

# Alerta de explosiones algales en el Embalse San Roque a partir de datos satelitales diarios y mediciones de campo

por Lic. Alba German

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física como parte de los requerimientos para la obtención del grado de Magister en Aplicaciones Espaciales de Respuesta y Alerta Temprana a Emergencias de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Agosto, 2017

©FaMAF - UNC 2017

Directora: Dra. Anabella Ferral

Co-Directora: Dra. Carolina Tauro



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-SinDerivar 2.5 Argentina.



## Pacs

92, 92.40.Kc, 92.20.cd, 92.20.jf, 92,20.ju, 92.20.Ox, 92.40.Bc, 92.40.qc, 92.40.qj, 89.60.Ec, 89.60.k, I.4.1, I.6.4, I.6.5

## Palabras clave

Eutrofización, Embalse San Roque, floraciones algales, series temporales, teledetección, MODIS, clorofila-a.



## Agradecimientos

Expreso mis eternas gratitudes a la mentora de este trabajo la Dra. Anabella Ferral por toda su dedicación, motivación y constantes enseñanzas. Al apoyo incondicional de la Dra. Carolina Tauro, quien con su guía y enseñanzas de modos de trabajo, influyó constantemente en mi formación y resultados de este trabajo. A la Dra. Verónica Andreo por ser mi consejera desde los inicios de mi carrera de Maestría e incondicional amiga además de hermosa persona. También agradezco especialmente a la Ing. Inés Bernasconi por su total predisposición a proveer los datos que hicieron posible este trabajo y su excepcional actitud frente a la dirección del trabajo importante que se realiza en el departamento de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

También al Instituto Gulich y todos los que forman parte de él por su constante actitud de enseñar y de compartir el conocimiento sin recelos, especialmente al Dr. Marcelo Scavuzzo que fue el guía de todos nosotros en este camino que iniciamos con la Maestría.

Especialmente quiero agradecer a mi familia por apoyarme siempre y alentarme a crecer profesional y espiritualmente. A mis amigos de toda la vida que siempre están y me entienden a pesar de todo. Gracias.



## Resumen

La eutrofización es un fenómeno que afecta a muchos cuerpos de agua en todo el mundo. En casos severos, la eutrofización puede llevar a grandes floraciones de algas. El Embalse San Roque, ubicado en la provincia de Córdoba, Argentina, no es ajeno a este proceso y en los últimos años se ha observado un incremento en las concentraciones anuales máximas de algas como consecuencia de eventos de floración. Frente a esto, el monitoreo de la calidad de su agua es clave ya que es la fuente de abastecimiento más importante de la ciudad de Córdoba. La teledetección es una herramienta fundamental para complementar los monitoreos in situ tradicionales y comprender los procesos que ocurren en el Embalse. En este trabajo de tesis se generó un algoritmo semi-empírico obtenido a partir de datos satelitales del sensor MODIS y de mediciones in situ realizadas por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba. A partir de este modelo se obtuvo una serie temporal de concentración de Clorofila-a entre los años 2001 y 2014. Del análisis de dicha serie se puede concluir que el estado del agua del Embalse ha empeorado en los últimos 5 años (2010-2014), respecto de los primeros cinco de la serie (2001-2005). Además, se desarrolla un método de detección de floraciones algales a partir de la serie temporal de concentración de Clorofila-a (Cl-a) entre los años 2001 y 2014. A partir de la detección de las fechas de eventos de floración y caracterización de las mismas, es posible definir el rango de valores de Cl-a en los que el Embalse San Roque está en evento de floración así como su estacionalidad, lo que permite generar una alerta cuando el cuerpo de agua se encuentra en estado de floración algal, fenómeno que puede afectar la salud humana.

## **Abstract**

Eutrophication is a phenomenon that affects many water bodies around the world. In severe cases, eutrophication can lead to large algae blooms. San Roque Dam, located in the province of Cordoba, Argentina, is also subject to this process and in recent years there has been a disproportionate increase in algae concentration due to bloom events. In this context, monitoring the quality of water is crucial because it is the most important source of water supply for Cordoba city. Remote sensing is a fundamental complement to traditional in situ monitoring and aids to understand the processes occurring in the dam. In this thesis a semi-empirical algorithm was obtained from MODIS data and in situ chlorophyll-a measurements, provided by the Ministry of Water Resources of Cordoba Province. From this model, a daily time chlorophyll-a time series was obtained from 2001 to 2014. Statistical analysis of the series indicate that water quality of the reservoir has worsened when comparing sets of last (2014-2010) and first (2010-2014) five years. Also a method to detect algae blooms was developed based on a time series of chlorophyll-a (Chl-a) concentration in the period 2001-2014. By detecting algae bloom dates and their statistic characterization, it is possible to define the range of Chl-a values in which the San Roque Dam is going through a bloom event and its seasonality, which allows generating an alert when the dam is in bloom event, which can be a problem to human health.



# Índice general

|  |            |
|--|------------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>   |
| 1.1. Hipótesis . . . . .   | 3          |
| 1.2. Objetivos Específicos . . . . .   | 4          |
| <b>2. Marco teórico</b>  | <b>5</b>   |
| 2.1. Conceptos y Definiciones . . . . .  | 5          |
| 2.2. Área de Estudio . . . . .   | 12         |
| <b>3. Análisis Descriptivo de los Datos Utilizados</b>   | <b>18</b>  |
| 3.1. Datos medidos <i>in situ</i> . . . . .  | 18         |
| 3.2. Datos de origen satelital: sensor MODIS . . . . .   | 27         |
| <b>4. Modelado Semiempírico de Temperatura y Clorofila-a a partir de datos Satelitales y Mediciones <i>in situ</i></b> | <b>38</b>  |
| 4.1. Temperatura . . . . .   | 39         |
| 4.2. Clorofila-a . . . . .   | 43         |
| <b>5. Generación y análisis de las series temporales de Cl-a y Temperatura</b>   | <b>49</b>  |
| 5.1. Serie temporal de Cl-a . . . . .  | 49         |
| 5.1.1. Análisis de Fourier . . . . .   | 58         |
| 5.2. Serie Temporal de Temperatura . . . . .   | 63         |
| <b>6. Detección y caracterización de las floraciones algales</b>   | <b>67</b>  |
| 6.1. Métodos de identificación de floraciones . . . . .  | 67         |
| <b>7. Conclusiones y Perspectivas Futuras</b>  | <b>101</b> |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Localización del área de estudio . . . . .   | 13 |
| 2.2. Fotografías de eventos de floraciones algales en el Embalse San Roque, con efectos de mortandad de peces. . . . .                              | 15 |
| 2.3. Distribución porcentual de grupos de algas a nivel subsuperficial en el área de toma durante el periodo de estudio. Extraída de [36] . . . . . | 16 |
| 3.1. Embalse San Roque. Localización de los puntos de monitoreo y del píxel MODIS utilizado.  | 20 |
| 3.2. Cantidad de muestreos por mes del año, para la totalidad de los datos del monitoreo <i>in situ</i> .   | 21 |
| 3.3. Datos de Cl-a medida <i>in situ</i> para todas las fechas de monitoreo utilizadas. . . . .   | 22 |
| 3.4. Gráficos de caja por año para todos los datos de monitoreo utilizados. . . . .   | 23 |
| 3.5. Medias Anuales de la Clorofila-a medida <i>in situ</i> . . . . .   | 23 |
| 3.6. Gráficos de caja estacionales para la Cl-a <i>in situ</i> . . . . .  | 24 |
| 3.7. Gráfico de torta que representa el porcentaje de los datos que clasifican en cada estado trófico según Carlson [14]. . . . .                   | 24 |
| 3.8. Valores de Temperatura superficial del agua medida <i>in situ</i> . . . . .  | 25 |
| 3.9. Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de Temperatura superficial del agua medida <i>in situ</i> por año. . . . .     | 25 |
| 3.10. Medias anuales de la temperatura superficial del agua medida <i>in situ</i> . . . . .   | 26 |
| 3.11. Gráficos de caja que representan la distribución de los datos de temperatura por estación del año. . . . .                                    | 26 |
| 3.12. Gráfico de correlación entre el logaritmo en base 10 de cl-a con temperatura superficial medidas <i>in situ</i> . . . . .                     | 27 |
| 3.13. Especificaciones técnicas de los satélites Aqua y Terra. . . . .  | 28 |
| 3.14. Especificaciones técnicas del Sensor MODIS. . . . .   | 29 |
| 3.15. Especificaciones técnicas de los productos de reflectancia de la superficie de la tierra del Sensor MODIS. . . . .                            | 30 |

|  |    |
|--|----|
| 3.16. Especificaciones técnicas de los productos de emisividad y temperatura de la superficie de la Tierra del Sensor MODIS. . . . .   | 31 |
| 3.17. Especificaciones técnicas del producto MODIS MOD09GQ. . . . .  | 32 |
| 3.18. Descripción de los componentes atmosféricos que afectan la señal del sensor remoto en el rango espectral de estudio [55]. . . . .  | 33 |
| 3.19. Diagrama de flujo del proceso de corrección atmosférica. Los tiempos que aparecen están dados para un procesador de 195 Mflops [55]. . . . .   | 34 |
| 3.20. Datos MODIS de entrada al algoritmo MODIS LST para el producto MOD11_L2 [59]. . .  | 36 |
| 3.21. Distribucion de datos faltantes por meses para todo el período de tiempo analizado. . .  | 37 |
|  |    |
| 4.1. Primer resultado del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos <i>in situ</i> de temperatura. . . . .  | 39 |
| 4.2. Gráficos de diagnóstico del primer resultado del modelo. . . . .  | 40 |
| 4.3. Segundo resultado del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos <i>in situ</i> de temperatura. . . . .   | 41 |
| 4.4. Gráficos de diagnóstico del segundo resultado del modelo. . . . .   | 41 |
| 4.5. Resultado final del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos medidos <i>in situ</i> de temperatura. . . . .   | 42 |
| 4.6. Resultados obtenidos para la muestra aleatoria del 15% del conjunto de los datos. Temperatura modelada (°C) comparada con temperatura medida <i>in situ</i> (°C). NA representa datos faltantes. . . . .                                | 42 |
| 4.7. Modelo lineal para los valores de la muestra control. . . . .   | 43 |
| 4.8. Correlaciones de Pearson entre las bandas de los productos MODIS MOD09GQ y MOD09GA y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01. . . . .                   | 44 |
| 4.9. Correlaciones de Pearson entre los logaritmos de las bandas de los productos MODIS MOD09GQ y MOD09GA y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01. . . . . | 44 |
| 4.10. Correlaciones de Pearson entre los índices y razones de las bandas 1 y 2 del producto MODIS MOD09GQ y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01. . . . . | 44 |
| 4.11. MODIS Floating Algae Index (FAI)[65] . . . . .   | 45 |
| 4.12. Modelo de dos bandas [66] . . . . .  | 45 |
| 4.13. Primer resultado del modelo semiempírico encontrado con mejor ajuste para los datos satelitales y los datos medidos <i>in situ</i> de Cl-a. . . . .  | 46 |
| 4.14. Diagnóstico del modelo. . . . .  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 4.15. Segundo resultado del modelo semiempírico encontrado con mejor ajuste para los datos satelitales y los datos medidos <i>in situ</i> de Cl-a. . . . .  | 47 |
| 4.16. Diagnóstico del modelo. . . . .   | 47 |
| 4.17. Resultado final del modelado semiempírico elegido para los datos satelitales y los datos medidos <i>in situ</i> de Cl-a. . . . .  | 48 |
| 5.1. Serie temporal 2001-2014 del logaritmo en base 10 de la clorofila satelital ( $\mu\text{g/L}$ ) en el pixel central del Embalse . . . . .  | 50 |
| 5.2. Serie temporal 2001-2014 de la concentración de clorofila satelital ( $\mu\text{g/L}$ ) en el pixel central del Embalse . . . . .  | 51 |
| 5.3. Distribución de las observaciones de la concentración de Clorofila Satelital . . . . .   | 52 |
| 5.4. Distribución de las observaciones del Logaritmo en base 10 de Clorofila Satelital . . . . .  | 52 |
| 5.5. Gráficos de caja que representan la distribución y mediana de los valores para toda la serie de Cl-a ( $\mu\text{g/L}$ ) por estación del año. . . . .   | 53 |
| 5.6. Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de la concentración de Cl-a ( $\mu\text{g/L}$ ) para cada año de la serie . . . . .  | 54 |
| 5.7. Medias Anuales para la Serie de Clorofila Satelital . . . . .  | 55 |
| 5.8. Diferencia entre los primeros 5 años de la serie y los últimos 5. . . . .  | 55 |
| 5.9. Porcentaje de niveles de eutrofización según el índice de Carlson [14] para toda la serie 2001-2014 . . . . .  | 56 |
| 5.10. Porcentaje del estado trófico del embalse según el Índice de Carlson [14] por año para toda la serie . . . . .  | 57 |
| 5.11. Comparación de los datos de Cl-a medidos <i>in situ</i> y satelitalmente. . . . .   | 58 |
| 5.12. Comparación de las proporciones del estado trófico del embalse según el Índice de Carlson para el total de las mediciones <i>in situ</i> y para las mediciones satelitales diarias desde 2008 a 2014. . . . . | 58 |
| 5.13. Interpolación lineal del año 2001, serie diaria de Concentración de Clorofila original e interpolada . . . . .  | 59 |
| 5.14. Interpolación cúbica del año 2001, serie diaria de concentración de Clorofila original e interpolada . . . . .  | 60 |
| 5.15. Interpolación DINEOF del año 2001, serie diaria de concentración de Clorofila original e interpolada . . . . .  | 60 |
| 5.16. Análisis de Fourier de la serie diaria del logaritmo de la clorofila . . . . .  | 61 |
| 5.17. Análisis de Fourier de la serie promedio cada 8 días del logaritmo de la clorofila. . . . .   | 62 |
| 5.18. Resultado del Análisis de Fourier para la serie promediada cada 8 días. . . . .   | 62 |
| 5.19. Serie Temporal 2001-2014 de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse . . . . .  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| 5.20. Histograma de la distribución de la Temperatura Satelital para toda la serie. . . . .  | 63 |
| 5.21. Gráficos de caja de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse por época del año. . . . .  | 64 |
| 5.22. Gráficos de caja de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse por año. . . . .  | 64 |
| 5.23. Comparación de los datos de tempertura satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5. . . . .  | 65 |
| 5.24. Comparación de los datos de tempertura y Cl-a satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5 en épocas de primavera - verano. . . . .   | 65 |
| 5.25. Comparación de los datos de tempertura y Cl-a satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5 en épocas de otoño - invierno. . . . .   | 66 |
| 6.1. Fechas de concentraciones de clorofila-a máximas por año. . . . .   | 68 |
| 6.2. Inicio de Floración Anual identificada con el método de Umbrales propuesta en [77] . . . . .  | 69 |
| 6.3. Resultados de la identificación de floraciones anuales con el método de umbral propuesto en [77]. . . . .   | 70 |
| 6.4. Resultados de las identificaciones logradas con el método de Suma Acumulada para el año 2001 . . . . .  | 71 |
| 6.5. Resultados de las identificaciones logradas con el método de Suma Acumulada para el año 2002 . . . . .  | 71 |
| 6.6. Umbral fijo obtenido a partir del cálculo de la mediana más el 5%. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . . . .                                     | 73 |
| 6.7. Cantidad de floraciones por año identificados con el método de la mediana más el 5%. . . . .  | 74 |
| 6.8. Porcentaje de Floraciones por Epoca del año identificadas en toda la serie con el método de la Mediana más 5%. . . . .  | 74 |
| 6.9. Umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . . . .                                    | 76 |
| 6.10. Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). . . . .   | 77 |
| 6.11. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). . . . .  | 77 |
| 6.12. Umbral fijo definido a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ). La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . . . . | 78 |
| 6.13. Cantidad de floraciones por año identificadas a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ). . . . .   | 79 |
| 6.14. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ). . . . .  | 79 |

|  |    |
|--|----|
| 6.15. Floraciones identificadas con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson (56 mg/m <sup>3</sup> ). Los puntos rojos representan las fechas identificadas. . . . .              | 81 |
| 6.16. Cantidad de floraciones por año identificadas con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson (56 mg/m <sup>3</sup> ). . . . .   | 82 |
| 6.17. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson (56 mg/m <sup>3</sup> ). . . . .                    | 82 |
| 6.18. Floraciones identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación (56 mg/m <sup>3</sup> ). Los puntos rojos representan las fechas identificadas. . . . . | 84 |
| 6.19. Cantidad de floraciones por año identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación (56 mg/m <sup>3</sup> ). . . . .                                    | 85 |
| 6.20. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación (56 mg/m <sup>3</sup> ). . . . .                        | 85 |
| 6.21. Serie modelada con HANTS (verde) sobre la serie promediada cada 8 días. . . . .  | 88 |
| 6.22. Serie modelada con Hants (Fucsia) realizada desde 2001 a 2009 y desde 2010 a 2014 sobre serie diaria original. . . . .   | 89 |
| 6.23. Ejemplo de generación de un umbral a partir de la serie modelada. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones para la serie diaria. .  | 90 |
| 6.24. Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . .  | 91 |
| 6.25. Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75. . . . .  | 92 |
| 6.26. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75. . . . .   | 92 |
| 6.27. Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . .   | 93 |
| 6.28. Cantidad de floraciones por año Identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9. . . . .   | 94 |
| 6.29. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9. . . . .  | 94 |
| 6.30. Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones. . .  | 95 |
| 6.31. Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99. . . . .  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.32. Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probablidad 0.99. . . . . | 96  |
| 6.33. Comparación de los valores de fechas de floración divididas en Verano-Primavera y Otoño-Invierno. . . . .   | 97  |
| 6.34. Histograma de los valores de fechas identificadas como floraciones. . . . .   | 98  |
| 6.35. Histograma de los valores de clorofila-a en toda la serie sin las fechas identificadas como floraciones. . . . .  | 98  |
| 6.36. Comparación de los valores de la serie para Verano - Primavera sin las fechas de floración, con las fechas de floración en esa época del año. . . . .                   | 99  |
| 6.37. Comparación de los valores de la serie para Otoño - Invierno sin las fechas de floración, con las fechas de floración en esa época del año. . . . .                     | 100 |

# Capítulo 1

## Introducción

La eutrofización es el proceso por el cual la producción primaria aumenta, ya que se ve potenciada por un mayor aporte de materia orgánica y nutrientes a un ecosistema. Este enriquecimiento de las aguas con nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, si se produce a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, la descomposición del exceso de materia orgánica genera una disminución del oxígeno disuelto, que puede producir efectos tales como la mortandad de peces. Las masas de agua eutrofizadas tienen un alto nivel de productividad y de biomasa en todos los niveles tróficos. Es así, que los procesos de eutrofización producen cambios cuantitativos y cualitativos en la comunidad del fitoplancton. En casos severos, este proceso puede llevar a grandes floraciones algales, que son el resultado de un rápido aumento de la población de algas en un sistema acuático. Pueden ocurrir tanto en sistemas de agua dulce, como en ambientes marinos y dependen de las condiciones de temperatura, luz y nutrientes [1]. En sistemas altamente eutrofizados, además de aumentar la frecuencia y densidad de las floraciones, se produce un cambio en la composición del fitoplancton. Generalmente, se genera un desplazamiento de las diatomeas, clorofíceas o crisofíceas y las cianobacterias aumentan [2]. Estas últimas son de especial interés ya que una gran proporción de ellas son capaces de producir una o más toxinas potentes. Las cianotoxinas son un grupo diverso de toxinas naturales, que tienen mecanismos específicos en los vertebrados. Algunas son fuertes neurotóxicos (anatoxin-a, anatoxin-a(s), saxitoxins) o hepatotóxicas (microcystins, nodularin, cylindrospermopsin), mientras que otras pueden causar impedimentos de salud, tales como gastroenteritis. Si el agua contiene altas concentraciones de cianobacterias tóxicas o si sus toxinas son ingeridas en agua de bebida o accidentalmente durante la recreación, ellas presentan un riesgo a la salud humana [3]. La preocupación sobre los efectos de las cianobacterias en la salud humana ha crecido en muchos países en los últimos años. Aunque la eutrofización ha sido reconocida como un fenómeno de preocupación creciente desde 1950, solo recientemente las toxinas producidas por las cianobacterias han sido ampliamente reconocidas como un problema para la salud humana derivada como una consecuencia de la eutrofización [4]. Además, las cianobacterias contribuyen a problemas estéticos y prácticos, ya que perjudican el uso recreacional de los cuerpos de agua, dado que producen olores desagradables y espumas superficiales, además de afectar el gusto del agua potable tratada [5].

Específicamente, este es el caso del Embalse San Roque con su baricentro superficial con coordenadas  $31^{\circ} 22' 56''$  S,  $64^{\circ} 27' 56''$  O, situado aproximadamente a 600 msnm en

el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía (provincia de Córdoba, Argentina). Este embalse constituye la fuente de abastecimiento de agua más importante de la ciudad de Córdoba y presenta condiciones de eutrofización que conducen a un desarrollo periódico y masivo de cianobacterias. El fitoplancton del Embalse San Roque viene sufriendo, desde hace varios años, distintas modificaciones en su composición debidas a causas de origen antrópico, principalmente el vertido de nutrientes orgánicos provenientes de líquidos cloacales sin tratar. Además, se suma la ocurrencia de incendios y crecidas de los cursos de agua que provocan un aporte de fósforo y nitrógeno al Embalse [6]. Esta situación genera problemas en la salud pública de la población que utiliza el embalse para recreación y genera muchos problemas a la hora de realizar el tratamiento del agua para acondicionarla para bebida.

Por esto es que los cuerpos de agua son continuamente monitoreados y controlados. Las floraciones algales son generalmente monitoreadas con medición de biomasa *in situ*, examinando las especies presentes. Una medida ampliamente usada es la concentración de clorofila-a [7], cuyos valores pico para un lago oligotrófico son de alrededor de 1 a 10  $\mu\text{g}/\text{l}$ , mientras que en un lago eutrófico puede alcanzar 300  $\mu\text{g}/\text{l}$ . El Dique San Roque presenta valores de Cl-a que en ocasiones pueden llegar a números cercanos a 1000  $\mu\text{g}/\text{l}$

Es sabido que las frecuencias temporales y espaciales de los programas de muestreo de agua convencionales no son adecuados para reportar cambios en la biomasa del fitoplancton [8], especialmente durante condiciones de floración, donde la variabilidad espacial y temporal en la densidad del fitoplancton es particularmente alta. Inclusive, el monitoreo confiable de cianobacterias es aún más complicado, ya que por su naturaleza son capaces de regular su flotabilidad, por lo que se localizan en la capa superficial del agua en vez de estar uniformemente mezcladas en la columna [9] [10]. Por esta razón, el sensado remoto es una muy buena herramienta para monitorear estas algas particularmente. El sensado remoto involucra medir alguna propiedad de un objeto de interés desde la distancia, desde un sensor a bordo de un satélite, por ejemplo. Esto nos permite extrapolar una característica de un área particular relevada por mediciones locales *in situ* a una escala más grande, en menor tiempo y costo.

Particularmente, debido a que las algas poseen pigmentos relacionados a la fotosíntesis, como la clorofila que alteran las características ópticas del agua, con sensores remotos es posible estimar concentración y distribución de cianobacterias a través de la medición de concentración de clorofila-a. La acumulación de agregados de células de cianobacterias apenas debajo de la superficie del agua son tan distintivas, que la extensión de una floración puede ser mapeada usando diversos instrumentos de sensado remoto [11].

Específicamente, el sensor MODIS ( Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, puestos en órbita en el año 1999 y 2002 respectivamente, muestra mucho potencial para monitorear calidad de agua ya sea continental u oceánica. Estos dos satélites proveen información diaria y disponible de forma libre y abierta. MODIS está equipado con varias bandas de reflectancia de la superficie de la tierra de resolución media y además genera productos en distintas resoluciones espaciales. Estos últimos son productos de suelo, productos de índices de vegetación y productos de Albedo. En esta tesis estamos particularmente interesados en el producto MOD09GQ - MODIS Reflectancia de Superficie Diaria L2G Global de 250 metros de resolución espacial, que contiene dos bandas de información espectral que se centran entre los 645 nm y los 858 nm. Además, incluye tres bandas adicionales de información sobre la calidad de la

banda, la órbita y cobertura y el número de observaciones. La información provista por este sensor es de mucho interés, ya que provee datos diarios y gratuitos, que permiten realizar un monitoreo constante. Otro sensor que fue diseñado para continuar la misión MODIS, es el sensor VIRSS a bordo del satélite Suomi NPP. Lanzado exitosamente en Octubre de 2011 provee datos similares al anterior, en especial un producto de reflectancia superficial con bandas en el rango del espectro electromagnético análogas a las utilizadas en este trabajo, con resolución de 375 metros [12]. También tiene paso diario, lo que genera información que permite el mismo tipo de monitoreo planteado en este trabajo para cuando la misión MODIS llegue al fin del ciclo de vida. Para el caso de las floraciones algales, estos dos sensores cumplen un papel muy importante, ya que el fenómeno de estudio es de explosión muy rápida y para detectar su aparición es esencial contar con una resolución temporal alta. Generar sistemas de alerta para estos eventos, es fundamental para el monitoreo de la calidad del agua y sus consecuencias en la salud de la sociedad. Estos datos satelitales diarios facilitan la elaboración de modelos predictivos que puedan utilizarse para entender la temporalidad de las floraciones.

En este trabajo, se realizó un estudio de la utilidad de la combinación de datos de origen satelital con datos tomados *in situ* para monitorear la calidad de agua del Embalse San Roque y las floraciones algales que sufre el cuerpo de agua. Para ello, se integraron ambos conjuntos de datos a través de matrices de correlación y se generó un algoritmo para estimar concentración de Cl-a en el agua del embalse a partir de datos MODIS. Luego, se estudió el comportamiento de esta variable en el tiempo a través de una serie temporal de 2001 a 2014. Finalmente, se generó un método para identificar las fechas durante las cuales el embalse se encuentra en estado de floración y se caracterizaron específicamente para este cuerpo de agua. También se analizó la variable temperatura del agua con la misma metodología que la Cl-a, para caracterizar cómo había influido la primera en el comportamiento de la segunda. El contenido de la tesis se organizó de la siguiente manera: en este capítulo se presenta la problemática, antecedentes y objetivos. En el capítulo dos, se resumen los conceptos más importantes relacionados al fenómeno de eutrofización y floraciones algales, como así también los principios físicos de la teledetección aplicada a estudios de calidad de agua, además de caracterizar las series temporales. En la segunda parte de este capítulo, se describe el área de estudio. En el capítulo tres, se describen los datos utilizados, tanto aquellos de origen *in situ* como satelital y cómo fueron obtenidos. Por otro lado, en el capítulo cuatro se presenta el modelado semi empírico de la temperatura y Cl-a y en el capítulo cinco la generación y análisis de las series temporales para ambas variables analizadas. En el capítulo siguiente, el número seis, se muestran los métodos que se probaron para detectar las floraciones algales en el embalse. A partir de los resultados obtenidos y contrastados, se elige el método que utiliza un umbral modelado a partir del algoritmo HANTS y a continuación, se realiza una caracterización de las fechas de floración detectadas. Finalmente, en el capítulo Conclusiones y Recomendaciones, se presentan las conclusiones que se obtienen a partir del trabajo realizado y recomendaciones a tener en cuenta para gestionar las problemáticas identificadas.

## 1.1. Hipótesis

A través de series temporal de imágenes MODIS, se podrá medir contenidos de clorofila-a y temperatura en el Embalse San Roque, que, validadas con datos de campo, permitirán

detectar las floraciones algales que se producen en el reservorio de agua y con esto generar una alerta para estos eventos perjudiciales para la salud humana.

## 1.2. Objetivos Específicos

Para cumplir el objetivo general se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar un protocolo automático de procesamiento de los productos de interés del Sensor MODIS.
2. Generar algoritmos semiempíricos a través del modelado de Clorofila-a por un lado y de temperatura superficial del agua por el otro, con datos de campo obtenidos en el período 2008-2014 y datos satelitales MODIS.
3. Armar series temporales de paso diario de clorofila-a y de temperatura superficial del agua para el Embalse San Roque para el período 2001-2014.
4. Detectar frecuencias de floraciones algales y generar un sistema de alerta para estos eventos en el Embalse.

## Capítulo 2

# Marco teórico

En este capítulo introduciremos algunos conceptos y definiciones relacionados con las temáticas estudiadas en este trabajo, como así también se caracterizará el area de estudio.

### 2.1. Conceptos y Definiciones

#### Eutrofización

Eutrofización es el proceso por el cual la producción primaria de un cuerpo de agua aumenta, ya que se ve potenciada por un mayor aporte de materia orgánica y nutrientes a un ecosistema. Este enriquecimiento de las aguas con nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, se lleva a cabo a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, produce una disminución del oxígeno disuelto por la descomposición del exceso de materia orgánica, puede ocasionar efectos tales como la mortandad de peces [1]. Las masas de agua eutróficas tienen un alto nivel de productividad y como consecuencia, de biomasa en todos los niveles tróficos. Es así que los procesos de eutrofización producen cambios cuantitativos y cualitativos en la comunidad del fitoplancton. Una célula fitoplanctónica o algal, es un organismo planctónico capaz de realizar fotosíntesis y que tiene un tamaño que va desde aproximadamente  $1 \mu\text{m}$  hasta  $100 \mu\text{m}$ . En general, el fitoplancton comprende dos grupos principales de organismos: las cianobacterias fotosintéticas y las algas unicelulares.

El estudio de la eutrofización de los lagos mereció la atención de los especialistas en las décadas siguientes a la posguerra en la cual se observaron cambios sociales importantes. Estos cambios se asocian a la forma de producción agropecuaria, la incorporación de tecnología basada en la utilización masiva de fertilizantes inorgánicos en reemplazo de los clásicos abonos orgánicos, una importante migración del campo a la ciudad y el consecuente incremento de la urbanización y la natalidad. Originariamente los términos eutrófico y oligotrófico tenían un significado cualitativo para describir dos tipos de ambientes distintos. No fue sino hasta el trabajo encomendado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) a Vollenweider en 1976 [13] que se desarrolló una escala basada en la concentración de clorofila, que permitiera dar al tema un enfoque cuantitativo. En este sentido, una medida para clasificar un cuerpo de agua según su estado trófico es el Índice de Carlson que puede ser calculado a partir de tres variables de manera inde-

pendiente, Disco de Secchi, Fosforo Total y Cl-a [14], debido a que presentan una relación matemática significativa con la biomasa algal y permiten estimarla. El mismo puede ser calculado a partir de la Ecuación 2.1, 2.2 ó 2.3:

$$TSIs = 60 - 14,14 \cdot \ln(SDD(\text{metros})) \quad (2.1)$$

$$TSIc = 30,6 + 9,81 \cdot \ln(\text{Clorofila}(\mu\text{g/L})) \quad (2.2)$$

$$TSIp = 4,15 + 14,42 \cdot \ln(PT(\text{mg/L})) \quad (2.3)$$

Donde  $TSI$  es el Índice de Estado Trófico de Carlson,  $SDD$  corresponde a la profundidad de disco de Secchi en metros,  $Clorofila$  es la concentración de clorofila-a en  $\mu\text{g/L}$  y  $PT$  es la concentración de fósforo total en  $\text{mg/L}$ . Los valores de TSI menores a 20 corresponden a un lago ultraoligotrófico, entre 20 y 40 a uno oligotrófico, entre 40 y 50 a uno mesotrófico, entre 50 y 70 a uno eutrófico y superiores a 70 a uno lago hipertrófico. En este trabajo [14], Carlson recomienda utilizar concentración de cl-a para estimar el índice, ya que disco de secchi por ejemplo puede presentar mayores interferencias de otros materiales en suspensión.

## Floraciones algales

En casos severos, la eutrofización puede llevar a grandes floraciones de algas. Las floraciones algales o fitoplanctónicas son el resultado de un rápido aumento de la población de algas en un sistema acuático, ya sea de agua dulce o en un ambiente marino. Aunque no existe ningún nivel umbral reconocido oficialmente, una población de algas debe tener una concentración de cientos a miles de células por mililitro para ser considerada una floración, además de poder observarse una coloración específica en el agua [15]. Para evaluar la calidad de los cuerpos de agua, se requieren indicadores cuantitativos que describan la frecuencia e intensidad de las floraciones que ocurren en éstos. Pero primero es necesario describir que características fitoplanctónicas subyacen detrás de un evento de este tipo.

Richardson en 1997 [16] describe una floración como un crecimiento rápido de una o más especies que provocan un aumento de la biomasa total. Esta definición cualitativa, como muchas otras, no especifica de manera formal el significado de un crecimiento excepcional o inusual, lo que lleva a confusiones sobre qué episodios corresponde a una floración. Tett en 1987 [17] utiliza una definición cuantitativa para floraciones excepcionales indicando que son aquellas que exceden un umbral de clorofila de 100  $\text{mg/l}$ . Esta definición es demasiado arbitraria y no considera el estado trófico del cuerpo de agua analizado, ya que dependiendo de esto serán los valores normales de clorofila que se encuentren. En este sentido, se contradice con la conclusión de la Reunión ICES (1984), en la que se concluyó que una floración es una desviación del ciclo normal de la masa fitoplanctónica [18]. En este marco, la definición de un evento de floración debe considerar a escalas regionales los cambios en las estaciones.

## Cianobacterias

Debido a la eutrofización, además de aumentar la frecuencia y densidad de las floraciones, se produce un cambio en la composición del fitoplancton. Generalmente se genera un desplazamiento de las diatomeas, clorofíceas o crisofíceas y las cianobacterias aumentan [2]. Estas últimas son de especial interés ya que son capaces de producir una o más toxinas potentes [3]. Las cianotoxinas son un grupo diverso de toxinas naturales, que tienen mecanismos específicos en los vertebrados. Algunas son fuertes neurotóxicos (anatoxin-a, anatoxin-a(s), saxitoxins) o hepatotóxicos (microcystins, nodularin y cylindrospermopsin), mientras que otras pueden causar impedimentos de salud, tales como gastroenteritis [2]. El riesgo para la salud humana se presenta cuando el agua contiene altas concentraciones de cianobacterias y sus toxinas son ingeridas, en agua de bebida o accidentalmente durante la recreación. La preocupación sobre los efectos de las cianobacterias en la salud humana ha crecido en muchos países en los últimos años. Aunque la eutrofización ha sido reconocida como un fenómeno de preocupación creciente desde 1950, solo recientemente las toxinas producidas por las cianobacterias han sido ampliamente reconocidas como un problema para la salud humana derivado de la eutrofización. Además, las cianobacterias contribuyen a problemas estéticos y prácticos, ya que perjudican el uso recreativo de los cuerpos de agua, debido a que producen olores desagradables y espumas superficiales, además de afectar el gusto del agua potable tratada [5]. Si las cianobacterias están presentes o aún dominantes en el agua durante casi todo el año, los problemas prácticos y de salud asociados con la biomasa de las mismas aumenta en gran medida. Este tipo de situaciones tienen más probabilidad de ocurrencia en áreas que experimentan crecimiento poblacional, especialmente en aquellos lugares donde hay falta de tratamiento de aguas residuales cloacales y en regiones donde las prácticas agropecuarias generan un aporte extra de nutrientes a los cuerpos de agua por fertilización y erosión [19].

## Monitoreo de floraciones

Las floraciones de algas son generalmente monitoreados con medición de biomasa *in situ*, examinando las especies presentes y la concentración de clorofila-a, siendo ésta la medida más ampliamente usada. Valores típicos de clorofila-a para un lago oligotrófico van de 0.05 a 0.35  $\mu\text{g/L}$ , mientras que el máximo para un lago eutrófico es 58  $\mu\text{g/L}$ . El Embalse San Roque presenta valores que en ocasiones pueden llegar a números cercanos a 1000  $\mu\text{g/L}$  y con frecuencia valores cercanos a 200  $\mu\text{g/L}$ . Por otro lado, la mayoría de los estudios sobre crecimiento de fitoplancton utilizan la temperatura como variable física que determina la máxima tasa de crecimiento [20]. Por esto, también es usualmente monitoreada en los cuerpos de agua [10]. Estas tasas de crecimiento se aceleran exponencialmente cuando la temperatura aumenta, alcanzando valores máximos entre los 25 y 40 °C de temperatura [21] [22]. Esta respuesta es distinta para las diferentes especies de algas y la mayor dependencia de las tasas de crecimiento con la temperatura se observan en las cianobacterias, desplazando a otras especies como las diatomeas [22]. Ha sido demostrado en [8] que las frecuencias temporales y espaciales de los programas de muestreo de agua convencionales no son adecuados para reportar cambios en la biomasa del fitoplancton, especialmente durante condiciones de florecimiento donde la variabilidad espacial y temporal en la densidad del fitoplancton es particularmente alta. De hecho, el monitoreo confiable de floraciones de cianobacterias es aún más complicado. Esto se debe a que las cianobacterias pueden localizarse

en la capa superficial en vez de estar uniformemente mezcladas en la columna de agua, pues son capaces de regular su flotabilidad [5] [10].

## Teledetección o Sensado Remoto

El sensado remoto implica la medición de alguna propiedad de un objeto de interés desde la distancia, por ejemplo desde un sensor a bordo de un satélite. Esto permite extrapolar una característica de un área particular relevada por mediciones locales *in situ* a una escala más grande, en menor tiempo y con menor costo. La teledetección parte del principio de la existencia de una interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Esta perturbación puede ser medida por un sistema receptor a la distancia para luego ser interpretada. En el caso de los satélites de observación de la tierra, se utiliza como información la energía radiante emitida, reflejada, transmitida o dispersada por la materia a partir de una fuente de radiación natural o artificial. Esta información se puede registrar en uno o más intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético, según el tipo de sensor que se utilice [23]. El sensor remoto es el instrumento que se encuentra en la plataforma satelital capaz de captar la energía procedente de la cubierta terrestre. Los sensores ópticos en general son pasivos, es decir que sólo reciben una señal electromagnética producto de la reflexión del sol, la luna o las estrellas sobre la superficie terrestre, pero no son capaces de perturbar el sistema al cual se le realiza la medición. Los sensores activos o de RADAR, emiten su propia radiación, es decir que perturban el objeto al cual se le mide una determinada propiedad y luego recibe y procesa la respuesta. Particularmente, trataremos los sensores ópticos, ya que es el caso del sensor utilizado en este trabajo. Los sensores remotos tienen distintas resoluciones, las cuales permiten diferentes tipos de estudios. Estas son:

1. **Resolución espacial:** Este concepto designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, el cual se visualiza en la unidad mínima de información denominada píxel.
2. **Resolución espectral:** Indica el número y el ancho de bandas en el espectro electromagnético que puede discriminar un sensor.
3. **Resolución radiométrica:** Este concepto está relacionado con la sensibilidad del sensor, es decir, con la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Se expresa en el número de bits de cada uno de los elementos contenidos en la imagen. Generalmente es 8 bits ( $2^8 = 256$  niveles por píxel). Cuanto mayor es el número de bits, mayor será la cantidad de cifras significativas de los valores de radiancia registrados.
4. **Resolución temporal:** Es la frecuencia o periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma área de superficie terrestre y siempre es función de las características orbitales del satélite (altura, velocidad e inclinación) y de las características del sensor.

Con respecto a la resolución espectral, los sensores ópticos se concentran en su mayoría en las longitudes del espectro pertenecientes al intervalo del rango visible por el ser humano, así como el intervalo perteneciente al infrarrojo cercano, medio y térmico. Para que una especie química sea detectada desde el espacio es necesario que presente una interacción con la radiación electromagnética dentro del intervalo espectral del instrumento de medición y

además que esté en una concentración que genere una respuesta apreciable. En este sentido, las sustancias ópticamente activas en los organismos pueden ser estudiadas a través del sensado remoto, dependiendo de su interacción con una longitud de onda específica. El gráfico de la variación de la reflectancia de una sustancia en función de la longitud de onda se denomina firma espectral, la cual es una medida cuantitativa y característica de la especie observada. La firma espectral de una cobertura no se restringe a mediciones de un compuesto puro en el vacío sino a la sumatoria de muchos elementos del paisaje con características dinámicas. Por este motivo, el comportamiento espectral de un objeto o superficie presenta una alta variabilidad debido a diferencias en las condiciones meteorológicas, de iluminación y a variables estacionales.

### Sustancias ópticamente activas: Clorofila-a

Particularmente, los cuerpos de agua presentan sustancias ópticamente activas que determinan el comportamiento espectral de los mismos. Estos sistemas poseen ciertas propiedades ópticas que influyen en la respuesta espectral. Las principales son:

1. Coeficiente de Absorción debido a la presencia de materia orgánica coloreada o también llamada materia amarilla,  $a_{CDOM}$ .
2. Coeficiente de absorción debido a la presencia de excrementos de la flora y fauna acuática, denominados en inglés tripton,  $a_{TR}$ .
3. Coeficiente de absorción debido a la presencia de fitoplancton, el cual abarca clorofila-a, ficocianina, carotenos entre otros,  $a_{\phi}$ .
4. Coeficiente de retrodispersión causado principalmente por la materia en suspensión o también denominado material particulado,  $b_{bp}$

Cada una de estas propiedades, pueden ser detectadas en mayor o menor medida en función de la longitud de onda a la cual se lleva a cabo la medición de reflectancia. En este sentido, Morel y Prieur en 1977 [24] propusieron una clasificación de aguas oceánicas en función de la influencia de las partículas disueltas o en suspensión sobre sus propiedades ópticas. La misma está muy difundida en la comunidad científica y se utiliza también para caracterizar aguas continentales [25]. Las aguas Tipo I son aquellas en las cuales el fitoplancton es el factor determinante de las propiedades ópticas. Este supuesto se puede verificar mediante una regresión lineal entre concentración de clorofila-a y materia en suspensión. Cuando esta relación es significativamente lineal entonces se puede trabajar bajo la aproximación de un agua Tipo I, mientras que si no lo es el agua se clasifica como Tipo II. Esto último significa que la materia orgánica, humus o sustancia amarilla y material en suspensión contribuyen de manera independiente y significativamente a la respuesta espectral del sistema en el rango óptico. Es importante la introducción de este concepto debido a que el cálculo de concentración de clorofila-a a partir de espectros de reflectancia de aguas tipo II es mucho más complejo que el que requiere un agua de Tipo I, ya que se deben utilizar sensores de mayor resolución espectral. En [26], el agua del embalse San Roque fue clasificada como Tipo I a partir del registro de una relación lineal entre la concentración de clorofila-a y materia en suspensión medidas *in situ*. En este marco, es posible afirmar

que las propiedades ópticas del agua del embalse están determinadas principalmente por la presencia de fitoplancton. En este sentido, debido a que las algas poseen pigmentos relacionados a la fotosíntesis, como la clorofila, las características ópticas del agua se ven alteradas, lo que permite establecer relaciones entre éstos cambios ópticos y la abundancia de algas. Es así, que es posible estimar concentración y distribución de algas en grandes superficies a través de sensores remotos. La frecuencia temporal de las imágenes satelitales hace que esta herramienta tenga el potencial de proveer información de alto valor para el monitoreo de explosiones algales en cuerpos de agua [27].

### **Temperatura de la superficie terrestre**

La temperatura de la tierra es una variable ampliamente utilizada como entrada a modelos climáticos, hidrodinámicos, entre otros, y específicamente es un factor determinante en los procesos de floraciones algales. Ésta se puede calcular remotamente a partir del dato de emisión de radiación del objeto de estudio en el rango de infrarrojo lejano o térmico y la ayuda de un modelo matemático. En la actualidad existe una variedad importante de sensores remotos que permiten calcularla, brindando una buena cobertura espacial y temporal.

Para obtener una buena validación de la energía emitida en el rango térmico, se requieren las siguientes condiciones [28]:

1. Emisividad conocida en el rango espectral de detección
2. Número apreciable de datos (píxeles)
3. Zona homogénea
4. Estabilidad térmica

En este sentido, el agua satisface muy bien las características 2, 3 y 4. Respecto de la primera, existen muchos métodos para obtener la emisividad de la superficie basados en datos satelitales. La emisividad del agua tiene una forma funcional prácticamente chata en el rango infrarrojo de interés (10,45-12,00  $\mu\text{m}$ ) [29].

Particularmente, en [30] se analiza la emisividad de distintas coberturas de la superficie terrestre, entre ellas superficie de agua de lagos internos y se concluye que en las bandas 31 y 32 de MODIS la emisividad de las mismas es relativamente estable y conocida.

### **Satélites y Sensores Usados en el Monitoreo de Calidad de Agua**

La necesidad de información sobre la calidad de agua a largo plazo a una escala regional, ha llevado a la utilización de diversos satélites para realizar estudios sobre la calidad del agua en lagos y embalses, así como el monitoreo de la Clorofila para entender y manejar problemáticas asociadas. Para esto, los principales satélites y sensores utilizados han sido Landsat, MODIS, MERIS y AwiFS. Todos poseen distintas características que los hacen más adecuados según los objetivos de estudio y la necesidad de información, así como el acceso a la misma. Los dos primeros son de acceso gratuito y sus imágenes

se pueden descargar facilmente de internet ([earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov); [modis.gsfc.nasa.gov](http://modis.gsfc.nasa.gov); <http://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/catalogo-de-imagenes.html>). Los segundos, son de acceso pago por lo que presentan dificultades en su disponibilidad.

Las principales diferencias entre Landsat y MODIS son la resolución temporal y espacial. El primero, provee imágenes cada 16 días y tiene una resolución espacial de 30m. El segundo, provee imágenes diarias y la mejor resolución espacial es de 250m. Es así que Landsat ha sido ampliamente utilizado en estudios de calidad de agua, pero también MODIS ya que su alta resolución temporal permite realizar estudios temporales de mayor alcance [31]. Por esto, la información provista por este sensor es de gran interés, ya que provee datos diarios y gratuitos que permiten realizar un monitoreo constante de la superficie de la Tierra. Para el caso de las floraciones algales, la resolución temporal es fundamental ya que son procesos de explosión muy rápida y contar con una resolución temporal alta es esencial.

Particularmente, en este trabajo se evalúa el uso de los siguientes productos, MOD09GQ y MOD09GA MODIS de Reflectancia de Superficie Diaria Global L2G de 250, 500 y 1000 metros de resolución espacial, así como también el producto de nivel 3 (L3) MOD11A1 de Temperatura superficial de la tierra y emisividad diaria global de 1 kilómetro de resolución espacial. Los primeros productos contienen en conjunto 36 bandas de reflectancia en distintos intervalos de longitudes de onda. Además, incluyen bandas adicionales de información sobre la calidad de los datos, la órbita y cobertura y el número de observaciones ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod09gq](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09gq)). El segundo, provee valores por pixel de temperatura y emisividad ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod11a1](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod11a1)).

Actualmente, el último sensor diseñado para continuar la misión MODIS, incluyendo el monitoreo de la calidad del agua, es el VIIRS a bordo del satélite Suomi NPP puesto en órbita en Octubre de 2011. El mismo provee datos similares a los descriptos anteriormente, también de acceso gratuito y paso diario. Esto asegura que la continuidad del monitoreo sea posible cuando MODIS llegue al fin de su vida útil.

## Series temporales

Una serie temporal es una sucesión ordenada en el tiempo de valores pertenecientes a una variable en particular. Una serie de tiempo provee información útil sobre los sistemas físicos, biológicos o socioeconómicos. El propósito de las mismas es determinar alguna de las propiedades claves de estos sistemas, cuantificando ciertas características de la serie. Estas propiedades pueden ayudar a entender el comportamiento del sistema estudiado y llegar a predecir su futuro. Una de las clasificaciones posibles de las series de tiempo es aquella que considera la forma en que son medidos los datos. Datos tomados en forma continua, por ejemplo por un aparato analógico, forman series de tiempo continuas [32]. Por el otro lado, datos observados cada cierto intervalo de tiempo, generan series de tiempo discretas. Estas últimas, pueden ser a su vez clasificadas según si las observaciones de los datos están igualmente espaciados por un cierto intervalo de tiempo o no.

La interpretación de series de tiempo comprende métodos para analizar datos en el tiempo con el fin de extraer información estadística y otras características como por ejemplo frecuencia de eventos extremos, en el caso que se registren. Además, se utilizan análisis predictivos a partir de series de tiempo, con el fin de generar modelos que puedan predecir

valores futuros basados en observaciones previas.

Por otro lado, el análisis de regresión de series temporales se utiliza comunmente para probar teorías de que los valores de una o más variables independientes en una serie de tiempo afectan el valor de otra variable dependiente representada en otra serie de tiempo. Este análisis se enfoca en comparar valores de una serie de tiempo dependiente en diferentes momentos temporales con aquellas variables temporales explicativas independientes.

Los métodos para analizar series de tiempo pueden ser divididos en dos clases, aquellos relacionados con el dominio de las frecuencias y los vinculados con el dominio del tiempo. El primer enfoque está motivado en la observación de que el comportamiento más regular y por lo tanto predecible de la serie de tiempo, será periódico. Estas variaciones periódicas son típicamente causadas por fenómenos biológicos, físicos o ambientales de interés. Por lo que se procede a determinar estos componentes periódicos embebidos en la serie de tiempo calculando períodos, amplitudes y fases. Para esto, se utiliza comúnmente lo que se denomina análisis de Fourier. El segundo enfoque se centra en el dominio del tiempo y abarca análisis de autocorrelación y correlación cruzada. éste está motivado generalmente por la asunción de que la correlación entre puntos adyacentes en el tiempo es mejor explicada en términos de una dependencia del valor actual en el valor pasado. Se enfoca en modelar valores futuros de una serie de tiempo como una función paramétrica de los valores actuales y pasados.

Cuando modelamos series temporales de situaciones del mundo real, es necesario algunas veces tratar con datos faltantes. Esto debido a que en la evolución de los datos, no siempre se cuenta con mediciones constantes en el lapso de tiempo estudiado, ya que no han sido medidos por alguna razón o impedimento técnico. Para suplir esta necesidad, existen diferentes algoritmos que modelan estos datos faltantes [33].

## 2.2. Área de Estudio

El Embalse San Roque está situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía (provincia de Córdoba) y tiene su baricentro superficial en las coordenadas  $31^{\circ} 22' 56''$  S,  $64^{\circ} 27' 56''$  O (figura 2.1).

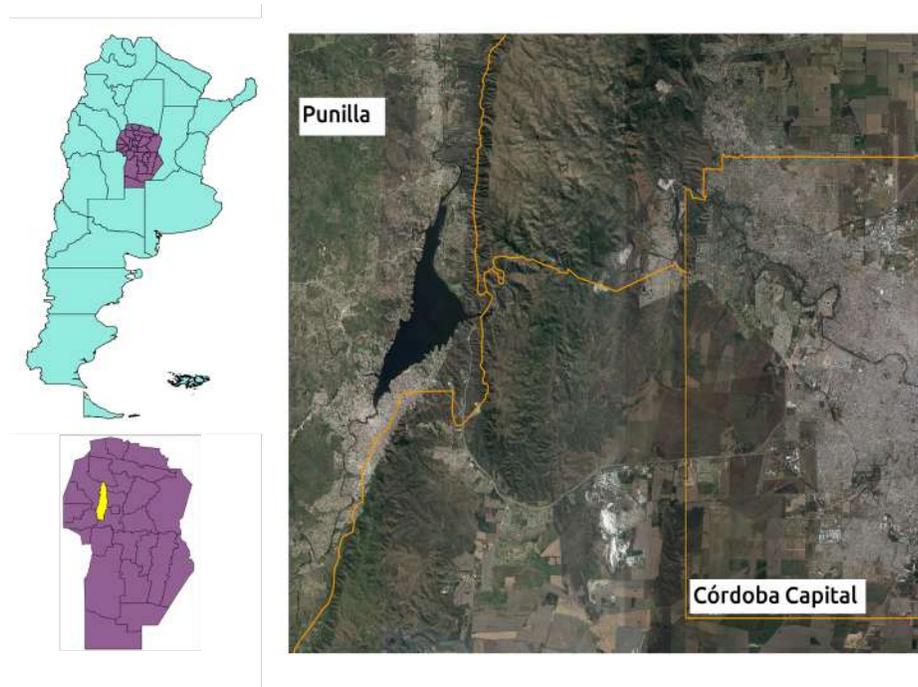


Figura 2.1: Localización del área de estudio

El clima de la región es templado con una temperatura media anual de  $14^{\circ}$  C y vientos predominantes del cuadrante sur y norte, con precipitaciones estivales en el rango de 400 a 1000 mm y una media anual aproximadamente de 720 mm [34]. El área de drenaje del Embalse comprende una superficie de  $1750 \text{ km}^2$ , recibiendo el aporte de cuatro tributarios. Los ríos San Antonio y Cosquín junto con los arroyos Los Chorrillos y Las Mojarras sumados al pequeño aporte debido al perillago que conforman las fuentes de agua por escorrentía superficial. A su vez cuenta con un único emisario, el Río Suquía. Un primer dique fue construido en el año 1888 el cual fue reemplazado por el actual paredón en 1944 para aumentar el volumen de almacenamiento. Las características principales de este cuerpo de agua se presentan en la tabla 2.1

Los ríos transportan al embalse material orgánico e inorgánico generado en las subcuencas, drenan áreas con baja permeabilidad del material rocoso, suelos discontinuos y superficiales que facilitan un drenaje excesivo con rápida concentración de las aguas [35]. En relación a esto, el volumen de agua del embalse se redujo en los últimos 60 años por una colmatación de  $11,73 \text{ hm}^3$  (volumen de sedimentos) que representa una pérdida de capacidad del embalse del 5,83%, degradación específica de  $142 \text{ tn/km}^2$  por año y una pérdida media anual de capacidad de 0,106 por año. Estas características concuerdan con las características geológicas de la cuenca, basamento cristalino de carácter ígneo y metamórfico con relación a los materiales friables [36]. En relación a la dinámica térmica, el embalse posee un régimen monomítico [37] [38] [39], lo que significa que las aguas se mezclan una vez al año, por causa de las variaciones de la temperatura de modo homogéneo en un perfil vertical sin un gradiente de densidad. En los lagos de clima cálido, la estratificación y la termoclina se forman en verano, cuando las aguas superficiales (llamadas epilimnion) se calientan y las del fondo (llamadas hipolimnion) permanecen frías. El gradiente de densidad entre ambas capas impide que las aguas se mezclen. La mezcla se produce en otoño, cuando se enfría la

|   |  |
|---|--|
| <b>Área de Drenaje:</b>                         | 1750 km <sup>2</sup>                   |
| <b>Tipo de presa</b>                            | Hormigón.<br>Gravedad,<br>Planta curva |
| <b>Superficie cota labio vertedero:</b>         | 15,01 km <sup>2</sup>                  |
| <b>Volumen cota labio vertedero:</b>            | 201 hm <sup>3</sup>                    |
| <b>Máxima profundidad cota labio vertedero:</b> | 35.30 m                                |
| <b>Profundidad media:</b>                       | 13 m                                   |
| <b>Nivel del Agua:</b>                          | Regulado                               |
| <b>Fluctuación anual del nivel</b>              | 6m                                     |
| <b>Tiempo de residencia</b>                     | 0.1 -0.7 años                          |
| <b>Caudal medio anual de tributarios</b>        |  |
| <b>Río San Antonio</b>                          | 2.7 m <sup>3</sup> /s                  |
| <b>Río Cosquín</b>                              | 4.4 m <sup>3</sup> /s                  |
| <b>Arroyo Las Mojarras</b>                      | 0.48m <sup>3</sup> /s                  |
| <b>Arroyo Los Chorrillos</b>                    | 0.73m <sup>3</sup> /s                  |
| <b>Emisario : Río Suquía</b>                    | 9.6m <sup>3</sup> /s                   |

Tabla 2.1: Características del Embalse San Roque. Fuente: Dirección Provincial de Hidráulica (1982).

superficie hasta igualar la temperatura del hipolimnion y dura hasta la primavera [36].

El Embalse cumple principalmente la función de provisión de agua para la Ciudad de Córdoba, pero también de control de inundaciones, aprovechamiento hidroeléctrico y es a su vez es un ámbito en el que se desarrollan múltiples actividades recreativas. Entre las actividades realizadas en la cuenca se citan el uso de las tierras en la agricultura de menor escala, pastoreo extensivo (el cual se transforma en intensivo en verano) trayendo consecuentemente problemas de deterioro del suelo y deforestación. Respecto al tratamiento de aguas negras de las ciudades situadas en el perilago y en la cuenca se han inaugurado en los últimos años dos plantas de tratamientos de líquidos cloacales, en Carlos Paz y en la Falda. Sin embargo estas plantas no incluyen tratamiento terciario, por lo que el aporte de nutrientes debido a esta fuente sigue siendo considerable, principalmente en verano. Por otro lado, la ocurrencia de eventos impredecibles como los incendios y las crecidas de los cursos de agua, provocan una variabilidad espacial y temporal en el aporte de fósforo y nitrógeno al Embalse, de elevada importancia [40].

La construcción del Embalse San Roque en una zona semiárida donde el recurso hídrico es limitado resulta de suma importancia para la provisión de agua necesaria para el sustento de la actividad y el desarrollo de la zona. La fuerte presión antrópica sobre el embalse, en conjunto con las fuentes naturales, lo han convertido en receptor de descargas contaminantes con alto contenido de nutrientes, generando una grave modificación en la calidad del agua del Embalse [34]. Así, la escasa transparencia y la presencia de color y olores desagradables, floraciones algales y eventos de mortandad de peces son de fácil y frecuente percepción, siendo éstas las manifestaciones visibles (figura 2.2) del problema del avanzado estado de eutrofia que presenta el cuerpo de agua [35].



Figura 2.2: Fotografías de eventos de floraciones algales en el Embalse San Roque, con efectos de mortandad de peces.

Existen antecedentes de estudios sobre la calidad física química del agua y el fitoplancton del Embalse San Roque. El primer estudio consistente sobre el fitoplancton corresponde al de Guarrera en 1948 [40] y posteriormente se destacan los trabajos de Bonetto et al. (1976) [41], Gavilán (1981) [42], Ormeño y Busso (1986) [43], Rodríguez M.I et al. (2008) [36], entre otros. En éstos, se muestra como han evolucionado distintos parámetros que determinan que la calidad del agua disminuye con el tiempo, confirmándose siempre el estado eutrófico del mismo. Específicamente, la alta concentración de Nitrógeno y Fósforo más el fenómeno de estratificación térmica que sucede en el Embalse en verano, generan las condiciones óptimas para la ocurrencia de floraciones algales. Particularmente, en estos estudios se ha observado que las principales especies involucradas en estos eventos son las cianobacterias. Según Ruibal et al en [44], las algas causantes de floraciones son principalmente las cianobacterias *Anabaena spiroides* y *Microcystis aeruginosa* y la pirrófita *Ceratium hirundinella*. Desde el primer estudio realizado por Guarrera en 1948 [40], el fitoplancton del Embalse San Roque ha mostrado cambios graduales, reduciéndose a la dominancia de escasas especies propias de lagos eutróficos. Durante 20 años, se observó periódicamente un crecimiento desmedido de algas azul-verdosas durante las primaveras - veranos y de Diatomeas y Dinofíceas (*Peridinium*) en los otoños - inviernos [35]. Rodríguez et. Al en 2008 [36], realizaron un estudio de monitoreo de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos en el Embalse y

una descripción del fitoplancton presente. La figura 2.3 presenta la dominancia de grupos de algas expresada como porcentaje del total de algas que, graficada temporalmente permite distinguir períodos de dominancia de crisófitas en los meses fríos alternados con períodos de dominancia de cianobacterias o pirrófitas en los meses cálidos.

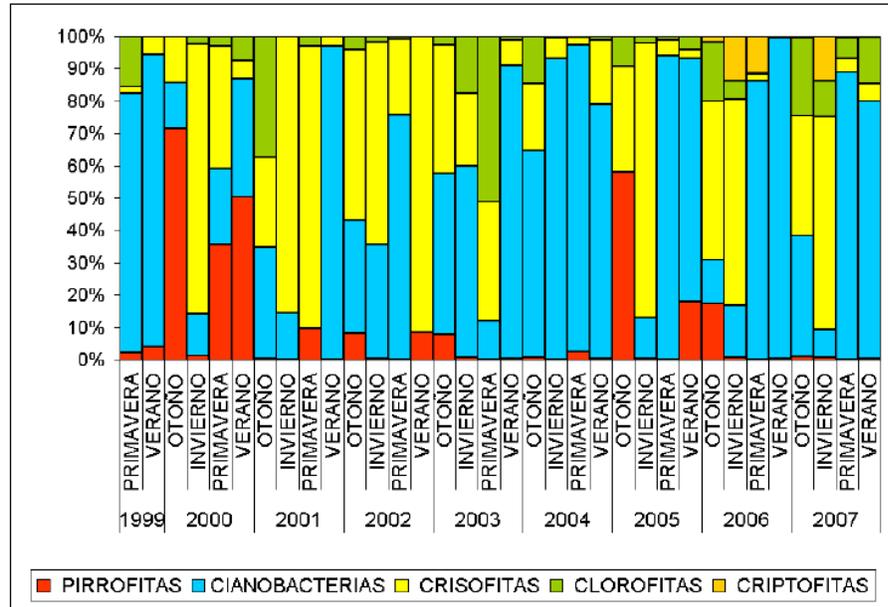


Figura 2.3: Distribución porcentual de grupos de algas a nivel subsuperficial en el área de toma durante el periodo de estudio. Extraída de [36]

Entre los géneros de algas más comúnmente registrados que han desarrollado floraciones en el embalse San Roque se encuentran *Cyclotella sp*, *Ceratium sp*, *Aulacoseira sp*, *Anabaena sp*, *Melosira sp*, *Microcystis sp*, *Navicula sp*, *Carteria Closterium sp* y *Stephanodiscus sp*. De estos géneros, *Cyclotella sp*, *Ceratium sp*, *Anabaena sp*, *Microcystis sp*, *Closterium sp* y *Carteria sp* [45]. Particularmente, los géneros de cianobacterias detectados en el Embalse son *Microcystis*, *Anabaena*, *Merismopedia*, *Oscillatoria*, *Raphidiopsis* y *Pseudoanabaena*, siendo los dos primeros más frecuentes y abundantes que el resto. En este mismo trabajo se concluye que los períodos más críticos en abundancia de cianobacterias son coincidentes con mayores temperaturas, estratificación estable y siempre con un espesor del estrato de mezcla superior al eufótico. Estas condiciones, sumadas a una alta disponibilidad de nutrientes, con períodos de calma o de vientos suaves aumentan el riesgo de floraciones. Por otro lado, Bustamante et.al. en [46] muestra una correlación entre la concentración de clorofila y las lecturas del disco de Secchi que sugiere que la transparencia del agua, sobre todo en verano, está regulada por la abundancia del fitoplancton. Además, las algas capaces de regular su posición en la columna de agua por mecanismos de flotación como las cianobacterias son las beneficiadas y principalmente durante períodos de calma y estratificación [47]. Se ha observado que si la calma se mantiene y no se produce una mezcla homogénea en el epilimnio, cianobacterias como *Anabaena sp* pueden formar floraciones superficiales [48]. Rodríguez et. al. [36] también concluye a partir de los datos de muestras del Embalse, que el aumento de temperatura en el verano junto con el ingreso de nutrientes provenientes de la cuenca, coincide con un aumento en la biomasa de algas (clorofila-a) y menor transparencia. Por otro lado, Ferral en [26]

encuentra una correlación de Pearson significativa positiva entre el logaritmo de la clorofila medida *in situ* con algas totales y a su vez estas últimas presentaron una correlación de Pearson significativa positiva con las cianobacterias presentes en el embalse San Roque ( $r^2=0.98$ ). Esto da cuenta de que las mismas estarían predominando en la biomasa de algas en el agua. Las características observadas en el Embalse en estudios de campo, son las que dan marco a la posibilidad de estudiar de forma remota (satélite) la biomasa del Embalse. La transparencia está relacionada con la concentración de clorofila, la cual permite detectar los eventos de floraciones algales, que a su vez están correlacionados con la concentración de cianobacterias, por su predominancia y por su posicionamiento en la superficie del cuerpo de agua. Además, se confirma que la temperatura es una variable clave en la ocurrencia de las floraciones en el Embalse, la cual se puede estudiar desde satélite con el fin de relacionarla a los eventos de floraciones.

## Capítulo 3

# Análisis Descriptivo de los Datos Utilizados

### 3.1. Datos medidos *in situ*

#### Plan de Monitoreo

Los datos de campo que se utilizaron en el presente trabajo fueron recolectados y generados en el contexto del plan de monitoreo que realiza la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba. Para mitigar el fenómeno de eutrofización en el Embalse San Roque, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo sustentable de la Nación y el Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba instalaron en el año 2008 una red de difusores en el lago. El objetivo de este sistema es reducir la estratificación térmica del agua y aumentar el nivel de oxígeno en el fondo del lago para evitar la liberación de fosfatos desde el sedimento [49]. La provincia definió un plan de monitoreo para evaluar el efecto de los difusores sobre la calidad del agua. El diseño de monitoreo adoptado en el mismo se elaboró considerando los términos de referencia del convenio firmado oportunamente con la Secretaría de Ambiente de la Nación [50]. Esta metodología es concordante con el modelo propuesto por la EPA (Environmental Protection Agency) para el monitoreo de lagos con sistemas de aireación artificial [51].

En dicho plan de monitoreo se miden numerosas variables, de las cuales en este trabajo solo se utilizarán:

- **Una variable temporal:** Fecha de medición.
- **Tres variables espaciales:** Estación de monitoreo, posición en coordenadas geográficas y profundidad del muestreo.
- **Una variable fisicoquímica medida *in situ*:** Temperatura del agua (C).
- **Una variable fisicoquímica analizada en el laboratorio:** Concentración de clorofila a ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ).

| Puntos de Muestreo   | Latitud  | Longitud |
|----------------------|----------|----------|
| 1 Centro             | -31.3753 | -64.4693 |
| 2 Garganta           | -31.374  | -64.4419 |
| 3 Zona A             | -31.3723 | -64.4549 |
| 4 Zona B             | -31.3775 | -64.4550 |
| 5 Control Satélite 1 | -31.3942 | -64.4843 |
| 6 Control Satélite 2 | -31.3819 | -64.4758 |
| 7 Control Satélite 3 | -31.3652 | -64.4630 |
| 8 Control Satélite 4 | -31.3608 | -64.4718 |

Tabla 3.1: Localización geográfica de los puntos de muestreo.

Debido a las determinaciones físicoquímicas y biológicas requeridas, la extracción de muestras se llevó a cabo en la superficie, en el límite de extinción de la luz y en el fondo. La toma de muestra de agua superficial se realizó a 20 cm de profundidad.

### Sitios de Muestreo

Las estaciones de muestreo de calidad de agua se ubicaron teniendo en cuenta la localización de los difusores, ya que fue planeado para monitorear la efectividad de los mismos y el uso de imágenes satelitales según lo acordado entre la Secretaría de Recursos Hídricos y la CONAE. Se definieron tres puntos sobre la zona de actuación de los difusores (Zona A, Zona B y Garganta), un punto central del embalse para evaluar el alcance de su efecto (Centro) y cuatro puntos periféricos pero alejados de las costas para utilizar en el análisis satelital (SAT 1, SAT 2, SAT 3 y SAT 4). La tabla 3.1 muestra las coordenadas geográficas de cada punto de monitoreo registradas con un GPS marca Garmin modelo Etrek. Es importante destacar que el método de posicionamiento de la lancha para realizar la toma de muestra consistió en tirar el ancla en el punto que el GPS marcaba como estación de monitoreo.

Estos puntos fueron pensados en su origen para trabajar con el satélite Landsat, el cual posee 30 m de resolución espacial. Para el presente trabajo, en que los objetivos priorizan la resolución temporal por sobre la espacial, las imágenes satelitales utilizadas tienen una menor resolución espacial, por lo que no todos estos puntos son factibles de utilizar, dado que algunos se ven afectados por información espectral proveniente de la superficie terrestre y no exclusivamente del agua. En [26] Ferral mostró que el área central del embalse se comporta estadísticamente como una media de la totalidad del mismo, por lo que se eligió trabajar con los datos de monitoreo provenientes del punto 1 (centro), ya que el mismo no posee ninguna contaminación por valores de reflectancia provenientes de áreas terrestres. En la figura 3.1, es posible observar el tamaño y ubicación del píxel de 250 metros de resolución espacial con respecto al tamaño del Embalse y los puntos de monitoreo.

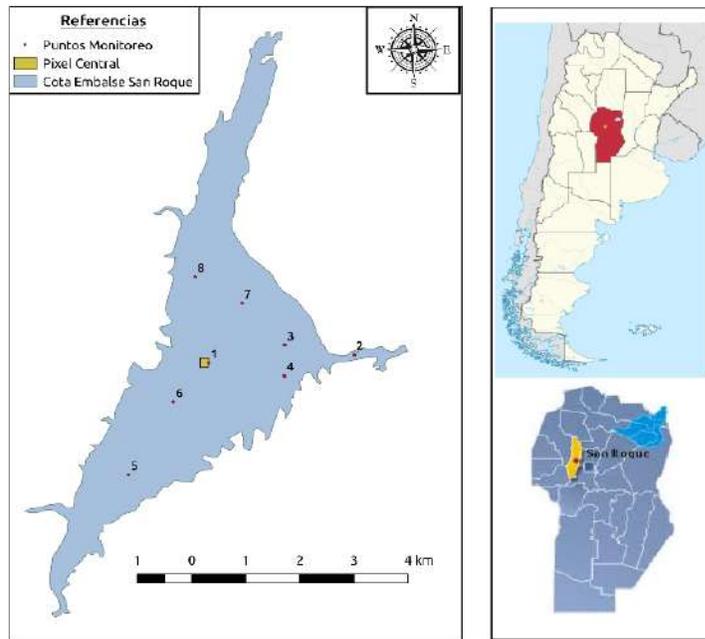


Figura 3.1: Embalse San Roque. Localización de los puntos de monitoreo y del píxel MODIS utilizado.

## Frecuencia

Las mediciones *in situ* se realizaron con una frecuencia semanal, desde Octubre de 2008 hasta Marzo de 2009, luego con una frecuencia quincenal hasta Junio de 2009 y finalmente mensual. Esto hace un total de 80 monitoreos que van desde el 02/10/2008 al 08/09/2014. Las variables fisicoquímicas de laboratorio sólo se registraron para los sitios en la zona de los difusores (garganta, zona-A y zona-B) y en el centro con una frecuencia, en general, mensual. En la figura 3.2, se puede observar la distribución de las mediciones *in situ*.

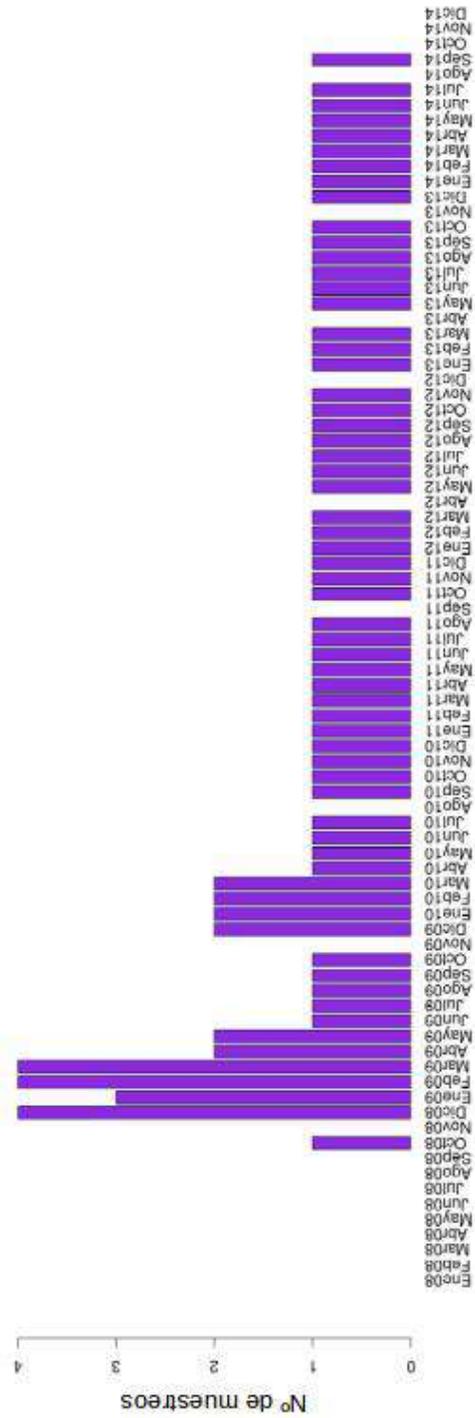


Figura 3.2: Cantidad de muestreos por mes del año, para la totalidad de los datos del monitoreo *in situ*.

### Técnicas de análisis

La metodología utilizada para la toma de muestras, almacenamiento, preservación y análisis está basada en métodos internacionales estandarizados [52] y se encuentra descrita en [50]. Particularmente, la metodología utilizado para medir clorofila es el método 10200 H.2.b, determinación espectrofotométrica de la clorofila que corrige interferencias por presencia de feofitina a, detallada en Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales [52]. Clorofila - a se mide a una longitud de onda de 664 nm y se corrige la turbidez a 750 nm.

Las mediciones *in situ* de pH, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura en cada estación se tomaron con sonda multiparamétrica Horiba U-22, la cual es calibrada antes de cada medición por personal calificado de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

### Análisis estadísticos de los datos de campo utilizados

De la totalidad de los datos de Cl-a y temperatura se seleccionaron, para cada fecha de muestreo, aquellos pertenecientes a la estación de monitoreo 1 (Centro). En total se analizaron 59 fechas de muestreo para Cl-a y 74 para temperatura, que se describen a continuación a través de un análisis estadístico.

#### Clorofila-a

La figura 3.3 presenta los datos de Cl-a medidos *in situ* en función de las fechas de monitoreo. Se observan una tendencia periódica con picos en los meses de primavera-verano y depresiones en otoño-invierno.

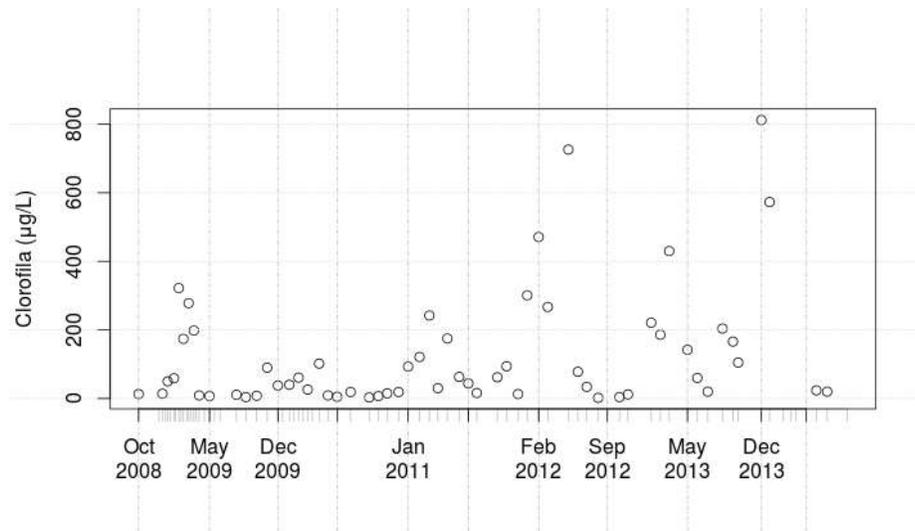


Figura 3.3: Datos de Cl-a medida *in situ* para todas las fechas de monitoreo utilizadas.

Se observa en los gráficos de la figura 3.4 que se solapan las cajas, lo que sugiere que las

diferencias entre las distribuciones anuales no son significativas. Sin embargo, si observamos la figura 3.5, que presenta las medias anuales, es posible identificar un aumento de la concentración promedio de Cl-a para los últimos 3 años. El número de datos es pequeño para realizar una prueba de medias de T-Student, por lo que solo podemos hablar de tendencia en este caso.

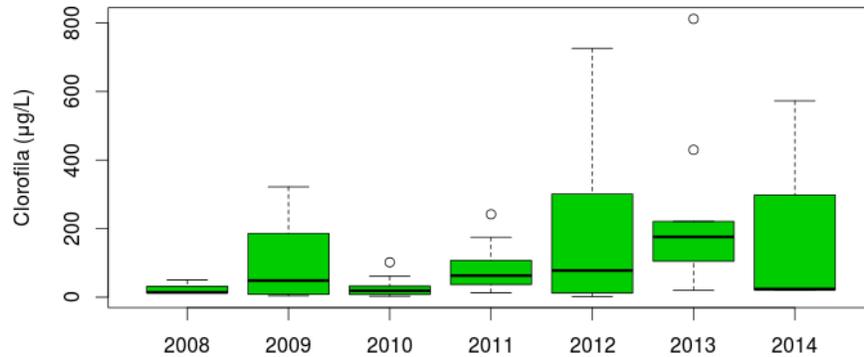


Figura 3.4: Gráficos de caja por año para todos los datos de monitoreo utilizados.

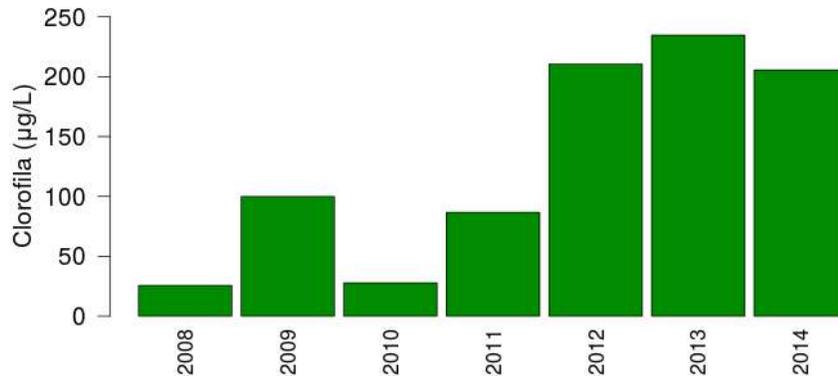


Figura 3.5: Medias Anuales de la Clorofila-a medida *in situ*.

En los gráficos de caja de la figura 3.6, podemos observar que los valores pertenecientes a la estación de Verano, son mayores a los de las demás estaciones. Esto corresponde con procesos productivos influenciados de forma positiva por mayores horas de luz y temperatura.

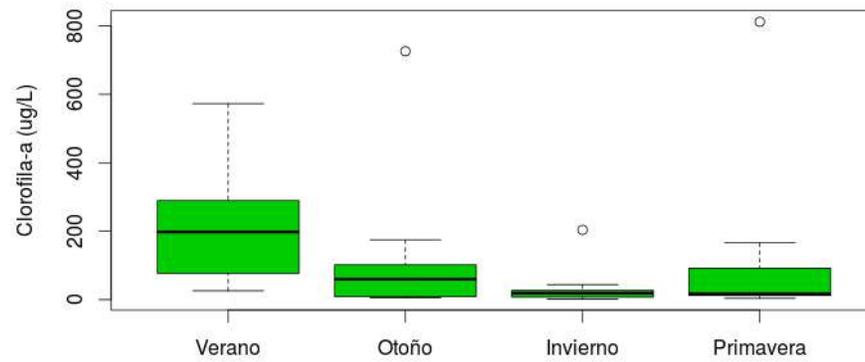


Figura 3.6: Gráficos de caja estacionales para la Cl-a *in situ*.

El gráfico de torta de la figura 3.7, muestra el porcentaje de distribución del índice de Carlson para todos los datos de Cl-a *in situ*. En el mismo se observa que el Embalse resultó en estado hipereutrófico más de la mitad de las fechas de muestreo (51 %) y eutrófico un 37 % de los casos.

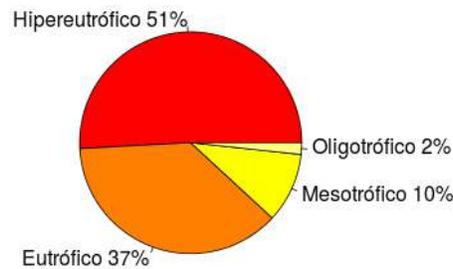


Figura 3.7: Gráfico de torta que representa el porcentaje de los datos que clasifican en cada estado trófico según Carlson [14].

### Temperatura

En la figura 3.8 se observan los datos de la temperatura medidos *in situ* y se pueden distinguir los ciclos estacionales, con picos en Verano - Primavera y valles en Otoño - Invierno.

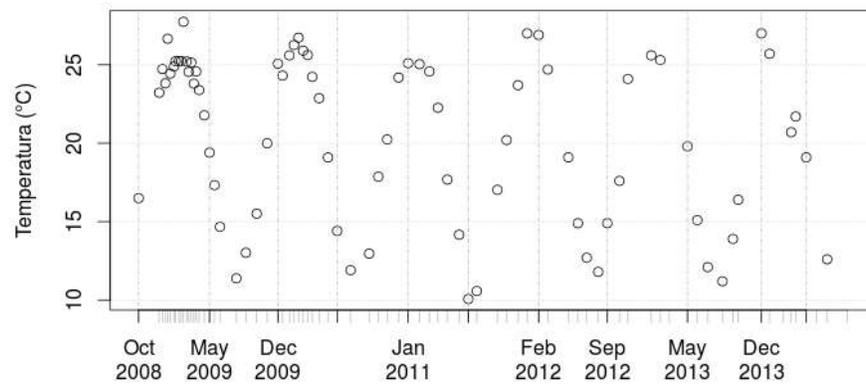


Figura 3.8: Valores de Temperatura superficial del agua medida *in situ*.

En los gráficos de caja de la figura 3.9 no se observan diferencias entre los valores de temperatura *in situ* de años consecutivos. Sin embargo, cuando se grafica el valor medio anual (figura 3.10) se observa una tendencia general decreciente de la temperatura desde el 2008 al 2014.

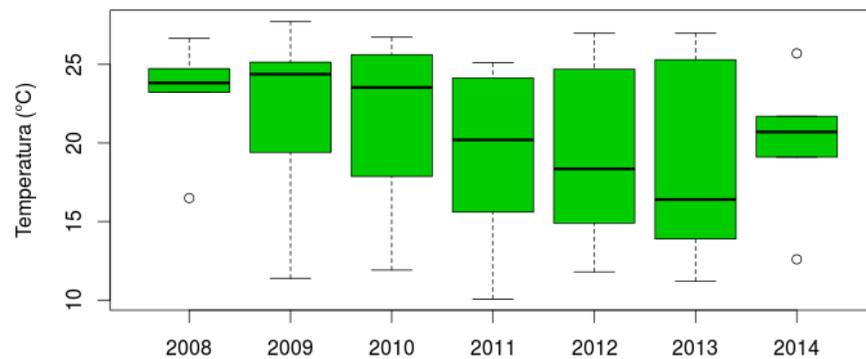


Figura 3.9: Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de Temperatura superficial del agua medida *in situ* por año.

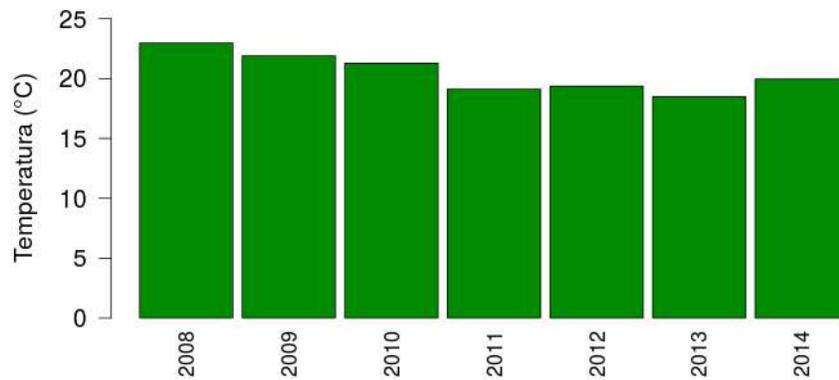


Figura 3.10: Medias anuales de la temperatura superficial del agua medida *in situ*.

Los gráficos de caja de la figura 3.11 representan la distribución de los valores según la estación del año, separándose claramente el verano del invierno, tal como se espera para el clima de la región.

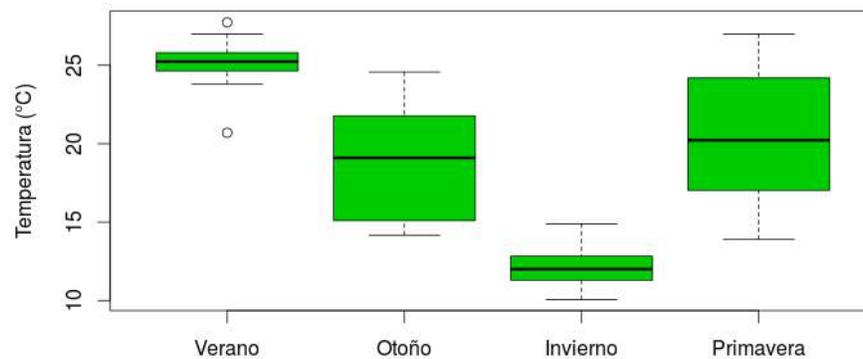


Figura 3.11: Gráficos de caja que representan la distribución de los datos de temperatura por estación del año.

Se realizó un análisis de correlación entre el logaritmo en base 10 de la cl-a medida *in situ* con la temperatura superficial también medida *in situ* para los meses de primavera - verano para el período de estudio. Se puede observar en la figura 3.12 la correlación entre estas variables y el ajuste realizado. Se obtuvo un r cuadrado significativo igual a 0,18. Esto indica que la temperatura solo explica el 18% del comportamiento de la cl-a para este período. La baja correlación positiva obtenida entre estas variables es coherente con lo observado en otros lagos eutróficos [53] y afirma el carácter multifactorial del comportamiento del

sistema.

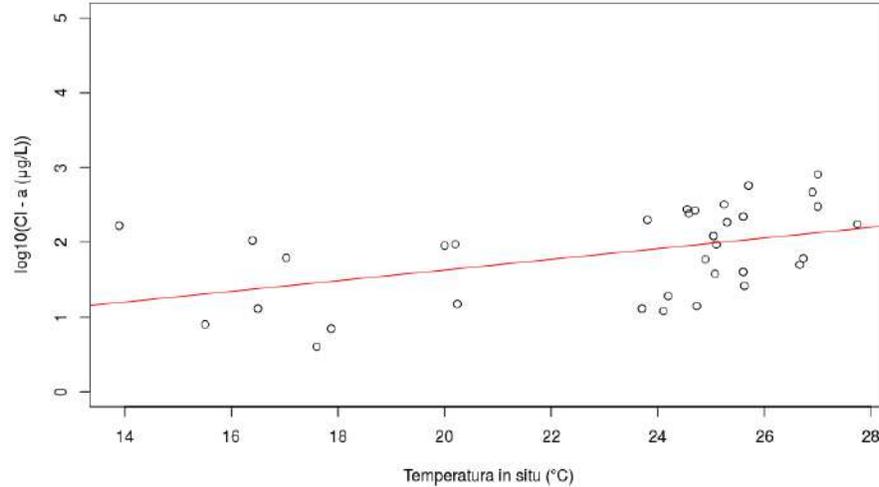


Figura 3.12: Gráfico de correlación entre el logaritmo en base 10 de cl-a con temperatura superficial medidas *in situ*

### 3.2. Datos de origen satelital: sensor MODIS

Los datos satelitales utilizados en este trabajo son productos provenientes del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua, operados por la NASA (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>). El Terra fue lanzado exitosamente el 18 de Diciembre de 1999 y Aqua el 4 de Mayo de 2002. La órbita del satélite Terra es tal que la hora de pasada norte a sur a través del ecuador es por la mañana, mientras que la del satélite Aqua es por la tarde y de sur a norte. Así es que estos dos satélites están constantemente observando toda la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días con el mismo sensor, generando los mismos productos. El Instrumento MODIS provee imágenes en 36 bandas espectrales de alta sensibilidad radiométrica (12 bit), en un rango de longitudes de onda que van desde los  $0.4 \mu\text{m}$  a los  $14.4 \mu\text{m}$ . Dos bandas son tomadas a una resolución espacial nominal de 250 m en el nadir, cinco bandas a 500 m y las remanentes 29 a 1km. El patrón de escaneo a  $\pm 55$  grados en la órbita EOS de 705 km, obtiene un barrido de 2330 km y provee una cobertura global cada uno o dos días. La obtención de esta información satelital diaria y global permite mejorar la comprensión de procesos y dinámicas globales que ocurren en la tierra, océanos y la capa baja de la atmósfera. Es así que juega un papel muy importante en el desarrollo y validación de modelos interactivos de los sistemas de la tierra, capaces de predecir cambios globales. En las tablas de la figura 3.13 y de la figura 3.14 se muestran las especificaciones técnicas del satélite y del sensor respectivamente.

| <b>Especificaciones</b> |  |
|-------------------------|--|
| Órbita                  | 705 km, 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) o 1:30 p.m. nodo ascendente (Aqua), sincronizado al sol, cuasi-polar, circular |
| Tasa de escaneo         | 20.3 rpm, cross track  |
| Pasada                  | 2330 km (track transversal) × 10 km (a lo largo del track en el nadir)   |
| <b>Dimensiones</b>      |  |
| Telescopio              | 17,78 cm diam. Off-axis, afocal (colimado), con diafragma de campo intermedio  |
| Tamaño                  | 1 x 1,6 x 1 m  |
| Peso                    | 228,7 kg   |
| Potencia                | 162,5 W (promedio en simple órbita)  |
| Tasa de data            | 10.6 Mbit/s (picop diario); 6.1 Mbit/s (promedio órbita)   |
| Cuantificación          | 12 bits  |
| Resolución espacial     | 250 m (bandas 1–2) 500 m (bandas 3–7) 1 km (bandas 8–36)   |
| Vida útil               | 6 años   |

Figura 3.13: Especificaciones técnicas de los satélites Aqua y Terra.

| Banda | Longitud de onda (nm) | Resolución (m) | Uso primario  |
|-------|-----------------------|----------------|---|
| 1     | 620–670               | 250            | Tierra/Nubes/Aerosoles                              |
| 2     | 841–876               | 250            | Límites   |
| 3     | 459–479               | 500            | Tierra/Nubes/Aerosoles<br>Propiedades               |
| 4     | 545–565               | 500            |   |
| 5     | 1230–1250             | 500            |   |
| 6     | 1628–1652             | 500            |   |
| 7     | 2105–2155             | 500            |   |
| 8     | 405–420               | 1000           | Color del océano/<br>Fitoplancton/<br>Biogeoquímica |
| 9     | 438–448               | 1000           |   |
| 10    | 483–493               | 1000           |   |
| 11    | 526–536               | 1000           |   |
| 12    | 546–556               | 1000           |   |
| 13    | 662–672               | 1000           |   |
| 14    | 673–683               | 1000           |   |
| 15    | 743–753               | 1000           |   |
| 16    | 862–877               | 1000           | Atmosférico<br>Vapor de agua                        |
| 17    | 890–920               | 1000           |   |
| 18    | 931–941               | 1000           |   |
| 19    | 915–965               | 1000           | Superficie/Nubes<br>T°                              |
| 20    | 3.660–3.840           | 1000           |   |
| 21    | 3.929–3.989           | 1000           |   |
| 22    | 3.929–3.989           | 1000           |   |
| 23    | 4.020–4.080           | 1000           | Atmosférico<br>T°                                   |
| 24    | 4.433–4.498           | 1000           |   |
| 25    | 4.482–4.549           | 1000           |   |
| 26    | 1.360–1.390           | 1000           | Nubes cirrus<br>Vapor de agua                       |
| 27    | 6.535–6.895           | 1000           |   |
| 28    | 7.175–7.475           | 1000           |   |
| 29    | 8.400–8.700           | 1000           | Propiedades de nubes                                |
| 30    | 9.580–9.880           | 1000           | Ozono   |
| 31    | 10.780–11.280         | 1000           | Superficie/Nubes                                    |
| 32    | 11.770–12.270         | 1000           | T°  |
| 33    | 13.185–13.485         | 1000           | Tope de nubes<br>Altitud                            |
| 34    | 13.485–13.785         | 1000           |   |
| 35    | 13.785–14.085         | 1000           |   |
| 36    | 14.085–14.385         | 1000           |   |

Figura 3.14: Especificaciones técnicas del Sensor MODIS.

### Productos MODIS

Los datos MODIS, distribuidos por NASA (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) se dividen de la siguiente forma:

- Productos MODIS de atmósfera
- Productos MODIS de superficie terrestre.
- Productos MODIS de océano
- Productos MODIS de calibración.

Los productos de interés para este trabajo son los de la superficie terrestre, dado que nuestra área de estudio entra en esta categoría. Éstos son distribuidos por el LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) y el USGS (United State Geological Server) (<https://lpdaac.usgs.gov>) y se dividen en tres categorías:

- Variables de Radiación.
- Variables Ecosistémicas.
- Características de cobertura de la superficie terrestre.

Los productos que se utilizan en este trabajo se encuentran dentro de las primeras, Reflectancia de la Superficie de la Tierra por un lado y Emisividad y Temperatura de la Superficie de la Tierra, por el otro. En la tabla de la figura 3.15 y la figura 3.16 se muestran las especificaciones técnicas de estas dos gamas de productos.

| Nombre   | Plataforma | Producto de datos MODIS       | Tipo de Raster | Resolución (m) |
|----------|------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| MOD09A1  | Terra      | Surface Reflectance Bands 1-7 | Tile           | 500m           |
| MOD09CMG | Terra      | Surface Reflectance Bands 1-7 | CMG            | 5600m          |
| MOD09GA  | Terra      | Surface Reflectance Bands 1-7 | Tile           | 500/1000m      |
| MOD09GQ  | Terra      | Surface Reflectance Bands 1-2 | Tile           | 250m           |
| MOD09Q1  | Terra      | Surface Reflectance Bands 1-2 | Tile           | 250m           |
| MYD09A1  | Aqua       | Surface Reflectance Bands 1-7 | Tile           | 500m           |
| MYD09CMG | Aqua       | Surface Reflectance Bands 1-7 | CMG            | 5600m          |
| MYD09GA  | Aqua       | Surface Reflectance Bands 1-7 | Tile           | 500/1000m      |
| MYD09GQ  | Aqua       | Surface Reflectance Bands 1-2 | Tile           | 250m           |
| MYD09Q1  | Aqua       | Surface Reflectance Bands 1-2 | Tile           | 250m           |

Figura 3.15: Especificaciones técnicas de los productos de reflectancia de la superficie de la tierra del Sensor MODIS.

| Nombre   | Plataforma | Producto de datos MODIS               | Tipo de Raster | Resolución (m) |
|----------|------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MOD11A1  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 1000m          |
| MOD11A2  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 1000m          |
| MOD11B1  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 5600m          |
| MOD11C1  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MOD11C2  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MOD11C3  | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MOD11_L2 | Terra      | Land Surface Temperature & Emissivity | Swath          | 1000m          |
| MYD11A1  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 1000m          |
| MYD11A2  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 1000m          |
| MYD11B1  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | Tile           | 5600m          |
| MYD11C1  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MYD11C2  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MYD11C3  | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | CMG            | 5600m          |
| MYD11_L2 | Aqua       | Land Surface Temperature & Emissivity | Swath          | 1000m          |

Figura 3.16: Especificaciones técnicas de los productos de emisividad y temperatura de la superficie de la Tierra del Sensor MODIS.

Particularmente, se seleccionan los productos denominados MOD09GQ y MOD09GA. Estos productos de reflectancia superficial de MODIS proveen un estimado de la reflectancia espectral superficial como si fuera medida al nivel del suelo en ausencia de dispersión atmosférica o absorción. Los datos de bajo nivel son corregidos para gases y aerosoles atmosféricos de forma flexible para generar una base de productos de mayor nivel de procesamiento [54]. MOD09GQ provee las bandas 1 y 2 a 250 m de resolución espacial en un producto grillado diario con proyección Sinusoidal. Los datos científicos provistos por este producto incluyen reflectancia para las bandas 1 y 2, una calificación de calidad, observación de cobertura y un número de observación. Este producto está pensado para usar en conjunto con MOD09GA, donde se guarda importante información de calidad y de observación geométrica. Este último, provee las bandas de 1 a 7 en un producto grillado diario con proyección sinusoidal, que incluye los valores de reflectancia a 500 m de resolución espacial y observaciones y es-

tadísticas de geolocalización a 1km de resolución. Los datos científicos de 500 m provistos por este producto incluyen la reflectancia para las bandas 1 a 7, una calificación de calidad, observaciones de cobertura, número de observación y la información escaneada a 250 m de resolución. La información científica de 1 km de resolución provista, incluye número de observación, estado de calidad, ángulo del sensor, ángulo solar, banderas de geolocalización e indicadores de órbita. Los productos Versión 5 de los mismos están en la etapa 2 de validación, lo que significa que la precisión ha sido evaluada en un gran conjunto de locaciones y períodos de tiempo, distribuidos de forma amplia a través de numerosos puntos de control terrestres ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod09gq](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09gq)).

En la tabla de la figura 3.17, se muestra información técnica sobre el producto MOD09GQ, descrito anteriormente.

| Conjunto de Datos científicos (Capas HDF ) (5)   | Unidades     | Tipo de BIT FILL        | Rango  | Factor de Escala a                       |
|--|--------------|-------------------------|--------|--|
|  |              |                         | Válido | Multiplicar                              |
| <b>num_observations:</b> Número de observaciones dentro del pixel                        | Ninguna      | 8-bit signed integer    | -1     | 0-127<br>na                              |
| <b>Banda 1:</b> Reflectancia de Superficie a 250m (620-670 nm)                           | Reflectancia | 16-bit signed integer   | -28672 | -100-16000<br>0.0001                     |
| <b>Banda 2:</b> Reflectancia de Superficie a 250m (841-876 nm)                           | Reflectancia | 16-bit signed integer   | -28672 | -100-16000<br>0.0001                     |
| Banda de calidad de la reflectancia a 250m   | Bit Field    | 16-bit unsigned integer | 2995   | 0-4096<br>na                             |
| <b>obs_cov:</b> Porcentaje del área de la célula del grillado cubierta en la observación | Porcentaje   | 8-bit signed integer    | -1     | 0-100<br>(0.001)<br>0.009999999776482582 |

Figura 3.17: Especificaciones técnicas del producto MODIS MOD09GQ.

### Algoritmo de corrección atmosférica: reflectancia espectral

El uso de los datos MODIS para generar productos sobre información de la superficie terrestre requiere que la señal a tope de la atmósfera sea convertida a reflectancia de superficie. El proceso necesario para esa conversión se llama corrección atmosférica. En este proceso, los datos MODIS de radiancia nivel 1B son corregidos por los efectos atmosféricos para generar el producto de reflectancia de superficie [55]. Según [55], esta corrección requiere información que describa los componentes variables que influyen en la señal al tope de la atmósfera (figura 3.18) y un adecuado modelo de la dispersión y absorción atmosférica.

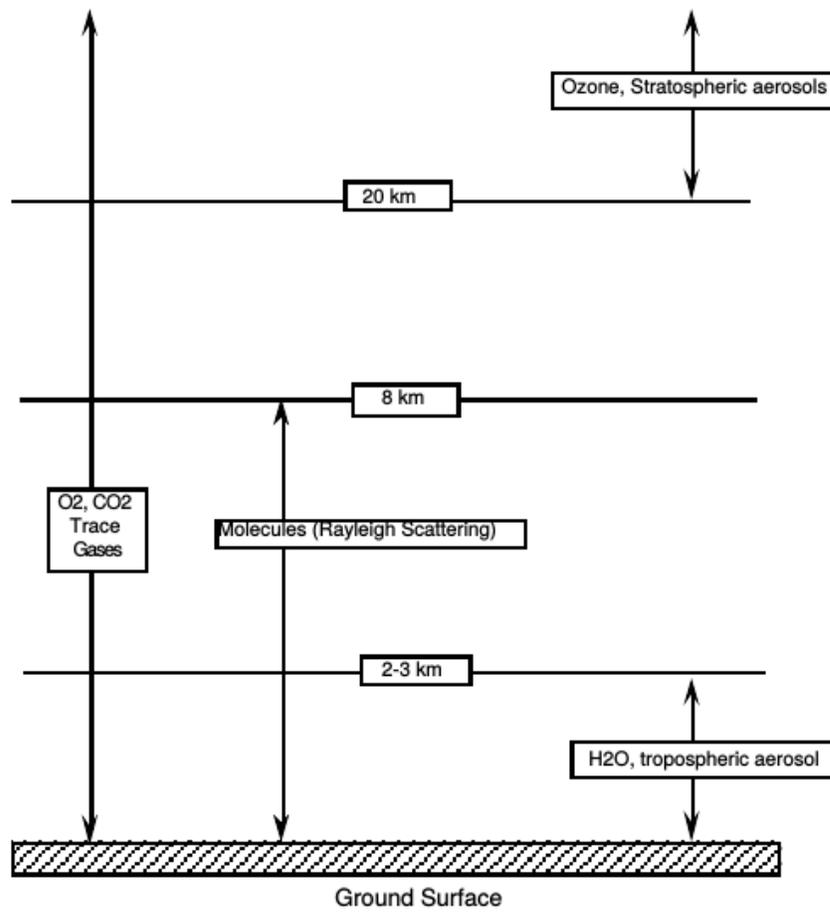


Figura 3.18: Descripción de los componentes atmosféricos que afectan la señal del sensor remoto en el rango espectral de estudio [55].

La información que se usa como entrada para describir los componentes que afectan la señal, durante la corrección atmosférica, proviene de los productos atmosféricos de MODIS (MOD04: aerosoles, MOD05: vapor de agua, MOD07 : ozono, MOD35 : máscara de nubes) así como también de datos auxiliares (Modelos de Elevación Digital y Presión atmosférica) (figura 3.19).

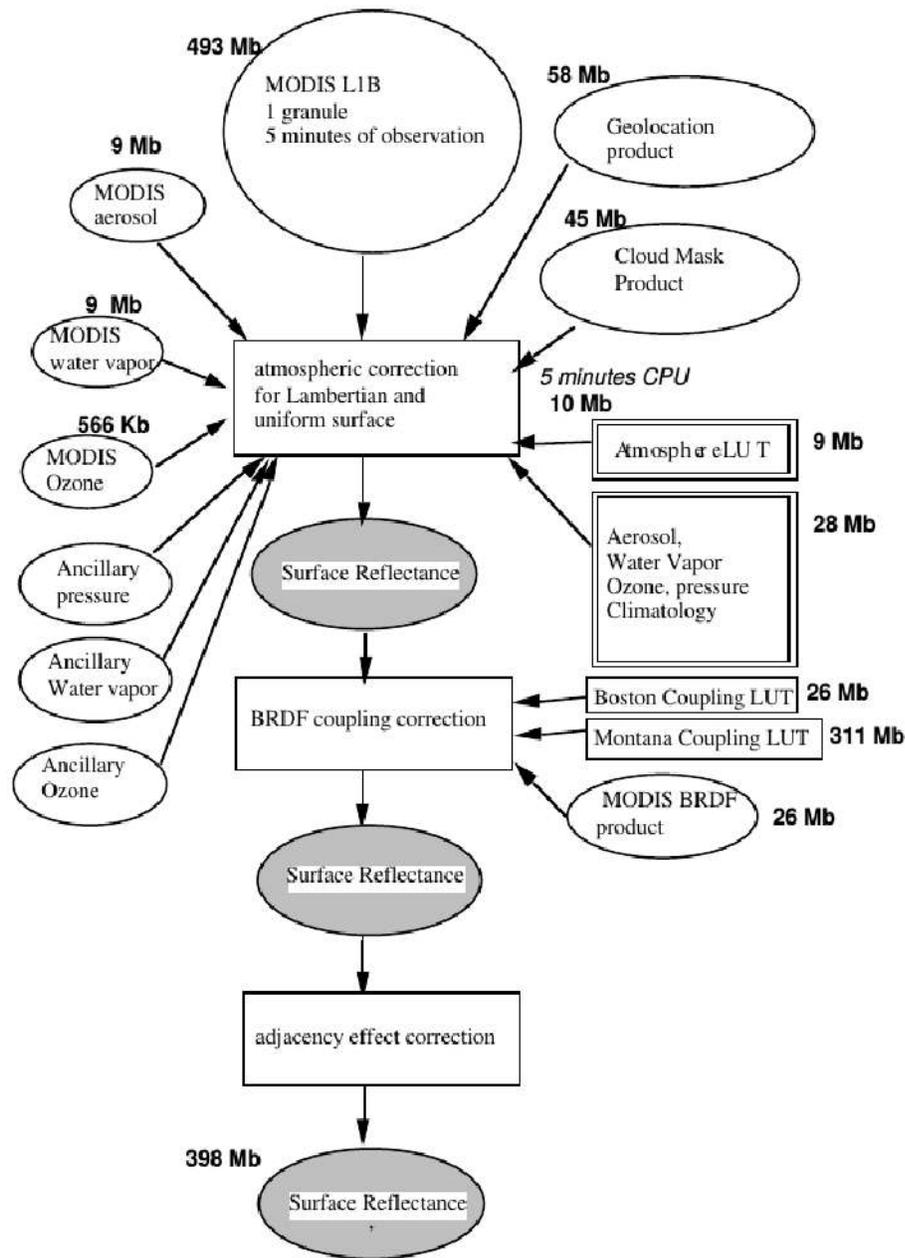


Figura 3.19: Diagrama de flujo del proceso de corrección atmosférica. Los tiempos que aparecen están dados para un procesador de 195 Mflops [55].

El método de corrección que se aplica a estos productos fue diseñado para características de la tierra. Pero este método tiene la ventaja de usar las bandas pertenecientes a la longitud de onda infrarroja corta (SWIR), donde la asunción del píxel negro es generalmente válida en las superficies de agua, lo cual mejoraría la corrección en estas áreas [56]. Ha sido mostrado por Wang y Shi en [57] que este esquema de corrección atmosférica basado en la banda SWIR, recupera en forma precisa la radiancia que reflejan las aguas ópticamente complejas.

### Temperatura de la superficie

El producto utilizado para detectar temperatura en el embalse es el producto diario de temperatura superficial de la tierra de MODIS, denominado MOD11A1 ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod11a1](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod11a1)). El mismo es de nivel 3 de procesamiento y es de 1km de resolución espacial. Está dividido en tiras con proyección Sinusoidal. Un tile contiene 1200 x 1200 celdas divididas en 1200 filas y 1200 columnas. El tamaño exacto de la celda a 1 km de resolución espacial es de 0,928 km por 0,928 km. Este producto es construido con los resultados del producto denominado MOD11\_L2. Se procesa el producto de un día, a través del mapeo de los datos científicos de todos los píxeles del mismo sobre grillas en la proyección sinusoidal y promediando el valor de temperatura superficial de los píxeles con superposición. El producto MOD11\_L2 es generado usando el producto de la radiancia del sensor MODIS (MOD021KM), el producto de geolocalización (MOD03), el producto de perfiles de temperatura atmosférica y agua (MOD07\_L2), el producto de máscara de nubes (MOD35\_L2), el producto trimestral de cobertura del suelo (MOD12Q1) y el producto de nieve (MOD10\_L2). El archivo de salida contiene los datos científicos de temperatura de superficie de la tierra (LST por sus siglas en inglés), las garantías de calidad (QA), los errores en el LST, las bandas 31 y 32 de emisividad, los ángulos de visión zenital y el tiempo, latitudes y longitudes, los atributos locales y globales. Este producto de LST es generado por el algoritmo de la ventana de división generalizada [30]. Este algoritmo fue analizado en diversas coberturas terrestres, incluyendo superficies de agua en lagos.

Cuando la latitud aumenta por encima de los 30°, puede haber múltiples observaciones MODIS en condiciones de cielo despejado. En la versión 5 del producto MOD11A1, los valores de LST en todas las células son de una única observación seleccionando aquel que tenga un menor ángulo zenital de visión o a mayores ángulos pero siendo su valor de LST mayor a por lo menos 2 °K [58].

El valor de LST en un barrido de MODIS esta limitado a píxeles que:

- tengan datos de radiancia nominal nivel 1B en las bandas 31 y 32
- estén en tierra o aguas internas
- estén en condiciones de cielo despejado a un nivel de confianza (definido en MOD35) mayor o igual a 95 % sobre tierra y menor o igual a 2000m, o mayor o igual a 66 % sobre tierra y mayor a 2000m y sobre lagos, a un nivel de confianza mayor o igual a 66 %

Los datos de entrada al algoritmo de LST están listados en la tabla de la figura 3.20.

| SDS Name         | Long Name  | Number Type | Unit | Valid Range | Fill Value | scale factor | add offset |
|------------------|--|-------------|------|-------------|------------|--------------|------------|
| LST_Day_1km      | Daily daytime 1km grid Land-surface Temperature                      | uint16      | K    | 7500-65535  | 0          | 0.02         | 0.0        |
| QC_Day           | Quality control for daytime LST and emissivity                       | uint8       | none | 0-255       | 0          | NA           | NA         |
| Day_view_time    | (local solar) Time of daytime Land-surface Temperature observation   | uint8       | hrs  | 0-240       | 0          | 0.1          | 0          |
| Day_view_angle   | View zenith angle of daytime Land-surface Temperature                | uint8       | deg  | 0-130       | 255        | 1.0          | -65.0      |
| LST_Night_1km    | Daily nighttime 1km grid Land-surface Temperature                    | uint16      | K    | 7500-65535  | 0          | 0.02         | 0.0        |
| QC_Night         | Quality control for nighttime LST and emissivity                     | uint8       | none | 0-255       | 0          | NA           | NA         |
| Night_view_time  | (local solar) Time of nighttime Land-surface Temperature observation | uint8       | hrs  | 0-240       | 0          | 0.1          | 0          |
| Night_view_angle | View zenith angle of nighttime Land-surface Temperature              | uint8       | deg  | 0-130       | 255        | 1.0          | -65.0      |
| Emis_31          | Band 31 emissivity   | uint8       | none | 1-255       | 0          | 0.002        | 0.49       |
| Emis_32          | Band 32 emissivity   | uint8       | none | 1-255       | 0          | 0.002        | 0.49       |
| Clear_day_cov    | day clear-sky coverage   | uint16      | none | 0-65535     | 0          | 0.0005       | 0.         |
| Clear_night_cov  | night clear-sky coverage   | uint16      | none | 0-65535     | 0          | 0.0005       | 0.         |

Figura 3.20: Datos MODIS de entrada al algoritmo MODIS LST para el producto MOD11\_L2 [59].

Las nubes son enmascaradas con el producto de MODIS MOD35\_L2. La emisividad en las bandas 31 y 32 es estimada por el método basado en la clasificación según tipos de cobertura del suelo en el pixel determinados por el producto trimestral de cobertura del suelo (MOD12Q1) y el diario de cobertura de nieve (MOD10\_L2) [60].

Observando la figura 3.21, podemos identificar las épocas del año en que hay menor cantidad de datos, debido en casi todos los casos a presencia de nubes. El total de fechas faltantes desde 2001 a 2014 es de 2287 días, lo que nos deja un total de 2866 fechas sin nubes para utilizar en el análisis. Los meses del año en que más fechas faltantes hay de 2001 a 2014 son Mayo (218 días) y Junio (217 días).

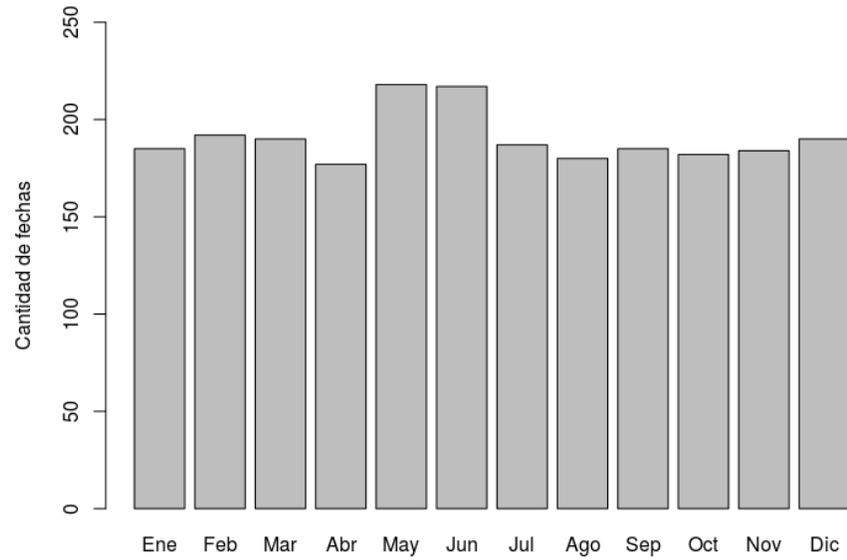


Figura 3.21: Distribucion de datos faltantes por meses para todo el período de tiempo analizado.

A partir de este análisis, se estima que por año se pierden alrededor del 44 % de los datos pero distribuidos prácticamente de manera uniforme a lo largo del año, lo que garantiza un muestreo representativo de la variabilidad anual.

## Capítulo 4

# Modelado Semiempírico de Temperatura y Clorofila-a a partir de datos Satelitales y Mediciones *in situ*

Para lograr una mejor comprensión sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y su respuesta frente a las perturbaciones (disturbios climáticos, erosión y contaminación, por ejemplo), es necesaria la obtención constante y regular de información. El conocimiento científico se encuentra con considerables obstáculos usando sólo muestreos *in situ*, como la adquisición rutinaria de observaciones de alta calidad y homogéneamente distribuidas. Estos se sortean gracias a la información de origen satelital que proveen observaciones regulares y sinópticas. Pero para que ésta pueda ser atribuida directamente a parámetros geofísicos y biológicos, debe encontrarse primero la relación radiométrica y estadística con datos medidos *in situ*. A partir de esta relación empírica encontrada, es posible luego estudiar estos parámetros con datos satelitales de forma independiente. Por esta razón, en este trabajo se generaron modelos semiempíricos de regresión lineal simple obtenidos a partir de los datos satelitales y mediciones *in situ*.

Por un lado, se trabajó con la concentración de clorofila-a, tomada *in situ* en simultáneo con el paso del sensor. Los datos de reflectancia del pixel central de las bandas seleccionadas fueron tabulados para cada fecha de muestreo y apareados con datos de campo de concentración de clorofila-a con el programa R [61]. Las fechas de muestreo en las que había ocurrencia de nubes, fueron desechadas. Para esto, se utilizó el producto MOD11C1 (LST), el cual atribuye valor 0 en los pixeles con nubes, que identifica con un algoritmo descrito en el manual de usuario [59]. Para aquellas fechas donde el píxel utilizado del producto mencionado anteriormente presentó valor 0, se le asignó un valor nulo (NA). A partir de la tabla depurada, se realizaron distintas operaciones de álgebra de bandas (logaritmos, índices y razones) para luego realizar el análisis bivariado y estadístico de los datos.

Se automatizó un procedimiento en el software GRASS 7.1 [62] para extraer datos de estas bandas correspondientes al pixel central del Embalse, debido a que es el único que no presenta perturbación en su reflectancia por presencia de zonas costeras. Por un lado, se

trabajaron las imágenes MOD11C1 (Producto de Temperatura) y por el otro las MOD09GQ (Reflectancia).

Luego, estos datos fueron trabajados con el software R [61]. En este entorno, se configuraron tablas con datos de las variables medidas a campo de interés (CI-a y Temperatura) y medidas desde satélite (Temperatura y Reflectancia) por fecha de muestreo. Posteriormente, estas tablas fueron utilizadas para cruzar los datos y encontrar correlaciones entre las variables.

## 4.1. Temperatura

A través, de una función escrita en R, se estudió la correlación entre la variable temperatura medida *in situ* y el producto MOD11C1. Usando la herramienta de modelación lineal de R, primero se generó un modelo con todos los datos. El mismo dio como resultado un R cuadrado de 0.717 (figura 4.1).

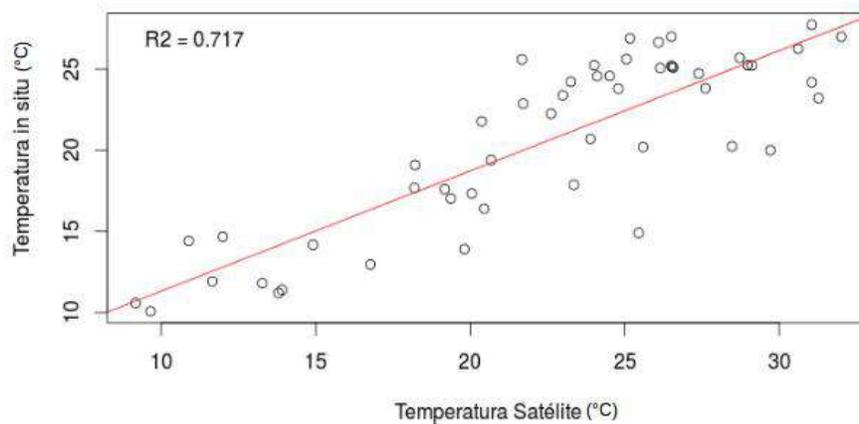


Figura 4.1: Primer resultado del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos *in situ* de temperatura.

Luego, se realizó un diagnóstico del mismo (figura 4.2), para ver los pares de datos con más error, los cuales se extrajeron para volver a generar un nuevo modelo lineal.

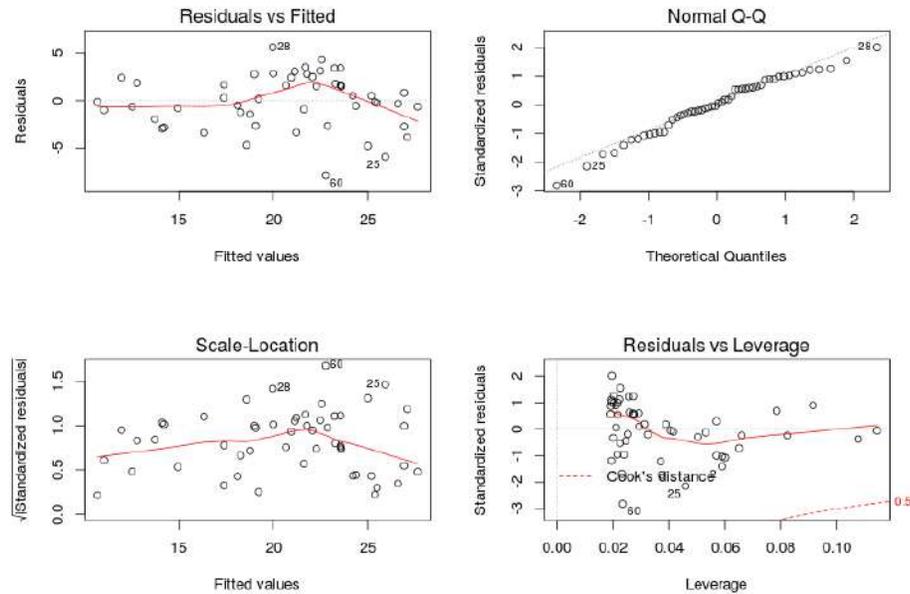


Figura 4.2: Gráficos de diagnóstico del primer resultado del modelo.

El gráfico superior izquierdo de la figura 4.2, muestra los errores residuales de los datos en función de los valores modelados. En este caso la dispersión parece aleatoria ya que no se observa ninguna tendencia. Se observa que los puntos con mayor error corresponden a los datos 28, 25 y 60.

El gráfico superior derecho de la figura 4.2, muestra las calificaciones normales de los errores estandarizados, es decir, normalizados tal que su varianza sea unitaria, en función de los valores teóricos. Esta prueba permite verificar el supuesto de normalidad de los errores. Se observa un buen acuerdo con la línea teórica a excepción de los puntos 28, 25 y 60.

El gráfico inferior izquierdo de la figura 4.2, presenta la raíz cuadrada del valor absoluto de los residuales estandarizados en función de los valores predichos por el modelo. Este gráfico reduce el sesgo de la distribución y permite la detección de alguna tendencia en la dispersión. Se puede verificar la aleatoriedad de los errores y nuevamente los puntos 28, 25 y 60 son los más alejados del comportamiento teórico.

El gráfico inferior derecho de la figura 4.2, muestra en el eje horizontal el número que identifica el dato y en el eje vertical la distancia de Cook. La distancia de Cook es una medida de la influencia de las observaciones en los valores de los parámetros de regresión. Los datos que mayor distancia de Cook presentan son los 40, 25 y 60.

Sobre la base de este diagnóstico se decidió separar tres pares de datos considerados outliers, correspondientes a la posición 28, 25, y 60. Al identificar estos tres pares de puntos con mayor error con respecto al modelo, se los extrajo y se volvió a general el modelo lineal, obteniendo un R cuadrado de 0.8 (figura 4.3).

CAPÍTULO 4. MODELADO SEMIEMPÍRICO DE TEMPERATURA Y CLOROFILA-A A PARTIR DE DATOS SATELITALES Y MEDICIONES *IN SITU*

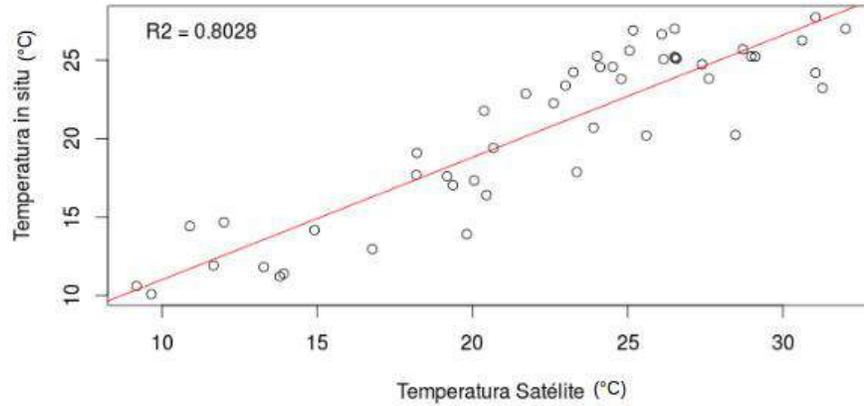


Figura 4.3: Segundo resultado del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos *in situ* de temperatura.

Nuevamente se hizo un diagnóstico del modelo (figura 4.4), obteniendo lo siguiente:

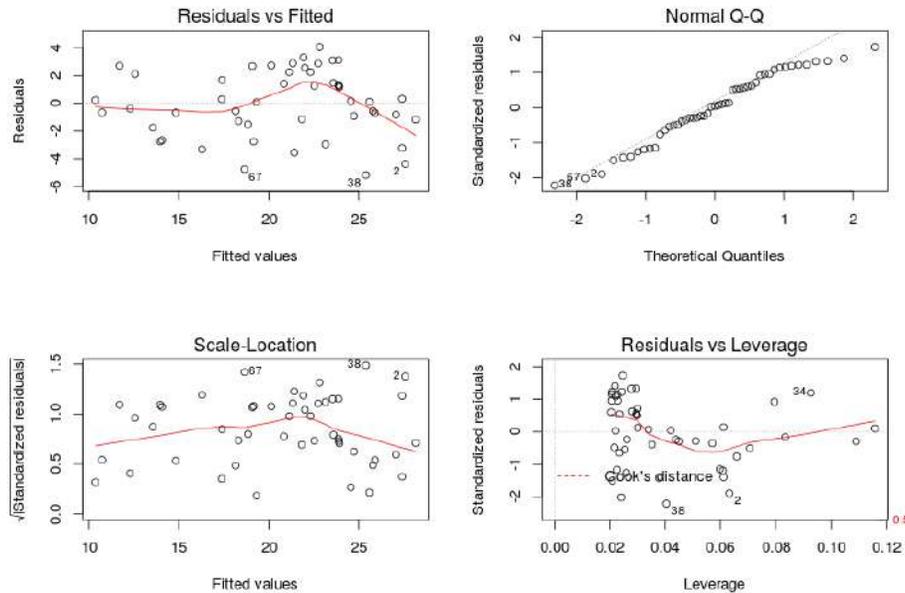


Figura 4.4: Gráficos de diagnóstico del segundo resultado del modelo.

En estos gráficos, podemos observar según las mismas pruebas estadísticas explicadas anteriormente que los datos con mayor error son los 67, 38 y 2. Por lo que, nuevamente se extraen estos puntos y se vuelve a realizar el modelo lineal, obteniendo un R cuadrado de 0.85.

Con este ajuste logrado, se extrajo una muestra aleatoria del 15% del conjunto de los

CAPÍTULO 4. MODELADO SEMIEMPÍRICO DE TEMPERATURA Y CLOROFILA-A A PARTIR DE DATOS SATELITALES Y MEDICIONES *IN SITU*

---

datos, para evaluar luego el desempeño del modelo, que se volvió a generar sin estos puntos, obteniendo un R cuadrado de 0.85 (figura 4.5), con un error cuadrático medio de 2.04 °C.

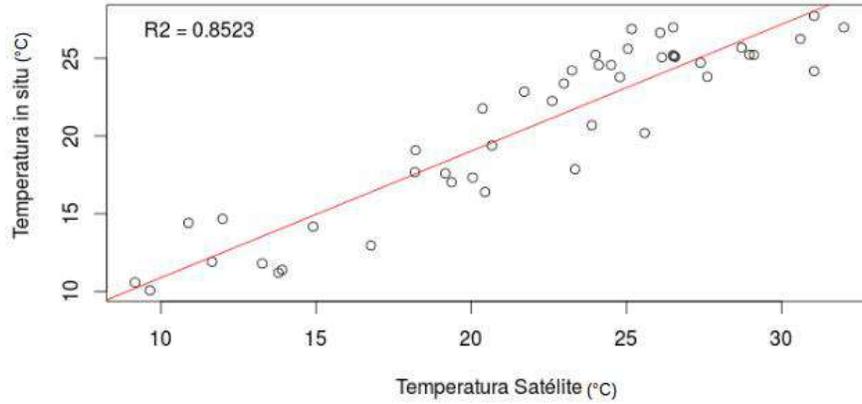


Figura 4.5: Resultado final del modelado semiempírico de los datos satelitales con los datos medidos *in situ* de temperatura.

Con los coeficientes del modelo, se calculó la temperatura modelada a partir del producto satelital MODIS, obteniendo los resultados mostrados en la tabla de la figura 4.6.

| <b>Temperatura <i>in situ</i></b> | <b>Temperatura Modelo</b> |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 12.70                             | NA                        |
| 25.07                             | 24.08                     |
| 15.10                             | NA                        |
| 20.70                             | 22.27                     |
| 24.10                             | NA                        |
| 17.33                             | 19.21                     |
| 22.26                             | 21.25                     |
| NA                                | NA                        |
| NA                                | 21.06                     |
| 11.20                             | 14.2                      |

Figura 4.6: Resultados obtenidos para la muestra aleatoria del 15% del conjunto de los datos. Temperatura modelada (°C) comparada con temperatura medida *in situ* (°C). NA representa datos faltantes.

Se generó un modelo lineal para la muestra control de valores *in situ* y los modelados, obteniendo un R cuadrado de 0.94 (figura 4.7).

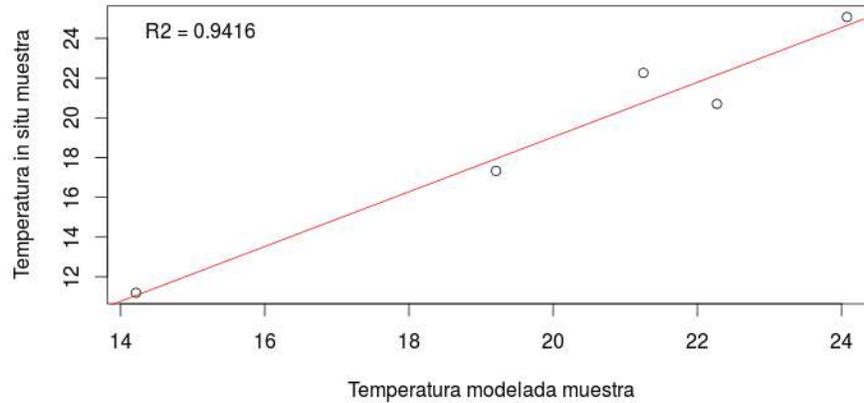


Figura 4.7: Modelo lineal para los valores de la muestra control.

Por lo que, se puede afirmar que el modelo ajusta satisfactoriamente a los datos medidos *in situ* y es apto para calcular la temperatura del agua del embalse para toda la serie.

## 4.2. Clorofila-a

Para encontrar un modelo de Clorofila-a satelital, se utilizaron las bandas de reflectancia del producto MOD09GQ y MOD09GA, explicadas en el capítulo 3. Se realizaron distintas operaciones de matemática de bandas, para luego estudiar las correlaciones de Pearson de los resultados con el valor de clorofila-a medido *in situ*, tanto el de concentración como el del logaritmo de la misma.

Específicamente, se calcularon por un lado las correlaciones entre las bandas uno a siete de los productos mencionados, las mismas correspondientes a la reflectancia en superficie en diferentes intervalos de longitud de onda (tabla de la figura 4.8), así como también con sus logaritmos en base 10 (tabla de la figura 4.10).

Por otro lado, se calculó la correlación de esta variable medida *in situ* con los índices de verdor NDVI [63] y EVI [64], calculados a partir de las bandas uno y dos del producto MOD09GQ, las cuales corresponden a los intervalos de longitud de onda pertenecientes a la porción del espectro electromagnético del visible-rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. También con estas bandas, se computó la razón entre ellas y se calculó la correlación correspondiente (tabla de la figura 4.10).

|                             | Cl-a | Log(Cl-a) |
|-----------------------------|------|-----------|
| <b>B1 (620 – 670 nm)</b>    | -0.1 | 0.096     |
| <b>B2 (841 – 876 nm)</b>    | 0.16 | 0.373     |
| <b>B3 (459 - 479 nm)</b>    | -41  | 130       |
| <b>B4 (545 – 565 nm)</b>    | -62  | 164       |
| <b>B5 ( 1230 – 1250 nm)</b> | 52   | 0.295*    |
| <b>B6 (1628 – 1652 nm)</b>  | 22   | 289       |
| <b>B7 ( 2105 – 2155 nm)</b> | -14  | 251       |

Figura 4.8: Correlaciones de Pearson entre las bandas de los productos MODIS MOD09GQ y MOD09GA y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01.

|                | Cl-a | Log(Cl-a) |
|----------------|------|-----------|
| <b>Log(B1)</b> | -129 | 161       |
| <b>Log(B2)</b> | 234  | 0.509**   |
| <b>Log(B3)</b> | -144 | 98        |
| <b>Log(B4)</b> | -85  | 146       |
| <b>Log(B5)</b> | 147  | 0.420**   |
| <b>Log(B6)</b> | 73   | 0.344*    |
| <b>Log(B7)</b> | 70   | 274       |

Figura 4.9: Correlaciones de Pearson entre los logaritmos de las bandas de los productos MODIS MOD09GQ y MOD09GA y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01.

|              | Cl-a     | Log(Cl-a) |
|--------------|----------|-----------|
| <b>NDVI</b>  | 0.579**  | 0.649**   |
| <b>EVI</b>   | 0.417**  | 0.609**   |
| <b>B1/B2</b> | -0.522** | -0.690**  |
| <b>B2/B1</b> | 0.505**  | 0.444**   |

Figura 4.10: Correlaciones de Pearson entre los índices y razones de las bandas 1 y 2 del producto MODIS MOD09GQ y la Cl-a. Una estrella indica un valor de significancia p menor a 0.05, mientras que dos estrellas un valor menor a 0.01.

A partir de estos resultados, se generaron modelos lineares con todas las combinaciones posibles de variables con correlaciones de Pearson menor a 0.01 y se estudiaron sus ajustes.

Por otro lado, antes de elegir el modelo que mejor ajustara de los calculados anteriormente, se prosiguió a investigar la relación entre los datos de campo de Clorofila-a y 2 algoritmos extraídos de bibliografía que generaron interés por haberse usado con éxito en trabajos con similares objetivos que el presente. Primero, se trabajó con el MODIS Floating Algae Index (FAI) (Fórmula 1)[65].

$$\begin{aligned} \text{FAI} &= R_{\text{rc,NIR}} - R'_{\text{rc,NIR}}, \\ R'_{\text{rc,NIR}} &= R_{\text{rc,RED}} + (R_{\text{rc,SWIR}} - R_{\text{rc,RED}}) \times (\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{RED}}) / (\lambda_{\text{SWIR}} - \lambda_{\text{RED}}). \end{aligned}$$

Figura 4.11: MODIS Floating Algae Index (FAI)[65]

El mismo es un índice de color de océano desarrollado y usado para detectar algas flotantes en ambientes de océano abierto usando datos de mediana resolución del instrumento MODIS. Está definido como la diferencia entre la reflectancia a 859 nm y una base lineal entre la banda roja (645 nm) y la banda infrarroja de onda corta (1240 o 1640 nm).

Se prueba su correlación, a pesar de ser un índice para océano, ya que las correlaciones de pearson significativas encontradas con la banda roja e infrarroja, podrían indicar una posible correlación significativa con este índice. A pesar de esto, la correlación entre los datos de clorofila medidos *in situ* y el índice no resultó significativa, por lo que se descarta su uso.

Luego, se buscó siguiendo la metodología de Gitelson et al. [66], encontrar la mejor función lineal entre la clorofila-a y el modelo de dos bandas allí explicado (Fórmula 2).

$$\begin{aligned} \text{chl}a &= -(16.2 \pm 1.8) + (136.3 \pm 3.2) \\ &\times [R_{\text{rs}}^{-1}(662 - 672) \times R_{\text{rs}}(743 - 753)] \end{aligned}$$

Figura 4.12: Modelo de dos bandas [66]

El mismo deriva de un modelo de 3 bandas, originalmente desarrollado para estimar contenidos de pigmentos en vegetación terrestre, el cual Dall'Ólmo et al. [67] toma y provee evidencia de que puede también ser usado para evaluar clorofila-a en aguas de tipo I o II .

Se utiliza la misma relación planteada por Gitelson [66], pero ajustando los parámetros al embalse estudiado en este trabajo.

Luego de analizar los ajustes y resultados de cada modelo, se eligió por su mayor R cuadrado, un modelo lineal que relaciona el logaritmo en base 10 de clorofila-a con el cociente entre la Banda 1 (620 - 670 nm) y la Banda 2 (841 - 876 nm), el cual presenta un R cuadrado de 0.46 (figura 4.13).

CAPÍTULO 4. MODELADO SEMIEMPÍRICO DE TEMPERATURA Y CLOROFILA-A A PARTIR DE DATOS SATELITALES Y MEDICIONES *IN SITU*

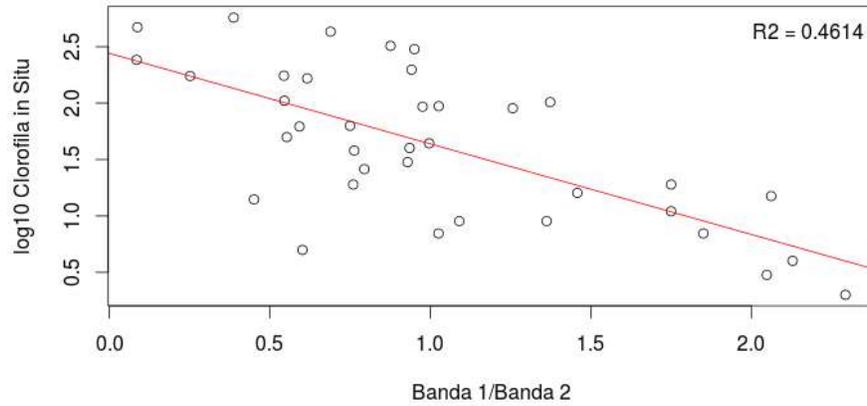


Figura 4.13: Primer resultado del modelo semiempírico encontrado con mejor ajuste para los datos satelitales y los datos medidos *in situ* de Cl-a.

Se realizó un diagnóstico del modelo, obteniendo los siguientes resultados (figura 4.14):

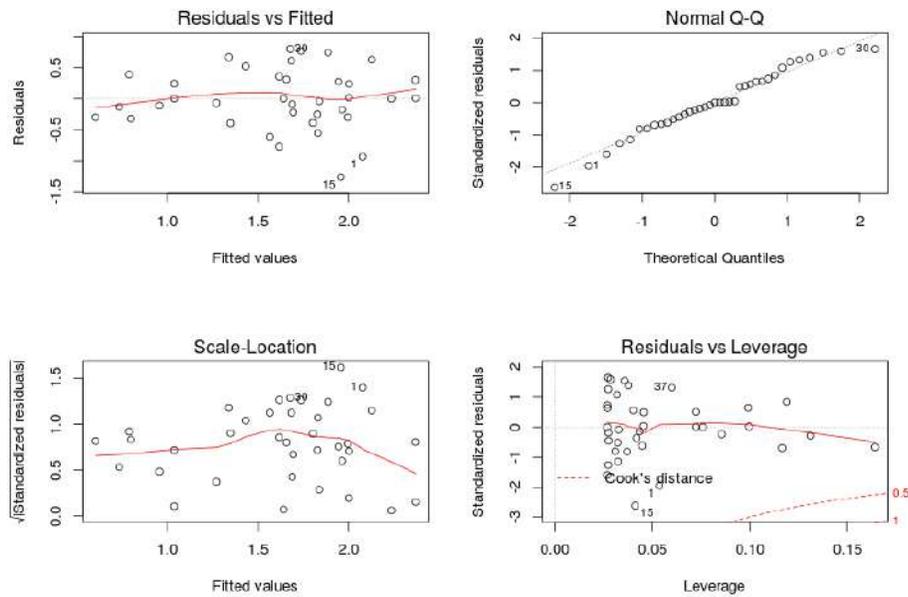


Figura 4.14: Diagnóstico del modelo.

Al observarse que los datos 30,15 y 1 son los identificados con mayor error, se extrajeron del conjunto de los datos y se volvió a generar el modelo, obteniendo un R cuadrado de 0.63 (figura 4.15).

CAPÍTULO 4. MODELADO SEMIEMPÍRICO DE TEMPERATURA Y CLOROFILA-A A PARTIR DE DATOS SATELITALES Y MEDICIONES *IN SITU*

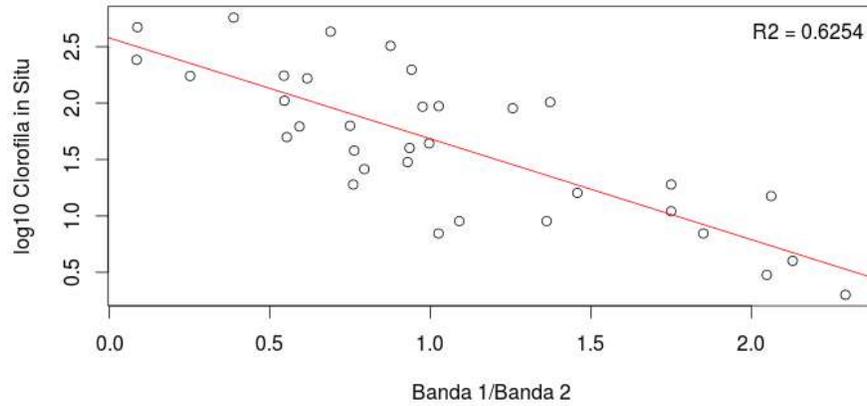


Figura 4.15: Segundo resultado del modelo semiempírico encontrado con mejor ajuste para los datos satelitales y los datos medidos *in situ* de Cl-a.

Nuevamente, se realizó un diagnóstico del modelo, obteniéndose que los datos 31,6 y 2 son los que presentaban mayor error (figura 4.16), por lo que se extrajeron para generar nuevamente el modelo, obteniendo un R cuadrado de 0.69 (figura 4.17).

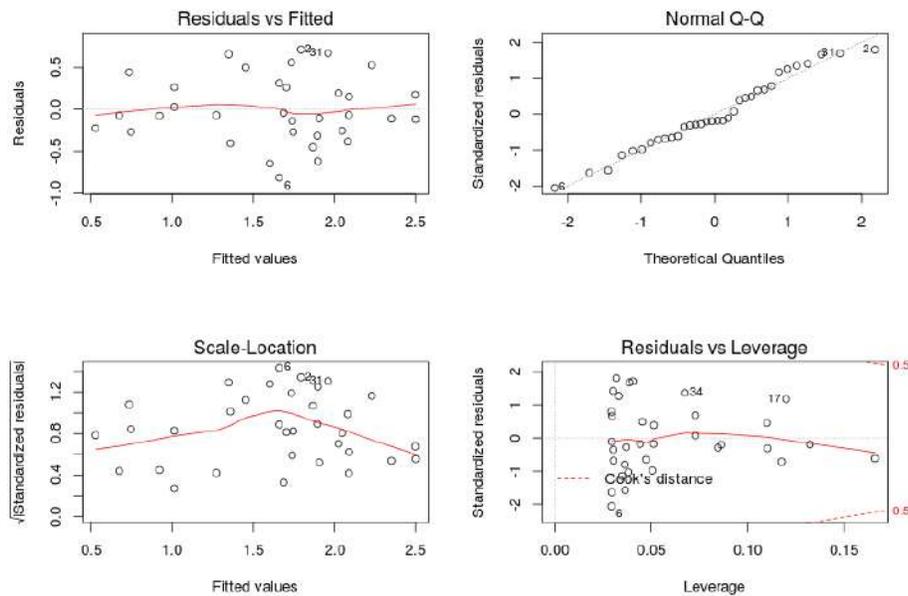


Figura 4.16: Diagnóstico del modelo.

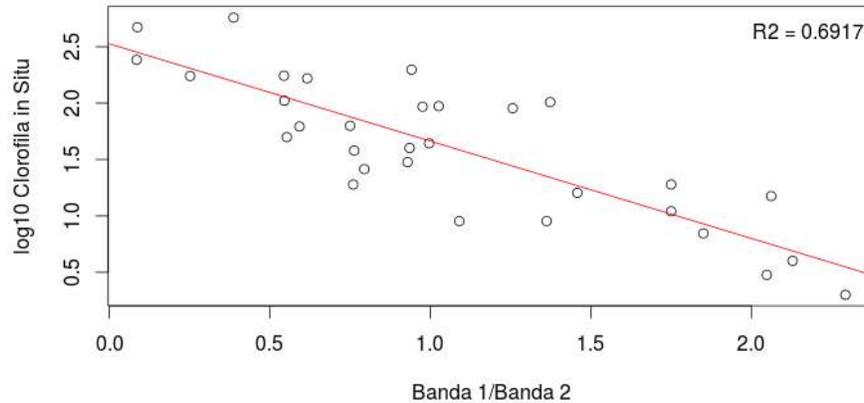


Figura 4.17: Resultado final del modelado semiempírico elegido para los datos satelitales y los datos medidos *in situ* de Cl-a.

Particularmente, el algoritmo obtenido en este trabajo relaciona a partir de una proporción las bandas pertenecientes al infrarrojo cercano y al rojo del visible. Técnicas similares han sido aplicadas para el estudio de la clorofila-a en aguas internas eutrofizadas. En [66], se plantea un modelo semi analítico para la estimación remota de Clorofila-a y en el mismo se utilizan estas longitudes de onda. En [68], se analiza la influencia de la clorofila y la materia orgánica coloreada disuelta (CDOM) en el espectro de reflectancia de los lagos y las implicancias para medir propiedades de los mismos a través del sensado remoto. Se concluye en el mismo que las proporciones de reflectancias con 2 longitudes de onda, parecen proveer la mejor estimación de Clorofila-a. Por otro lado, en Gitelson. 1992 [69] se expone que la información de clorofila en las porciones del espectro de reflectancia pertenecientes al rojo e infrarrojo (660-720 nm) no se ve afectada por otros pigmentos vegetales. Además, en [70] se realiza una revisión que describe el actual estado de la ciencia sobre el sensado remoto y radiometría del color de aguas costeras e internas y se remarcan asuntos sin resolver en la temática. Se destaca que para aguas con moderadas a altas concentraciones de Clorofila-a ( $10 \text{ mg/m}^3$ ), son preferidas las reflectancias en el rojo e infrarrojo cercano para la estimación de la misma y se citan [69],[25],[71] que utilizan estas longitudes de onda para la estimación de Clorofila-a en ecosistemas acuáticos eutrofizados. También se ha utilizado la misma porción del espectro electromagnético, para estudios de casos de concentraciones densas de cianobacterias. En este caso cita a [72] y [73], que utilizan las bandas del satélite MERIS correspondientes al rojo e infrarrojo en el espectro electromagnético.

## Capítulo 5

# Generación y análisis de las series temporales de Cl-a y Temperatura

### 5.1. Serie temporal de Cl-a

A partir del algoritmo desarrollado y presentado en el capítulo anterior, se obtuvo un valor de concentración de clorofila-a en el agua del embalse para cada día sin nubes desde el año 2001 hasta el año 2014. Para ello, se aplicó un protocolo de descarga automático de todas las imágenes MODIS MOD09GQ correspondientes a la zona geográfica de interés, en el lapso de tiempo de estudio, obteniendo una imagen diaria desde el 1 de Enero de 2001 al 31 de diciembre de 2014.

Las imágenes fueron procesadas con el software GRASS 7.0. Se ingresaron al programa de forma automática y se extrajo de cada una de las bandas el valor del píxel perteneciente a las coordenadas del punto central de embalse. Con estos valores, se confeccionaron tablas ordenadas por las fechas de obtención de las imágenes. Luego, se ingresaron estas tablas al software R y se calculó a partir de estos valores de reflectancia el valor estimado de clorofila-a, con el algoritmo presentado en el capítulo anterior. Las fechas en las que había ocurrencia de nubes fueron desechadas y se le asignó un valor no válido (NA). Luego de este proceso se obtuvieron 2867 valores de reflectancia para cada banda, sumando un total de 5734 datos satelitales.

La figura 5.1 presenta los resultados obtenidos para el logaritmo de la clorofila-a a partir del modelo, mientras que la figura 5.2 muestra la concentración de clorofila-a. En ambas figuras se observa un claro comportamiento periódico en el que prevalece la frecuencia anual, con picos en los meses de verano y valles en los de invierno, tal como se espera para procesos biológicos termodependientes.

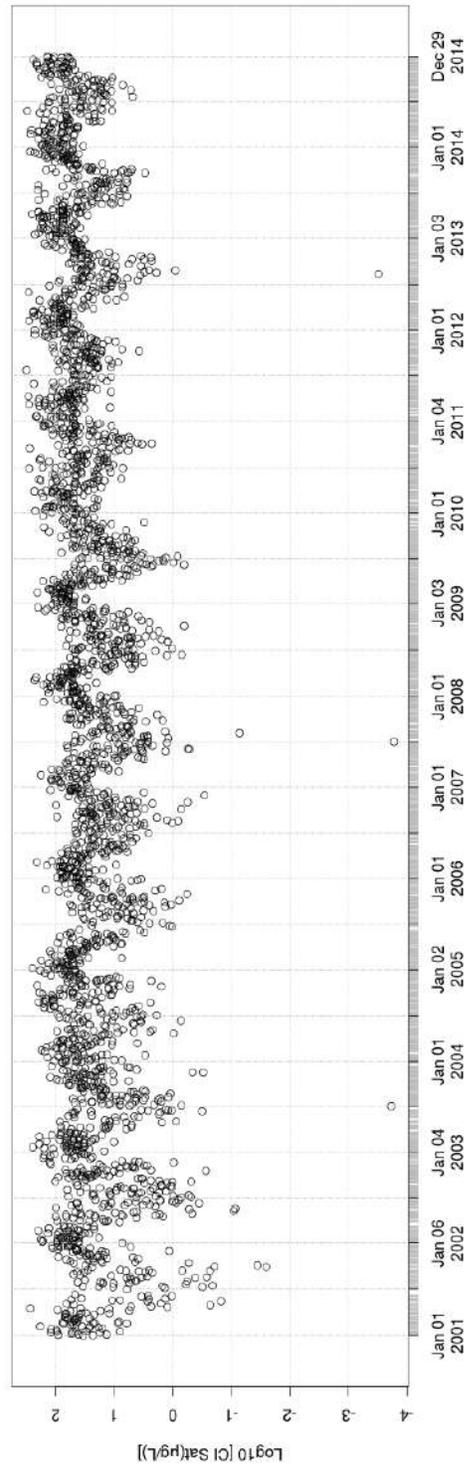


Figura 5.1: Serie temporal 2001-2014 del logaritmo en base 10 de la clorofila satelital ( $\mu\text{g/L}$ ) en el pixel central del Embalse

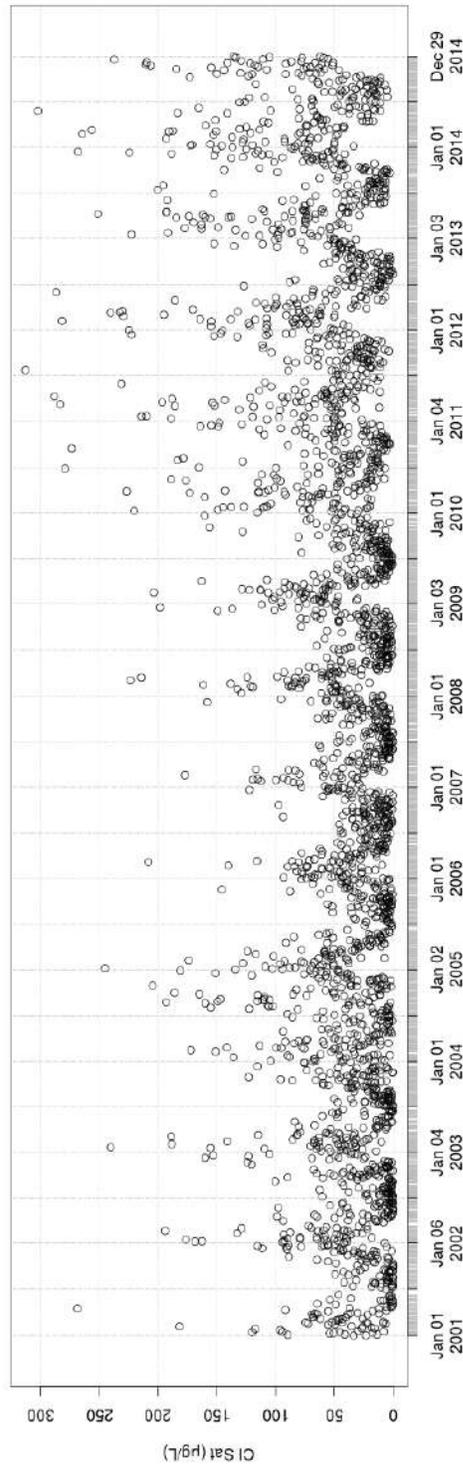


Figura 5.2: Serie temporal 2001-2014 de la concentración de clorofila satelital ( $\mu\text{g/L}$ ) en el pixel central del Embalse

Las figuras 5.4 y 5.3 presentan los histogramas de las series temporales graficadas en las figuras 5.1 y 5.2 respectivamente. Si se analiza la distribución de las observaciones, una se

asemeja más a una gaussiana (figura 5.4) y la otra a una exponencial (figura 5.3), ya que algunos análisis estadísticos requieren como condición que la muestra tenga distribución normal.

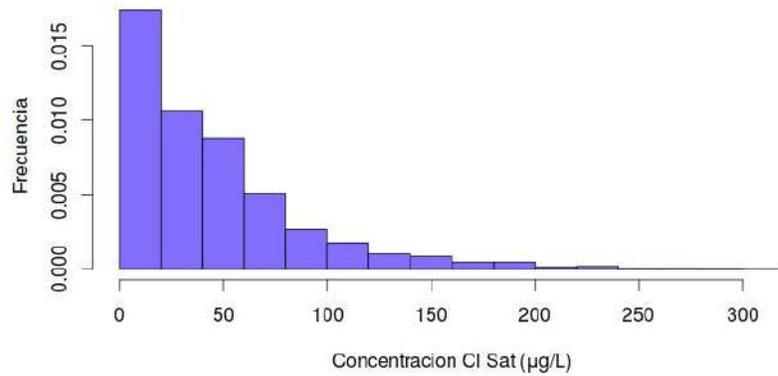


Figura 5.3: Distribución de las observaciones de la concentración de Clorofila Satelital

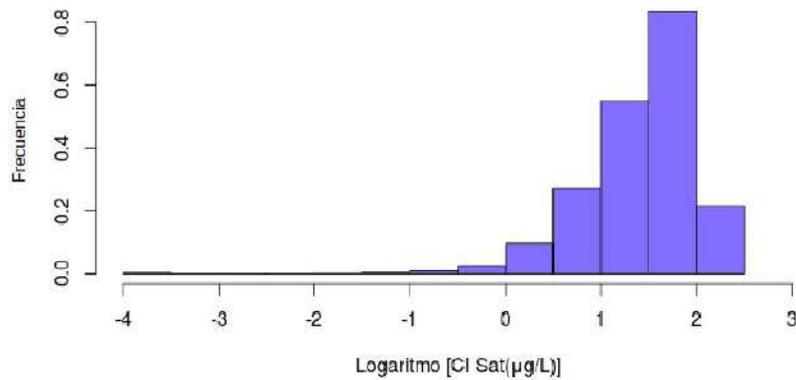


Figura 5.4: Distribución de las observaciones del Logaritmo en base 10 de Clorofila Satelital

Luego se realizó un análisis estacional y mensual para observar el comportamiento inter-anual de la Cl-a. En los gráficos de caja de la figura 5.5, se puede observar que ésta alcanza mayores valores en verano, seguido por otoño y primavera, siendo el invierno la época de menores valores. Se observan valores altos, clasificados como outliers, durante todo el año.

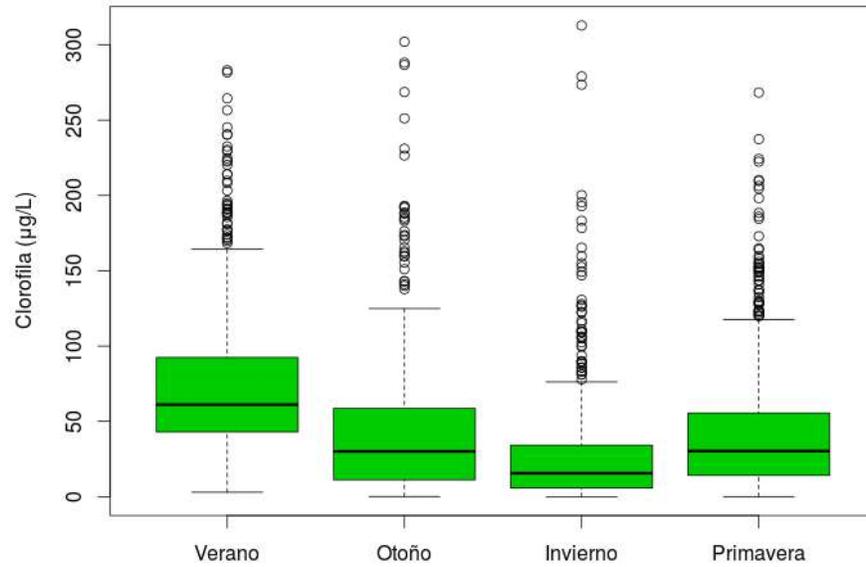


Figura 5.5: Gráficos de caja que representan la distribución y mediana de los valores para toda la serie de Cl-a ( $\mu\text{g/L}$ ) por estación del año.

También se analizó el comportamiento de la variable año a año de toda la serie (figura 5.6). Se observan medianas menores en los primeros años y un incremento sostenido a partir de 2010, sin embargo entre años consecutivos no se observan diferencias apreciables.

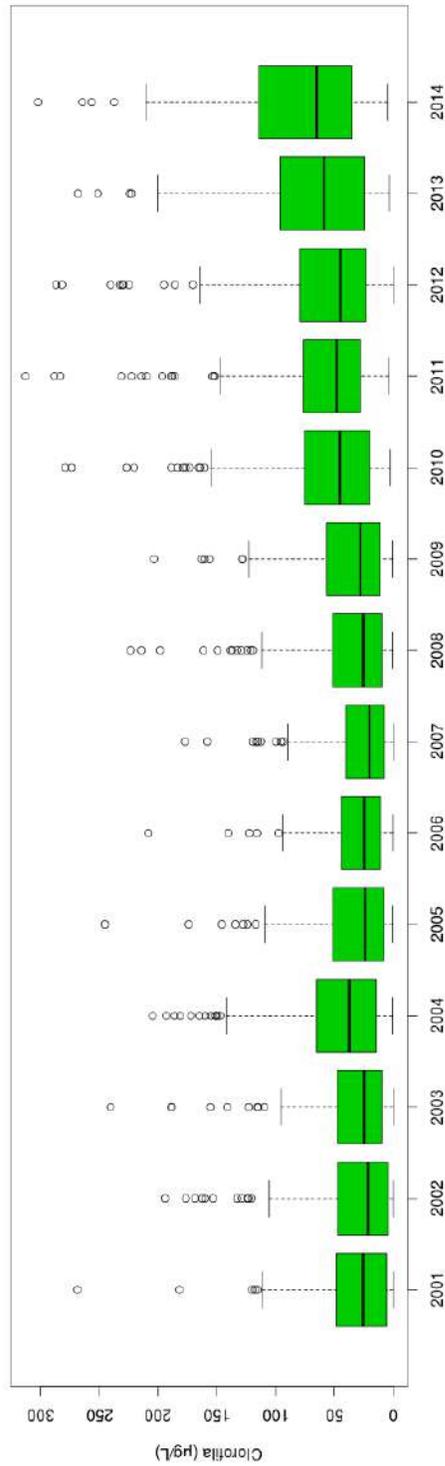


Figura 5.6: Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de la concentración de Cl-a ( $\mu\text{g/L}$ ) para cada año de la serie

Se graficaron las medias de cada año (figura 5.7), lo que muestra un aumento más evidente hacia los últimos años de la serie. Para evaluar esta tendencia, se realizó una

prueba de diferencia de medias, T de Student, entre el grupo de datos pertenecientes a los primeros y los últimos 5 años de la serie (2001-2006, 2010-2014). Éste dio como resultado una diferencia significativa entre las medias ( $p$  menor a 0.01), siendo 36.8 ( $\mu\text{g/L}$ ) para los primeros 5 años y 65.3 ( $\mu\text{g/L}$ ) para los últimos.

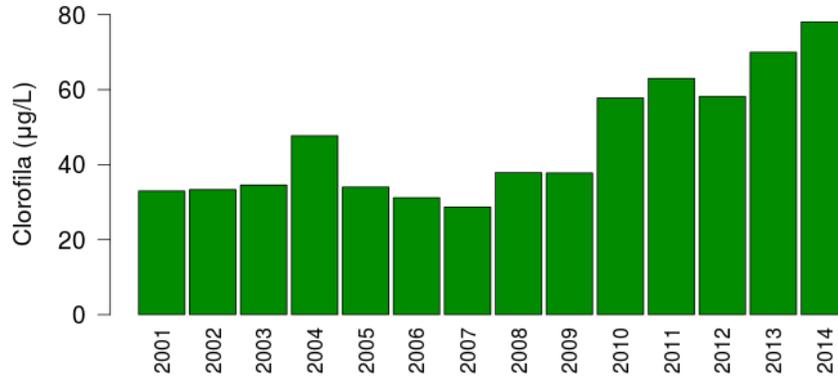


Figura 5.7: Medias Anuales para la Serie de Clorofila Satelital

Este resultado se aprecia de manera gráfica en la figura 5.8, donde se puede observar la comparación de los gráficos de caja realizados con los datos de los primeros 5 años de la serie por un lado y los últimos 5 por el otro. Estos demuestran que la diferencia de medianas es significativamente diferente ya que las cinturas no se solapan [74].

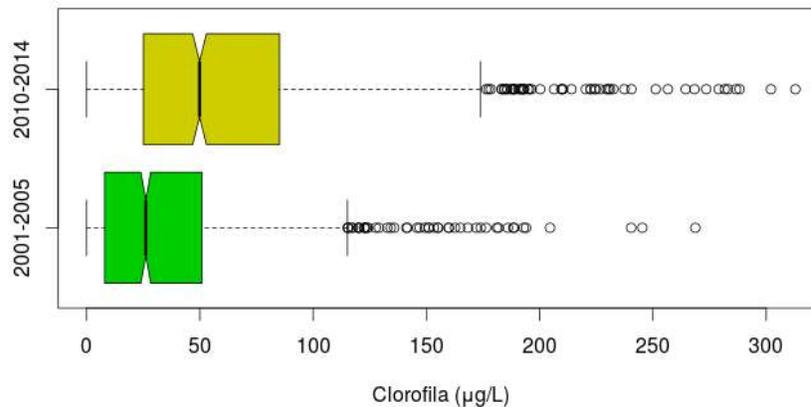


Figura 5.8: Diferencia entre los primeros 5 años de la serie y los últimos 5.

Por otro lado, se utilizaron los valores de clorofila para analizar la evolución del estado trófico del embalse, a través del índice de eutrofización de Carlson [14]. En la figura 5.9,

se puede observar para la totalidad de la serie el porcentaje de tiempo que el embalse se encontró en cada estado trófico. Esto muestra que el mismo se mantuvo la mayor cantidad de tiempo en estado hipereutrófico y eutrófico.

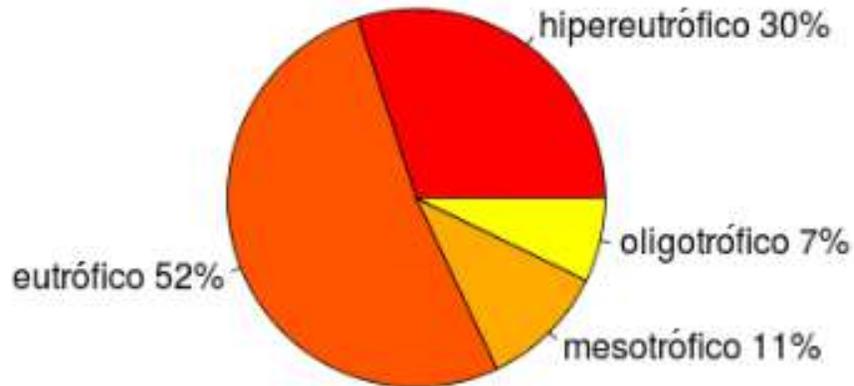


Figura 5.9: Porcentaje de niveles de eutrofización según el índice de Carlson [14] para toda la serie 2001-2014

La figura 5.10 presenta el porcentaje de tiempo en cada año que el embalse permaneció en los diferentes estados tróficos. Se observa un claro cambio de configuración en los colores de las barras, prevaleciendo en los últimos años los estados eutrófico e hipertrófico.



Figura 5.10: Porcentaje del estado trófico del embalse según el Índice de Carlson [14] por año para toda la serie

Luego de tener calculados los valores de concentración de Clorofila-a de origen satelital, se procedió a realizar un análisis comparativo de estos datos con los datos obtenidos *in situ*. Para esto, se recortó la serie en el período de tiempo que se correspondía con las fechas de monitoreo descritas en el capítulo 3. Se compararon las distribuciones de ambos set de datos cuyos resultados se muestran la figura 5.11. El rango de los valores de la clorofila satelital está incluido en el rango de los valores *in situ*, pero estos últimos muestran mayores dispersiones. El algoritmo esta detectando valores máximos menores a los registrados *in situ*. Sin embargo, estos valores límites son suficientemente altos para clasificar el embalse en un estado trófico alto y detectar floraciones algales.

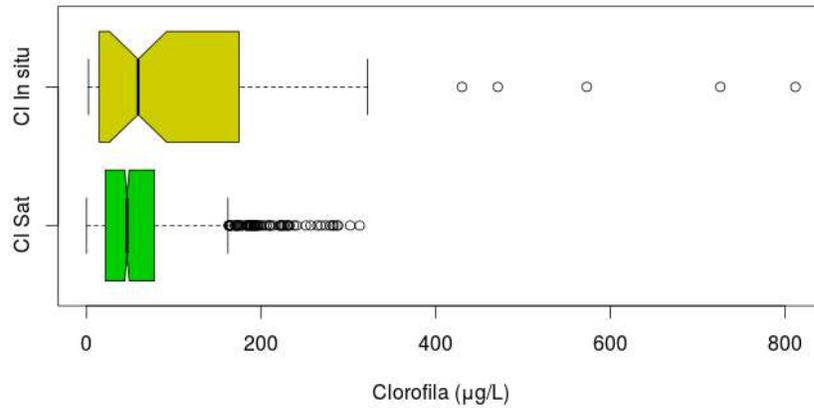


Figura 5.11: Comparación de los datos de Cl-a medidos *in situ* y satelitalmente.

También se compararon las proporciones del estado trófico del embalse según el Índice de Carlson para el total de las mediciones *in situ* y para las mediciones satelitales diarias desde 2008 a 2014. Ambas proporciones son muy similares (figura 5.12).

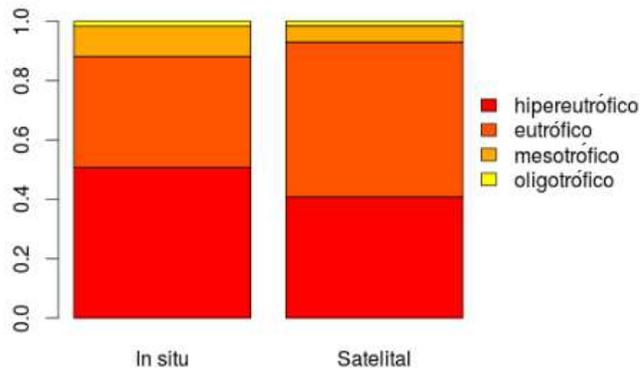


Figura 5.12: Comparación de las proporciones del estado trófico del embalse según el Índice de Carlson para el total de las mediciones *in situ* y para las mediciones satelitales diarias desde 2008 a 2014.

### 5.1.1. Análisis de Fourier

Luego se realizó un análisis de Fourier para analizar la serie en el dominio de las frecuencias. Para realizar el mismo fue necesario primero obtener una serie continua sin faltantes de datos, éstos debidos principalmente a la presencia de nubes. Con este objetivo, se probaron tres métodos de interpolación: lineal, cúbica y con el algoritmo denominado DINEOF (Data INterpola-ting Empirical Orthogonal Functions, [75] [76]).

Este último ha sido usado exitosamente en la reconstrucción de series de SST y Cl-a [76]. La base del mismo es rellenar los datos faltantes usando ciclos iterativos de descomposiciones de valor singular (SVD) produciendo un conjunto de funciones ortogonales empíricas (EOFs) como síntesis aproximada de la base de datos. Posteriormente, se reemplazan los píxeles de datos faltantes con el valor reconstruido al combinar las señales de las EOFs. Para comenzar, se usa una primera aproximación (promedio de campo global o local) como estimador de los datos faltantes. Las iteraciones se detienen cuando la moda (y por tanto los estimadores de datos faltantes) convergen a una solución constante. El número de modas a usar se define como aquel que minimiza un estimador global de error calculado para un conjunto aleatorio de puntos por validación cruzada. Finalmente, el set óptimo de EOFs y de estimadores de datos faltantes se calculan por medio de un último ciclo de SVD que descompone el set de datos completo en el número de modas óptimo predeterminado [75] [76].

Se muestran a continuación los resultados de la interpolación para los tres métodos, implementados todos en el Software R. Como se puede observar en las figuras 5.13,5.14,5.15, DINEOF es el único método que no asume tendencias ni genera valores negativos, como en el caso de la interpolación cúbica. La época del año más conflictiva es el invierno donde hay continuidad de varios días nublados, donde DINEOF mantiene constante el valor, comportamiento también observado en campo, ya que en el invierno las constantes bajas temperaturas no generan demasiados cambios en la concentración de clorofila.

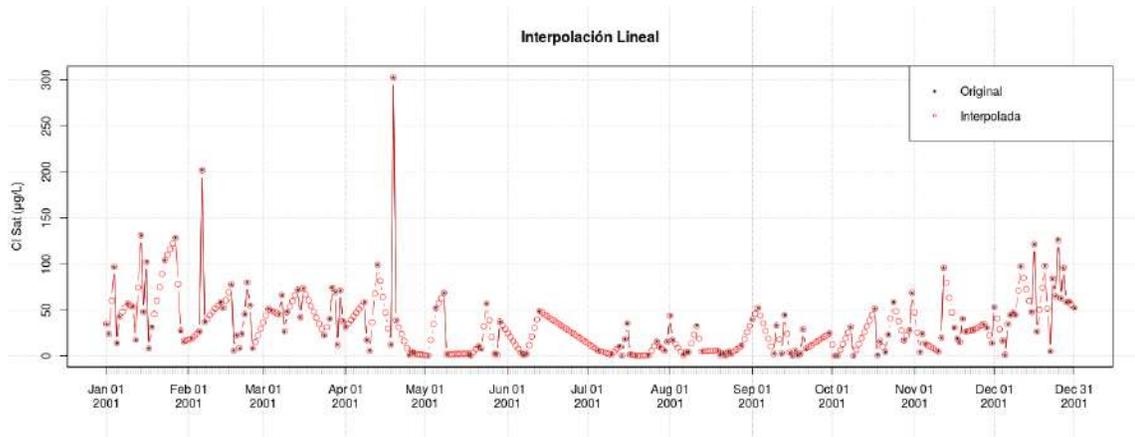


Figura 5.13: Interpolación lineal del año 2001, serie diaria de Concentración de Clorofila original e interpolada

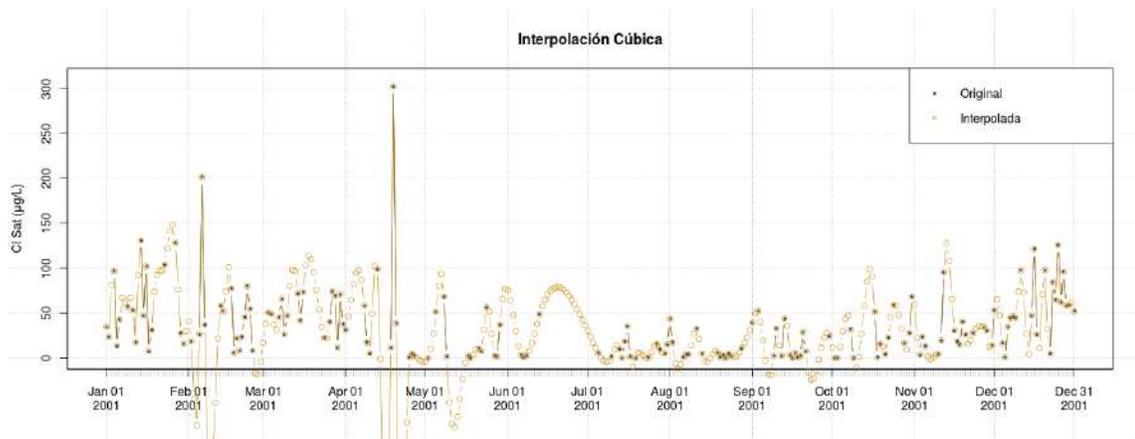


Figura 5.14: Interpolación cúbica del año 2001, serie diaria de concentración de Clorofila original e interpolada

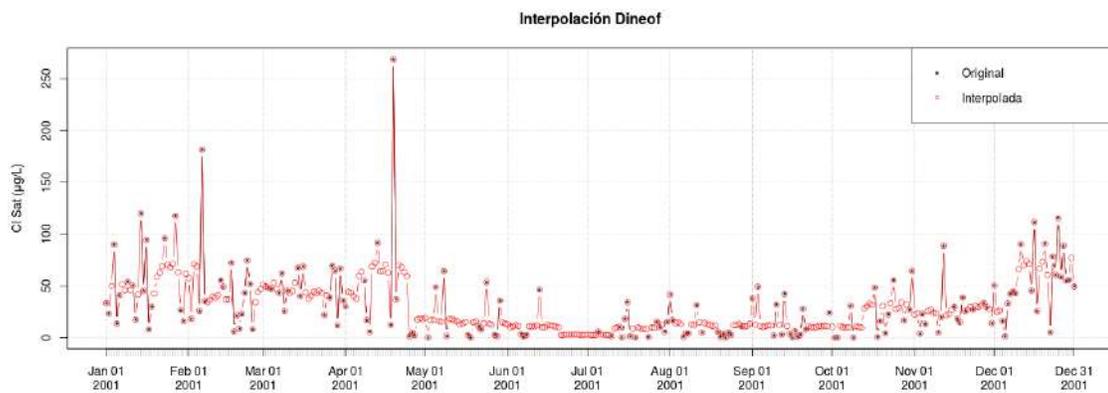


Figura 5.15: Interpolación DINEOF del año 2001, serie diaria de concentración de Clorofila original e interpolada

Finalmente se elige la serie de tiempo obtenida a partir del relleno con DINEOF, ya que no asume tendencias en los valores faltantes, siendo esto más fiel a lo que sucede a campo en los días nublados. Con esta serie, se realiza un análisis de Fourier utilizando el software Origin (OriginLab, Northampton, MA). Los resultados se muestran en la figura 5.16.

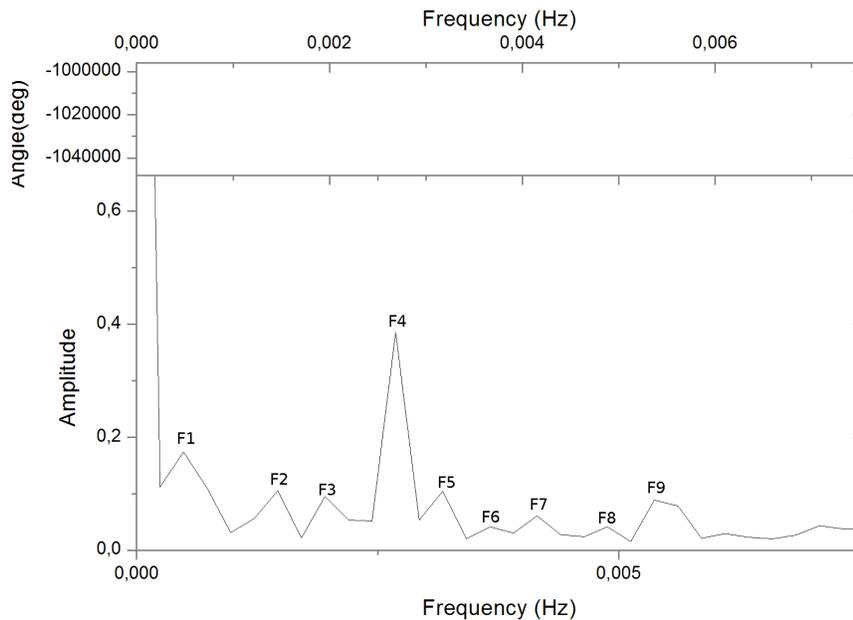


Figura 5.16: Análisis de Fourier de la serie diaria del logaritmo de la clorofila

En el gráfico de la figura 5.16, es posible observar los picos de frecuencia que se destacan en la serie. El primer pico significativo que se observa (F1), tiene un valor de frecuencia de 0,000488. Para obtener el período de tiempo que esta frecuencia representa, se divide uno por el valor de la frecuencia. Esto nos da como resultado 2049,18 días, lo que representa 5,6 años. Lo mismo se realiza con todos los picos de frecuencias subsiguientes, obteniendo los siguientes resultados:

- F1=0,000488 que representa 5,6 años
- F2=0,001465 que representa 1,87 años
- F3= 0,001953 que representa 1,4 años
- F4= 0,00268 que representa 1,02 años
- F5=0,003174 que representa 10,5 meses
- F6=0,0036621 que representa 5,03 meses
- F7= 0,00415 que representa 8,03 meses
- F8= 0,00488 que representa 6,8 meses
- F9= 0,00537 que representa 6,2 meses

De todos estos picos, se seleccionan los que tienen una mayor importancia en amplitud y que representan un ciclo biológico explicativo. El F1 tiene una amplitud de 0,174 y su temporalidad podría estar relacionada a un ciclo climático o de radiación solar. El F4 tiene una amplitud de 0,385, siendo el más significativo y su temporalidad representa el ciclo

anual de la clorofila. El F9 tiene una amplitud de 0,0886 y podría estar representando la época seca y fría y la época húmeda y cálida del año.

A continuación, se muestran los resultados de otro análisis de Fourier pero ahora con la serie promediada cada 8 días (figura 5.17). Esto se realizó para analizar el comportamiento de la serie eliminando la alta variabilidad diaria y así poder detectar ciclos más generales. En la tabla de la figura 5.18, se resumen sus valores. Se puede decir que la frecuencia 1 puede estar relacionada con un ciclo climático o de radiación. El F3 puede estar relacionado a los años correspondientes a los eventos de El Niño y el F7 a las épocas secas y húmedas a lo largo del año. La F5 representa el ciclo anual de la clorofila.

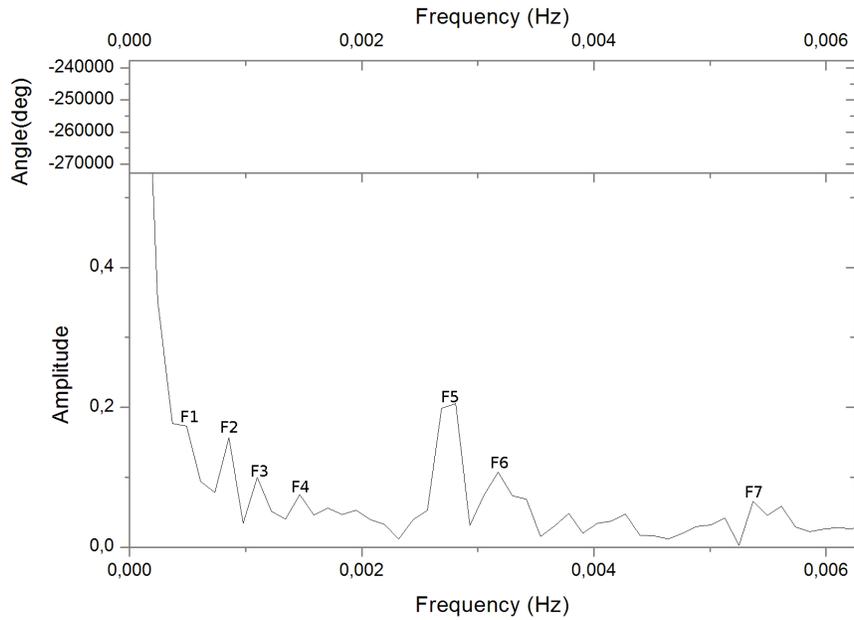


Figura 5.17: Análisis de Fourier de la serie promedio cada 8 días del logaritmo de la clorofila.

|    | Frecuencia | Amplitud | Tiempo     |
|----|------------|----------|------------|
| F1 | 0,000488   | 0,17338  | 5,6 años   |
| F2 | 0,0008545  | 0,15698  | 3,2 años   |
| F3 | 0,0011     | 0,09957  | 2,5 años   |
| F4 | 0,001467   | 0,0749   | 1,87 años  |
| F5 | 0,002685   | 0,1987   | 1,02 años  |
| F6 | 0,0031738  | 0,1072   | 10,4 meses |
| F7 | 0,005371   | 0,0653   | 6,1 meses  |

Figura 5.18: Resultado del Análisis de Fourier para la serie promediada cada 8 días.

## 5.2. Serie Temporal de Temperatura

A partir del algoritmo desarrollado y presentado en el capítulo anterior, se obtuvo un valor de temperatura en el agua del embalse para cada día sin nubes desde el año 2001 hasta el año 2014. La metodología para extraer los valores de temperatura de brillo fue idéntica a la que se utilizó para los datos de reflectancia mediante los software GRASS y R. En este caso se utiliza un solo valor satelital por día, sumando en total 2867.

La figura 5.19 presenta los resultados obtenidos para la temperatura superficial del agua. Se observa claramente un comportamiento periódico en el que prevalece la frecuencia anual, con picos en los meses de verano y valles en los de invierno, tal como se espera para el clima de región.

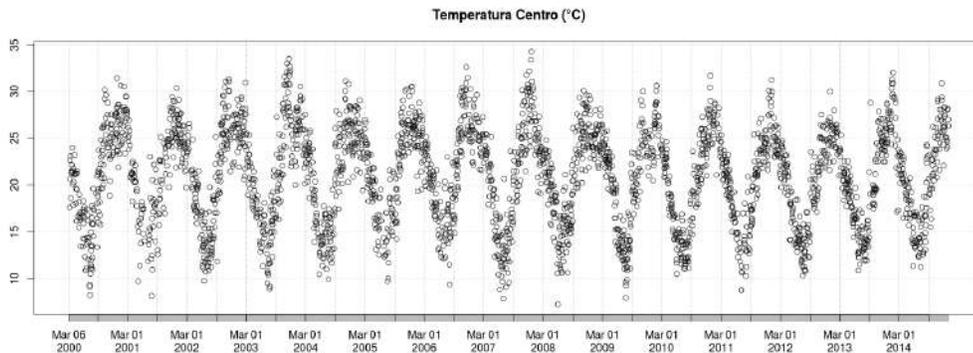


Figura 5.19: Serie Temporal 2001-2014 de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse

En el gráfico de la figura 5.20 se observa la distribución de los valores de temperatura obtenidos desde satélite con valores que van desde 6 a 34  $^{\circ}\text{C}$ .

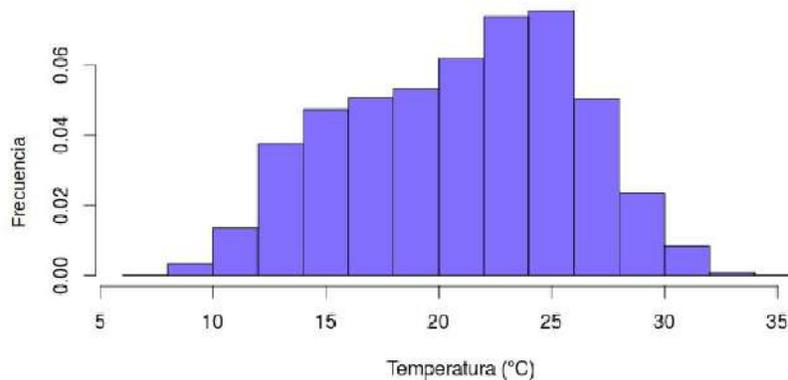


Figura 5.20: Histograma de la distribución de la Temperatura Satelital para toda la serie.

Luego se realizó un análisis estacional para observar el comportamiento interanual de la temperatura en el agua del embalse. En los gráficos de caja de la figura 5.21, se puede observar que ésta alcanza mayores similares en verano y primavera, seguido por otoño,

siendo el invierno la época de menores valores.

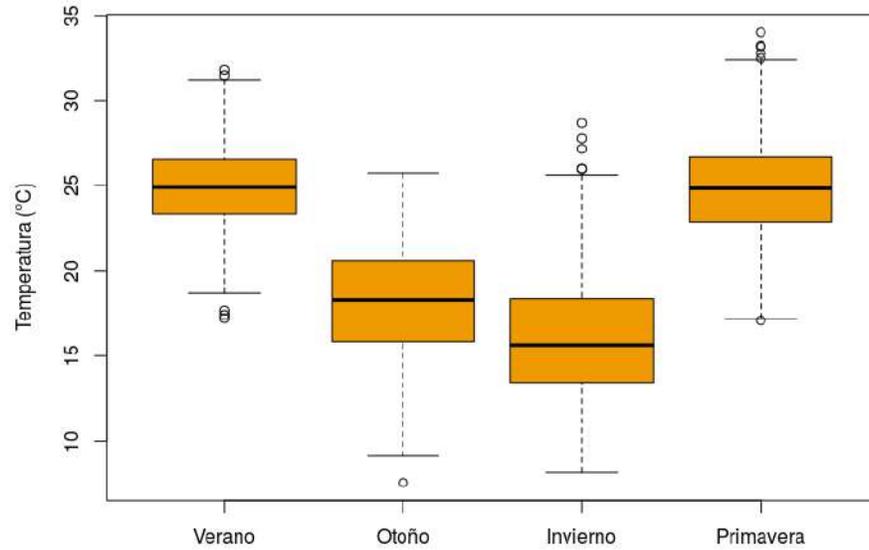


Figura 5.21: Gráficos de caja de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse por época del año.

Por otro lado, en el gráfico de la figura 5.22 se presentan los gráficos de caja que representan la distribución de los valores observados por año para toda la serie. En el mismo, no se observan diferencias significativas para los años consecutivos. Pero si se observan oscilaciones en las medianas, que pueden estar relacionados con ciclos climáticos. Además se observa una aparente disminución en los valores de los últimos años de la serie.

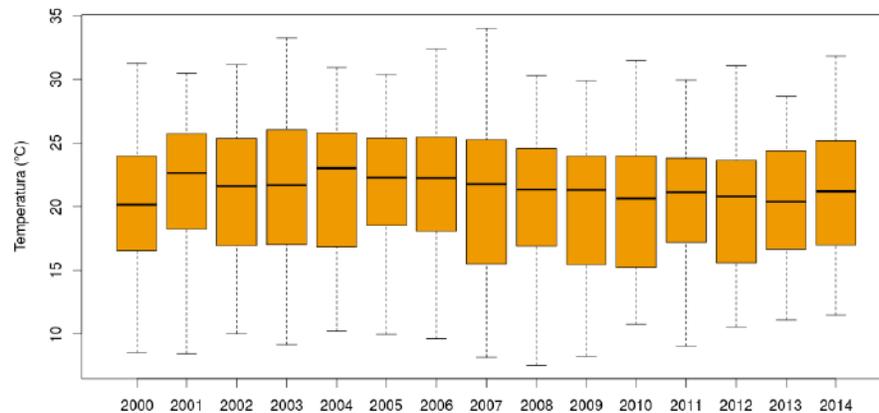


Figura 5.22: Gráficos de caja de temperatura satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el pixel central del Embalse por año.

Para evaluar esta tendencia sobre la disminución de la temperatura en los últimos años,

se realizó una prueba de diferencia de medias, T de Student, entre el grupo de datos pertenecientes a los primeros y los últimos 5 años de la serie (2001-2006, 2010-2014). Éste dio como resultado una diferencia significativa entre las medias ( $p$  menor a 0.01), siendo 21.52 ( $^{\circ}\text{C}$ ) para los primeros 5 años y 20.47 ( $^{\circ}\text{C}$ ) para los últimos. Este resultado se aprecia de manera gráfica en la figura 5.23, donde se puede observar la comparación de los gráficos de caja realizados con los datos de los primeros 5 años de la serie por un lado y los últimos 5 por el otro. Estos demuestran que la diferencia de medianas es significativamente diferente ya que las cinturas no se solapan [74] y que los valores de los últimos años son menores que los primeros.

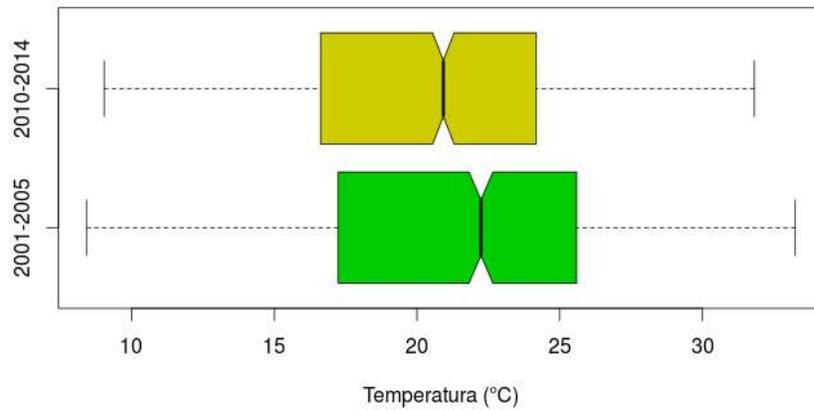


Figura 5.23: Comparación de los datos de temperatura satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5.

Este resultado es coherente con los datos medidos *in situ*, en los cuales se observa en el capítulo 3 que existe una disminución de las medias de los valores medidos. Esto llama mucho la atención, ya que en la serie de Cl-a satelital el comportamiento fue opuesto. Inclusive comparando ambas series temporales en las épocas de verano - primavera por un lado (figura 5.24) y otoño - invierno por el otro (figura 5.25), para estos dos períodos de tiempo, el comportamiento observado es el mismo.

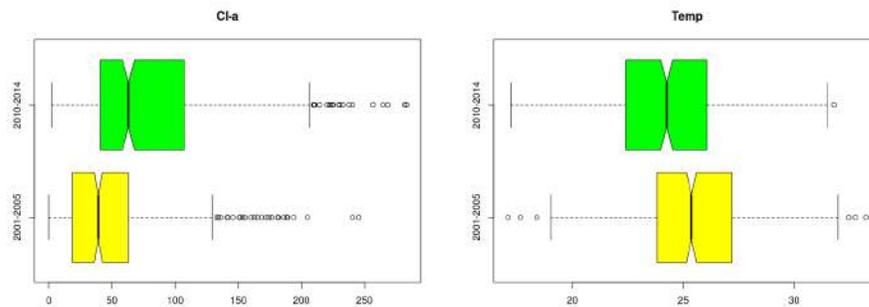


Figura 5.24: Comparación de los datos de temperatura y Cl-a satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5 en épocas de primavera - verano.

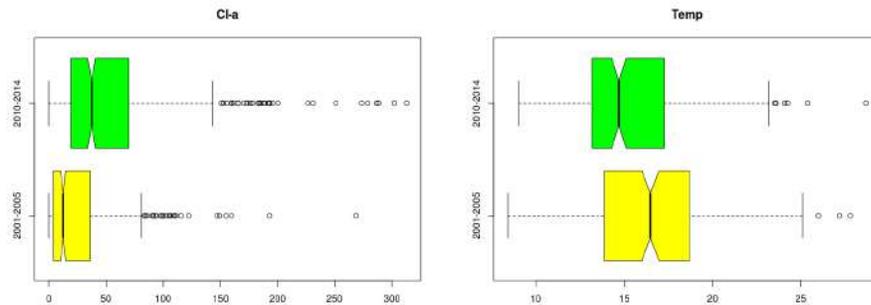


Figura 5.25: Comparación de los datos de temperatura y Cl-a satelital de los primero 5 años de la serie con los últimos 5 en épocas de otoño - invierno.

Esto nos estaría indicando que a pesar de que el fenómeno biologicamente está determinado por la temperatura, existe otro factor predominante que está haciendo aumentar la concentración de Cl-a y las consecuentes floraciones en el embalse. Esto podría estar relacionado al aumento poblacional que se ha observado en la cuenca de estudio (INDEC, 2010), ya que se estaría produciendo un aporte mayor de nutrientes al embalse a través de los ríos que desembocan en él, dado que no todas las poblaciones circundantes cuentan con plantas de tratamiento de efluentes cloacales, además de la afluencia de turistas en verano. Esto sumado al cambio de uso de suelo que se genera también por el aumento de zonas urbanizadas, lo que produce mayores escurrimientos y procesos erosivos que aumentan el volumen de nutrientes que llegan al embalse. Otro factor a tener en cuenta son los incendios que se viven en la cuenca año tras año. Esto también aumenta el contenido de nutrientes en los ríos y por consiguiente en el embalse.

## Capítulo 6

# Detección y caracterización de las floraciones algales

### 6.1. Métodos de identificación de floraciones

Como se explicó en el capítulo 2 de este trabajo, la distinción de un evento de floración respecto del comportamiento normal de la biomasa no es sencillo ni arbitrario. De forma general, la definición del evento incluye una alta densidad de células, que se traduce a una alta concentración de clorofila, además de un rápido crecimiento de las mismas. Estos eventos además se caracterizan por estar por fuera del comportamiento normal esperado del fitoplancton para un cuerpo de agua determinado. Al estar el ecosistema acuático de estudio fuertemente eutrofizado durante más de la mitad del año, la definición del evento de floración para el embalse se hace aún más complicada. Es por esto que se implementaron diversos métodos para identificarlos, según distintos parámetros, donde se buscó separar aquellas fechas de floraciones del resto de la serie.

En primer lugar, se muestran las fechas de máximo valor de clorofila-a medida desde satélite para cada año, estimados a partir de la serie temporal generada (tabla de la figura 6.1). En esta tabla se puede observar que aparecen valores máximos en fechas correspondientes a las cuatro estaciones del año, otoño, invierno, primavera y verano. Sin embargo, predominan (9 frente a 5) aquellas que pertenecen a épocas más cálidas (primavera-verano). Además, comparado con otros cuerpos de agua eutrofizados, los valores máximos de concentración de clorofila que se estiman en el embalse son altos y a partir de 2010 son mayores que todos los anteriores a excepción de 2013 que es ligeramente menor con respecto a los anteriores.

| Fecha Máximo | Valor Máximo Cl |
|--------------|-----------------|
| 2001-04-19   | 268,72          |
| 2002-02-23   | 194,00          |
| 2003-01-23   | 240,38          |
| 2004-10-30   | 204,57          |
| 2005-01-07   | 245,30          |
| 2006-03-08   | 208,21          |
| 2007-02-18   | 177,25          |
| 2008-03-03   | 223,28          |
| 2009-02-16   | 203,28          |
| 2010-06-27   | 279,02          |
| 2011-07-25   | 312,91          |
| 2012-05-31   | 286,69          |
| 2013-12-14   | 268,34          |
| 2014-05-26   | 302,07          |

Figura 6.1: Fechas de concentraciones de clorofila-a máximas por año.

A continuación, se presentan los resultados de los métodos utilizados para identificar floraciones en la serie temporal. Se estudiaron diversos trabajos ([14]; [17]; [77]; [78]) y se adoptaron distintos enfoques en base a éstos, adaptados al área de estudio. En particular, Brody et. al. en [77] propone 3 métodos para identificar la fecha de inicio de la floración para datos SeaWiFS. Aunque las floraciones algales marinas tienen comportamiento diferente a las de aguas internas, se tomaron los 3 métodos propuestos y se adaptaron al comportamiento de los datos.

### Método del Umbral

El primer método que se evaluó fue el del umbral, siguiendo la metodología propuesta en [77]. Se estableció un umbral como la mediana de la serie más el 5% de la misma, el cual está basado en estudios fenológicos anteriores. Este umbral se calcula luego de rellenar los valores faltantes en la serie, en nuestro caso con el algoritmo DINEOF explicado en el capítulo anterior. Luego, se obtienen los valores máximos anuales, se busca tiempo atrás de la fecha de este valor, las primeras dos fechas consecutivas que crucen el umbral y se identifica como fecha de inicio de la floración aquella subsiguiente a esas dos fechas identificadas. El valor resultante fue de  $40 \mu\text{g/L}$  para el embalse. Esta metodología está desarrollada para las floraciones de crecimiento gradual que ocurren en el mar y de este modo, se asegura que la disminución en los niveles de clorofila es robusta a través del tiempo y no sólo efecto de ruido transitorio. En el caso del Embalse de estudio, las floraciones se dan con un crecimiento abrupto, en donde la concentración de clorofila-a puede cambiar mucho de un día para otro, quedando un día por debajo del umbral y otro por encima. Es así que este método no resultó adecuado cuando fue implementado con la serie diaria. Por lo que, se aplicó el método para la serie promediada cada 8 días. En la figura 6.2, es posible observar la serie completa promediada cada ocho días, resaltando los valores máximos de clorofila

para cada año y los inicios de floraciones que se pudieron identificar con este método.

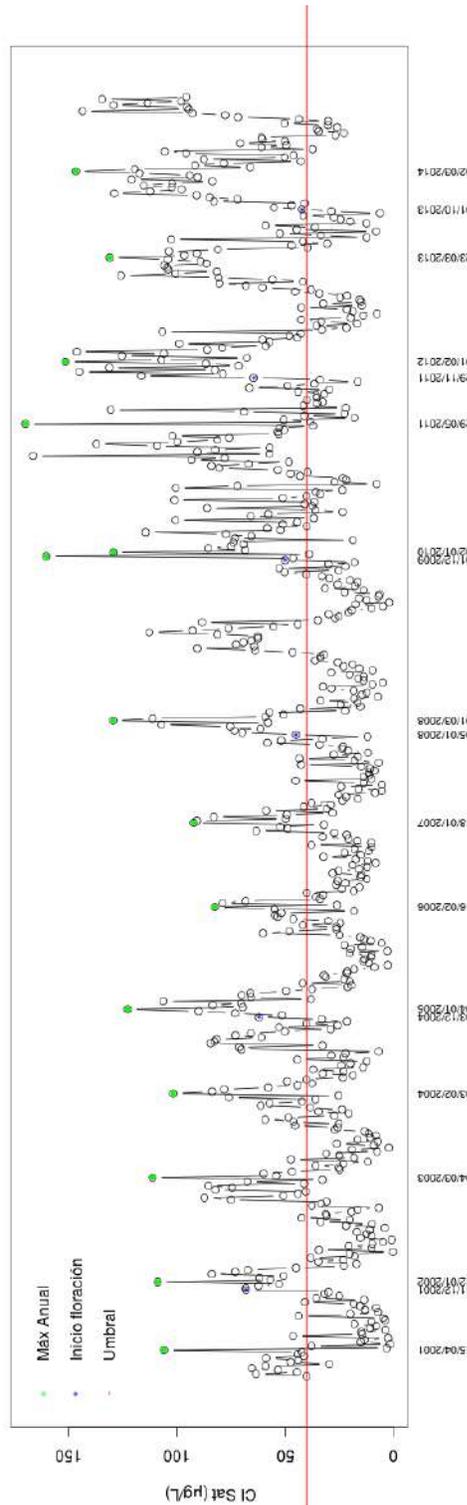


Figura 6.2: Inicio de Floración Anual identificada con el método de Umbrales propuesta en [77]

En la tabla de la figura 6.3, es posible identificar los valores máximos de clorofila por

año para la serie promediada cada 8 días y la fecha de inicio de la floración al cual ese valor corresponde. En muchos años, la fecha de floración corresponde al año anterior, ya que son las floraciones de verano que pueden comenzar en Diciembre y llegar al pico en Enero, por ejemplo. A pesar de haber promediado la serie diaria, la oscilación de la serie obtenida cada 8 días también provoca que en algunos años no se alcance a identificar mediante este método, la fecha de inicio de la floración. Esto sucede por no cumplirse la condición del método que define que debe haber dos fechas consecutivas por encima del umbral antes del máximo. Esta condición, es una desventaja del método para cuerpos de agua dulce, ya que sólo propone conceptualmente una floración por año y de crecimiento gradual, comportamiento característico de floraciones algales marinas. Por el contrario, en nuestro caso de estudio se han observado *in situ* múltiples floraciones por año y de crecimiento y muerte muy intensos que pueden durar solo un día.

| Fecha máximo | Cl ( $\mu\text{g/L}$ ) | Fecha Inicio  |
|--------------|------------------------|---------------|
| 15/ 04/ 2001 | 105. 97303             | No identifica |
| 12/ 01/ 2002 | 108. 8988              | 11/ 12/ 01    |
| 04/ 03/ 2003 | 111. 2609              | No identifica |
| 03/ 02/ 2004 | 101. 67396             | No identifica |
| 04/ 01/ 2005 | 122. 76494             | 03/ 12/ 04    |
| 16/ 02/ 2006 | 82. 43207              | No identifica |
| 18/ 01/ 2007 | 92. 29449              | No identifica |
| 01/ 03/ 2008 | 129. 52327             | 05/ 01/ 08    |
| 17/ 12/ 2009 | 160. 35305             | 01/ 12/ 09    |
| 02/ 01/ 2010 | 129. 38299             | No identifica |
| 29/ 05/ 2011 | 170. 05943             | No identifica |
| 01/ 02/ 2012 | 151. 5683              | 29/ 11/ 2011  |
| 23/ 03/ 2013 | 131. 12752             | No identifica |
| 02/ 03/ 2014 | 146. 74571             | 01/ 10/ 13    |

Figura 6.3: Resultados de la identificación de floraciones anuales con el método de umbral propuesto en [77].

### Método Suma Acumulada

Luego, siguiendo la metodología propuesta en [77], se probó el método de la Suma Acumulada. Éste consiste en generar primero una curva que representa la biomasa acumulada a partir de la suma de la concentración de cl-a obtenida a partir de la serie de tiempo de clorofila satelital para cada año. Como se mencionó en el apartado que describe el área de estudio, para el embalse San Roque se ha encontrado una relación positiva y significativa entre biomasa y cl-a.

Se utiliza luego esta curva de biomasa acumulada para determinar la fecha de la serie diaria en la que se supera un porcentaje establecido de biomasa acumulada, siendo la misma identificada como la fecha de inicio de la floración. Este porcentaje es sensible a cada área de estudio, y se utilizan valores que van desde el 5 al 30%. Para este trabajo fue necesario utilizar un porcentaje más bajo, ya que el contenido de biomasa acumulada en todo el año es tan grande que el rango propuesto no permitió identificar floraciones. Se eligió un

umbral del 3% del total de biomasa anual, ya que el mismo fue suficiente para identificar las floraciones principales de cada año. La metodología establecida para floraciones marinas, supone el cruce de este umbral como el inicio de la floración anual donde empieza a aumentar el contenido de Clorofila-a. En nuestro caso, se usó sólo como un umbral para identificar todas las fechas que lo superaran e identificarlas como floraciones específicas dentro de un año. En la figura 6.4, se puede observar la serie diaria sin rellenar datos faltantes del año 2001, con la curva de biomasa acumulada en línea roja punteada. En color rojo se destacan las fechas donde, según el umbral 3%, se puede identificar una floración.

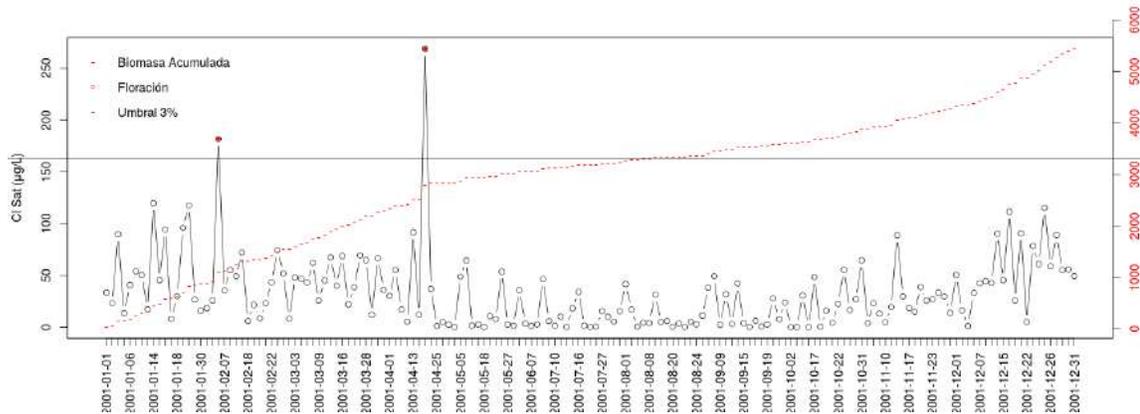


Figura 6.4: Resultados de las identificaciones logradas con el método de Suma Acumulada para el año 2001

Para el año 2002, no se observaron floraciones a partir de este método, ya que el valor de umbral era muy elevado y no identificó ninguna fecha por encima del mismo. En la figura 6.5, se puede observar que para el año 2003 el umbral del 3% sigue siendo elevado y solo identifica una floración.

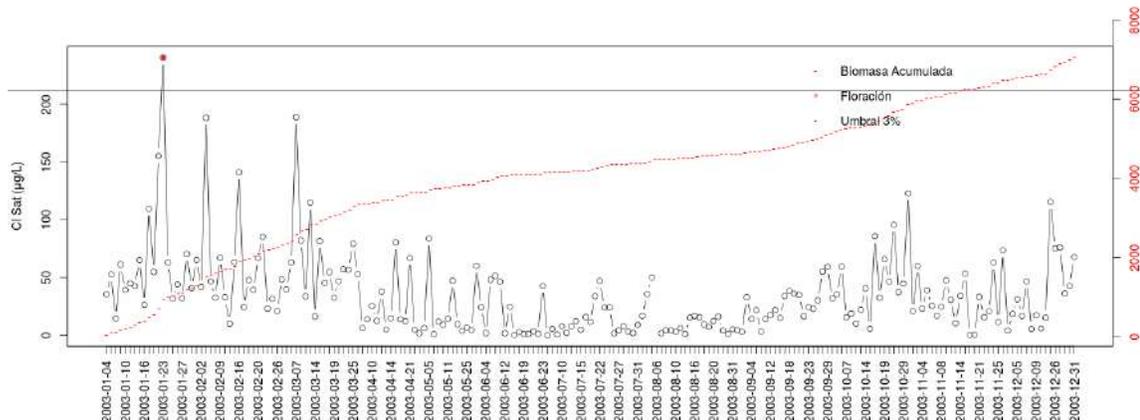


Figura 6.5: Resultados de las identificaciones logradas con el método de Suma Acumulada para el año 2002

Sobre la base de estos resultados preliminares, fue posible determinar que el método no era conveniente para nuestra área de estudio. Por lo que se consideró establecer un umbral fijo para toda la serie.

### Método del Umbral Fijo

Este método consiste en definir un valor de concentración de clorofila-a fijo que sirva como límite para definir que todo lo que se encuentre por encima del mismo, sea considerado floración. Se buscó un criterio de elección para este umbral fijo en la literatura. Se eligieron tres valores de umbrales comparando diversos números citados en bibliografía, los cuales fueron probados en la serie completa para observar la capacidad de los mismos de identificar eventos de floración.

Primero, se toma nuevamente el trabajo de Brody et. al. [77] que propone como umbral en el método anteriormente explicado la mediana más el 5 % para cada año, que en este caso es igual a  $48 \text{ mg/m}^3$ . Este valor según [79] está por encima del estado de hipereutrofia, ya que supera el límite propuesto de  $40 \text{ mg/m}^3$  de clorofila-a. Por otro lado, la Organización para la Economía en Desarrollo y Cooperación (OECD 1982) establece que valores promedios anuales mayores a  $25 \text{ mg/m}^3$  corresponden a hipereutrofia, por lo que el valor de umbral calculado a partir de la serie también está representando concentraciones altas de clorofila-a.

Como segundo criterio, se considera el valor que Carlson utiliza para definir el estado de hipereutrofia ( $56 \text{ mg/m}^3$ ) [14] como umbral fijo para toda la serie.

Por último, el tercer valor que se utiliza como umbral es aquel que propone Tett en [17] de  $100 \text{ mg/m}^3$ , con el cual define floraciones excepcionales. A continuación, se muestra los resultados obtenidos para cada umbral. En primer lugar, es posible observar en la figura 6.6 la serie temporal completa con las fechas identificadas como floraciones marcadas en rojo, para el umbral fijo basado en [77] de  $48 \text{ mg/m}^3$ .

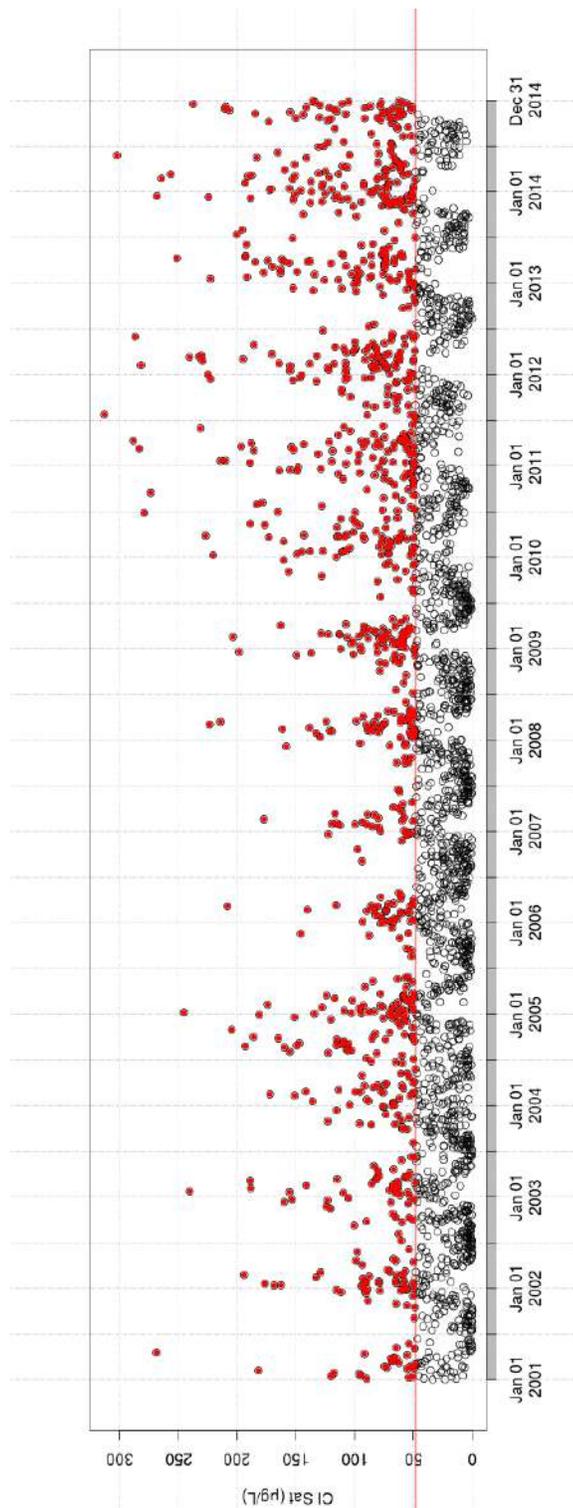


Figura 6.6: Umbral fijo obtenido a partir del cálculo de la mediana más el 5%. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

En la figura 6.6 se muestran los resultados de las floraciones predichas aplicando el criterio de umbral fijo igual a  $48 \text{ mg/m}^3$ . Es posible observar en ésta, que la cantidad de

fechas identificadas como floraciones es muy abundante. Para entender mejor las mismas, se generaron el gráfico de barra de la figura 6.7, que muestra la cantidad de floraciones por año identificadas con este primer umbral y el gráfico de torta de la figura 6.8 que muestra el porcentaje de fechas identificadas como floraciones por época del año. El total de fechas identificadas como floraciones con este umbral para toda la serie es de 1005.

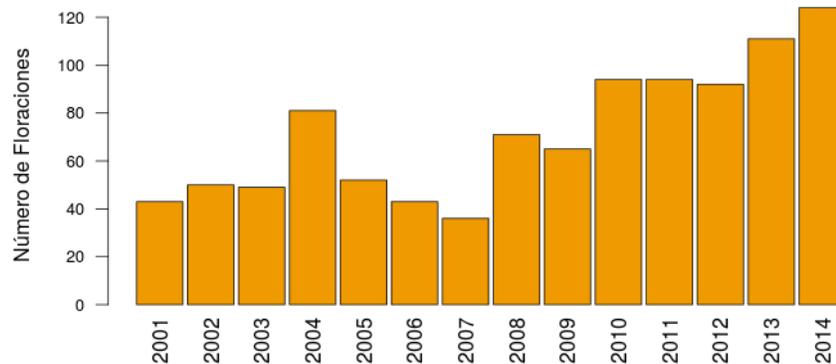


Figura 6.7: Cantidad de floraciones por año identificados con el método de la mediana más el 5%.



Figura 6.8: Porcentaje de Floraciones por Época del año identificadas en toda la serie con el método de la Mediana más 5%.

Es posible observar además en la figura 6.7 que las barras presentan una oscilación y hacia los últimos años de la serie crecen. También en el gráfico de torta de la figura 6.8 se observa que la mayor cantidad de floraciones se produce en los meses de verano, siendo coherente con la teoría de que las temperaturas mayores en estos meses estarían incrementando el número de floraciones.

A continuación, se muestran los resultados para el segundo umbral considerado a partir del valor de hipereutrofia definido por Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). En la figura 6.9, se observa la serie temporal de Cl-a con las fechas identificadas como floraciones, rellenas en rojo. Como es de esperar, al ser este umbral más elevado, la cantidad de floraciones en la totalidad del período de tiempo analizado disminuye con respecto al umbral fijo anterior, siendo 816 en este caso. Con respecto al gráfico de barras de la figura 6.10, se observa que las oscilaciones detectadas anteriormente son similares, pero es más marcada la tendencia sostenida de aumento de cantidad de floraciones identificadas hacia los últimos años de la serie. Los porcentajes que se observan en el gráfico de torta de la figura 6.11 se mantienen casi iguales con respecto al método anterior (figura 6.8), confirmando que la mayor cantidad de floraciones se produce durante los meses de verano.

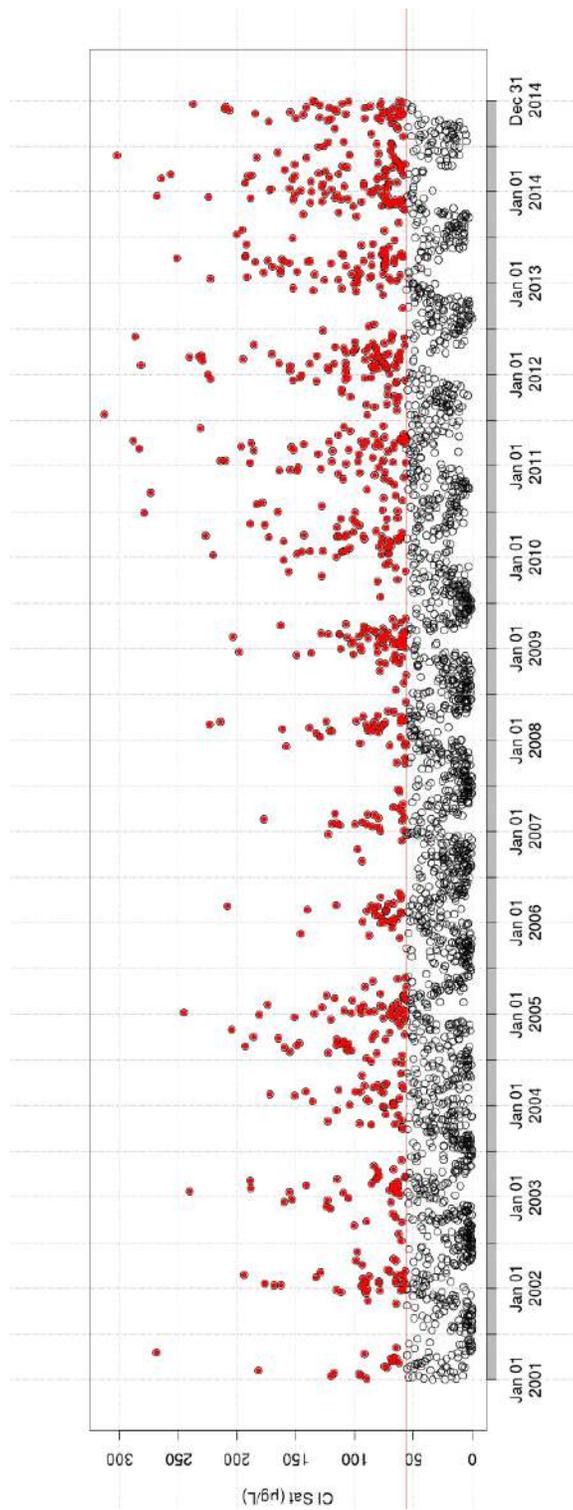


Figura 6.9: Umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

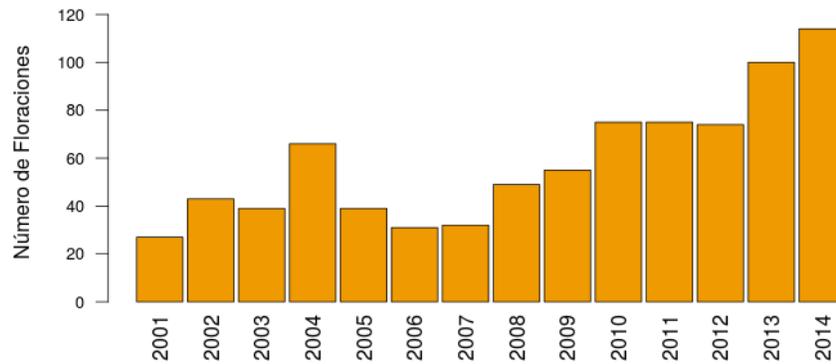


Figura 6.10: Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ).



Figura 6.11: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral fijo de hipereutrofia según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ).

Por último, se muestran a continuación los resultados del umbral fijo ( $100 \text{ mg/m}^3$ ) propuesto por Tett de floraciones extraordinarias [17]. Este valor se considera muy alto en bibliografía, por lo cual se quiso incluir en este análisis para mostrar que el embalse presenta concentraciones de Cl-a que superan las clasificadas como importantes en la bibliografía y que no son extraordinarias en el caso del embalse San Roque. Como se puede observar en la figura 6.12, se identifican numerosas fechas por encima del umbral fijo (303 en total para toda la serie).

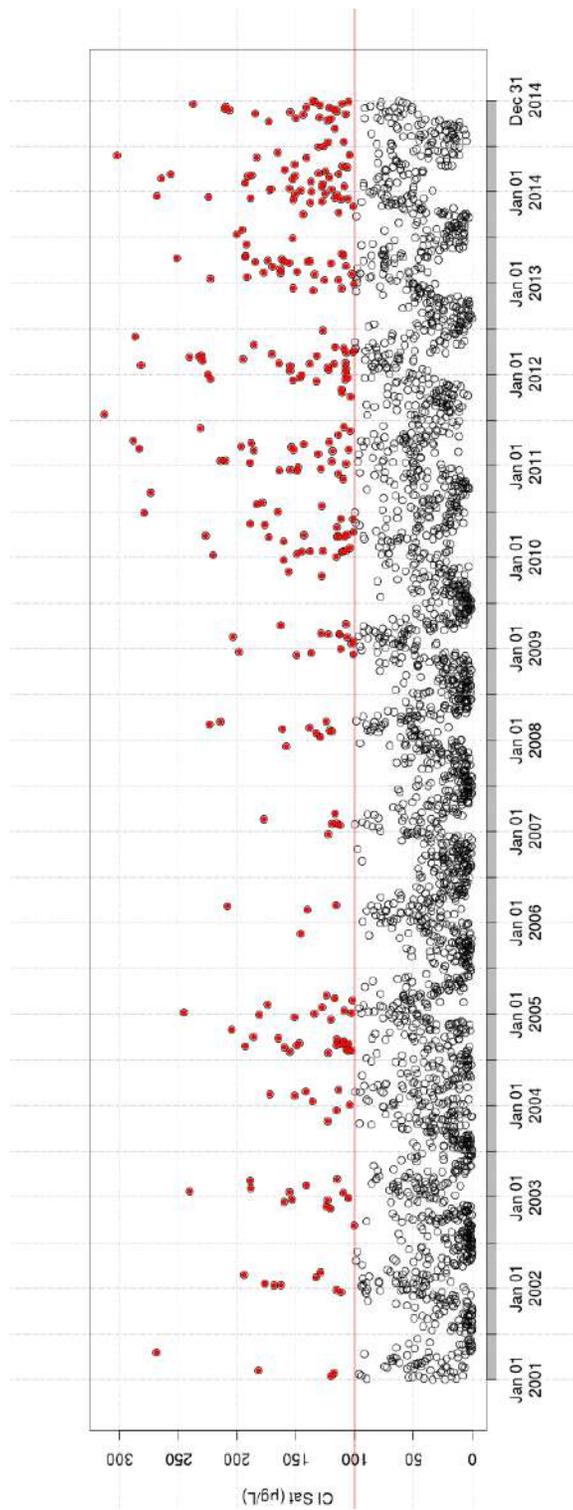


Figura 6.12: Umbral fijo definido a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ). La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

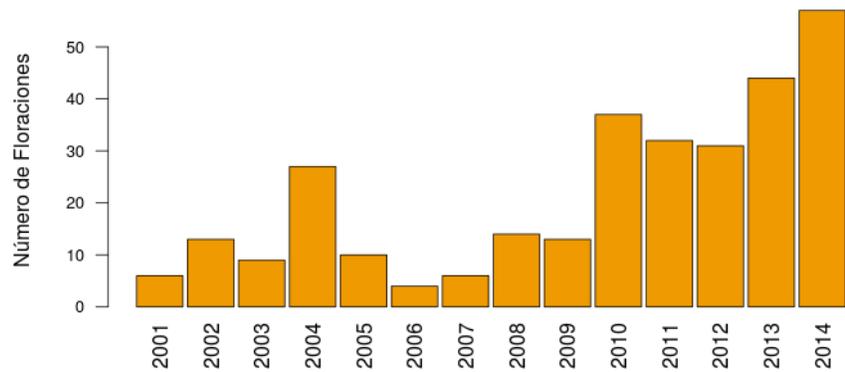


Figura 6.13: Cantidad de floraciones por año identificadas a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ).



Figura 6.14: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie a partir de las floraciones extraordinarias según Tett ( $100 \text{ mg/m}^3$ ).

En el gráfico de barras de la figura 6.13 se observan nuevamente las oscilaciones, pero ahora más claramente se puede identificar el año 2004 como pico al principio de la serie que luego decae abruptamente para ascender de nuevo en 2010 y 2013. Esto está indicando un proceso cíclico en las floraciones, pero también un crecimiento superior de la cantidad en los últimos años, ya que a partir de 2010 se observan mayores números de floraciones que en el resto de la serie. En el gráfico de torta de la figura 6.14, otra vez se observa la predominancia de los meses de verano, aunque ahora es más marcada la diferencia entre primavera y otoño. Estos resultados nos indican que son necesarios umbrales elevados para poder entender mejor la dinámica de las concentraciones realmente altas para este embalse.

### Métodos basados en los Crecimientos Rápidos

El método de umbrales mostrado anteriormente, está identificando solo altas concentraciones de clorofila-a, sin asegurarnos que todas ellas se correspondan con eventos de floración. Es decir, solo está teniendo en cuenta un parámetro en la definición de estos eventos. Al observar los resultados obtenidos, podemos decir que es insuficiente tener en cuenta solo este factor para detectar una floración. De todas maneras, nos provee información importante sobre el comportamiento de la biomasa algal en el embalse, relacionado con las altas concentraciones encontradas durante toda la serie, mostrando que el cuerpo de agua de estudio presenta condiciones graves con respecto a otros. Debido a que demasiadas fechas son incluidas en cada caso, más que eventos específicos de floración se pudieron identificar momentos en el año en el que el Embalse presenta condiciones sostenidas de altos valores de biomasa algal. En este marco, se buscó incorporar en la identificación de floraciones el parámetro que las define como crecimiento rápido de algas. Para ello, se utilizó la pendiente como medida para identificar la fecha de floración. Ésta se definió de dos maneras, por un lado como la diferencia entre valores consecutivos con paso de tiempo de 1 día y por el otro como exponencial, calculando el cociente entre valores consecutivos con el mismo paso de tiempo. Para este análisis, fue necesario utilizar una serie que no tuviera valores faltantes, por lo que se utilizó la generada en el capítulo 5 con el algoritmo DINEOF. Para sumar al análisis el parámetro de altas concentraciones, se desecharon aquellas fechas identificadas que tuvieran valores menores al umbral de Carlson de hipereutroficación ( $56 \text{ mg/m}^3$ ).

En la figura 6.15 se presentan las fechas identificadas como floraciones con el método de la pendiente definida como diferencia entre valores consecutivos. Se toma una diferencia mayor a 30 como criterio de floración. Las floraciones se observan resaltadas en rojo. Se identifican en total 615 fechas para toda la serie.

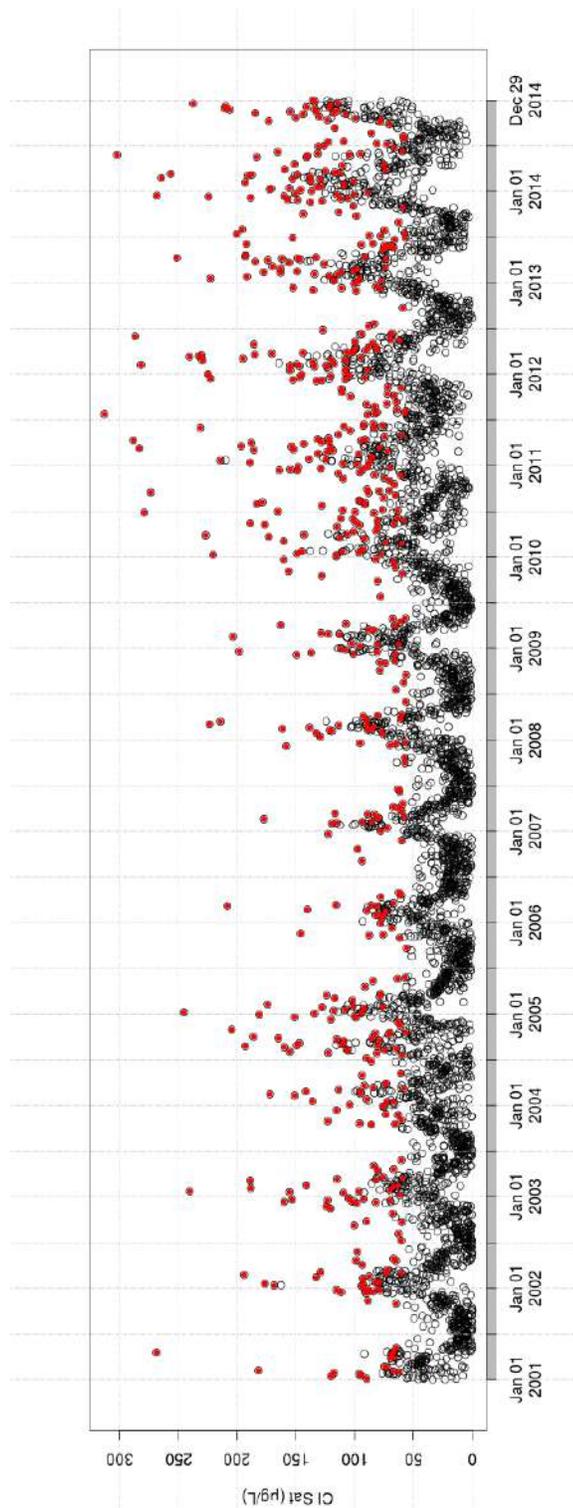


Figura 6.15: Floraciones identificadas con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). Los puntos rojos representan las fechas identificadas.

Nuevamente se realiza un análisis de las fechas resaltadas, a través del gráfico de barra

presentado en la figura 6.16, que muestra la cantidad de floraciones identificadas por año. Se observa un patrón algo diferente al obtenido con el método anterior de umbrales fijos. Las oscilaciones son mayores pero resaltan igualmente los últimos 5 años de la serie con mayores números de floraciones. A su vez, en el gráfico de torta de la figura 6.17 se vuelve a observar que el mayor porcentaje de floraciones se dan durante los meses de verano.

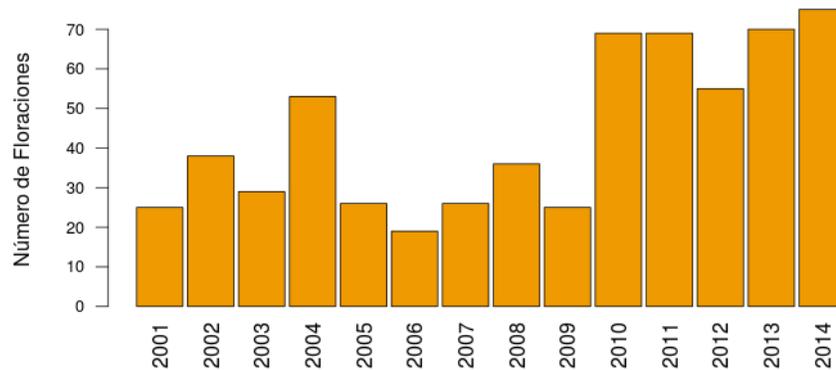


Figura 6.16: Cantidad de floraciones por año identificadas con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ).

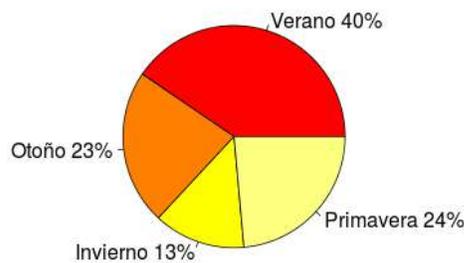


Figura 6.17: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el método de pendiente, definida como la diferencia de concentración mayor a 30, que superen el estado hipereutrófico según Carlson ( $56 \text{ mg/m}^3$ ).

A continuación, se muestran los resultados de la identificación de floraciones con el método que considera la pendiente como exponencial a través del cálculo del cociente de valores consecutivos. Se toman sólo aquellos resultados con cocientes mayores a 2,7 (número de Nepper) y que superen el valor de hipereutroficación, definido por Carlson. Se observa en

el gráfico presentado en la figura 6.18, las fechas en la serie temporal que fueron identificadas con este método. Se logra identificar un total de 270 fechas para todo el período de tiempo analizado.

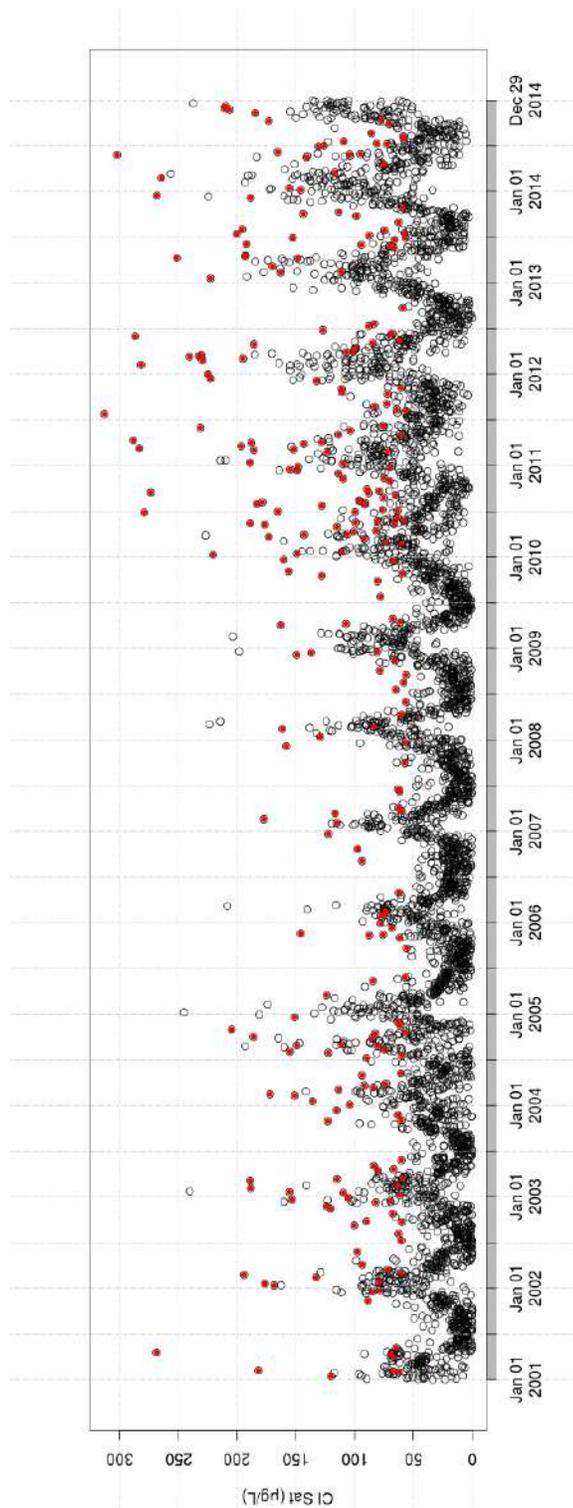


Figura 6.18: Floraciones identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación ( $56 \text{ mg/m}^3$ ). Los puntos rojos representan las fechas identificadas.

En la figura 6.19 se graficó el número de floraciones por año para el período estudiado.

Se observa un resultados diferente respecto a la definición de pendiente anterior. Se destaca un pico predominante en el año 2010 y luego una disminución de las cantidades. Además, en el gráfico de torta mostrado en la figura 6.20, se observan porcentajes similares para todas las épocas del año. Estos resultados tan distintos con respecto a todos los métodos presentados anteriormente, nos permiten dar cuenta de la importancia en la definición del método que se utiliza para definir las floraciones.

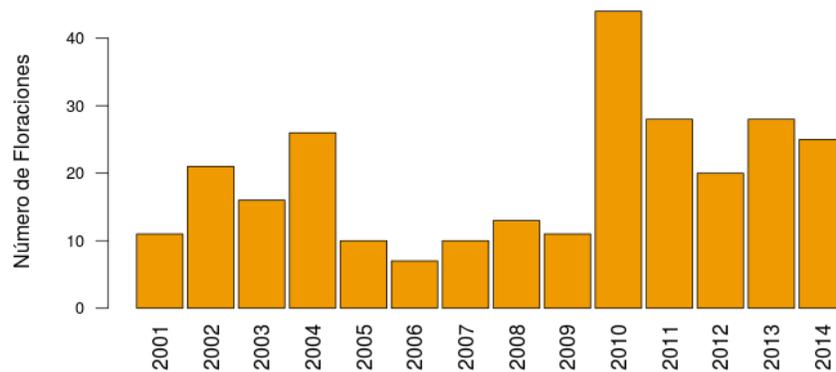


Figura 6.19: Cantidad de floraciones por año identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación (56 mg/m<sup>3</sup>).

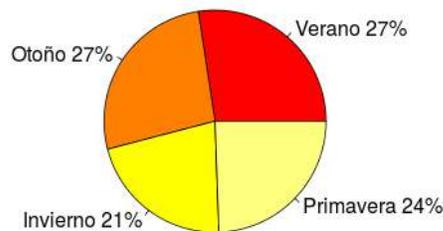


Figura 6.20: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas con la pendiente, definida como el cociente de concentración mayor a 2,7 y mayor al índice de Carlson correspondiente a estado de hipereutroficación (56 mg/m<sup>3</sup>).

### Método basado en la desviación del comportamiento normal

Es posible concluir, luego de haber probado diversas metodologías, que la definición utilizada para identificar fechas de floración es clave a la hora de obtener resultados confiables. Hasta ahora, ninguna de las analizadas puede separar fechas concretas como eventos de floración. Sí hemos podido obtener valiosa información sobre procesos que son persistentes en casi todos los métodos mostrados. Por ejemplo, las oscilaciones que estarían relacionadas a procesos climáticos que son posibles de identificar con el análisis de frecuencias realizado en el capítulo 5. También, el aumento sostenido en los últimos años de la serie.

Pero, no hemos logrado poder aislar y definir lo que significa un evento particular de floración para nuestro embalse de estudio, dado que presenta un desafío particular debido a las altas concentraciones que se observan durante todo el año. Por lo que se propone un método propio que priorice el hecho de que la floración es un evento por fuera de lo normal. En la reunión ICES (1984) se concluye sobre floraciones de fitoplancton excepcionales que deben ser definidas en términos de la desviación del ciclo normal de la biomasa fitoplanctónica. El desafío ahora está en definir este comportamiento normal.

Para realizar un mejor análisis y poder definir el estado normal, se utilizará un método de modelado de la serie llamado HANTS. Éste, es un algoritmo desarrollado para tratar series de tiempo de observaciones irregularmente espaciadas [80]. Ha sido pensado principalmente para rellenar datos faltantes en las series de tiempo, comunmente debidos a presencia de nubes. Pero debido a cómo calcula estos valores faltantes, lo que será explicado luego, provee mayor información de interés. Es así que ha sido utilizado exitosamente para más aplicaciones. Como por ejemplo para describir las variaciones espacio temporales de la temperatura en superficie, a través de la descripción de los períodos en las señales de series de tiempo de temperatura satelital de la superficie terrestre (LST) [81]. También ha sido empleado [82] para monitorear los cambios en la superficie terrestre de temperatura e índices verdes a través del modelado de series temporales de estas dos variables medidas desde satélite, cuyos resultados muestran tendencias de las mismas. Además, fue usado para reconstrucción y modelado de una serie de tiempo de Cl-a en [83], obteniendo valiosos resultados. Esto muestra que este algoritmo tiene mucho potencial para trabajar con series de tiempo que describan fenómenos cíclicos y poder obtener información adicional sobre la misma. En nuestro caso, la principal aplicación fue generar un umbral que representara la variación estacional de la Cl-a sin verse afectada por los valores extremos de floraciones y que representara así el comportamiento normal de la variable.

A continuación se explica el funcionamiento básico del algoritmo. La idea del mismo es calcular una serie de Fourier para modelar las series de tiempo, identificando outliers relativos al modelo. El algoritmo elimina esos outliers y los reemplaza con el valor dado por la serie de Fourier. Además, HANTS considera sólo las frecuencias más significativas esperadas en el perfil temporal (determinadas por ejemplo a partir de un análisis de transformadas de Fourier previo) y aplica un ajuste por cuadrados mínimos basado en componentes armónicos (senos y cosenos). Para cada frecuencia se determina la amplitud y la fase durante un proceso iterativo (Roerink et al., 2000). Los datos entrantes con desviaciones positivas o negativas muy grandes respecto a la curva son removidos, asignándoles un valor de cero. Después de recalcular los coeficientes sobre la base de los puntos que quedan, el procedimiento se repite hasta que el error máximo sea aceptable o el número de puntos restantes sea muy pequeño [80]. El ajuste de la curva es controlado por 5 parámetros que tienen que definirse

al comienzo del procedimiento:

- Número de frecuencias (Number of frequencies, NOF): una curva es descripta por su valor promedio y una serie de funciones seno con diferentes frecuencias. Con este parámetro, el usuario define cuántas frecuencias son usadas y qué tan largo es su período en unidades de tiempo muestrales. Esto resulta en una curva descripta por  $2 \times \text{NOF} - 1$  parámetros: fase y amplitud para cada frecuencia, menos la frecuencia cero (media) sin fase.
- Indicador de supresión de valores altos y bajos (Hi/lo suppression flag): este parámetro indica los valores umbrales (máximo y mínimo) para determinar los valores que serán considerados outliers y rechazados durante el ajuste.
- Umbral de rechazo de datos inválidos (Invalid data rejection threshold, IDRT): valores de la imagen que se consideran dato no válido.
- Tolerancia de error en el ajuste (Fit error tolerance, FET): la diferencia absoluta entre los puntos y la curva ajustada. Esta diferencia se estima en cada iteración y el proceso termina cuando la diferencia es menor a la FET.
- Grado de sobre-determinación (Degree of overdetermination, DOD): el número de observaciones válidas debe ser siempre mayor o igual al número de parámetros que describen la curva ( $2 \times \text{NOF} - 1$ ). Para obtener un ajuste más confiable el usuario puede decidir usar más puntos que el mínimo necesario a través de este parámetro.

La principal desventaja de este método es que no existen reglas objetivas para determinar la magnitud de los parámetros de control mencionados anteriormente. Sin embargo, en base a la experiencia y después de probar un cierto set de combinaciones de valores, se puede llegar a un conjunto de magnitudes apropiado [80]. En este trabajo, se utilizó la implementación de HANTS realizada por Markus Metz en el Add-on de GRASS GIS 7 (<http://grass.osgeo.org/grass70/manuals/addons/r.hants.html>) y se probaron diferentes combinaciones de parámetros, variando uno por vez. Se utilizaron finalmente los siguientes valores para cada parámetro:  $\text{NOF} = 6$ ,  $\text{FET} = 0.1$ ,  $\text{DOD} = 11$ , considerando también los valores elegidos en el trabajo de Andreo en [83]. Además, se utilizó para el análisis la serie temporal promediada cada 8 días, generada en el capítulo 5, ya que el objetivo fue suavizar la serie para obtener este comportamiento normal. En el gráfico de la figura 6.21, se puede observar un extracto de la serie modelada con HANTS sobre la serie original promediada cada 8 días. En este gráfico es posible apreciar, cómo el resultado de aplicar el algoritmo en la serie, nos da una representación coherente del comportamiento normal de la serie, respetando los ciclos anuales pero sin verse influenciada por los valores extremos.

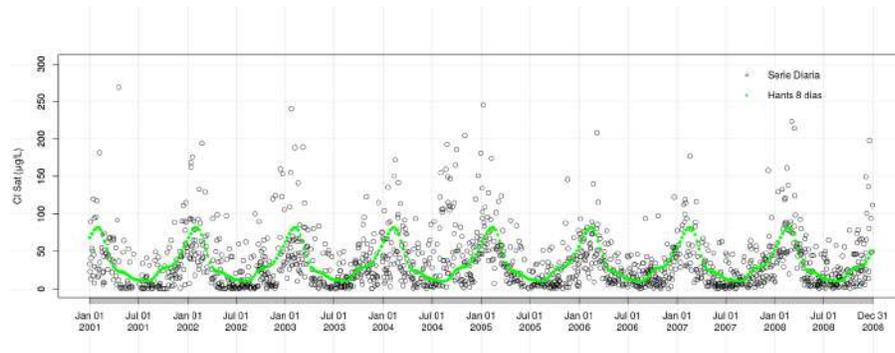


Figura 6.21: Serie modelada con HANTS (verde) sobre la serie promediada cada 8 días.

Por otro lado, con los resultados previamente expuestos en este trabajo, se ha identificado un comportamiento estadísticamente diferente a partir del año 2010. Por lo que se decidió considerar dos períodos para modelar la serie: antes y después de 2010. En el gráfico mostrado en la figura 6.22, se puede observar el resultado de la serie modelada sobre la original. Esta nueva serie modelada será utilizada de ahora en adelante como medida de la normalidad del comportamiento de la Cl-a en el embalse.

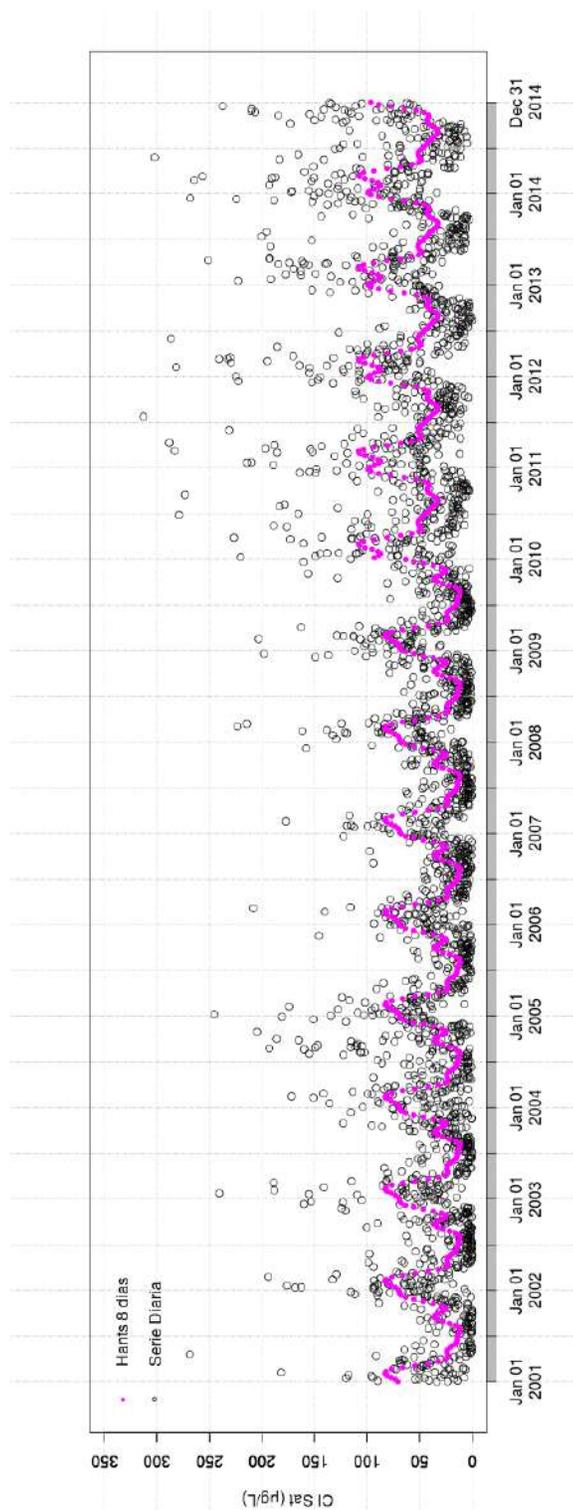


Figura 6.22: Serie modelada con Hants (Fucsia) realizada desde 2001 a 2009 y desde 2010 a 2014 sobre serie diaria original.

A continuación, es necesario definir qué consideramos comportamiento por fuera del normal, es decir, una floración. Se usó como criterio de floración umbral la serie modelada

más un cierto intervalo por encima de la misma. Para ésto, se probaron 3 intervalos distintos basados en cuartiles estadísticos provenientes de la distribución de la serie modelada. Las probabilidades que se utilizaron fueron 0.75, 0.90 y 0.99. Se le sumó a la serie modelada los distintos valores de cuartiles obtenidos, lo que generó un umbral como se muestra a modo de ejemplo en la figura 6.23, por el cual por encima del mismo se identificaron las fechas de floración.

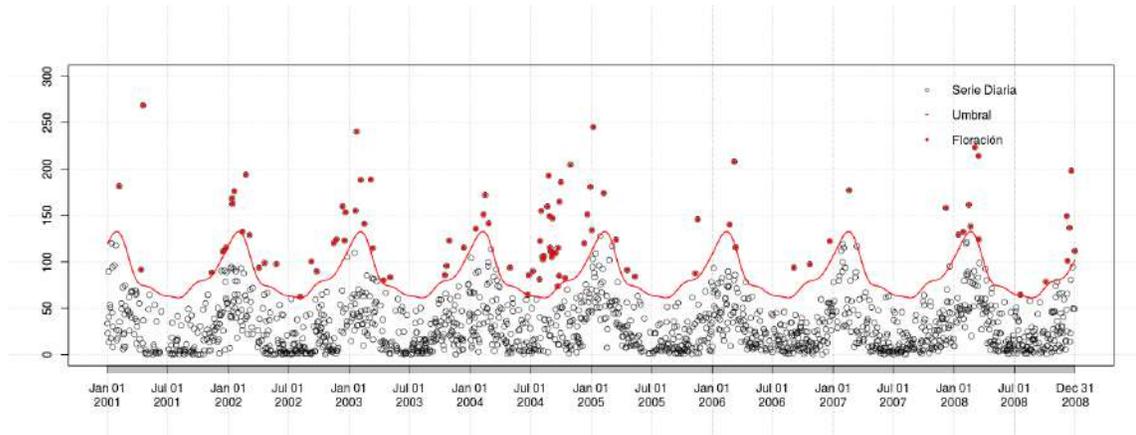


Figura 6.23: Ejemplo de generación de un umbral a partir de la serie modelada. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones para la serie diaria.

A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los umbrales que se probaron con este método para toda la serie (figuras 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, 6.31, 6.32)

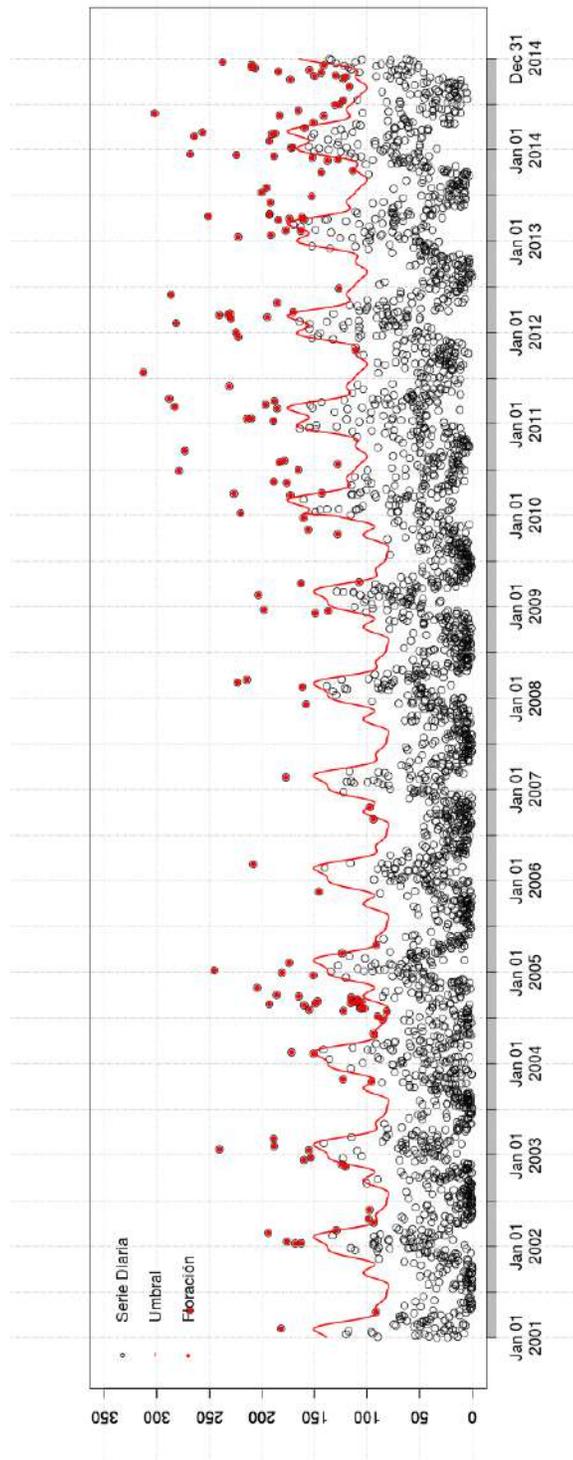


Figura 6.24: Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

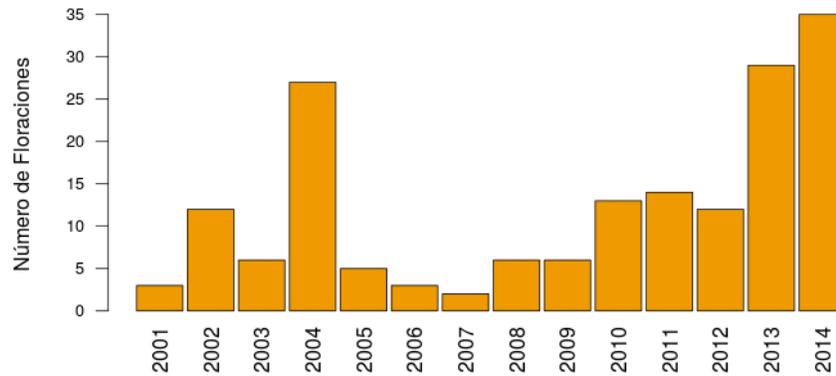


Figura 6.25: Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75.

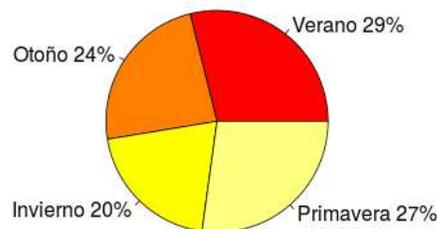


Figura 6.26: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75.

En las figuras 6.24, 6.25 y 6.26, se observan los resultados para el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.75. Se observan picos de mayores cantidades de floraciones en 2004, 2013 y 2014. Además, las floraciones se distribuyen en todas las estaciones del año de forma aproximadamente uniforme, a pesar de que en Verano-Primavera prevalecen (56%).

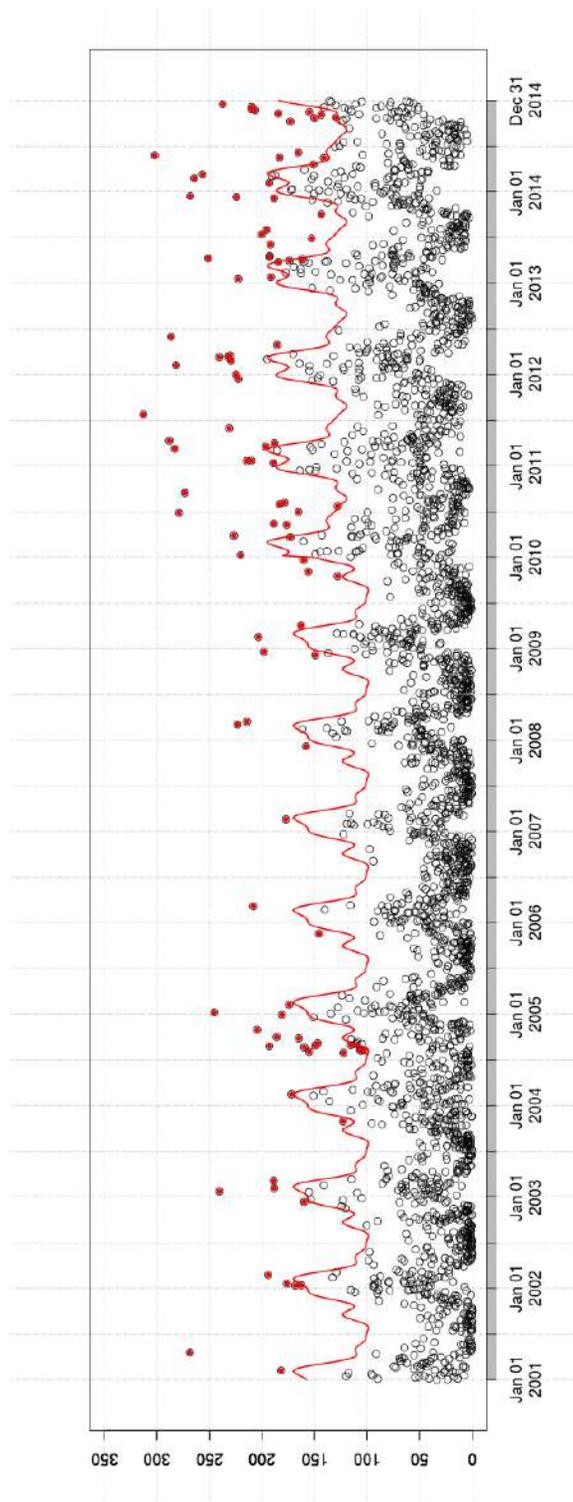


Figura 6.27: Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

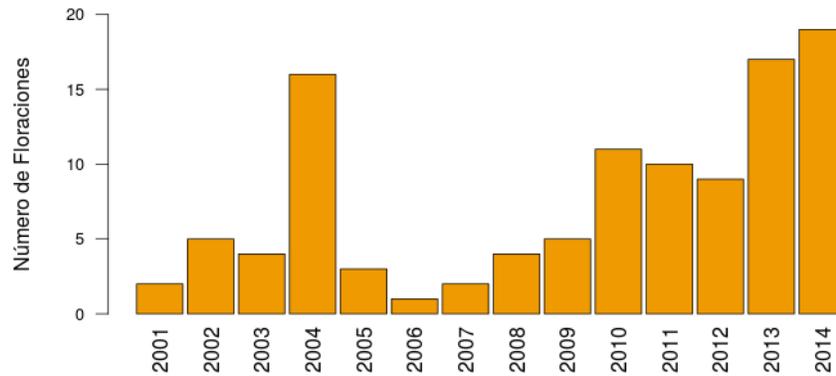


Figura 6.28: Cantidad de floraciones por año Identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9.

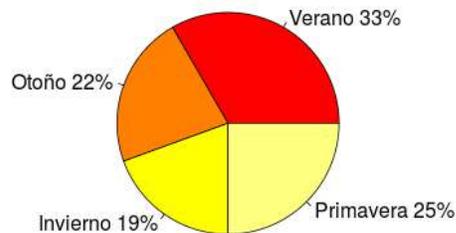


Figura 6.29: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9.

En las figuras 6.27, 6.28 y 6.29, se observan los resultados para el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.9. Se observan los mismos picos de floraciones en 2004, 2013 y 2014 pero ahora mayores cantidades en 2010, 2011 y 2012. Además, las floraciones se distribuyen un poco menos uniforme en las distintas estaciones, predominando Verano-Primavera (58%).

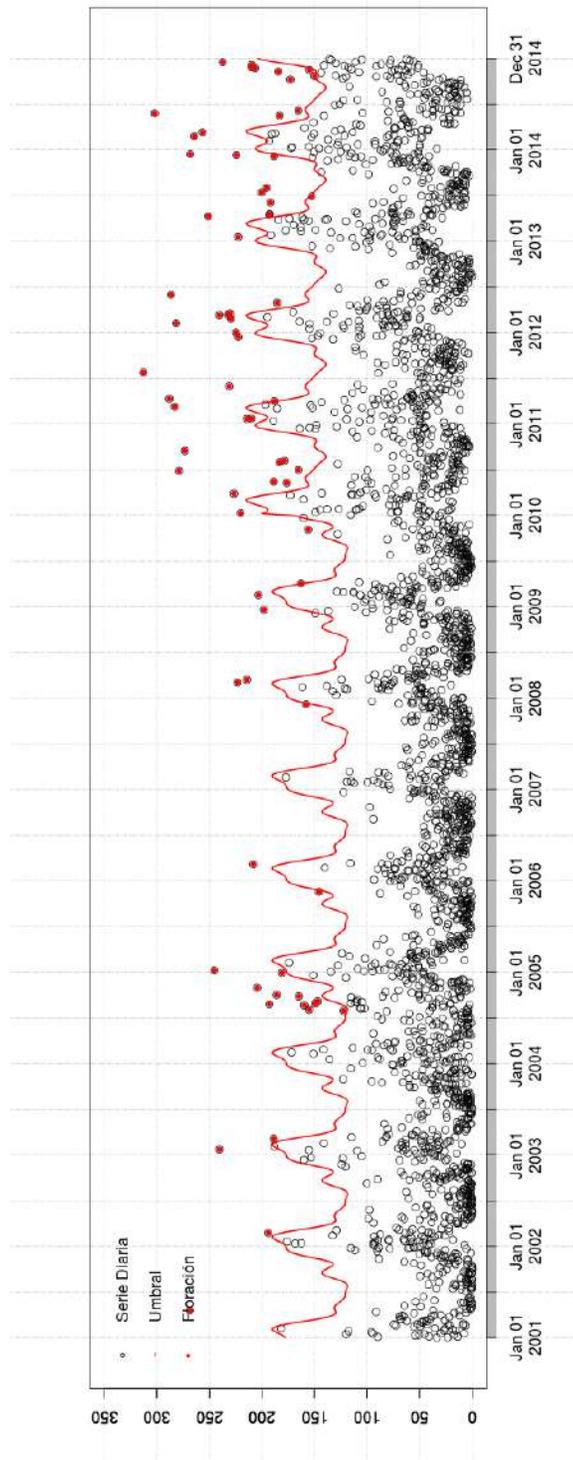


Figura 6.30: Umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99. La línea roja representa el umbral y los puntos rojos las fechas identificadas como floraciones.

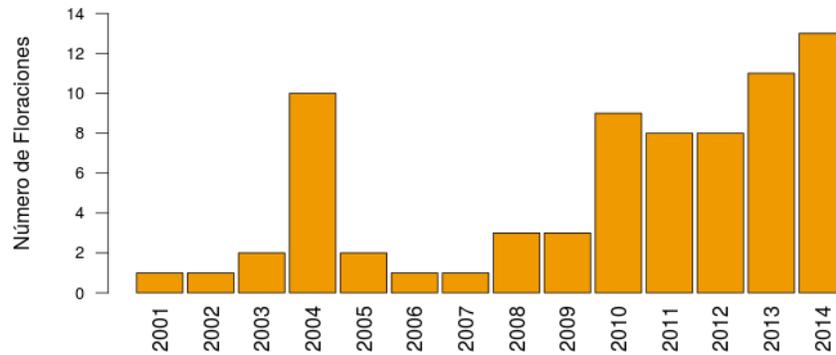


Figura 6.31: Cantidad de floraciones por año identificados con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99.

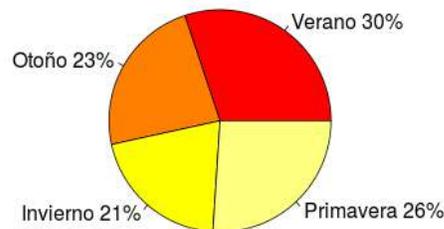


Figura 6.32: Porcentaje de floraciones por época del año identificadas en toda la serie con el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99.

En las figuras 6.30, 6.31 y 6.32, se observan los resultados para el umbral generado a partir de la serie modelada con Hants más probabilidad 0.99. Se observa el mismo pico en 2004 pero ya con un aumento notable a partir de 2010 con respecto a los años anteriores. La distribución de las floraciones en las distintas estaciones del año vuelven a ser como con el primer umbral de Hants (Primavera-Verano 56%).

A partir de los resultados mostrados con los tres umbrales, se elije finalmente el que utiliza la probabilidad 0.9, ya que se considera intermedia entre los enfoques propuestos. El gráfico de barra que se presenta en la figura 6.28, muestra la cantidad de floraciones identificadas por año en toda la serie con este umbral elegido. El claro pico identificado en el año 2004, se debe a una cantidad extraordinaria de floraciones en los meses de invierno.

Además, es posible observar en el gráfico de torta de la figura 6.29 que las floraciones se dan en un importante porcentaje durante todo el año, característica llamativa y particular de nuestro embalse de estudio, ya que normalmente las floraciones se dan en los meses de temperaturas más cálidas. Aú así podemos decir que más de la mitad de estos eventos se dan en estos meses (58 %).

Una vez que hemos logrado separar las fechas consideradas como floraciones, a continuación se presenta una caracterización de las mismas. Primero, se analizan las fechas separadas según la estación del año, ya que hemos mostrado que el comportamiento es muy disímil según la época. Se generan 2 grupos uniendo verano - primavera por un lado y otoño - invierno por el otro. En la figura 6.33, se observan los gráficos de caja con cintura que representan la distribución de los valores de concentración de Cl-a en las fechas identificadas como floraciones, según estos dos grupos. Los rangos de valores de concentración de Cl-a para el primer grupo (Verano - Primavera) van desde los 123 hasta los 283  $\text{mg}/\text{m}^3$  y la media es de 196, mientras que para el segundo (Otoño - Invierno) van desde los 103 hasta los 313  $\text{mg}/\text{m}^3$  y la media es de 187.

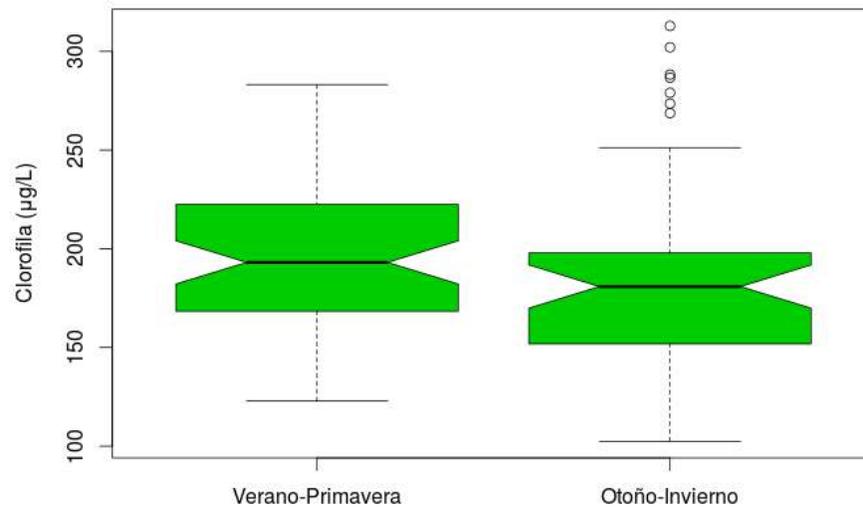


Figura 6.33: Comparación de los valores de fechas de floración divididas en Verano-Primavera y Otoño-Invierno.

Si miramos las cinturas de los gráficos de caja, vemos que no hay diferencia significativa en los valores de clorofila en las distintas estaciones. Esto muestra que a pesar de que en verano - primavera se producen más floraciones (61) que en otoño - invierno (44), los valores de concentración de Cl-a que alcanzan son estadísticamente similares. Por lo que es posible afirmar que para el Embalse de estudio una floración algal queda definida por una concentración de Cl-a que va desde los 103 hasta los 313  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Esto se observa de manera más clara en el gráfico de la figura 6.34, que muestra un histograma de las frecuencias de concentración de Cl-a en estas fechas identificadas como floraciones. Podemos ver que

el rango de mayor frecuencia es aquel que va desde 180 a 200  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Por otro lado, si comparamos las fechas de floración con el resto de la serie sin las mismas (figura 6.35) se observa que la distribución de los valores es muy diferente, predominando en esta última los valores más bajos y no llegando a los valores máximos a los que llegan las fechas de floración.

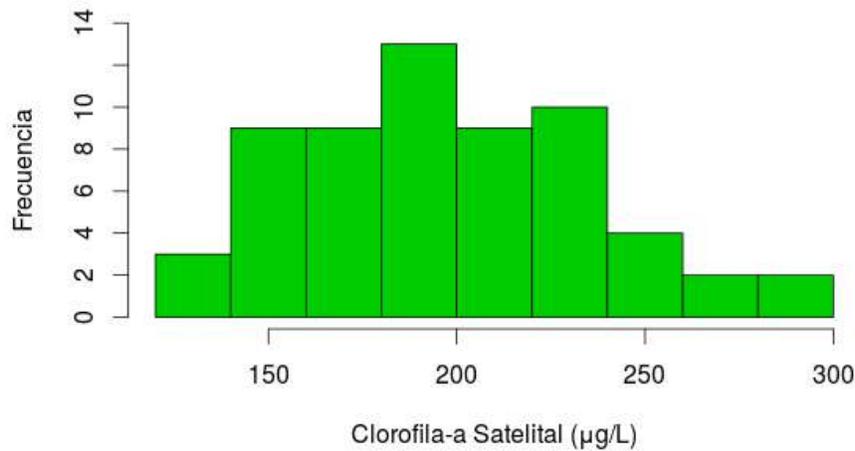


Figura 6.34: Histograma de los valores de fechas identificadas como floraciones.

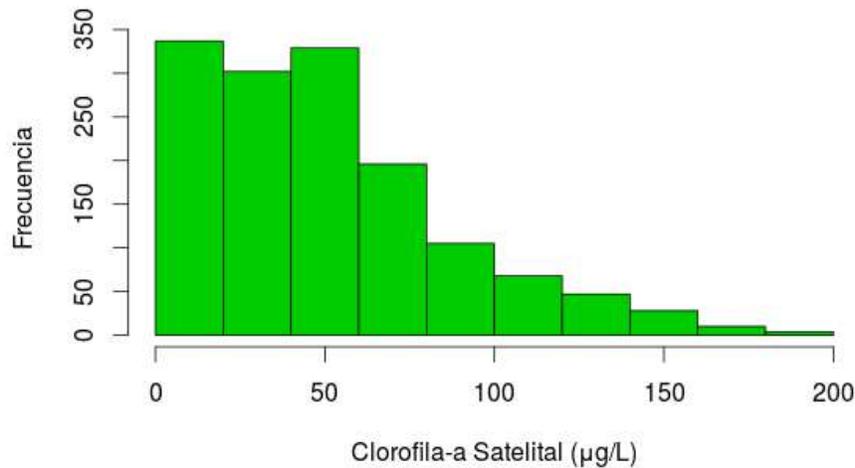


Figura 6.35: Histograma de los valores de clorofila-a en toda la serie sin las fechas identificadas como floraciones.

En los gráficos de caja de las figuras 6.36 y 6.37 se puede observar que los valores de concentración de Cl-a pertenecientes a las fechas identificadas como floraciones, son

estadísticamente distintos ya que las cinturas no se solapan, de los valores para toda la serie sin las fechas de floración, separadas por estaciones.

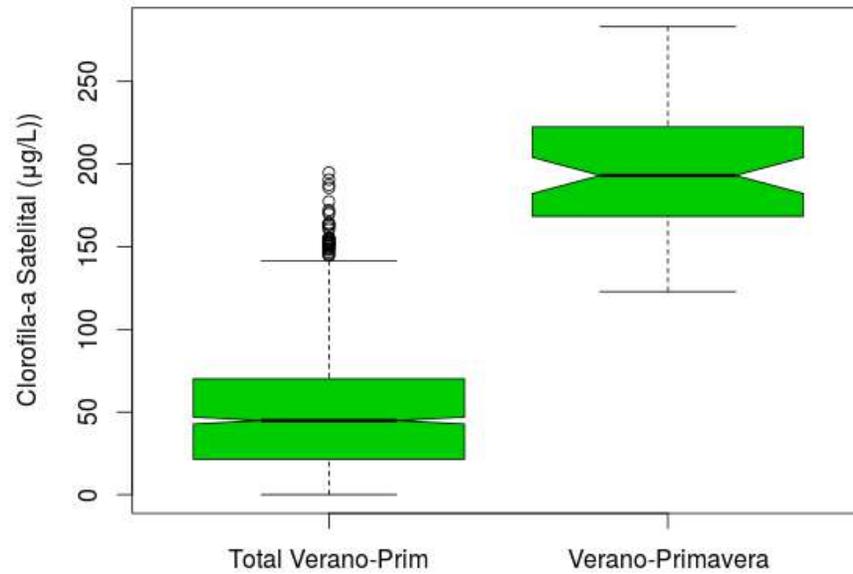


Figura 6.36: Comparación de los valores de la serie para Verano - Primavera sin las fechas de floración, con las fechas de floración en esa época del año.

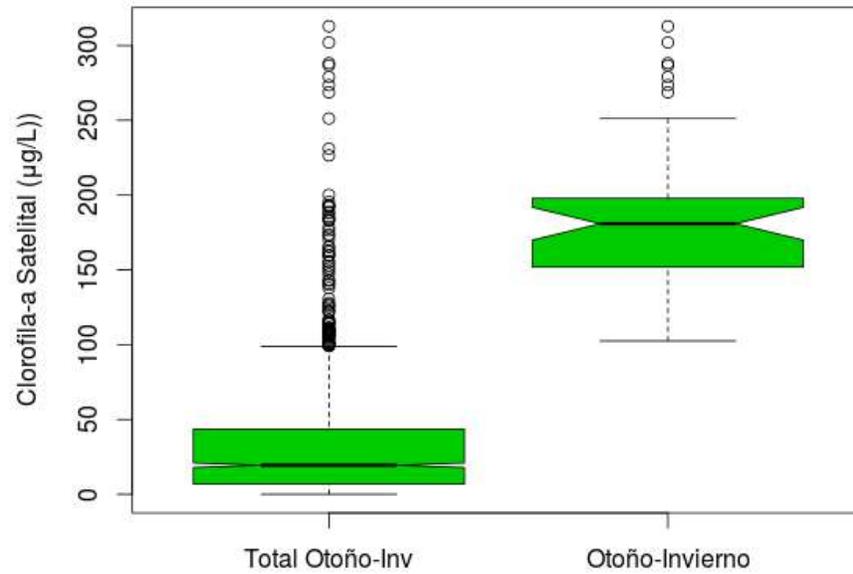


Figura 6.37: Comparación de los valores de la serie para Otoño - Invierno sin las fechas de floración, con las fechas de floración en esa época del año.

Podemos concluir a partir de estos resultados, que el método elegido funciona para identificar floraciones no sólo en nuestro embalse de estudio, sino que posiblemente sea adecuado para embalses con alta biomasa y abundantes cantidades de floraciones durante todo el año. Además, hemos logrado caracterizar específicamente cómo es un evento de floración en nuestro embalse, tarea no trivial como se ha podido apreciar a lo largo de este capítulo. Esto nos da un mayor entendimiento de lo que podremos llamar floración en el embalse a futuro, en el monitoreo del mismo.

## Capítulo 7

# Conclusiones y Perspectivas Futuras

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo pudo describirse y caracterizarse la variabilidad temporal de las floraciones algales en el Embalse San Roque en el período 2001 - 2014. Se logró desarrollar un modelo semiempírico para estimar concentración de clorofila a partir de datos MODIS con un  $r^2 = 0.69$ , así como también un modelo para estimar la temperatura en el agua del embalse con un  $r^2 = 0.8$ . A partir de datos MODIS y de los modelos obtenidos se construyeron series temporales diarias de concentración de clorofila-a por un lado y temperatura por el otro. Se demostró que el conjunto de los datos medidos *in situ* y el de las series temporales presentan el mismo comportamiento estadístico, lo que le da robustez al estudio del embalse mediante el uso de datos de origen satelital (MODIS).

A partir del estudio de la serie temporal de concentración de Clorofila-a, se pudieron identificar, describir y caracterizar los eventos de floraciones algales que ha sufrido el Embalse en el período de estudio. Se generó un método propio para identificarlas, lo que permitirá trabajar en el desarrollo de un modelo de alerta durante los momentos en que el embalse se encuentra en evento de floración. Esto será muy útil para los dos usos principales del Embalse. Por un lado, para la población que utiliza el mismo con fines recreativos, ya que estos eventos están correlacionados con la concentración de cianobacterias en el agua que son altamente perjudiciales para la salud humana [84] . Por el otro, para mejorar el proceso de potabilización frente a estos episodios, por ejemplo utilizando ozono. Este último es muy costoso y no se emplea regularmente, pero si se generaran alertas concretas de los momentos en los cuales es realmente necesario, se podrá comenzar a utilizar de forma eficiente.

Además, se pudo mostrar que el estado de la calidad del agua en el embalse ha ido empeorando en los últimos 5 años de la serie (2010-2014), marcando una tendencia que no parece parte de una oscilación natural. Esto se comprueba también con los resultados obtenidos para la serie temporal de temperatura, en los cuales se observa una disminución de la misma en esos años. Tal como se explicó a lo largo del trabajo, ésta es un parámetro físico fundamental en la regulación del proceso biológico descrito, pero en este caso no está siendo el causante del aumento de Cl-a observado en los últimos cinco años estudiados. En este marco, se deberán seguir estudiando los posibles causantes de este aumento de concentración de Cl-a y floraciones. Las causas se relacionan principalmente con el aumento en la concentración de nutrientes disponibles en el agua. Estas causas pueden ser de origen

antrópico o natural. Particularmente, en la última década el cambio de uso del suelo en la cuenca del Embalse San Roque está dado por el aumento de la superficie urbanizada. Esto puede estar provocando un mayor aporte de nutrientes al embalse a través de los ríos que desembocan en él. Es por esto, que se recomienda fuertemente controlar los procesos de urbanización y erosión que se están produciendo en la cuenca a través de planes de ordenamiento, así como incorporar plantas de tratamiento de efluentes cloacales regionales que realicen tratamientos terciarios para extraer el nitrógeno y fósforo presente en estas aguas residuales. A su vez, una reforestación y cuidado de la vegetación nativa de la ecorregión, ayudaría considerablemente a reducir los procesos de arrastre de nutrientes hacia los ríos y finalmente hacia el embalse.

Por otro lado, otra causa de masivas floraciones en el embalse puede deberse a fuertes épocas de sequía en la cuenca. Esto se relaciona directamente con bajas en el nivel de la cota del cuerpo de agua, lo que genera que se concentren los nutrientes en el mismo. Pero también en épocas de intensas lluvias, se generan arrastres en toda la cuenca que son depositados finalmente en el Embalse, generando también un aumento en la concentración de nutrientes.

En este sentido, es primordial entender las variadas y complejas posibles causas del fenómeno estudiado para poder generar sistemas de alerta. Éstos deberán ser construídos a partir de la relación entre los datos generados y validados en este trabajo sobre la variable Cl-a con datos ambientales diversos, tales como precipitación, altura de cota, viento, temperatura del aire, radiación solar entre otros de interés. Además, entender la influencia de los ciclos climáticos tales como El Niño así como también ciclos solares a través de series de tiempo. Esta es la línea principal que se desea seguir en trabajos futuros.

Otro análisis que se desprende de los resultados obtenidos, es que a pesar de haberse instalado el sistema de aireación artificial en una zona del embalse y de haberse probado [26] que ha producido un efecto positivo sobre la calidad del agua en la zona de influencia, en promedio el mismo está sufriendo un deterioro generalizado. Es por esto que se recomienda fuertemente instalar mayor cantidad de aireadores en el embalse, en distintas zonas para lograr que el efecto positivo sea generalizado.

# Bibliografía

- [1] Robert G Wetzel. *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf Professional Publishing, 2001.
- [2] Ingrid Chorus and Jamie Bartram. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. 1999.
- [3] Geoffrey A Codd, Louise F Morrison, and James S Metcalf. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicology and applied pharmacology*, 203(3):264–272, 2005.
- [4] Hans W Paerl and Jef Huisman. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental microbiology reports*, 1(1):27–37, 2009.
- [5] Julien Parinet, Manuel J Rodriguez, and Jean Serodes. Influence of water quality on the presence of off-flavour compounds (geosmin and 2-methylisoborneol). *water research*, 44(20):5847–5856, 2010.
- [6] Pedro F Temporetti. Efecto a largo plazo de los incendios forestales en la calidad del agua de dos arroyos en la subregión andino-patagónica, argentina. *Ecología austral*, 16(2):157–166, 2006.
- [7] Donald M Anderson, Per Andersen, V Monica Bricelj, John J Cullen, and JE Jack Rensel. *Monitoring and management strategies for harmful algal blooms in coastal waters*. Unesco, 2001.
- [8] Eija Rantajärvi, Riitta Olsonen, Seija Hällfors, Juha-Markku Leppänen, and Mika Raateoja. Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: unattended high-frequency measurements on board ferries in the baltic sea. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 55(4):697–704, 1998.
- [9] Hans W Paerl and Joseph F Ustach. Blue-green algal scums: an explanation for their occurrence during freshwater blooms. *Limnology and oceanography*, 27(2):212–217, 1982.
- [10] Kevin G Sellner et al. Physiology, ecology, and toxic properties of marine cyanobacteria blooms. *Limnology and oceanography*, 42(5):1089–1104, 1997.
- [11] Tiit Kutser. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6):2179–2189, 2004.

- 
- [12] Changyong Cao, Jack Xiong, Slawomir Blonski, Quanhua Liu, Sirish Uprety, Xi Shao, Yan Bai, and Fuzhong Weng. Suomi npp viirs sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(20), 2013.
- [13] Richard A Vollenweider. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'istituto Italiano di Idrobiologia, Dott. Marco de Marchi Verbania Pallanza*, 1976.
- [14] Robert E Carlson. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22(2):361–369, 1977.
- [15] Brian Henderson-Sellers and HR Markland. *Decaying lakes*. Wiley, 1987.
- [16] K Richardson. Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem. *Advances in marine biology*, 31:301–385, 1997.
- [17] Paul Tett. The ecophysiology of exceptional blooms. *Rapport et Proces-verbaux des Reunions. Conseil international pour l'Exploration de la Mer*, 187:47–60, 1987.
- [18] Miles Parker and Paul Tett. Exceptional plankton blooms. 1987.
- [19] Hans W Paerl, Hai Xu, Mark J McCarthy, Guangwei Zhu, Boqiang Qin, Yiping Li, and Wayne S Gardner. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (lake taihu, china): the need for a dual nutrient (n & p) management strategy. *Water Research*, 45(5):1973–1983, 2011.
- [20] Andreas Nicklisch, Tom Shatwell, and Jan Köhler. Analysis and modelling of the interactive effects of temperature and light on phytoplankton growth and relevance for the spring bloom. *Journal of plankton research*, 30(1):75–91, 2008.
- [21] Colin S Reynolds. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, 1984.
- [22] Richard D Robarts and Tamar Zohary. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 21(3):391–399, 1987.
- [23] Emilio Chuvieco. Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203):371, 1991.
- [24] Anclré Morel and Louis Prieur. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, 22(4):709–722, 1977.
- [25] Anatoly A Gitelson, John F Schalles, and Christine M Hladik. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 109(4):464–472, 2007.
- [26] A Ferral. *Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el Embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales*. FaMAF - UNC, 2013.

- 
- [27] Stephanie CJ Palmer, Tiit Kutser, and Peter D Hunter. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 157:1–8, 2015.
- [28] Fuqin Li, Thomas J Jackson, William P Kustas, Thomas J Schmugge, Andrew N French, Michael H Cosh, and Rajat Bindlish. Deriving land surface temperature from landsat 5 and 7 during smex02/smacex. *Remote sensing of environment*, 92(4):521–534, 2004.
- [29] Melchor Centeno. The refractive index of liquid water in the near infra-red spectrum. *JOSA*, 31(3):244–247, 1941.
- [30] Zhengming Wan and Jeff Dozier. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 34(4):892–905, 1996.
- [31] Katja Dörnhöfer and Natascha Oppelt. Remote sensing for lake research and monitoring—recent advances. *Ecological Indicators*, 64:105–122, 2016.
- [32] Robert H Shumway and David S Stoffer. *Time series analysis and its applications: with R examples*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [33] Genshiro Kitagawa. *Introduction to time series modeling*. CRC press, 2010.
- [34] María Inés Rodríguez, M Ruiz, G Vilchez, N Crema, AL Ruibal Conti, MA Bustamante, CM Angelaccio, F Busso, E Bonfanti, and F López. Monitoreo integral de un cuerpo de agua eutrófico embalse san roque (córdoba, argentina). In *I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*, 2006.
- [35] A Bustamante, S Morillo, and M Rodriguez. Estudios para la evaluación de la eutroficación del embalse san roque mediante la observación, medición y aplicación de herramientas numéricas. In *Seminario Taller Calidad de Agua en los Embalses de Córdoba*, 2002.
- [36] MI Rodríguez, MA Bustamante, AL Ruibal, MA Ruíz, and F Busso. Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del embalse san roque (cba). 2008.
- [37] F López. Numerical modelling of the seasonal thermal stratification in lake san roque.
- [38] J Helmbrecht and F López. Predictores físicos de la calidad del recurso en el lago san roque (córdoba, argentina). In *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina*, 1997.
- [39] S Morillo, C Dasso, MA Bustamante, M Granero, and F López. Modelación unidimensional de la limnología física del embalse san roque, córdoba, argentina. In *XIX Congreso Nacional del Agua*, 2002.
- [40] Sebastián A Guarrera. *El fitoplancton del Embalse San Roque (provincia de Córdoba).: Estudio preliminar*. Imprenta y casa editora Coni, 1948.
- [41] AA Bonetto, DH Di Persia, R Maglianesi, and M del C CORIGLIANO. Caracteres limnológicos de algunos lagos eutróficos de embalse de la región central de la argentina. *Ecosur*, 3(5):47–120, 1976.

- 
- [42] Juan G Gavilán. Study water quality in the san roque reservoir. *Water Quality Bulletin Environment Canada*, 6(4):136–158, 1981.
- [43] N Ormeño and F Busso. *Caracterización a través de Algunos Parámetros Físico-Químicos del Lago Embalse San Roque*. FCEFYN - UNC, 1986.
- [44] AL Ruibal, A Bustamante, M Granero, F López, A Girbal, E Lammel, ME Simonin, and F Busso. Estudio de la evolución de la calidad de agua del embalse del dique san roque (córdoba) asociado al desarrollo de floraciones de ceratium. In *Actas del Congreso Argentino de Gran Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*, pages 493–495, 1999.
- [45] María Inés Rodríguez, Fanny Busso, María Alejandra Bustamante, AL Ruibal Conti, Marcia Ruiz, and Carlos Martín Angelaccio. Floraciones de algas en el embalse san roque (córdoba). In *XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina*, 2005.
- [46] M A BUSTAMANTE, A L RUIBAL CONTI, M I RODRIGUEZ, F LOPEZ, F BUSO, and C BONETTO. Caracterización del régimen trófico del embalse san roque, (córdoba.). In *XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán*, 2007.
- [47] Martin T Dokulil and Katrin Teubner. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 438(1-3):1–12, 2000.
- [48] BJ Robson and DP Hamilton. Three dimensional modelling of a microcystis bloom event in the swan river estuary, western australia. *Ecological Modelling*, 174(1):203–222, 2004.
- [49] Jason P Antenucci, R Alexander, JR Romero, and J Imberger. Management strategies for a eutrophic water supply reservoir-san roque, argentina. *Water science and technology*, 47(7-8):149–155, 2003.
- [50] I Bernasconi, A Alensinkó, M Fuster, M Herrera, A Orueta, E Plomer, GE Montachini, M Cossavella, R Brito, N Ferreyra, L Hunziker, F Echeverría, J Melián, Roqué, and Bresciano JC. Desestratificación térmica del embalse san roque por el método de circulación-aireación artificial. Technical report, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, 2009.
- [51] RE Wedepohl, DR Knauer, GB Wolbert, H Olem, PJ Garrison, and K Kepford. Monitoring lake and reservoir restoration. Technical report, EPA 440/4-90-007. Prep. by N. Am. Lake Manage. Soc. for USEPA, 1990.
- [52] American Public Health Association, American Water Works Association, et al. *Standard methods for the examination of water and wastewater: selected analytical methods approved and cited by the United States Environmental Protection Agency*. American Public Health Association, 1981.
- [53] D. Wei, G. Yuan, and F. Simon. Seasonal characteristics of chlorophyll- a and its relationship with environmental factors in yunneng lake of china. *Journal of Environmental Biology*, 37(5):1073–1076, 2016. cited By 0.
- [54] EF Vermote, SY Kotchenova, and JP Ray. Modis surface reflectance user’s guide. *MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, version*, 1, 2011.
-

- 
- [55] EF Vermote and A Vermeulen. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (mod09). *ATBD version*, 4, 1999.
- [56] Wei Shi and Menghua Wang. An assessment of the black ocean pixel assumption for modis swir bands. *Remote Sensing of Environment*, 113(8):1587–1597, 2009.
- [57] Menghua Wang and Wei Shi. Estimation of ocean contribution at the modis near-infrared wavelengths along the east coast of the us: Two case studies. *Geophysical research letters*, 32(13), 2005.
- [58] Zhengming Wan. Collection-5 modis land surface temperature products users’s guide. *ICESSE, University of California, Santa Barbara*, 2007.
- [59] ZHENGMING WAN. *MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD)*. Institute for Computational Earth System Science University of California, Santa Barbara, 1999.
- [60] William C Snyder, Zhengming Wan, Yulin Zhang, and Y-Z Feng. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 19(14):2753–2774, 1998.
- [61] Core Team. R: A language and environment for statistical computing.
- [62] Development Team. Geographic resources analysis support system (grass). `grass.osgeo.org`, 2016.
- [63] John R Jensen. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Technical report, Univ. of South Carolina, Columbus, 1986.
- [64] Zhangyan Jiang, Alfredo R Huete, Kamel Didan, and Tomoaki Miura. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10):3833–3845, 2008.
- [65] Chuanmin Hu, Zhongping Lee, Ronghua Ma, Kun Yu, Daqiu Li, and Shaoling Shang. Moderate resolution imaging spectroradiometer (modis) observations of cyanobacteria blooms in taihu lake, china. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4), 2010.
- [66] Anatoly A Gitelson, Giorgio Dall’Ólmo, Wesley Moses, Donald C Rundquist, Tadd Barrow, Thomas R Fisher, Daniela Gurlin, and John Holz. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 112(9):3582–3593, 2008.
- [67] Giorgio Dall’Ólmo, Anatoly A Gitelson, and Donald C Rundquist. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 30(18), 2003.
- [68] Kevin D Menken, Patrick L Brezonik, and Marvin E Bauer. Influence of chlorophyll and colored dissolved organic matter (cdom) on lake reflectance spectra: Implications for measuring lake properties by remote sensing. *Lake and Reservoir Management*, 22(3):179–190, 2006.
- [69] A Gitelson. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 13(17):3367–3373, 1992.

- 
- [70] Colleen B Mouw, Steven Greb, Dirk Aurin, Paul M DiGiacomo, Zhongping Lee, Michael Twardowski, Caren Binding, Chuanmin Hu, Ronghua Ma, Timothy Moore, et al. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 160:15–30, 2015.
- [71] Herman J Gons. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environmental Science & Technology*, 33(7):1127–1132, 1999.
- [72] Mark William Matthews and Daniel Odermatt. Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 156:374–382, 2015.
- [73] Mark William Matthews, Stewart Bernard, and Lisl Robertson. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 124:637–652, 2012.
- [74] John M Chambers. *Graphical methods for data analysis*. 1983.
- [75] Jean-Marie Beckers and M Rixen. Eof calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets\*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(12):1839–1856, 2003.
- [76] Aïda Alvera-Azcárate, Alexander Barth, Michel Rixen, and Jean-Marie Beckers. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: application to the adriatic sea surface temperature. *Ocean Modelling*, 9(4):325–346, 2005.
- [77] Sarah R Brody, M Susan Lozier, and John P Dunne. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5):2345–2357, 2013.
- [78] Jacob Carstensen, Peter Henriksen, and Anna-Stiina Heiskanen. Summer algal blooms in shallow estuaries: definition, mechanisms, and link to eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 52(1):370–384, 2007.
- [79] Sven-Olof Ryding and Curt Forsberg. Short-term load-response relationships in shallow, polluted lakes. In *Hypertrophic ecosystems*, pages 95–103. Springer, 1980.
- [80] GJ Roerink, M Menenti, and W Verhoef. Reconstructing cloudfree ndvi composites using fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9):1911–1917, 2000.
- [81] Yongming Xu, Yan Shen, and Ziyue Wu. Spatial and temporal variations of land surface temperature over the tibetan plateau based on harmonic analysis. *Mountain Research and Development*, 33(1):85–94, 2013.
- [82] Yves Julien, José A Sobrino, and Wout Verhoef. Changes in land surface temperatures and ndvi values over europe between 1982 and 1999. *Remote Sensing of Environment*, 103(1):43–55, 2006.
-

- [83] V. C. Andreo. *Variabilidad espacio temporal de florecimientos fitoplanctónicos en el Talud y plataforma continental de la Patagonia argentina usando sensores Remotos*. FaMAF - UNC, 2014.
- [84] T Petcheneshsky, RO Benitez, AL Parenti, H Stepanik, S De Simone, L Pertusi, and J Lobos. Directrices sanitarias para el uso seguro de aguas recreativas. Technical report, Departamento De Salud Ambiental, Dirección Nacional De Determinantes De La Salud E Investigación, Subsecretaría De Relaciones Institucionales, Secretaría De Relaciones Nacionales E Internacionales, Ministerio De Salud, 2016.