

---

# Análisis Espacio-Temporal del Fitoplanctón en la Costa de Antofagasta, Chile

---

Autor: Francisco Muñoz Guajardo

# Resumen

La Clorofila-a (Chl-a), un indicador clave de la biomasa fitoplanctónica, fue analizada para caracterizar la dinámica espacio-temporal de la productividad en la región costera de Antofagasta, Chile. Utilizando datos satelitales diarios de CMEMS para el periodo 1997-2024. Se aplicaron análisis exploratorios y descomposición de series temporales. Los resultados revelan una fuerte estacionalidad, con concentraciones máximas de Chl-a en primavera y verano (picos en enero-febrero), y niveles generalmente más elevados cerca de la costa inmediata. Se identificó una compleja tendencia a largo plazo, con un incremento inicial (1997-2003), seguido de relativa estabilidad (2003-2022) y un descenso reciente (2022-2024). Una significativa variabilidad residual subraya la influencia de factores interanuales no explicados por la tendencia o la estacionalidad. Se detectaron periodos de Chl-a excepcionalmente alta (indicativos de “blooms”), aunque este estudio no permite confirmar Floraciones Algales Nocivas (FANs). En conclusión, la dinámica de Chl-a está gobernada por la estacionalidad, tendencias a largo plazo y variabilidad residual, siendo fundamental comprender estos patrones para la gestión ecosistémica y la evaluación de riesgos como las FANs.

# Índice de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>1</b>
2.1. Adquisición de Datos y Área de Estudio . . . . .	1
2.2. Preprocesamiento de Datos . . . . .	2
2.3. Análisis Exploratorio y de Series Temporales . . . . .	2
2.4. Software y Herramientas . . . . .	3
<b>3. Resultados y Discusión</b>	<b>3</b>
3.1. Distribución Espacial Promedio . . . . .	3
3.2. Ciclo Estacional . . . . .	3
3.3. Análisis de Componentes Temporales (Tendencia, Estacionalidad, Residuos)	4
3.4. Implicaciones de los Patrones Observados: Alta Biomasa y Variabilidad . .	4
<b>4. Conclusiones</b>	<b>5</b>
<b>Anexo A. Figuras</b>	<b>6</b>

## Índice de Figuras

A.1. Distribución espacial promedio de la concentración de Chl-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en la Región de Estudio en el año 2000. Los valores superiores al percentil 99 están marcados con el color fucsia, mientras que los valores inferiores al percentil 1 están marcados con el color gris. El POI está marcado a través del punto rojo.	6
A.2. Ciclo estacional promedio de la concentración de Chl-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en la región de estudio. Los valores representan el promedio estacional calculado sobre el año 200, promediado espacialmente sobre la Región de Estudio. Los valores superiores al percentil 99 están marcados con el color fucsia, mientras que los valores inferiores al percentil 1 están marcados con el color gris. El POI está marcado a través del punto rojo. . . . .	7
A.3. Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio diaria en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia, Estacionalidad y Residuos. . . . .	8
A.4. Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio mensual en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia, Estacionalidad y Residuos. . .	8
A.5. Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio anual en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia y Residuos (la componente 'Seasonal' a escala anual no representa un ciclo estacional típico). . . . .	9

# 1. Introducción

El fitoplancton es la base de la mayoría de las redes tróficas marinas y juega un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos globales. Monitorear su abundancia y distribución es esencial para comprender la salud y la productividad de los ecosistemas oceánicos. La concentración de Clorofila-a (Chl-a), el principal pigmento fotosintético, es ampliamente utilizada como un indicador proxy de la biomasa fitoplanctónica y puede ser estimada eficazmente mediante sensores remotos satelitales, proporcionando una cobertura espacio-temporal extensa.

Este informe presenta un análisis espacio-temporal de la concentración de la Chl-a en la región costera chilena, utilizando datos satelitales diarios del Copernicus-GlobColour, para el periodo comprendido entre 1997 y 2024. Se aplicaron técnicas de análisis exploratorio de datos (EDA), y descomposición de series temporales para identificar tendencias y estacionalidad.

Los objetivos principales de este estudio son:

1. Caracterizar los patrones espaciales y estacionalidad de la productividad fitoplanctónica.
2. Identificar las tendencias a largo plazo y la variabilidad interanual.
3. Derivar insights sobre la productividad y discutir las implicaciones de alta concentración de Chl-a, identificados mediante el análisis exploratorio, como indicadores de potenciales amenazas ambientales.

# 2. Metodología

En esta sección se detallan los datos utilizados, el área de estudio, los pasos de preprocesamiento y las técnicas de análisis aplicadas para evaluar la dinámica espacio-temporal de la Chl-a.

## 2.1. Adquisición de Datos y Área de Estudio

Se utilizaron datos satelitales de concentración de Chl-a (unidad:  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) provenientes del producto “Global Ocean Colour (Copernicus-GlobColour), Bio-Geo-Chemical, L4 (monthly and interpolated daily), merged”<sup>1</sup>, distribuidos por el Copernicus Marine Service (CMEMS). Se empleó el conjunto de datos con resolución diaria, que cubre el periodo comprendido entre Septiembre de 1997 y Agosto de 2024. La resolución espacial nominal de estos datos es de aproximadamente 4 km.

La Región de Estudio abarca una sección de la costa chilena definida por las siguientes coordenadas geográficas: Latitud entre  $-27.98^\circ\text{S}$  a  $-21.02^\circ\text{S}$ , y Longitud entre  $-72.98^\circ\text{W}$  a  $-69.02^\circ\text{W}$ . Mientras que la Región de Interés (ROI) es una subregión de la región anterior,

<sup>1</sup> ID del producto: OCEANCOLOUR\_GLO\_BGC\_L4\_MY\_009\_104

la que contiene el Punto de Interés (POI) proporcionada en las instrucciones: (-23.63, -70.40). Esta región está comprendida por las siguientes coordenadas geográficas: Latitud entre -25.63°S y -21.63°S, y Longitud entre -71.50°W y -68.40°W. Ambas regiones fueron cargadas y gestionadas utilizando la librería `xarray` en Python. En este trabajo, la Región de Estudio se utiliza para analizar los patrones espaciales generales, mientras que la Región de Interés (ROI), centrada en la zona del Punto de Interés (POI), se emplea para extraer series temporales representativas y realizar análisis temporales detallados.

## 2.2. Preprocesamiento de Datos

Se realizaron los siguientes pasos de preparación y verificación:

- **Verificación y Manejo de Datos Faltantes Residuales:** Se realizó una inspección visual para detectar datos faltantes persistentes utilizando la librería `missingno`. Cualquier valor faltante residual en la dimensión temporal para píxeles específicos fue rellenado mediante interpolación lineal, asegurando la continuidad temporal para el análisis. La elección de la interpolación lineal fue meramente por simplicidad, y se tiene conocimiento de que existen mejores métodos para tratar con datos faltantes en este contexto.
- **Enmascaramiento de Tierra y Zonas sin Datos Válidos:** Las áreas correspondientes a tierra firme o aquellas con valores inválidos o persistentemente faltantes a lo largo de toda la serie temporal fueron identificadas y excluidas del análisis espacial.
- **Agregación Temporal:** Para ciertos análisis, los datos diarios de concentración de Chl-a fueron promediados para obtener series temporales con resolución mensual (utilizando `resample('ME')` y anual (utilizando `resample('YE')`).

## 2.3. Análisis Exploratorio y de Series Temporales

Se realizó un Análisis Exploratorio de Datos (EDA) para comprender los patrones básicos de la concentración de Chl-a:

- Cálculo y visualización de mapas de concentración de Chl-a promedio (mensual y estacional) sobre la Región de Estudio para identificar patrones espaciales y valores anómalos.
- Generación de series temporales de concentración de Chl-a promediadas espacialmente sobre toda la ROI para analizar la evolución temporal global (diaria, mensual y anual).
- Descomposición de la serie temporal mensual de concentración de Chl-a promediada espacialmente en sus componentes de tendencia, estacionalidad y residuo, utilizando la función `seasonal_decompose` de la librería `statsmodels.tsa.seasonal`, para aislar la variabilidad a largo plazo y el ciclo anual recurrente.

## 2.4. Software y Herramientas

El análisis de datos y la generación de visualizaciones se realizaron utilizando el lenguaje de programación Python (versión 3.12) y su ecosistema de librerías científicas, incluyendo **xarray** para el manejo de datos multidimensionales, **pandas** para la manipulación de series temporales, **numpy** para operaciones numéricas, **statsmodels** para análisis estadísticos y descomposición temporal, **missingno** para visualización de faltantes, y **matplotlib** y **seaborn** para la creación de gráficos.

## 3. Resultados y Discusión

Los análisis realizados sobre los datos satelitales de Chl-a revelan patrones espaciales y temporales característicos en la región de estudio.

### 3.1. Distribución Espacial Promedio

Para comprender la distribución geográfica de la biomasa fitoplanctónica y su distribución interanual, se calcularon mapas de concentración promedio mensual de Chl-a por cada año del periodo de estudio sobre la Región de Estudio. Como ejemplo representativo, la Fig. A.1 muestra el promedio mensual para el año 2000.

Como se aprecia en la Fig. A.1, las épocas con mayor concentración de clorofila están en las épocas más cálidas (desde septiembre hasta mayo), mientras que en las épocas más heladas hay una menor concentración de clorofila (desde junio hasta agosto). Cabe destacar que el mes con mayor concentración de clorofila es el mes de enero, pues en este mes hay valores superiores al percentil 99 (marcadas en fucsia).

Estos patrones se repiten en el resto de Figuras generadas (desde 1998 hasta 2023), aunque se seleccionó la del año 2000 como figura representativa.

### 3.2. Ciclo Estacional

El análisis de la serie temporal promediada espacialmente revela un fuerte patrón estacional en la concentración de Chl-a. Para visualizar el ciclo anual típico, por cada año del periodo de estudio se calculó la concentración promedio para cada estación del año. Como ejemplo representativo, la Fig. A.2 ilustra este ciclo promedio.

La Fig. A.2 reafirma la afirmación anterior: en las épocas más cálidas (Verano, Otoño, Primavera) son las épocas con mayor concentración de clorofila, mientras que la época más fría (invierno) es la época con menor concentración de clorofila. También se reafirma que la mayor concentración de clorofila se encuentra en verano.

### 3.3. Análisis de Componentes Temporales (Tendencia, Estacionalidad, Residuos)

Para analizar en detalle la estructura temporal de la concentración de Chl-a en la Región de Interés (ROI), se aplicó una descomposición clásica de series temporales. Este método separa la serie original en sus componentes principales: la tendencia a largo plazo, la componente estacional regular y la variabilidad residual (no explicada por las anteriores). La descomposición se realizó sobre la serie temporal promediada espacialmente en la ROI, utilizando agregaciones a escala diaria, mensual y anual para evaluar los patrones en diferentes frecuencias. Se utilizó la función `seasonal_decompose` de la librería `statsmodels`.

La Fig. A.3 muestra la descomposición aplicada a la serie temporal con resolución diaria, mientras que en las Figs. A.4 y A.5 muestran la descomposición aplicada a la serie temporal con resolución mensual y anual respectivamente, ofreciendo una visión más suavizada de las componentes principales.

A partir de las descomposiciones de las series temporales se puede observar que la tendencia entre los tres gráficos son similares. Es lo que debe de ocurrir propiamente tal. En términos generales, se observa que la tendencia tiene una alza marcada desde el inicio del estudio hasta el año 2003, donde permanece estable (con alzas y bajadas esporádicas) hasta el año 2022, donde tiene una bajada pronunciada hasta el año 2024.

Se observa que existe una estacionalidad marcada en las Figs. A.3 y A.4, donde en ambas Figuras se nota que la estacionalidad se encuentra oscilando entre los rangos -0.25 y 0.25. Sin embargo, también existe un residuo de alta magnitud, superando con creces las escalas de la tendencia y estacionalidad. Por lo menos, en la descomposición promediada por mes, este resulta bastante menor en comparación con la descomposición diaria. Esto se puede deber a factores externos, como la temperatura del océano u otras variables, aunque es necesario realizar un análisis más exhaustivo para comprobarlo.

### 3.4. Implicaciones de los Patrones Observados: Alta Biomasa y Variabilidad

Los análisis espaciales y temporales realizados revelan una dinámica compleja de la Chl-a en la región costera estudiada. Los mapas promedio (e.g., Fig. A.1) y el análisis estacional (e.g., Fig. A.2) identificaron zonas y periodos, particularmente en regiones cercanas al POI durante otoño, primavera y especialmente en verano, con concentraciones de Chl-a consistentemente más elevadas.

Aunque este estudio se basa en la concentración total de Chl-a y no discrimina entre especies de fitoplancton, es conocido que las condiciones oceanográficas que favorecen una alta biomasa general (alta disponibilidad de nutrientes y luz) en la costa chilena también pueden ser propicias para el desarrollo de Floraciones Algales Nocivas (FANs), o “mareas rojas”. Estas FANs, causadas por la proliferación de ciertas especies de microalgas (algunas tóxicas), representan un riesgo ecológico (mortalidad de fauna marina) y socioeconómico (cierres de áreas de pesca y acuicultura, salud pública) bien documentado en la región. Por

lo tanto, las zonas y periodos identificados con las mayores concentraciones de Chl-a en este análisis podrían interpretarse como ventanas de mayor riesgo potencial para la ocurrencia de tales eventos nocivos.

Por otro lado, la significativa magnitud de los residuos observada en la descomposición temporal (Figs. A.3 y A.4), que en ocasiones supera la amplitud de la señal estacional o la tendencia, subraya la importante influencia de factores no periódicos o no capturados por el ciclo estacional promedio.

## 4. Conclusiones

Este estudio analizó la dinámica espacio-temporal de la concentración de Chl-a en la región costera de Antofagasta, Chile, utilizando datos satelitales diarios de CMEMS para el periodo 1997-2024, con el fin de comprender los patrones de productividad fitoplanctónica.

Los resultados demuestran la existencia de una **fuerte estacionalidad** en la biomasa fitoplanctónica. Las concentraciones máximas de Chl-a se registran sistemáticamente durante los meses de primavera y verano (aproximadamente septiembre a marzo), con picos que suelen ocurrir en los meses de enero y febrero, coincidiendo con el periodo de mayor radiación solar.

Desde una perspectiva espacial, si bien existen variaciones estacionales, se observa una tendencia general a encontrar **concentraciones más elevadas en aguas de la costa inmediata**, lo cual puede estar relacionado con la distribución de nutrientes en la zona de estudio.

El análisis de series temporales mediante descomposición permitió identificar una **tendencia a largo plazo compleja** en las concentraciones medias de Chl-a. Esta tendencia se caracterizó por un incremento inicial (aprox. 1997-2003), seguido de un periodo prolongado de relativa estabilidad (aprox. 2003-2022) y culminando con una notable disminución en los últimos años analizados (2022-2024). Estas fluctuaciones multianuales sugieren la influencia de cambios graduales en las condiciones oceanográficas.

Además de la tendencia y la marcada estacionalidad, el análisis reveló una **significativa variabilidad residual**. Esta componente residual, que representa las fluctuaciones no explicadas por la tendencia o el ciclo estacional promedio, sugiere una influencia de factores interanuales.

Finalmente, el análisis identificó **periodos y zonas con concentraciones de Chl-a excepcionalmente altas**, particularmente durante los meses de verano. Estos eventos son indicativos de floraciones algales ("blooms") de alta biomasa. Si bien representan picos significativos de productividad, es crucial señalar que este estudio **no permite determinar la composición específica de estas floraciones ni confirmar si corresponden a Floraciones Algales Nocivas (FAN) o "mareas rojas"**.



## Anexo A. Figuras

Con el objetivo de ahorrar espacio, en este anexo se encontrarán las figuras mencionadas en el texto.

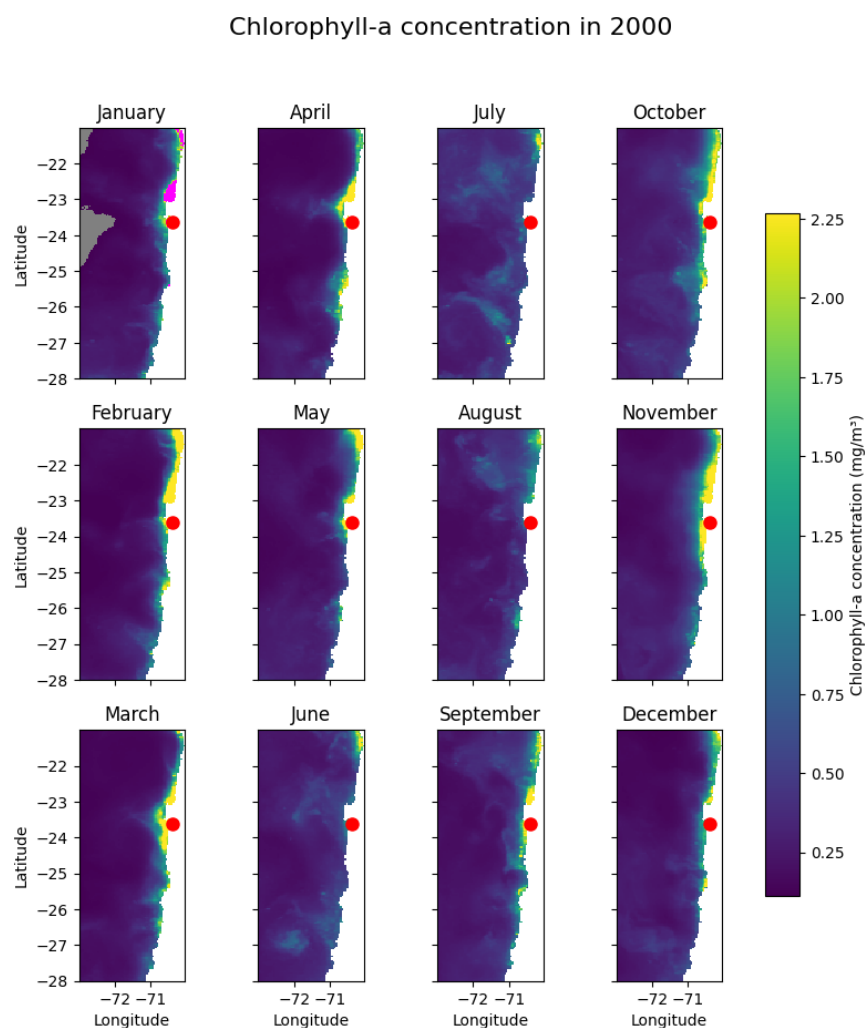


Figura A.1: Distribución espacial promedio de la concentración de Chl-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en la Región de Estudio en el año 2000. Los valores superiores al percentil 99 están marcados con el color fucsia, mientras que los valores inferiores al percentil 1 están marcados con el color gris. El POI está marcado a través del punto rojo.

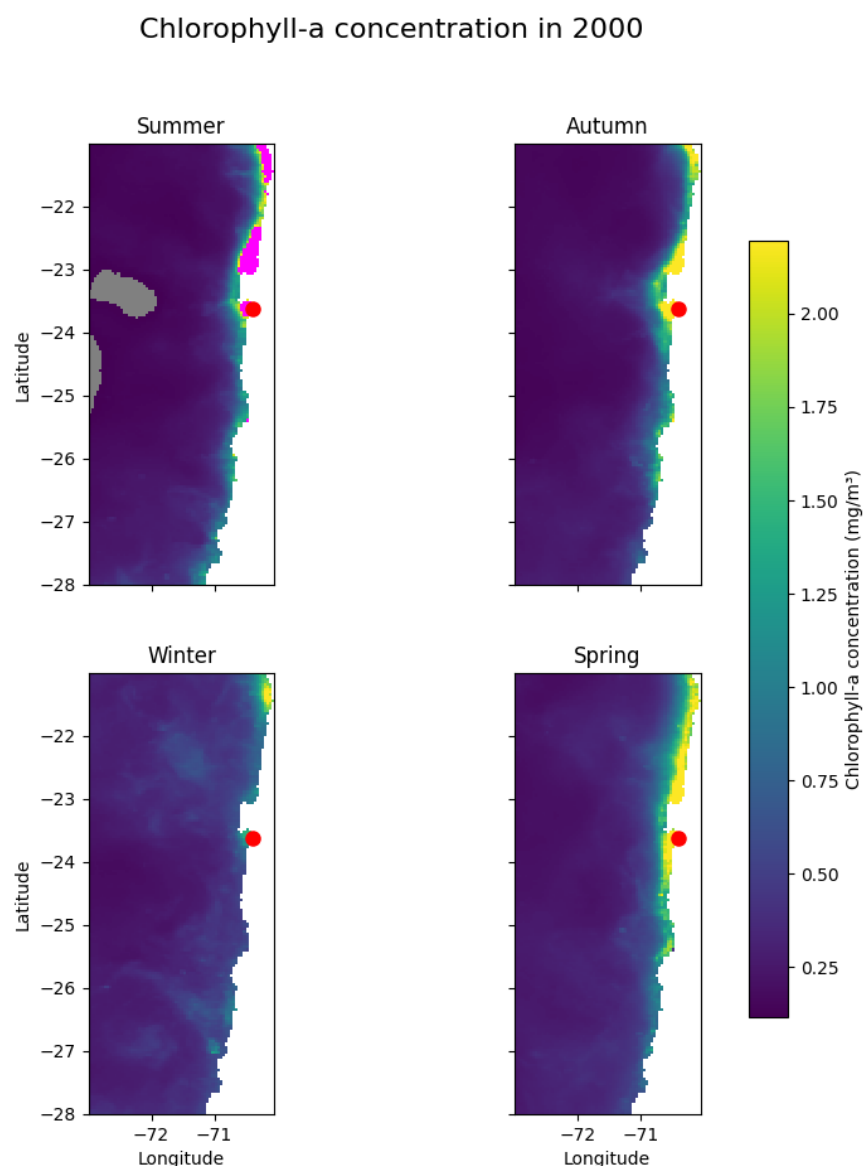


Figura A.2: Ciclo estacional promedio de la concentración de Chl-a ( $\text{mg/m}^3$ ) en la región de estudio. Los valores representan el promedio estacional calculado sobre el año 200, promediado espacialmente sobre la Región de Estudio. Los valores superiores al percentil 99 están marcados con el color fucsia, mientras que los valores inferiores al percentil 1 están marcados con el color gris. El POI está marcado a través del punto rojo.

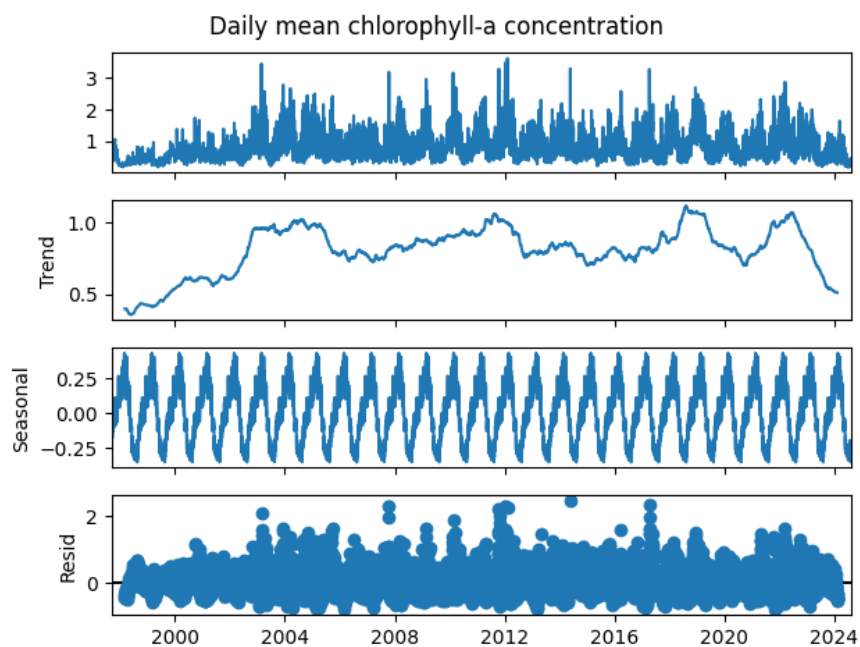


Figura A.3: Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio diaria en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia, Estacionalidad y Residuos.

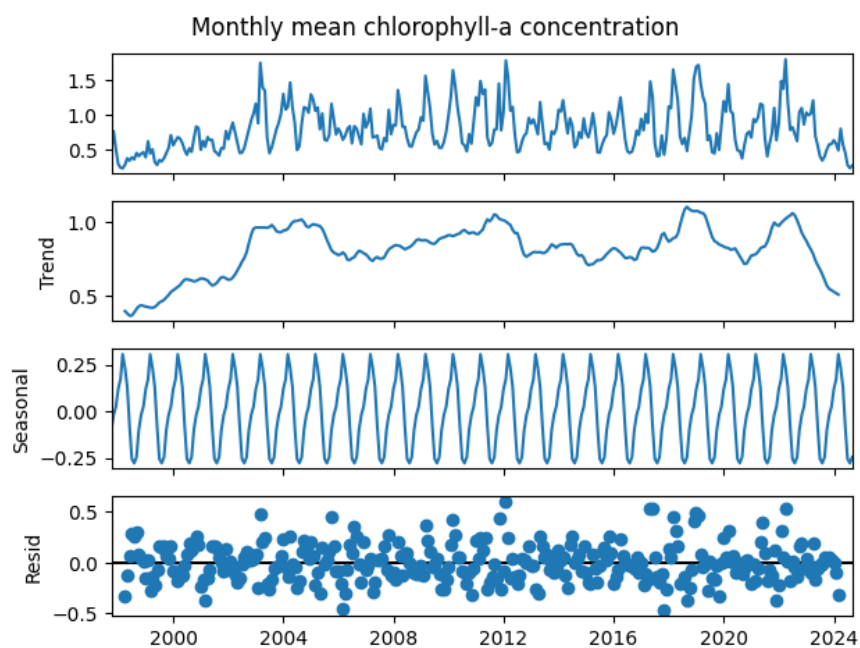


Figura A.4: Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio mensual en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia, Estacionalidad y Residuos.

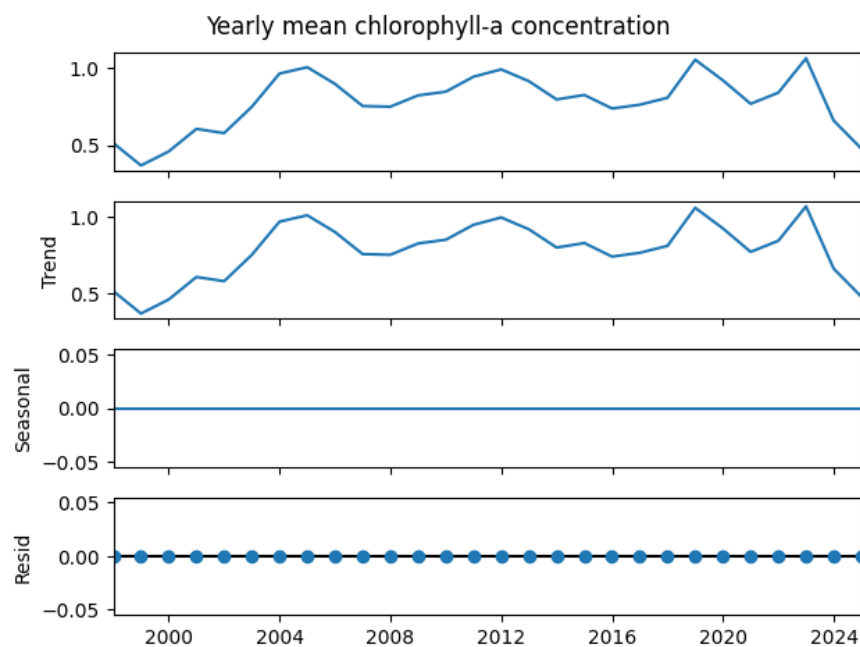


Figura A.5: Descomposición de la serie temporal de Chl-a promedio anual en la ROI (1997-2024). Paneles: Serie Original, Tendencia y Residuos (la componente 'Seasonal' a escala anual no representa un ciclo estacional típico).