

Análisis Espaciotemporal de Clorofila y su Relación con Factores Ambientales en la Región de Antofagasta

Angel Barra

Abril 7, 2025

1 Introducción

El fitoplancton, en particular la concentración de clorofila-*a* (CHL-*a*), es un indicador clave de la productividad primaria marina y de la salud de los ecosistemas oceánicos [1]. Su variabilidad temporal y espacial está fuertemente influenciada por factores físicos y climáticos como la temperatura superficial del mar (SST), los regímenes de surgencia y la dinámica de las masas de agua [2], [3].

En zonas costeras como las costas del norte de Chile, especialmente frente a Antofagasta, el estudio de la fenología del fitoplancton se vuelve esencial para comprender procesos de surgencia y su impacto en los ciclos biogeoquímicos y en las cadenas tróficas [4]. Además, alteraciones en la estacionalidad o intensidad de los blooms pueden reflejar efectos del cambio climático o anomalías oceanográficas interanuales.

Gracias a la disponibilidad de datos satelitales de alta resolución y a herramientas modernas de análisis como *xarray*, es posible realizar estudios espaciotemporales detallados que permiten identificar patrones de variabilidad, anomalías y posibles relaciones entre CHL-*a* y variables ambientales como la SST [2], [3].

Este informe presenta un análisis exploratorio y comparativo de la distribución de clorofila-*a* en la región de Antofagasta durante el periodo 1997–2024, con especial énfasis en su dinámica temporal, patrones estacionales, anomalías anuales y su correlación con la temperatura superficial del mar.

2 Carga y Preprocesamiento de Datos

Los datos utilizados en este análisis corresponden a la concentración superficial de clorofila-*a* (CHL-*a*) y a la temperatura superficial del mar (SST), ambos con resolución diaria y cobertura espacial sobre la región costera de Antofagasta, Chile.

El preprocesamiento consistió en la selección geográfica de la zona de estudio, la eliminación de valores negativos o nulos (NaN) y la sincronización temporal entre ambas variables. Los datos se mantuvieron en su resolución original, y se manipularon mediante la biblioteca *xarray*, que permite trabajar de forma eficiente con estructuras multidimensionales.

Tras aplicar el recorte espacial correspondiente, se estimó un porcentaje de valores faltantes del **38.33%** para CHL-*a* y del **36.57%** para SST. Estos valores ausentes se concentran principalmente en las zonas terrestres y áreas costeras adyacentes, como se observa en la Figura 1.

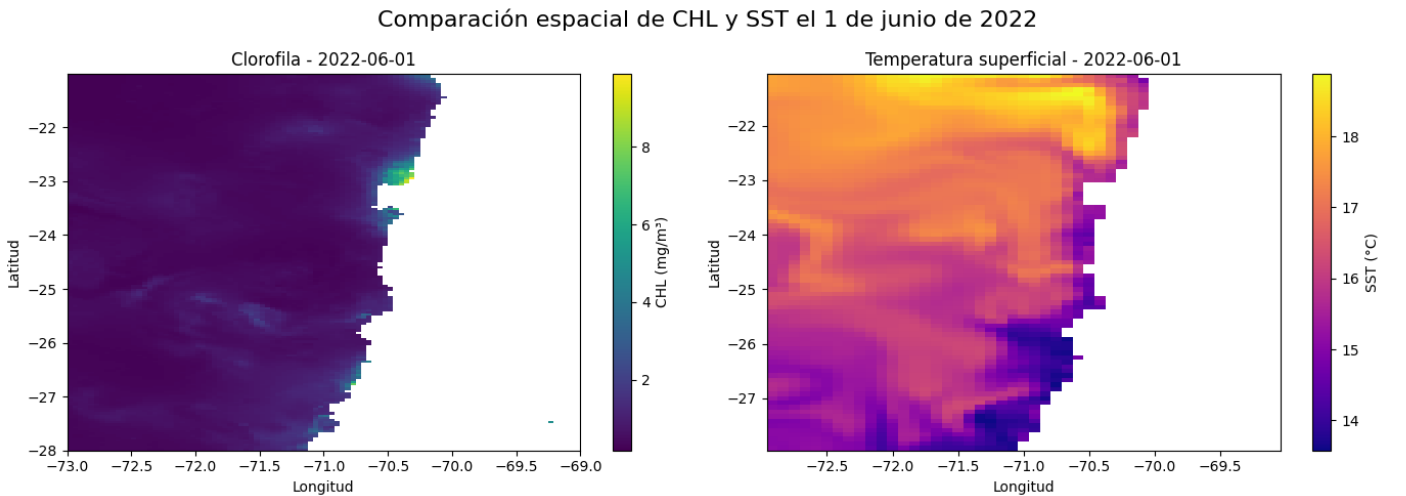


Figure 1: Comparación espacial de la concentración de clorofila (CHL-*a*) y la temperatura superficial del mar (SST) en un mismo instante. Los valores nulos (NaN) se corresponden con zonas terrestres o sin datos satelitales.

Dado que ambos datasets representan variables estrictamente oceánicas, es natural que los valores válidos se limiten al área marina, mientras que la región continental y ciertas zonas de borde no contienen observaciones válidas. Esta distribución espacial de los NaN es coherente con la naturaleza del problema. Además, gracias a la funcionalidad de

`xarray`, que permite excluir automáticamente estos valores en operaciones estadísticas, fue posible trabajar con los datos sin necesidad de imputación o interpolación adicional.

3 Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

Distribución de la concentración de clorofila

Antes de analizar su comportamiento temporal, se estudió la distribución de los valores diarios promedio espaciales de clorofila-*a* (CHL-*a*) en toda la serie disponible (1997–2024). La Figura 2 muestra esta distribución tanto en escala lineal como logarítmica.

En escala lineal, se observa una clara asimetría positiva, con una concentración de valores en el rango bajo (alrededor de 0.4 mg/m³) y una cola larga hacia la derecha, lo que indica la presencia ocasional de valores elevados —potencialmente asociados a eventos de *blooms* fitoplanctónicos.

Al aplicar la transformación logarítmica (\log_{10}), la distribución adquiere una forma más simétrica y aproximadamente normal, lo que sugiere que una parte importante de la variabilidad de CHL-*a* responde a procesos multiplicativos o exponenciales, algo habitual en fenómenos ecológicos y biofísicos.

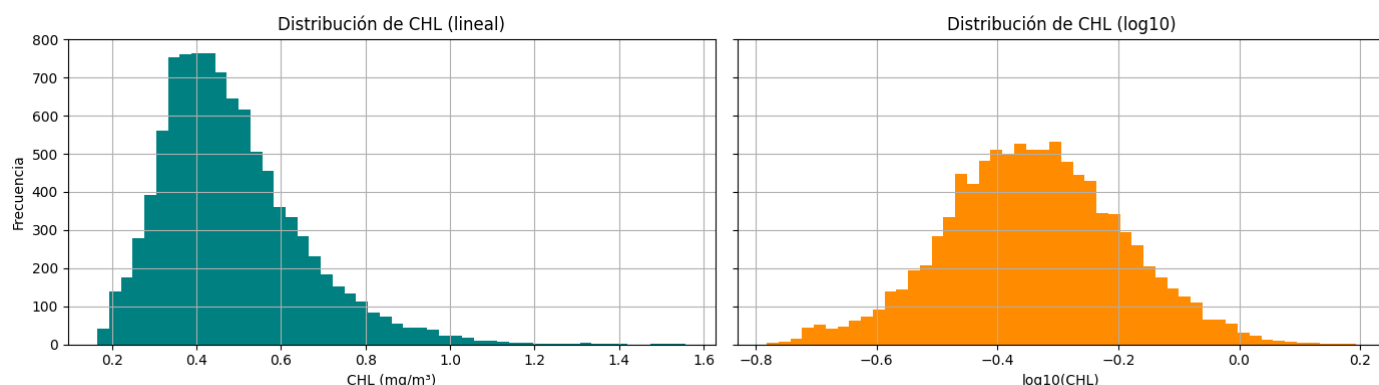


Figure 2: Distribución de la concentración diaria promedio de CHL-*a* para todo el periodo (1997–2024). A la izquierda en escala lineal; a la derecha en escala logarítmica.

Serie temporal diaria y mensual

La Figura 3 muestra la evolución de la concentración de clorofila-*a* (CHL-*a*) en la región de Antofagasta durante el periodo 1997–2024, a escala diaria (arriba) y mensual (abajo). Ambas series representan el promedio espacial diario/mensual de CHL-*a* sobre la zona de estudio.

En la escala diaria se observan pulsos estacionales recurrentes, con valores máximos típicos entre diciembre y marzo, y mínimos persistentes durante el invierno austral (junio–agosto). Estos patrones sugieren la influencia de ciclos oceanográficos anuales, como la surgencia costera.

Al pasar a una agregación mensual, la señal estacional se vuelve mucho más evidente y estable. El promedio mensual permite reducir el ruido asociado a eventos transitorios o variabilidad meteorológica de corto plazo, y revela de manera clara la alternancia entre periodos de alta y baja productividad fitoplanctónica. Esta visualización también facilita la comparación entre años, especialmente para detectar anomalías persistentes.

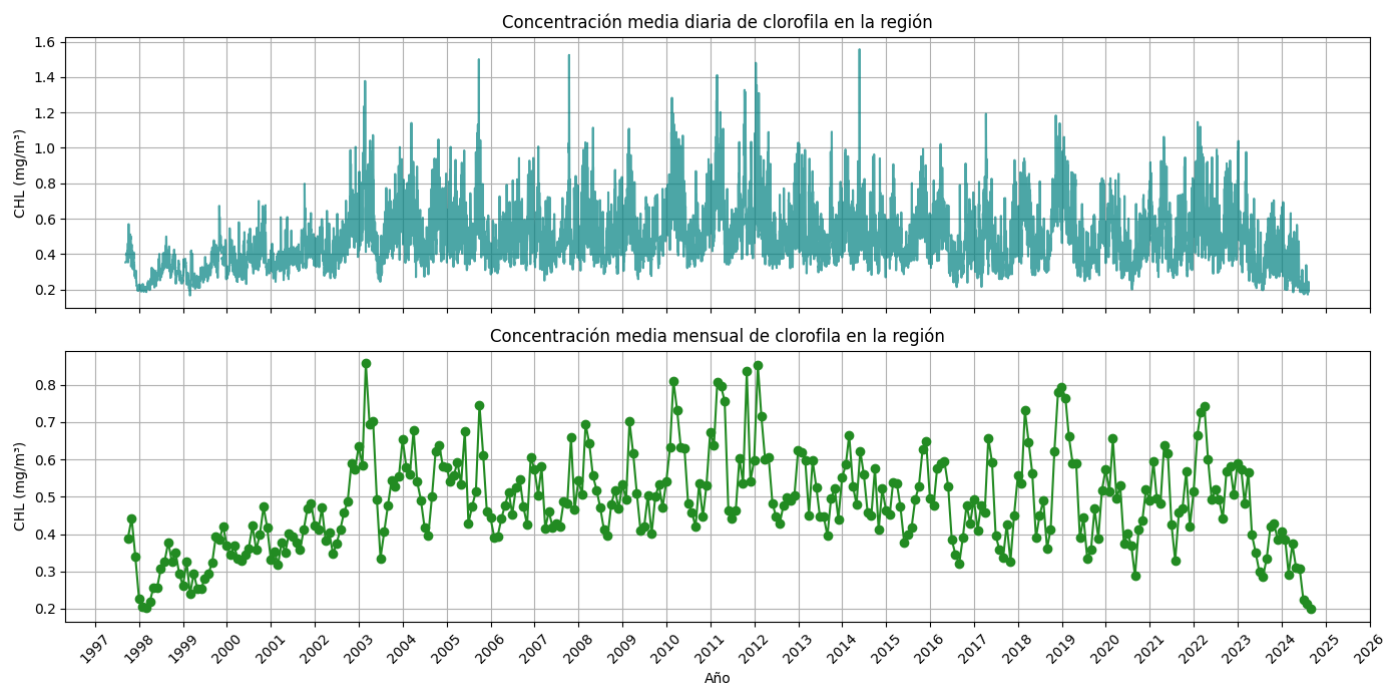


Figure 3: Serie temporal diaria (arriba) y mensual (abajo) de la concentración promedio de CHL-a entre 1997 y 2024. La escala mensual suaviza el ruido diario y resalta la estacionalidad.

Estacionalidad promedio mensual

Para identificar el comportamiento típico de la concentración de clorofila-*a* (CHL-a) a lo largo del año, se calcularon los promedios mensuales sobre toda la serie temporal (1997–2024). La Figura 4 muestra el resultado de este análisis.

Se observa una marcada estacionalidad, con valores máximos durante el verano austral, alcanzando su punto más alto en febrero (0.56 mg/m^3), y mínimos persistentes en invierno, especialmente en julio (0.40 mg/m^3). La curva muestra una transición suave entre ambos extremos, destacando una simetría estacional bien definida.

Este patrón es consistente con la dinámica de surgencia costera que caracteriza al norte de Chile, donde en los meses de mayor radiación solar y mezcla vertical (verano–otoño) se favorece la disponibilidad de nutrientes y la productividad fitoplanctónica. En contraste, durante el invierno la estratificación y las condiciones físicas limitan el crecimiento del fitoplancton.

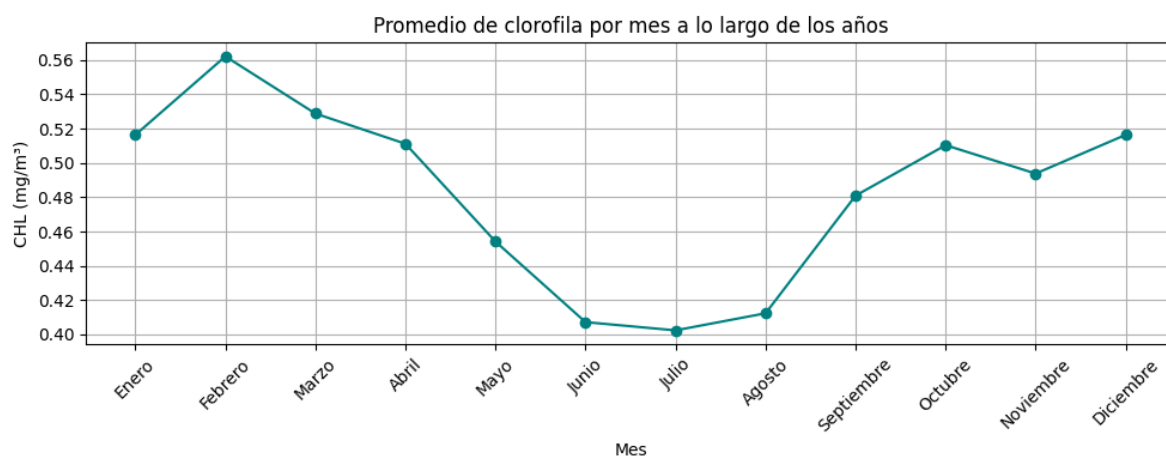


Figure 4: Promedio mensual de CHL-a calculado a partir de los 27 años de datos. Se observa una estacionalidad típica con máximos en verano y mínimos en invierno.

Distribución espacial promedio mensual

La estacionalidad observada en la serie temporal y en el promedio mensual por mes se ve reforzada al analizar la distribución espacial de CHL-a promediada para cada mes del año (Figura 5).

Se observa que los valores más altos de concentración de clorofila se presentan de forma consistente durante los meses de verano austral (enero–marzo), con máximos localizados en sectores costeros, especialmente alrededor de los 24°S . A

medida que avanza el año, esta señal disminuye, alcanzando su mínimo espacial en invierno (junio–agosto), donde la concentración de CHL-a es notablemente más baja y homogénea en toda la zona.

Esta variación mensual en el espacio respalda lo observado en los gráficos temporales: la productividad fitoplanctónica en la región no solo varía a lo largo del año, sino que se distribuye espacialmente con mayor intensidad en ciertas zonas durante los periodos de máxima actividad.

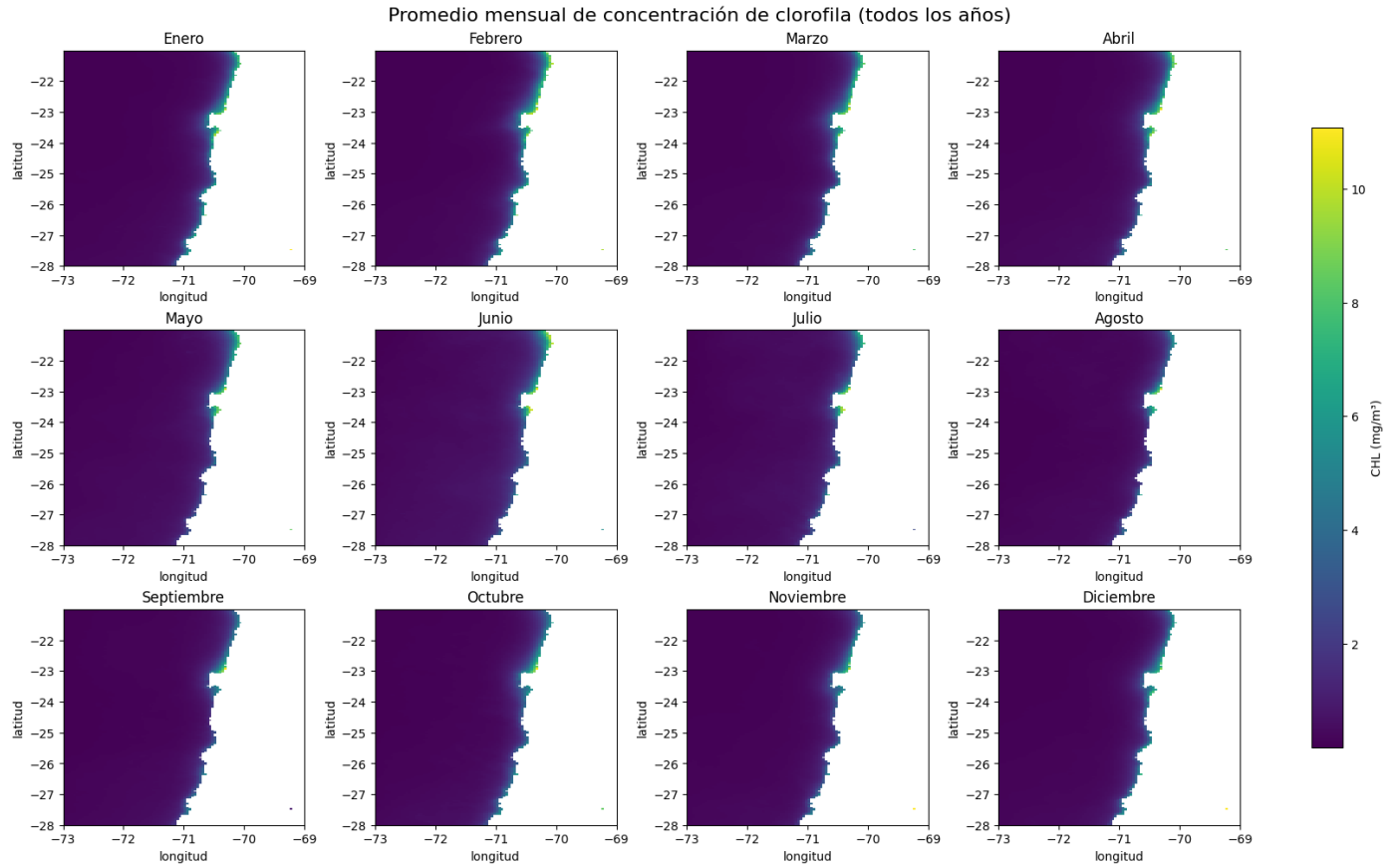


Figure 5: Distribución espacial mensual promedio de concentración de CHL-a (1997–2024). Se aprecia una clara estacionalidad con valores máximos en verano.

Además de reflejar la estacionalidad general, la Figura 5 permite identificar patrones espaciales persistentes a lo largo del año. En los meses más cálidos (verano austral), la concentración de CHL-a aumenta de forma significativa a lo largo de toda la costa, especialmente en las zonas próximas a la plataforma continental.

Durante los meses más fríos (junio–agosto), si bien se observa una disminución generalizada en la concentración de clorofila en gran parte del área, ciertos sectores costeros mantienen niveles relativamente elevados de CHL-a. Esta persistencia es especialmente visible en los alrededores de la península de Mejillones, y coincide con la ubicación de bahías semiabiertas.

Las bahías son conocidas por presentar condiciones oceanográficas particulares, incluyendo circulación restringida, mayor retención de nutrientes y limitada dispersión de biomasa, lo que puede favorecer la acumulación local de fitoplancton incluso cuando las condiciones externas son menos productivas [5], [6].

Este tipo de estructuras geográficas podría actuar como reservorios locales de biomasa, manteniendo condiciones ecológicas favorables a lo largo de todo el año.

Comparación temporal entre CHL-a y SST

La Figura 6 presenta una comparación temporal detallada entre la concentración de clorofila-*a* (CHL-a) y la temperatura superficial del mar (SST). En la parte superior se muestran las series temporales diarias del promedio espacial de ambas variables, correspondientes al periodo común disponible, desde junio de 2022 hasta el 14 de agosto de 2024, fecha en que finalizan los registros de CHL-a.

A partir de estas series diarias, no se observa una relación clara entre la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila. Por ello, se calcularon los promedios mensuales de ambas variables restringidos al periodo en común, lo que permite visualizar con mayor claridad sus patrones estacionales. Esta comparación se presenta en un gráfico con doble eje, donde se aprecia que la CHL-a tiende a alcanzar sus valores máximos durante el verano austral (enero–marzo), precisamente cuando la SST es mayor, y desciende durante el invierno, cuando la temperatura superficial aumenta también disminuye. Posteriormente tras agosto la SST sube de forma gradual mientras que la concentración de CHL-a aumenta de forma abrupta cuando las temperaturas comienzan a subir, dejando ver que otros valores podrían

afectar este evento o también el hecho de una ventana de dos años no es suficiente para medir una relación directa entre la SST y la concentración de CHL-a.

Comparación temporal entre CHL y SST

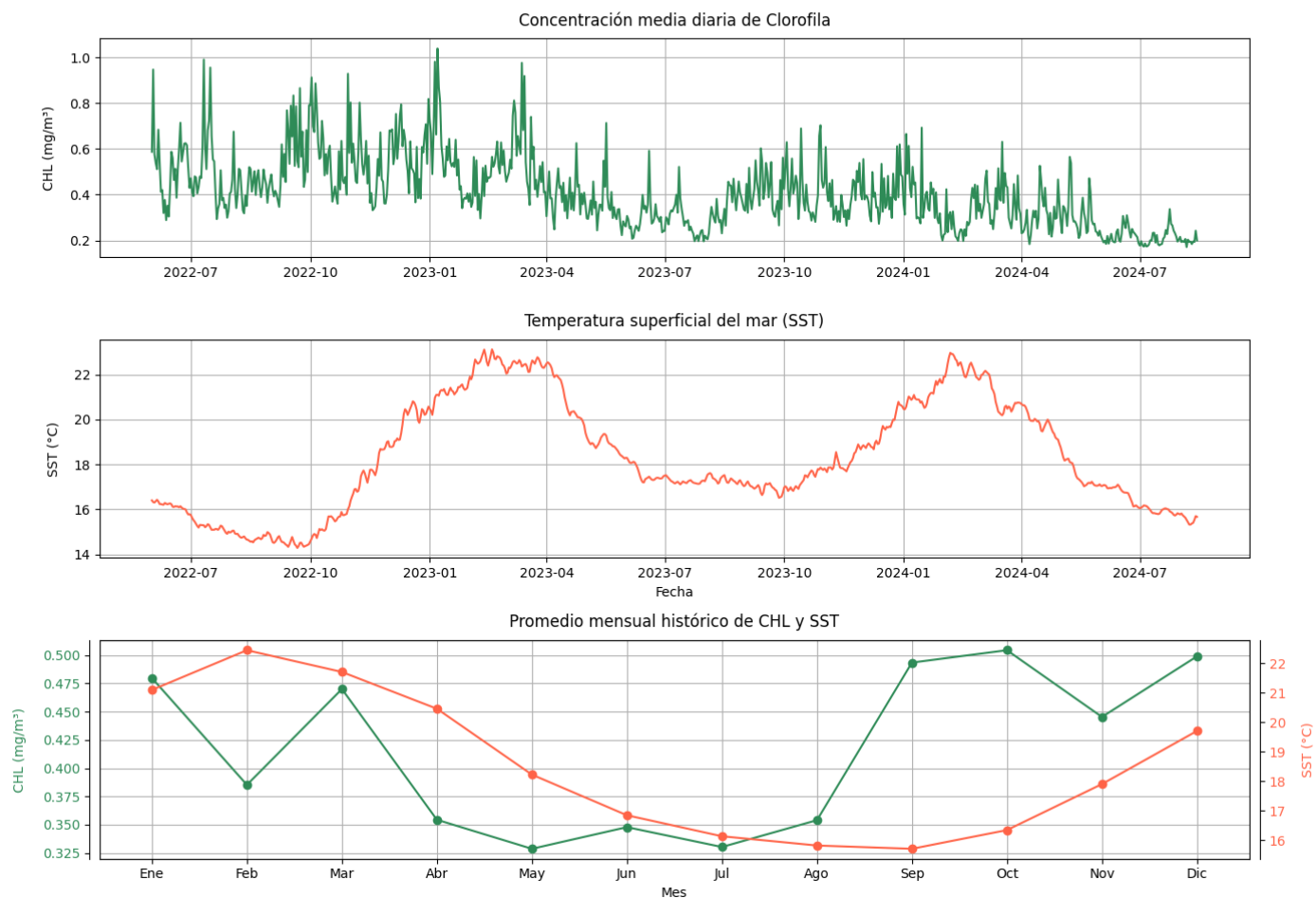


Figure 6: Comparación temporal entre CHL-a y SST: series diarias promedio espacial entre junio 2022 y el 14 de agosto de 2024 (arriba), y promedios mensuales históricos (abajo). Se observa una relación inversa estacional entre ambas variables.

Productividad Fitoplanctónica y Amenazas Ambientales Potenciales

El análisis de la concentración de clorofila-*a* (CHL-a) durante los últimos 27 años en la costa de Antofagasta revela un patrón estacional bien definido, con máximos durante los meses cálidos (enero–marzo) y mínimos en invierno (junio–agosto). Este comportamiento es coherente con la dinámica del sistema de surgencia costera asociado a la Corriente de Humboldt, el cual inyecta aguas frías y ricas en nutrientes en superficie, favoreciendo la productividad fitoplanctónica [7].

Zonas geográficas particulares, como la península de Mejillones, muestran concentraciones elevadas de CHL-a de manera persistente incluso durante el invierno. Este fenómeno puede atribuirse a la presencia de bahías semiabiertas, cuya circulación restringida y retención de nutrientes generan condiciones propicias para la acumulación de fitoplancton a lo largo del año [8].

A lo largo de la serie histórica, destacan años en los que se observa una disminución anómala en los niveles de clorofila, especialmente en 1997, 1998, 1999 y 2023. Estos años coinciden con la ocurrencia de eventos El Niño (1997, 1998, 2023) y La Niña (1999), fenómenos conocidos por modificar drásticamente la productividad marina. Durante El Niño, la reducción de los vientos alisios debilita la surgencia costera, lo que eleva la temperatura superficial del mar (TSM) y reduce el aporte de nutrientes, afectando negativamente la biomasa fitoplanctónica **CHL-aorophyll'variability'elnino**, [9].

Por el contrario, los eventos de La Niña intensifican la surgencia, trayendo consigo aguas más frías y nutritivas que promueven una mayor producción primaria. Esto se refleja, por ejemplo, en el aumento de CHL-a posterior al evento de La Niña de 1999, marcando un alza sostenida durante la década siguiente. Entre 2010 y 2012 se produjeron nuevamente eventos ENOS: El Niño (2010), seguido por dos años consecutivos de La Niña (2011, 2012), donde se observa una respuesta alternada en la concentración de CHL-a. Otro evento de El Niño en 2015 precede una disminución, mientras que aumentos posteriores coinciden con los eventos de La Niña de 2017, 2020 y 2021. Finalmente, en 2023 vuelve a

presentarse El Niño, acompañado por una caída significativa en los niveles de clorofila, como se aprecia en la Figura 3.

Estas variaciones interanuales evidencian la influencia del ciclo ENOS sobre la productividad fitoplanctónica regional. Si bien este estudio no aplicó un análisis estadístico formal de correlación, la coincidencia temporal de los eventos climáticos y los cambios en CHL-a respalda la existencia de una relación inversa entre TSM y concentración de clorofila, ampliamente documentada en la literatura científica **CHL-aorophyll'variability'elnino**, [7].

En conjunto, estos resultados subrayan la necesidad de monitorear de forma continua las condiciones oceanográficas superficiales. La identificación de patrones climáticos persistentes y sus efectos sobre la biomasa marina resulta crucial para anticipar condiciones propicias para la aparición de floraciones algales nocivas (HABs), con potenciales impactos ecológicos, económicos y sanitarios para la región.

References

- [1] A. Ferreira, V. Brotas, C. Palma, C. Borges, and A. Brito, “Assessing phytoplankton bloom phenology in upwelling-influenced regions using ocean color remote sensing,” *Remote Sensing*, vol. 13, 2021. DOI: 10.3390/rs13040675.
- [2] H. e. a. Xi, “Satellite monitoring of surface phytoplankton functional types in the atlantic ocean over 20 years (2002–2021),” *State Planet*, vol. 1, 2023. DOI: 10.5194/sp-1-osr7-5-2023.
- [3] H. Cen, J. Jiang, G. Han, and X. e. a. Lin, “Applying deep learning in the prediction of chlorophyll-a in the east china sea,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 5461, 2022. DOI: 10.3390/rs14215461.
- [4] R. e. a. Muñoz, “On the phenology of coastal upwelling off central-southern chile,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol. 106, 2024. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2023.101405.
- [5] M. Sobarzo, D. Figueroa, and L. Djurfeldt, “Upwelling of subsurface water into the rim of the biobío submarine canyon, central chile,” *Continental Shelf Research*, vol. 27, pp. 1001–1011, 2007. DOI: 10.1016/j.csr.2007.01.014.
- [6] R. Escribano, P. Hidalgo, H. González, R. Giesecke, and R. Riquelme-Bugueño, “Seasonal succession of zooplankton in the coastal upwelling zone off central-southern chile,” *Progress in Oceanography*, vol. 63, pp. 131–146, 2004. DOI: 10.1016/j.pocean.2004.09.004.
- [7] *The humboldt current system: Ecosystem components and processes*, <http://humboldt.iwlearn.org/en/information-and-publication/ebm-course/papers-ebm-chile/the-humboldt-current-system-ecosystem-components-and-processes>, Accedido el 6 de abril de 2025.
- [8] V. e. a. Montecino, “Mesoscale primary production and bio-optical variability off antofagasta (23-24° s) during the transition to el niño 1997-1998,” *Marine Ecology Progress Series*, vol. 269, pp. 83–96, 2004. [Online]. Available: <https://www.int-res.com/articles/meps2004/269/m269p083.pdf>.
- [9] *Enso sea surface temperature anomalies: 1997-1998 - nasa svcs*, <https://svcs.gsfc.nasa.gov/30551/>, Accedido el 6 de abril de 2025.