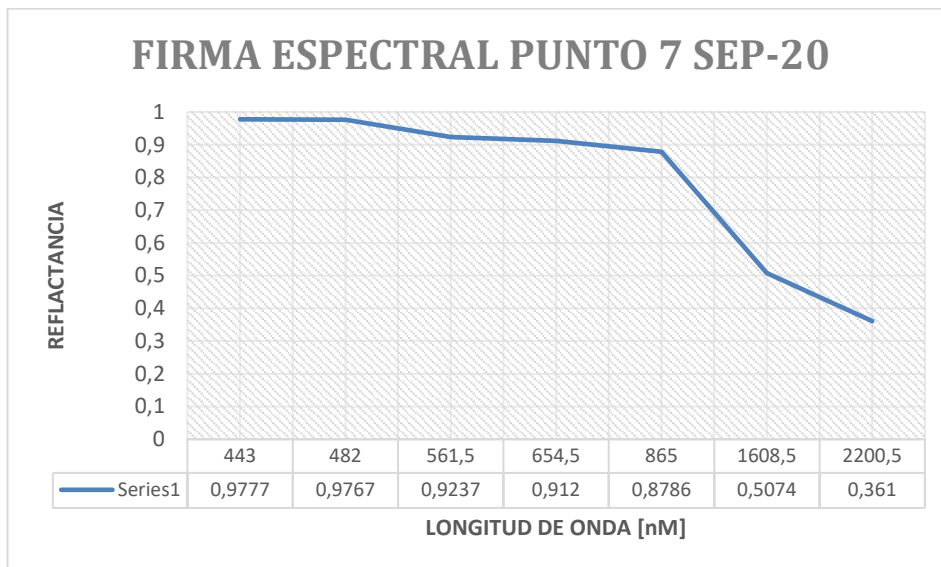
Gráfica 24. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 5 SEP-20

Como se observa, en el resto de puntos existen valores elevados de reflectancia en las primeras bandas, disminuyendo considerablemente en las bandas infrarroja, e infrarrojas cercanas. Como ocurrían en el mes de Marzo, este tipo de espectro puede dar cuenta de la turbidez del agua.

La turbidez en el agua puede ocasionar la eutrofiación del medio, esto es, la pérdida de oxígeno en el lecho debido a que la radiación solar no alcanza ciertas profundidades, y degenerar en la pérdida de vida del ecosistema. Esta turbidez es característica de periodos en los que las poblaciones de algas se merman notablemente, acumulándose sus restos (partículas en suspensión) en suspensión en el agua.

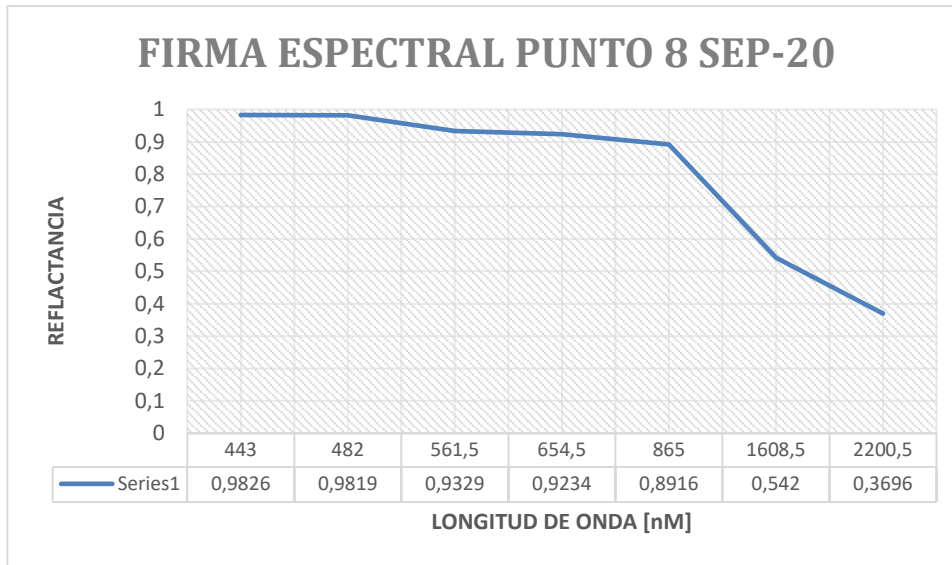


Gráfica 25. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 SEP-20



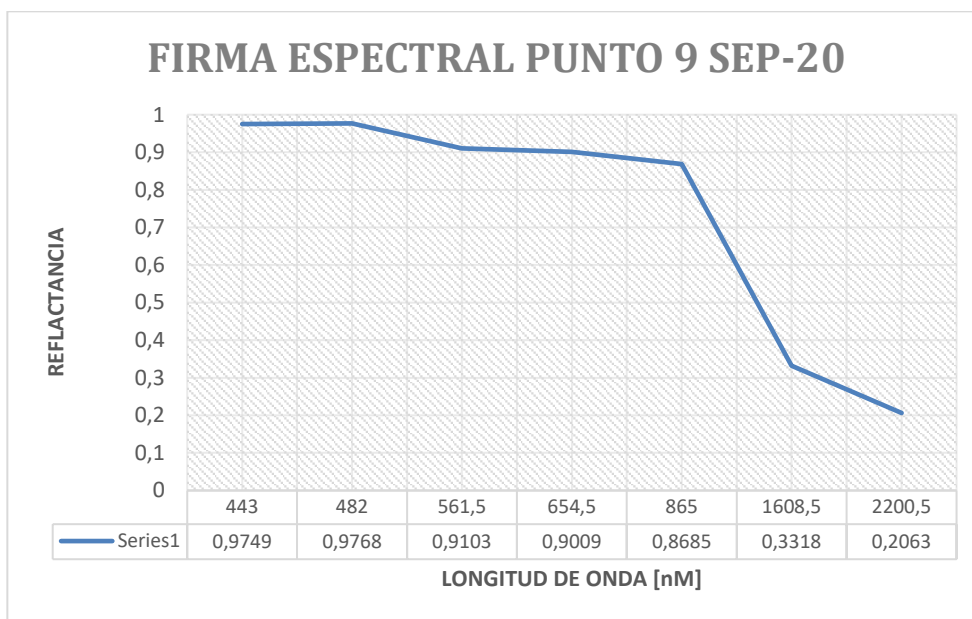
Gráfica 26. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 SEP-20

Si bien, la turbidez no tiene por qué corresponderse exclusivamente con la proliferación de algas, pudiendo deberse también a otros factores, como la acumulación de sedimentos en suspensión, bien sea por la dinámica marina o bien por aportaciones fluviales a la laguna.

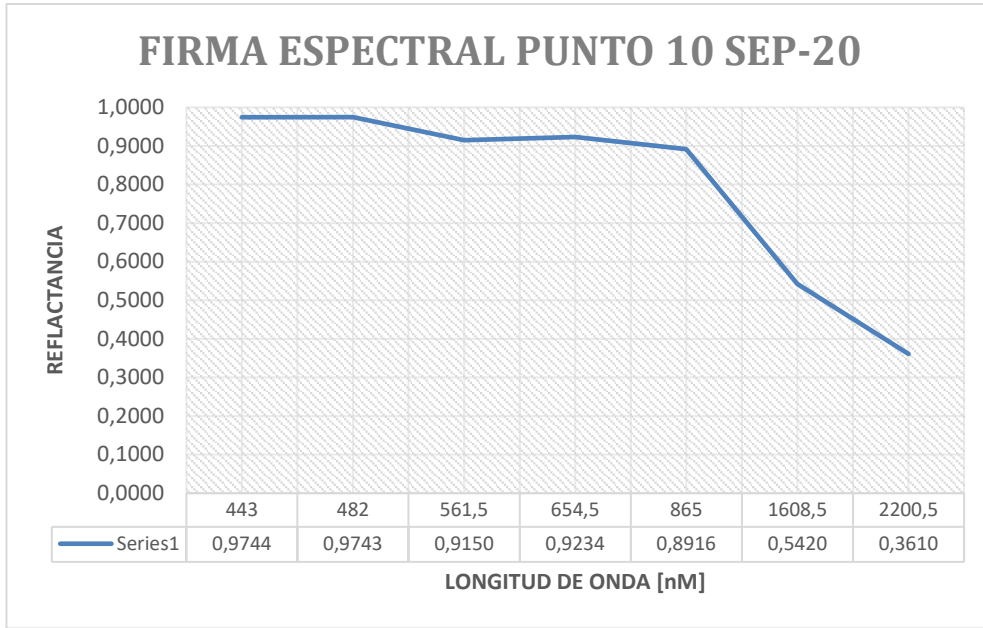


Gráfica 27. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 SEP-20

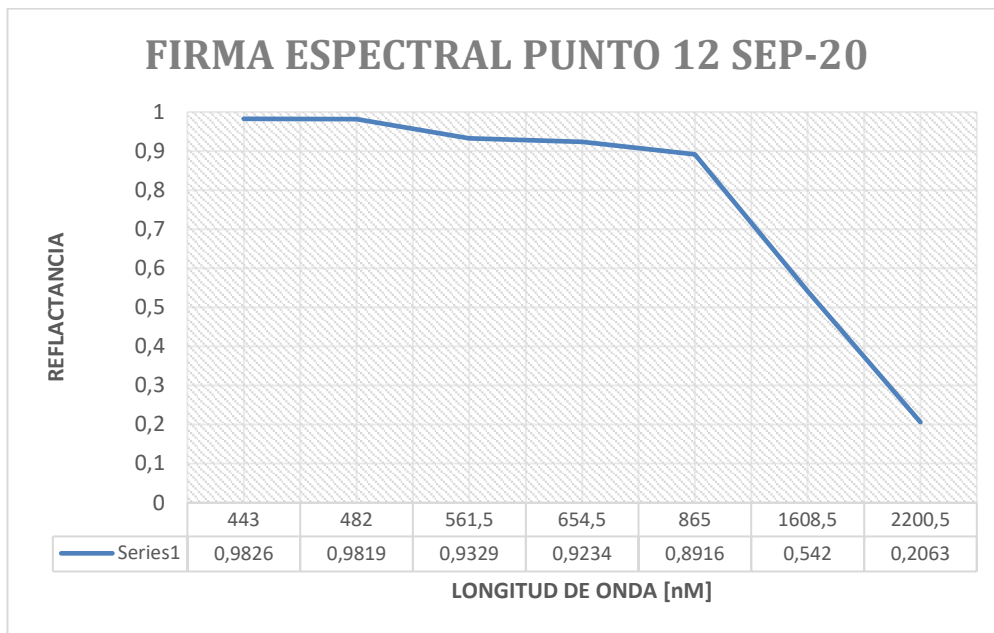
Habida cuenta de todo ello, y puesto que las temperaturas en el mes de septiembre no se encuentran en rangos de inconveniencia, además de resular los meses anteriores, meses cálidos, es importante destacar que la turbidez en este mes no tiene por qué ser debida a residuos de algas, ya que, además, no se detectan otros pigmentos diferentes a la Luteína.



Gráfica 28. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 9 SEP-20

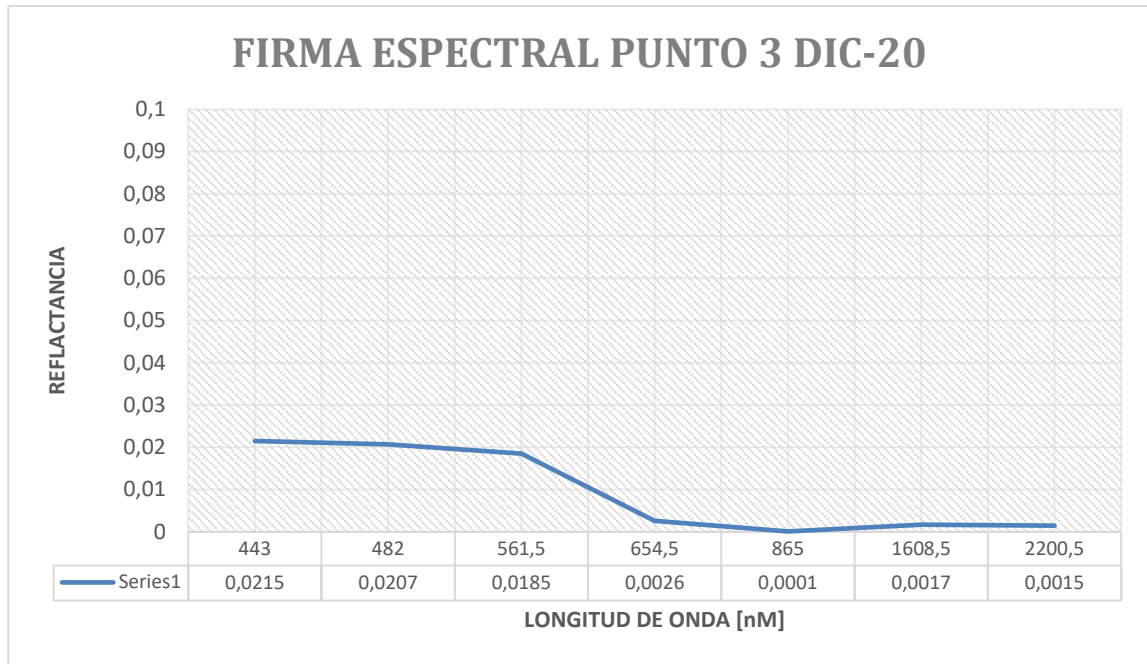


Gráfica 29. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 10 SEP-20

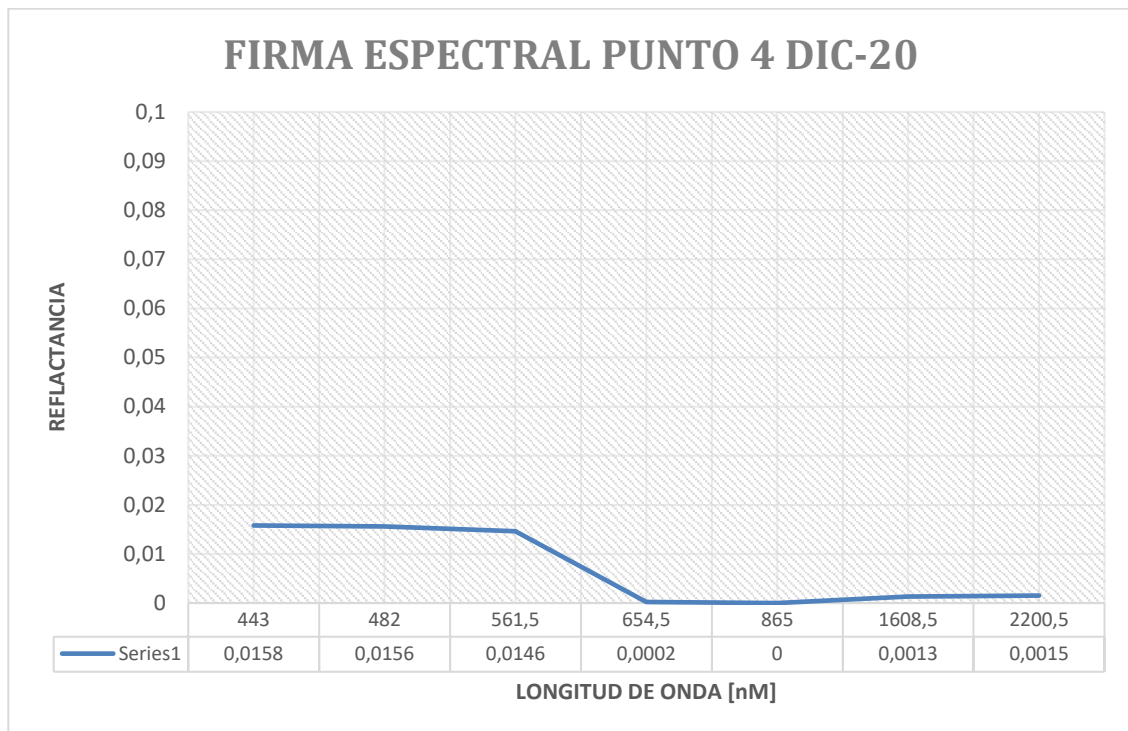


Gráfica 30. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 SEP-20

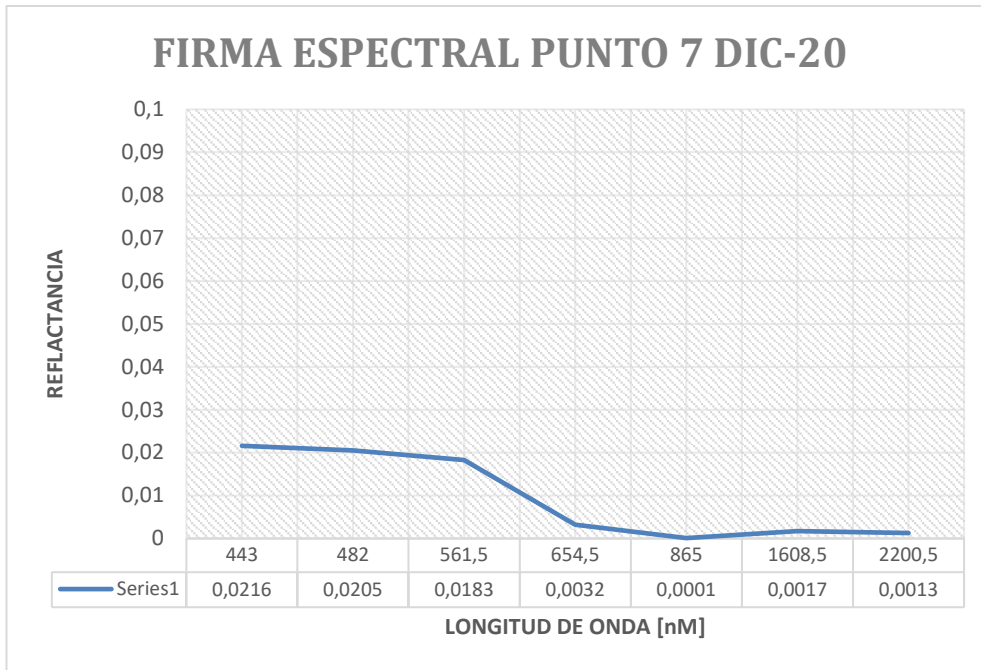
En el mes de Diciembre del año 2020, se observan espectros de agua clara en los puntos 3, 4 y 7:



Gráfica 31.FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 DIC-20



Gráfica 32. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 DIC-20

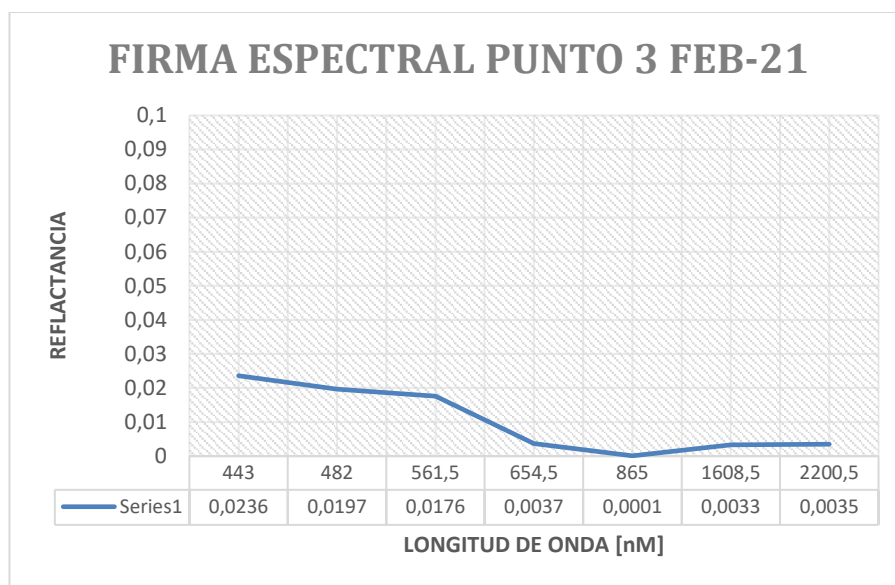


Gráfica 33. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 DIC-20

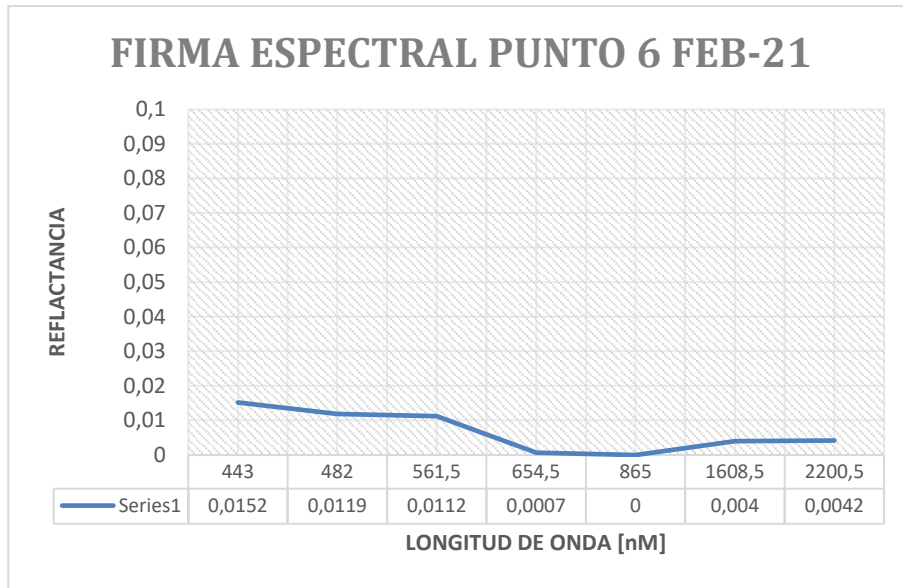
En este mes, la temperatura media registrada en la laguna se sitúa en 12,89° C, por lo que resulta coherente apreciar aguas con pocas partículas en suspensión.

Durante este mes se detectan los pigmentos de Luteína, β -caroteno y Neoxantina, característicos de algas pardas y rojas. En diciembre comienzan a asentarse las temperaturas de los meses fríos, por lo que estos hallazgos pueden tener relación con los reductos de la proliferación de algas presentes en el Mar Menor, como son *Chaetomorpha linum* y *Laurencia obtusa*.

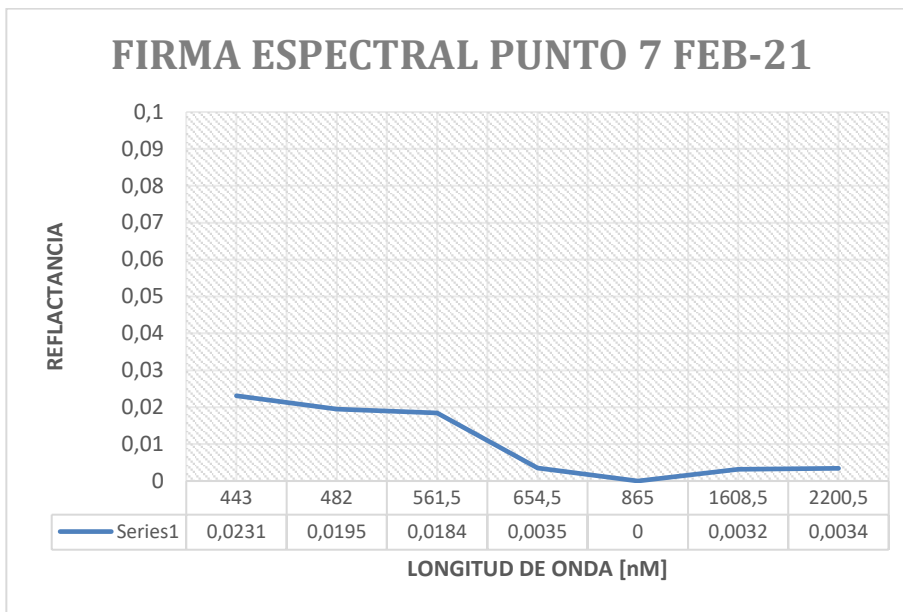
Por su parte, en Febrero de 2021, la temperatura media registrada en la laguna se sitúa en 11,97° C, resultando una temperatura de 11°C por debajo de la generalmente adecuada para la reproducción y proliferación de las algas que habitan en la laguna; en este sentido, resulta coherente apreciar aguas con pocas partículas en suspensión.



Gráfica 34. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 FEB-21



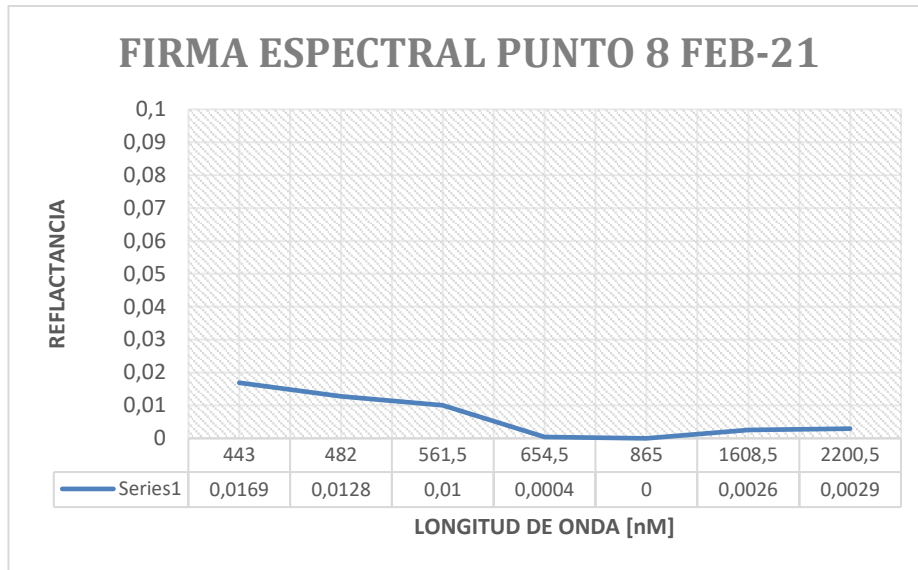
Gráfica 35. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 FEB-21



Gráfica 36. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 FEB-21

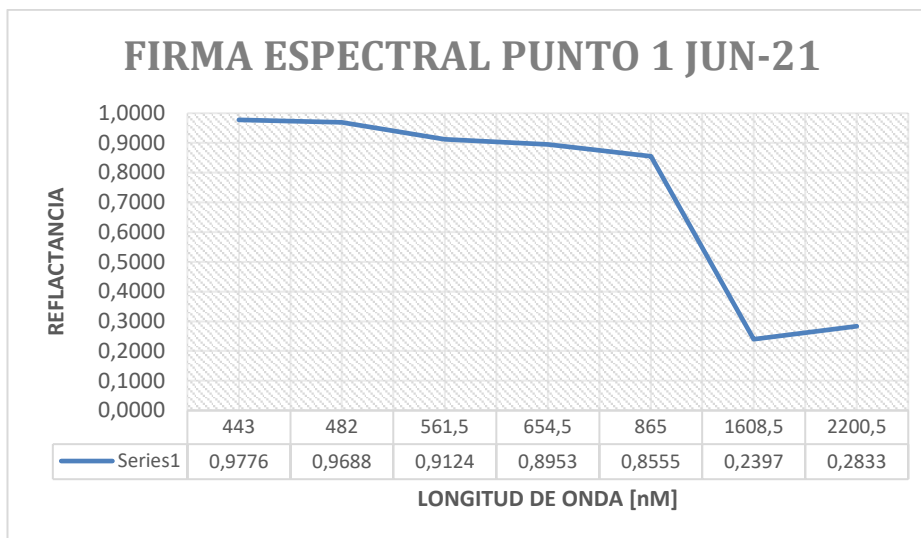
Durante este mes se detectan de nuevo los pigmentos de Luteína, β -caroteno y Neoxantina, característicos de algas pardas y rojas, con la aparición de V+A+Z en el punto 8.

En febrero comienzan a aumentar la temperatura desde los meses fríos a temperaturas estivales, por lo que estos hallazgos pueden tener relación con el comienzo de la proliferación de algas presentes en el Mar Menor, como son *Chaetomorpha linum* y *Laurencia obtusa*.



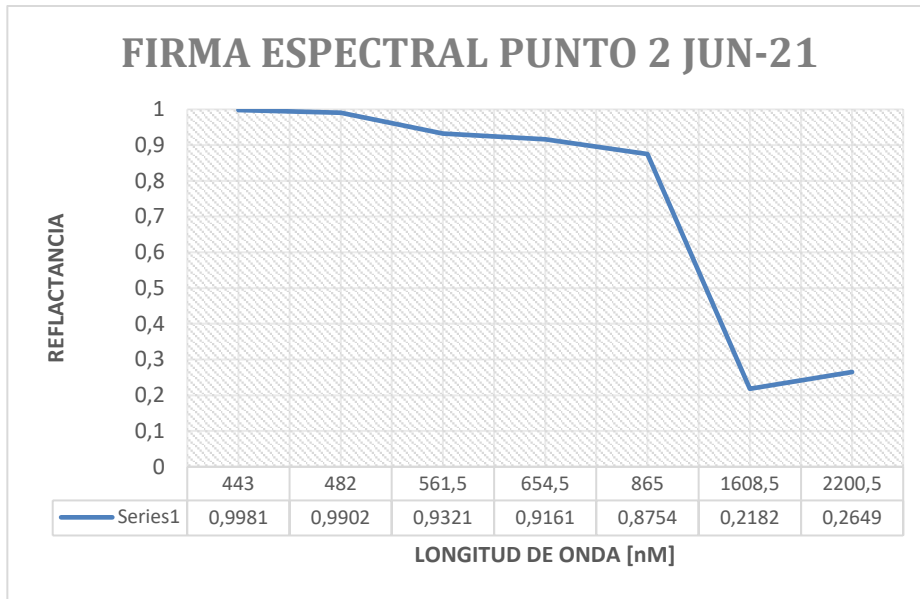
Gráfica 37. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 FEB-21

Adentrados en la época estival del año 2021, en el mes de Junio se detecta la presencia de Luteína en diferentes puntos del estudio, repartidos por la totalidad de la laguna del Mar Menor.



Gráfica 38. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 JUN-21

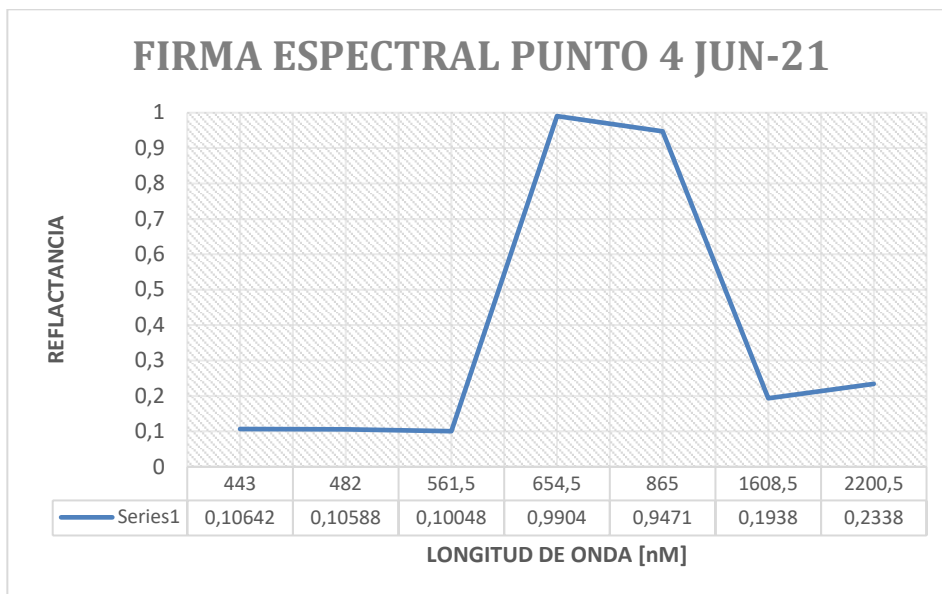
En este mes, con una temperatura media registrada de 26,39 °C, la proliferación de algas es latente. Al igual que ocurría en Septiembre de 2020, las firmas espectrales presentan valores altos en las bandas azul, verde y roja, destacando la presencia de Luteína.



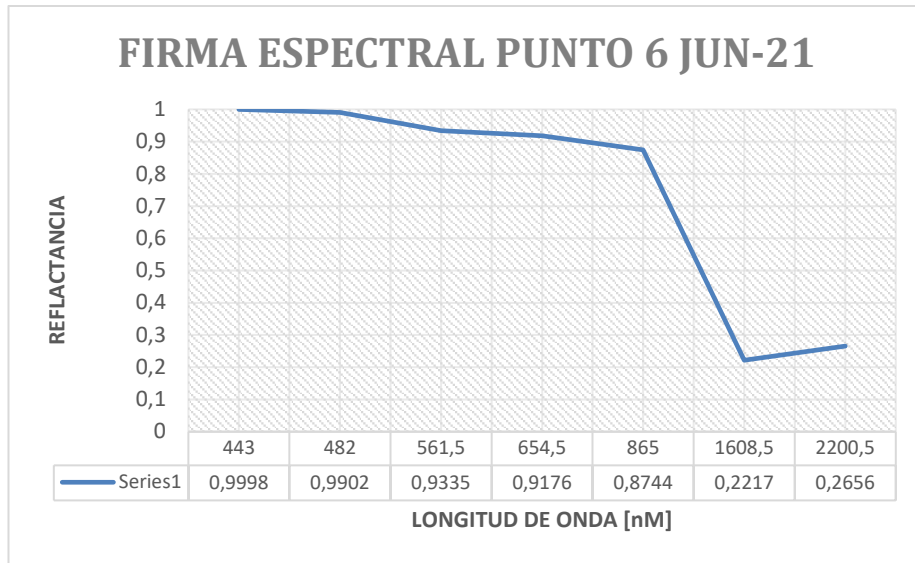
Gráfica 39. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 2 JUN-21

En el punto 4, cercano a la gola de Las Encañizadas, al igual que ocurre en el punto 8, cercano a la gola y canales del Puerto, se pueden observar picos en las bandas roja e infrarroja cercana (NIR), que dan cuenta de un alto índice de clorofila, indicativo de comunidades de algas desarrolladas.

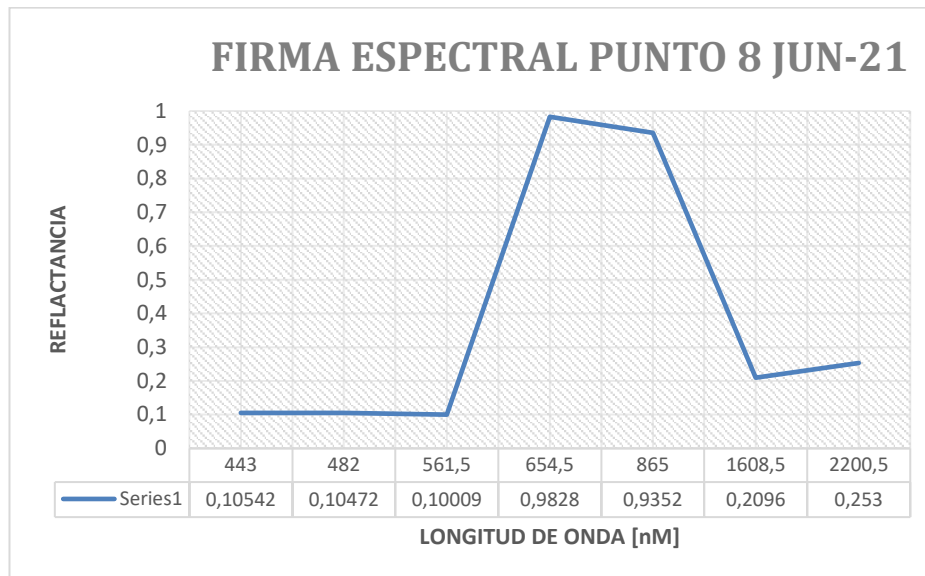
Es llamativa la localización de estos puntos, ya que puede acontecer la entrada en el Mar Menor de algas formadas en las corrientes mediterráneas, que se introducen en la laguna mediante la comunicación existente en la zona.



Gráfica 40. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 JUN-21



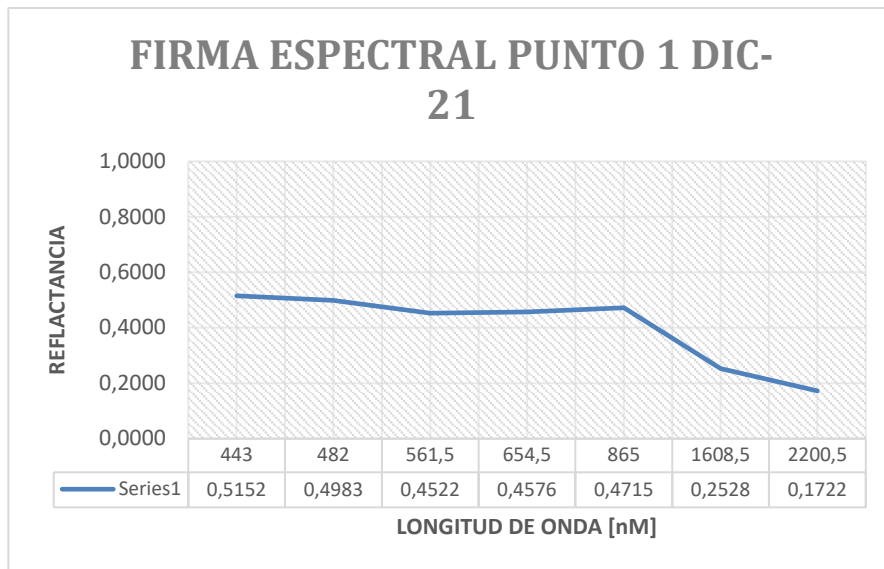
Gráfica 41. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 JUN-21



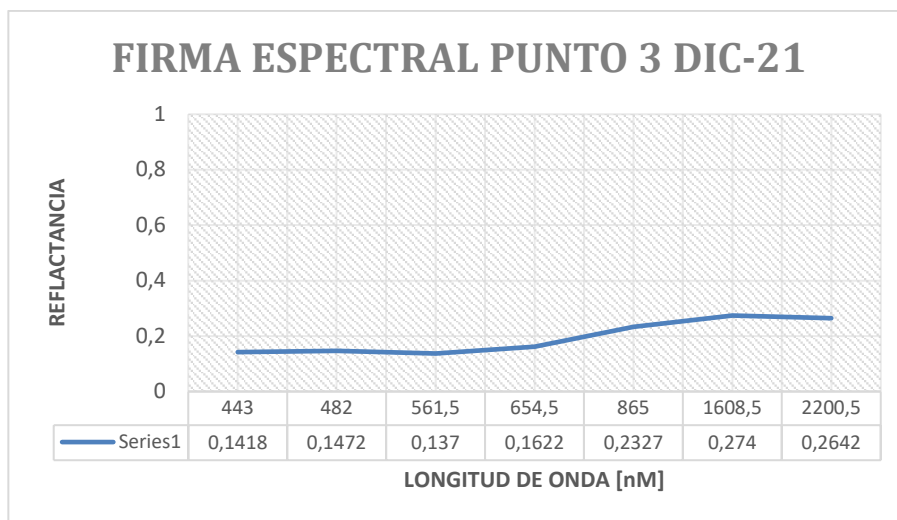
Gráfica 42. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 8 JUN-21

En el mes de diciembre de 2021, se observa la presencia de los pigmentos Luteína, Neoxantina, β -caroteno y V+A+Z. La presencia de todos ellos, unida a la temperatura media de la zona en este mes, 12,02°C, puede indicar la presencia en la laguna de restos procedentes de colonias de algas pardas y rojas, como *Chaetomorpha linum* y *Laurencia obtusa*.

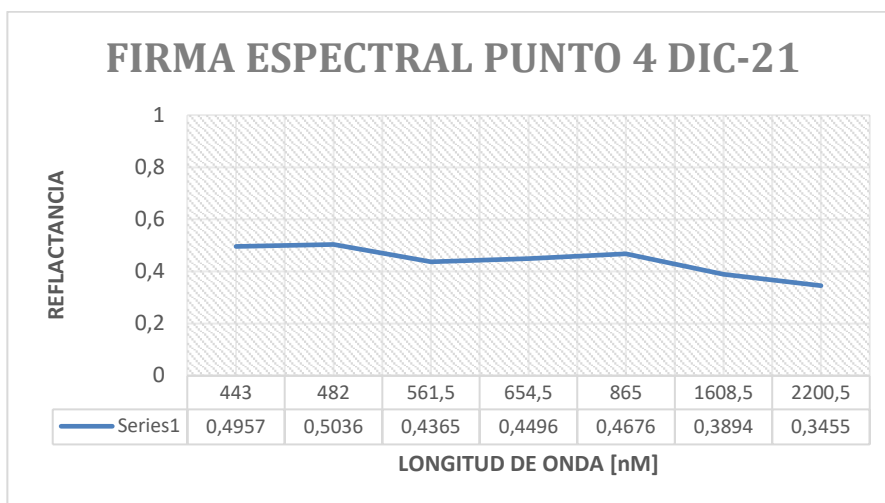
Mientras que en los puntos situados en la zona Norte de la laguna las firmas espectrales presentan rangos en las bandas básicas moderados-bajos, lo que indica poca turbidez en el agua, estos valores aumentan notablemente en el sur de la laguna, indicando un agua más turbia.



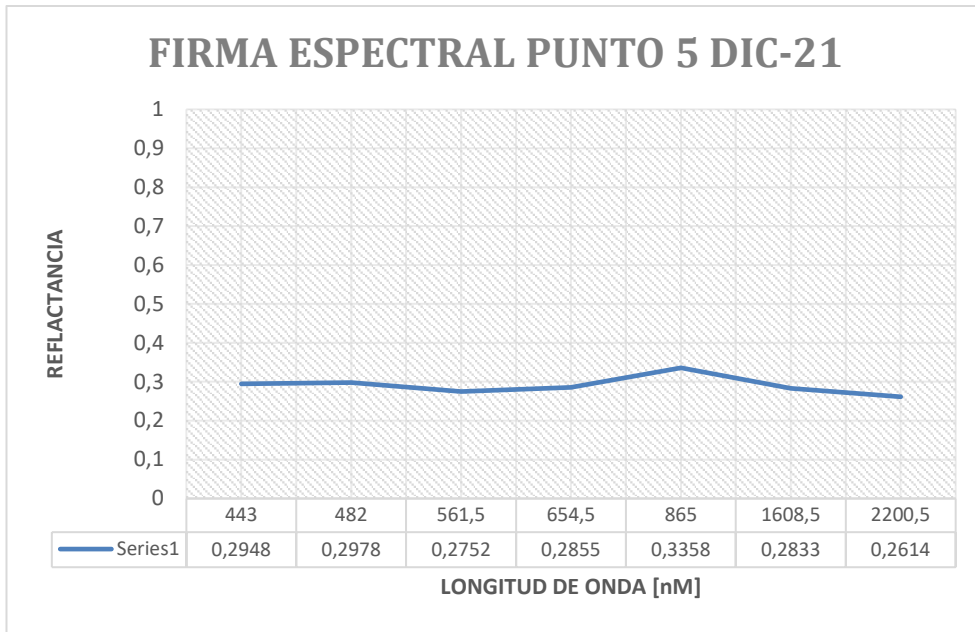
Gráfica 43. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 1 DIC-21



Gráfica 44. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 DIC-21



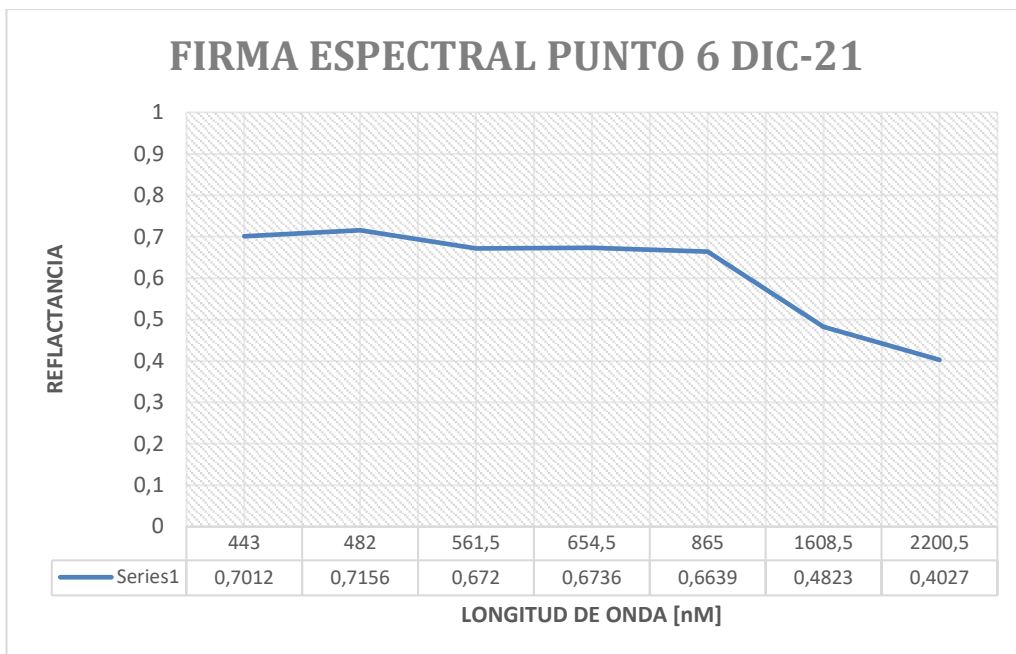
Gráfica 45. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 DIC-21



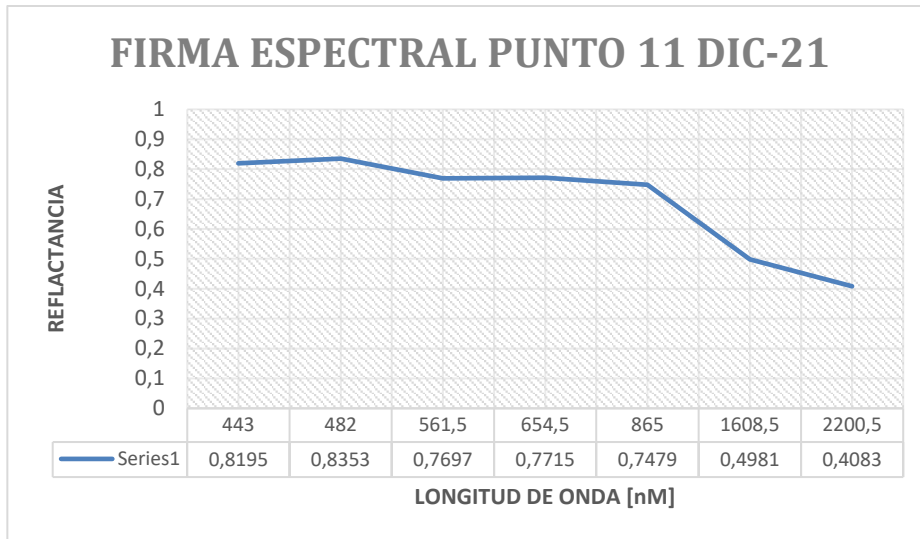
Gráfica 46. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 5 DIC-21

El hecho de que en el sur aumenten los valores de las primeras bandas espectrales, como se decía anteriormente, indica una mayor turbidez del agua, lo que puede ser consecuencia de una mayor concentración de partículas en suspensión.

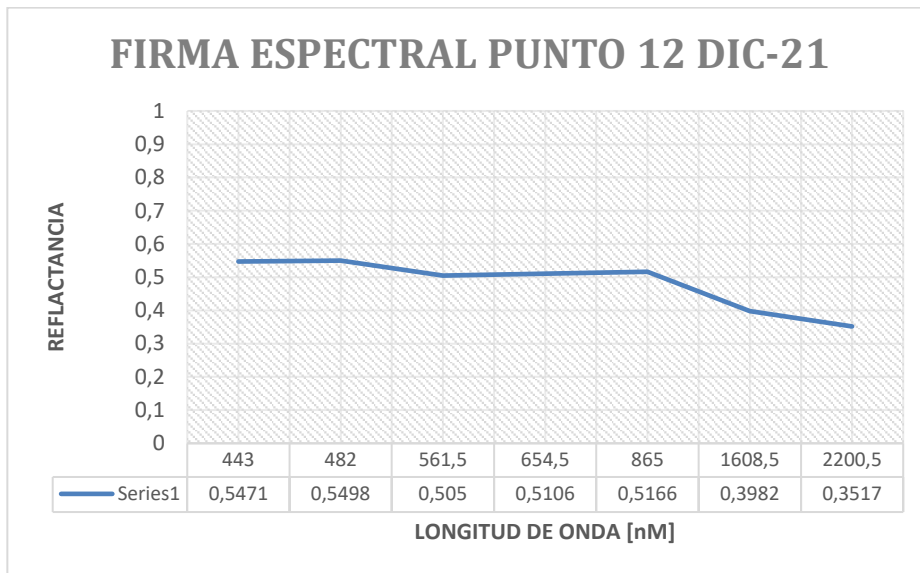
Atendiendo a las corrientes que existen en el mar menor, es posible que esta turbidez se deba al desplazamiento de las partículas a causa de los procesos hidrodinámicos del Mar Menor.



Gráfica 47. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 DIC-21

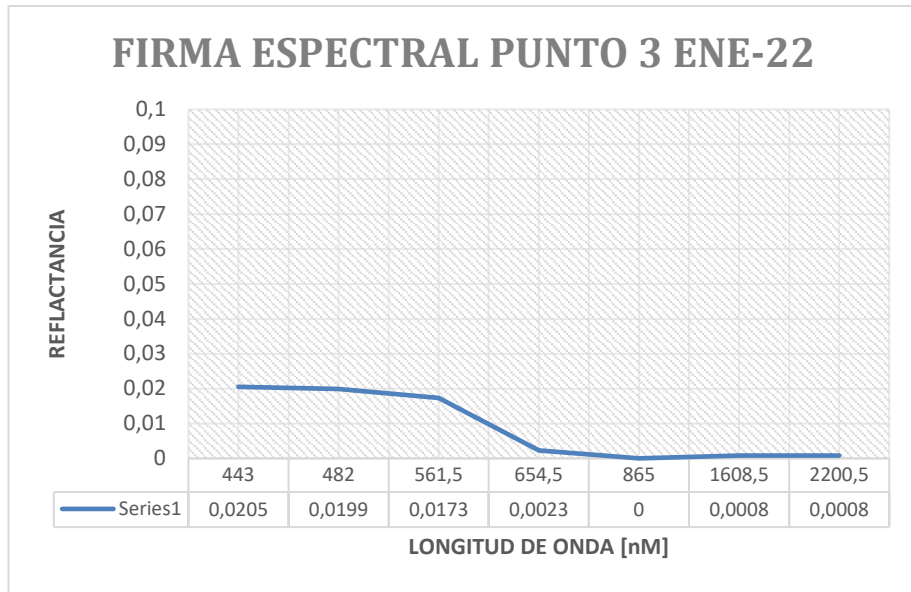


Gráfica 48. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 11 DIC-21

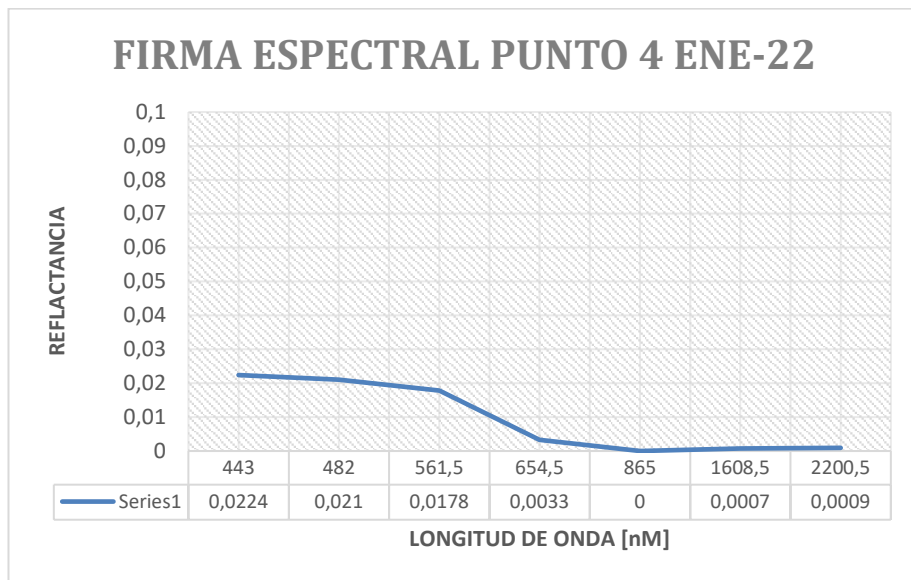


Gráfica 49. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 DIC-21

En el mes de enero de 2022, se comprueba un descenso notable en los valores de las firmas espectrales, que puede deberse a la menor turbidez del agua en el Mar Menor, observándose firmas espectrales propias de agua clara:

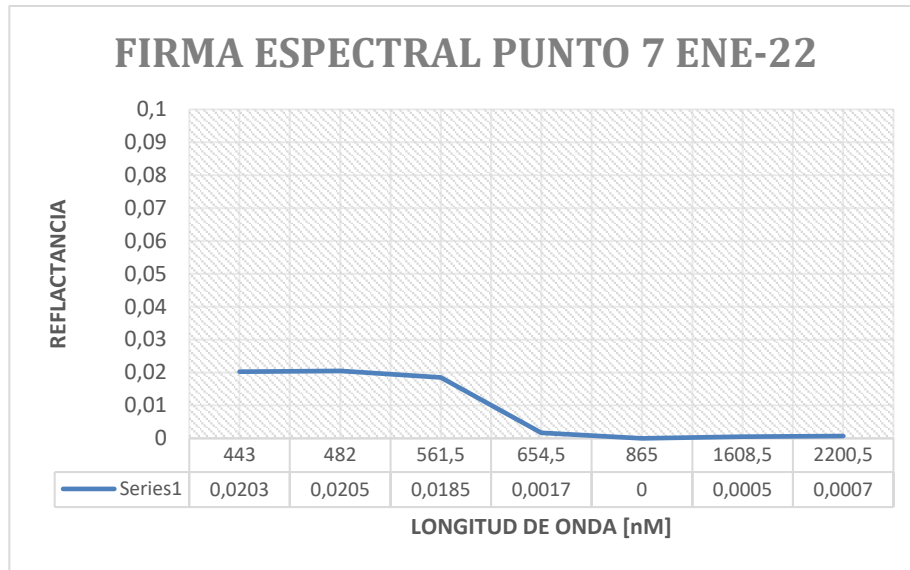


Gráfica 50. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 3 ENE-22

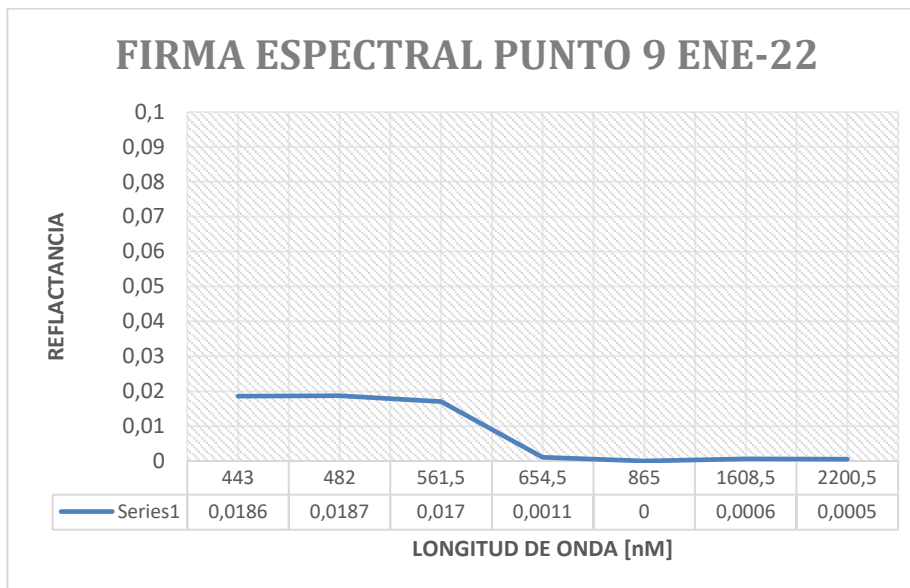


Gráfica 51. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 4 ENE-22

La temperatura media del mes de Enero de 2022 se sitúa en 10,66; temperatura bastante por debajo de la que precisan las especies de algas del Mar Menor para su reproducción. En este sentido, los valores de los pigmentos Luteína, Neoxantina y β -coroteno observados pueden deberse a la acumulación de restos de algas pardas y rojas como la *Chaetomorpha linum* y *Laurencia obtusa*.



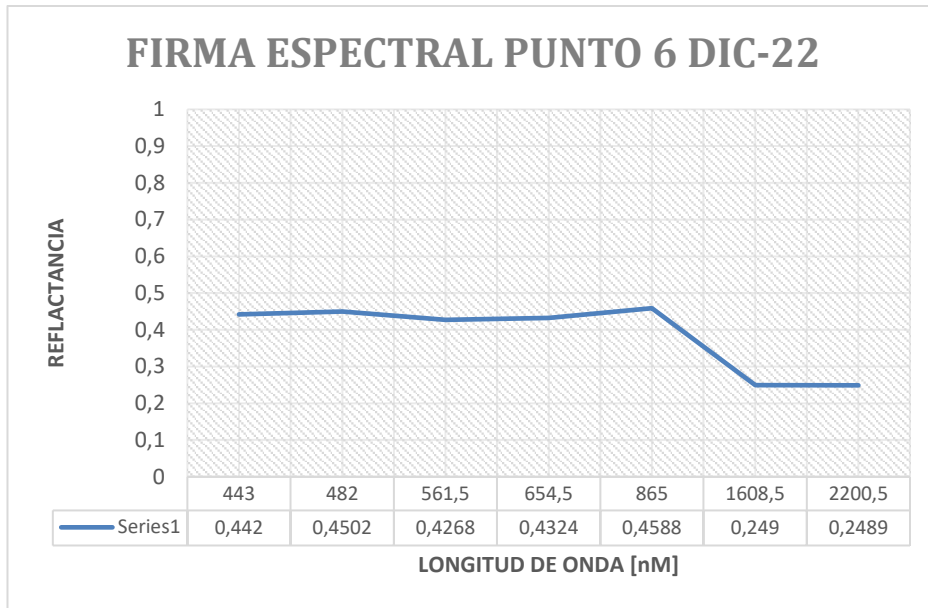
Gráfica 52. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 7 ENE-22



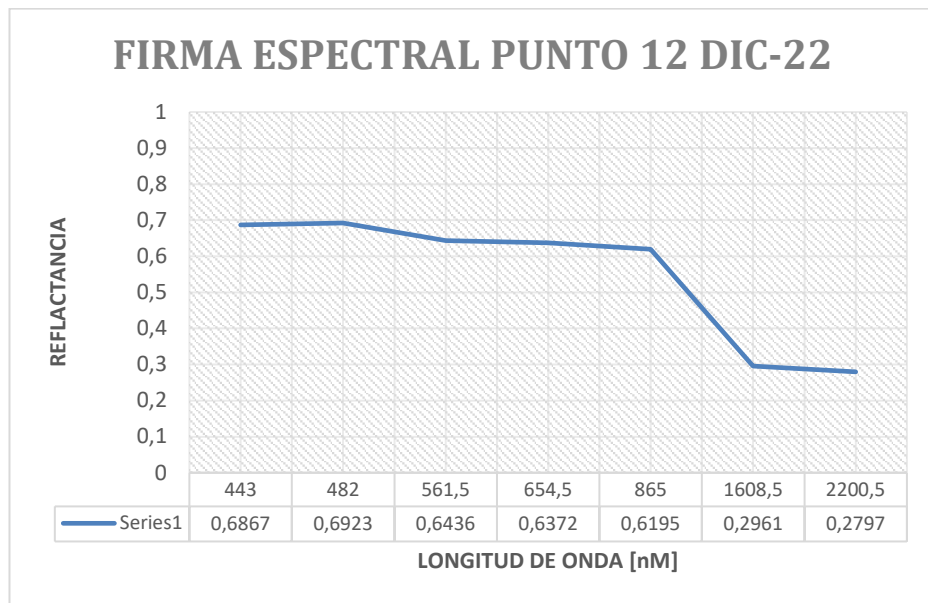
Gráfica 53. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 9 ENE-22

En diciembre de 2022, último mes observado, se observan valores de Luteína, a la vez que las firmas espectrales correspondientes presentan reflectancias moderadas en las primeras bandas.

Esto, unido a la temperatura media registrada en la zona, de 13,52°C, puede suponer al igual que en meses anteriores, la presencia de algas en suspensión procedentes de la descomposición de colonias de algas.

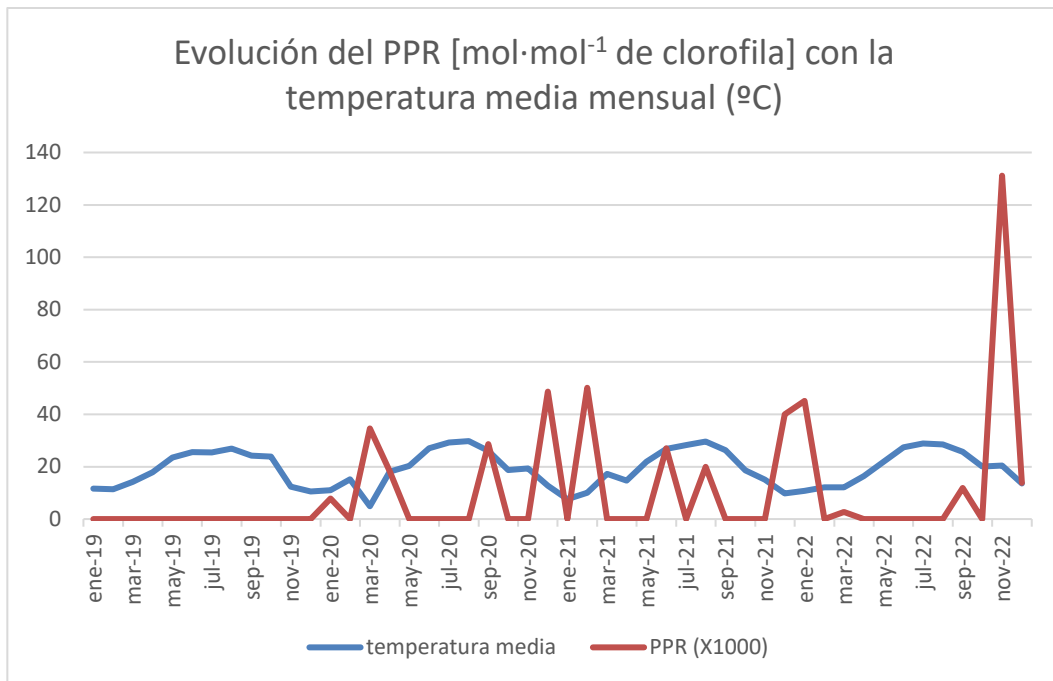


Gráfica 54. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 6 DIC-22



Gráfica 55. FIRMA ESPECTRAL PUNTO 12 DIC-22

Para concluir el análisis y discusión de los resultados obtenidos en este estudio, se muestra a continuación una gráfica en la que se superponen la fluctuación de la temperatura media mensual en la zona, con la variación del índice PPR (Plant Pigment Ratio), con una escala de 1000:1, para una comparación más facilitda.



Gráfica 56. Comparación evolución PPR - Temperatura

Como puede apreciarse, se distinguen en la serie de temperatura los cuatro años del periodo de estudio, identificándose sin lugar a duda los periodos fríos y cálidos. Por otro lado, destaca de la serie del índice PPR los picos más pronunciados que sufre en los meses fríos, notándose otros menores en los periodos cálidos.

Como se ha ido analizando con las firmas espectrales de los diferentes meses, todo parece indicar a la formación de algas en periodos cálidos, obteniéndose los valores más elevados de partículas en suspensión después de estos periodos de crecimiento, cuando las especies de algas mueren y sus restos quedan en suspensión en el agua.

A la luz de los pigmentos observados, en su generalidad se trata de algas pardas y rojas, siendo las especies de estas características más predominantes en la zona la *Chaetomorpha linum* y la *Laurencia obtusa*.

Otro tipo de grupo de algas que presentan estos pigmentos es el Synurophyceae, un alga que generalmente vive en agua dulce, rápida reproducción, vida estacional y con una temperatura ideal similar a las que presenta la laguna. Si bien, no existen evidencias de ninguna especie de este grupo en el Mar Menor.

6 CONCLUSIONES

A modo de conclusión de este estudio:

La teledetección es una herramienta potente y eficaz en el estudio de eventos o fenómenos acontecidos en grandes extensiones de terreno, aportando un análisis evolutivo, seguimientos a lo largo del tiempo, y caracterización de estos, que permite detectar cambios en las zonas de estudio, como en el caso del texto que nos ocupa, la contaminación en la laguna del Mar Menor.

El constante y evolutivo desarrollo de los satélites de observación, que mejoran sus resoluciones y sensores con la capacidad de aportar imágenes detalladas y específicas, implica un necesario avance para los distintos usos que se les pueda dar, cualquiera que sea el campo requerido, mediante el desarrollo de las bandas espectrales, convirtiendo a las imágenes se conviertan en fuentes de información muy valiosas.

En la actualidad, existen imágenes satelitales disponibles en Internet, así como visores web gratuitos que ofrecen una calidad aceptable. Estos recursos son accesibles para cualquier persona y resultan útiles para llevar a cabo estudios. La teledetección, que utiliza estas imágenes, se convierte en una excelente alternativa cuando no se cuenta con los medios o recursos para recopilar datos de campo o utilizar software de pago. Además, los visores web continúan mejorando y añadiendo nuevas funcionalidades para su uso gratuito.

Un primer acercamiento a la caracterización y análisis de evolución de fenómenos como la mancha en el Mar Menor, se puede realizar comparando imágenes de distintas fechas de una misma zona a través de sus valores de índices como el WSMI (Índice de suspensión de materia en el agua), que a partir de las bandas B1 y B3 permite delimitar una superficie y su evolución. Las firmas espectrales toman mucha utilidad al permitir identificar las posibles características de los objetos o superficies detectadas.

En este sentido, las firmas espectrales pueden aportar una información muy específica, tal y como se ha obtenido en este estudio las posibles presencias de especies de algas en el Mar Menor a partir de los pigmentos detectados y el rango del PPR (Ratio de pigmentación de las plantas), índice que combina las bandas B02 y B03 para obtener el ratio de clorofila.

La teledetección ha resultado igualmente de gran utilidad para este estudio al permitir la obtención de la temperatura en la superficie acuática del Mar Menor, lo que otorga datos más precisos, en términos individuales, que los que aportan las estaciones meteorológicas terrestres cercanas. En este aspecto, se comprueba una temperatura propia de clima mediterráneo, sin variaciones significantes a lo largo del periodo de estudio.

En cuanto a la contaminación del Mar Menor, el estudio desvela la presencia periódica de materia orgánica en suspensión, mostrando además la alta posibilidad de que esta se corresponda con algas que, cotejando los resultados con las temperaturas registradas, forman colonias abundantes en las épocas cálidas y mueren en los meses más fríos, pasando a la suspensión en el agua.

Si bien, se han obtenido resultados coherentes con formaciones de las especies *Chaetomorpha linum* y *Laurencia obtusa*, se juzga necesario completar el estudio con datos y análisis de campo, así como estudios físico-químicos de la composición del agua. Todo esto sin restar importancia a las evidencias que aporta la teledetección, como eficaz herramienta de análisis y detección.

Con todo, la presencia explosiva de algas involucra una alta concentración de nutrientes, lo que es digno de juzgarse contaminante, así como su acelerada e intrusiva evolución empeoran la calidad del agua por eutroficación de una laguna que, desde un prisma objetivo, supone uno de los reductos naturales cuya protección es taxativa en nuestro país, por su rica biodiversidad y singularidad en la geografía española.

Por último, se destaca la posibilidad de que un análisis como el aquí desarrollado obtenga resultados más concluyentes, para un periodo de estudio más amplio, y con una obtención de datos más segmentada, en cuanto a áreas y localizaciones puntuales se refiere.

REFERENCIAS

- [2] [1] Pérez-Ruzafa, A., et al. (2017). Unraveling the key drivers of aquatic ecosystem shifts in a heavily humanized Mediterranean coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 557-567.
- [2] «¿Cuántos satélites hay alrededor de la Tierra?,» Sitio web de Curiosfera, Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.curiosfera.com/cuantos-satelites-alrededor-la-tierra/>.
- [3] Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall.
- [4] García-Santos, G., et al. (2020). Development and application of a Water Quality Index for the Mar Menor coastal lagoon (SE Spain) using in situ and satellite data. *Science of the Total Environment*, 707, 136066.
- [5] Sánchez-García, M. J., et al. (2019). Analysis of water temperature and rainfall in the Mar Menor coastal lagoon (SE Spain) through remote sensing and in situ data. *Remote Sensing*, 11(15), 1821
- [6] Martínez-López, F. J., et al. (2018). Development of a new water quality index for the Mar Menor coastal lagoon (SE Spain) based on satellite remote sensing data. *Ecological Indicators*, 95, 484-496.
- [7] González-Ortegón, E., et al. (2013). Environmental constraints in colonization sequence of Mediterranean estuarine environments: the Mar Menor case study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 135, 60-69.
- [8] Marín, A., et al. (2017). *Posidonia oceanica* seagrass meadows as biodiversity and natural heritage hotspots in the Mar Menor coastal lagoon (Murcia, SE Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 59-66.
- [9] Ley 19/2022, de 30 de septiembre, para el reconocimiento de personalidad jurídica a la laguna del Mar Menor y su cuenca.
- [10] Martínez-Méndez, J., Valenzuela, A., & Fennessy, M. S. (2018). Assessing land use/land cover changes in the Mar Menor catchment, SE Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 588.
- [11] Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I. M., & Fernández, N. (2016). Changes in the ichthyofauna of the Mar Menor lagoon (Spain) during the last century: an example of a coastal exploitation model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 120-133.
- [12] Conesa García, C., & Tomás, R. (2017). Sediment sources and transport pathways in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, SE Spain). *Science of the Total Environment*, 579, 1049-1062.
- [13] Jordá, G., Gomis, D., & Álvarez-Fanjul, E. (2016). Storm-induced sea level variability along the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(12), 8857-8873
- [14] Martínez Fernández, J. y Esteve Selma, M.A. 2003. El papel de las aguas subterráneas en la exportación de nutrientes de origen agrícola hacia la laguna del Mar Menor. En J.M. Fornés y M. Ramón Llamas (Eds.)
- [15] Región de Murcia. 2027 “INVERSIÓN TERRITORIAL INTEGRADA (ITI) DEL MAR MENOR”
- [16] Ramírez-Juidías, E., Villavicencio-Valero, K., & Borja, A. (2021). Sedimentation and Proposed Algorithms to Detect the Possible Existence of Vegetation and Humidity in the Landing Area of the Mars Exploration Rover-B (Opportunity). En *Solar System Planets and Exoplanets*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97628>

[17] Haske-Cornelius, O., Vu, T., Schmiedhofer, C., Vielnascher, R., Dielacher, M., Sachs, V., ... & Guebitz, G. M. (2020). Cultivation of heterotrophic algae on enzymatically hydrolyzed municipal food waste. *Algal Research*, 50, 101993.

[18] Estimación de parámetros de calidad del agua del Lago de Maracaibo a partir de imágenes del satélite venezolano Miranda (VRSS-1). - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Espectros-de-reflectividad-del-agua-limpia-y-del-agua-turbia-Bartolucci-et_fig1_311953823 [accessed 18 Jun, 2024]