



Boletín Oceanográfico de BCS junio de 2023

Elaborado por: Dr. Eduardo González Rodríguez¹, Dr. Armando Trasviña Castro², Dr. Romeo Saldívar-Lucio², Dr. Jorge Cortes Ramos³, Dr(c). José Denis Osuna Amador⁴, Dr(c). Cotsikayala Pacheco Ramírez⁵ y Dr. Hugo Herrera Cervantes².

¹CICESE-UT3, ²Laboratorio SERVANT-CICESE-ULP, ³Investigador Cátedra CONAHCYT-CICESE-ULP, ⁴Estudiante Programa Doctorado en Ciencias de La Vida CICESE e Investigador Campo Experimental Todos Santos del INIFAP, ⁵Estudiante Programa Doctorado en Ciencias de La Vida-CICESE.

OCTUBRE DE 2023, No. 1

Introducción

Este boletín incluye productos gráficos elaborados por los laboratorios de percepción remota de la Unidad UT3 en Tepic, Nayarit, y SERVANT de la Unidad La Paz (ULP) en La Paz, Baja California Sur, del CICESE.

El objetivo es mostrar el estado del océano en el mes anterior, en las costas de Baja California Sur.

Este boletín inicia con una sección de mapas regionales que corresponde a las aguas oceánicas frente a las costas del estado de Baja California Sur (figura 1).

Además de estos mapas, se seleccionaron tres sitios específicos (figura 1): [San Juanico](#) (costa occidental, océano pacífico), [Bahía de La Paz](#) (costa del golfo de California), y parque nacional [Cabo Pulmo](#) (Entrada al Golfo de California).

Índice

1. Área de estudio	3
2. Método	3
2.1. Información satelital	3
2.2. Datos <i>in situ</i>	4
2.2.1. Viento local	4
2.2.2. Temperatura del aire	5
2.3. Mapas de distribución mensual	5
2.4. Análisis de series de tiempo	6
2.5. Paisaje pelágico	6
3. Resultados	6
3.1. Nivel del mar Absoluto (NMA)	6
3.2. Mapas de distribución mensual	7
3.2.1. Anomalías de nivel del mar (ANM)	7
3.2.2. Clorofila superficial (CLO)	9
3.2.3. TSM	9
3.3. Cabo Pulmo	11
3.3.1. Series de tiempo	11
3.3.2. Viento (VTO) <i>in situ</i>	12
3.3.3. Paisaje Pelágico (CP)	14
3.3.4. Fitoplancton	15
3.4. Bahía de La Paz	16
3.4.1. Series de tiempo	16
3.4.2. Temperatura del aire	18
3.4.3. Paisaje Pelágico (BLP)	19
3.4.4. Fitoplancton	19
3.5. San Juanico, Golfo de Ulloa	21
3.5.1. Series de tiempo	21
3.5.2. Viento (VTO) <i>in situ</i>	22
3.5.3. Paisaje Pelágico (GU)	24
3.5.4. Fitoplancton	25
3.5.5. Temperatura en el Valle de Santo Domingo, área contigua, región San Juanico- Golfo de Ulloa	27
4. Glosario	29
5. Referencias	30

1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las aguas oceánicas frente a las costas del estado de BCS (figura 1). Los círculos de colores en la figura 1 indican los sitios de interés en donde se hicieron análisis de series de tiempo para las variables TSM, CLO y ANM (ver sección de variación temporal en método), de sur a norte, parque nacional Cabo Pulmo, La Paz y en San Juanico.

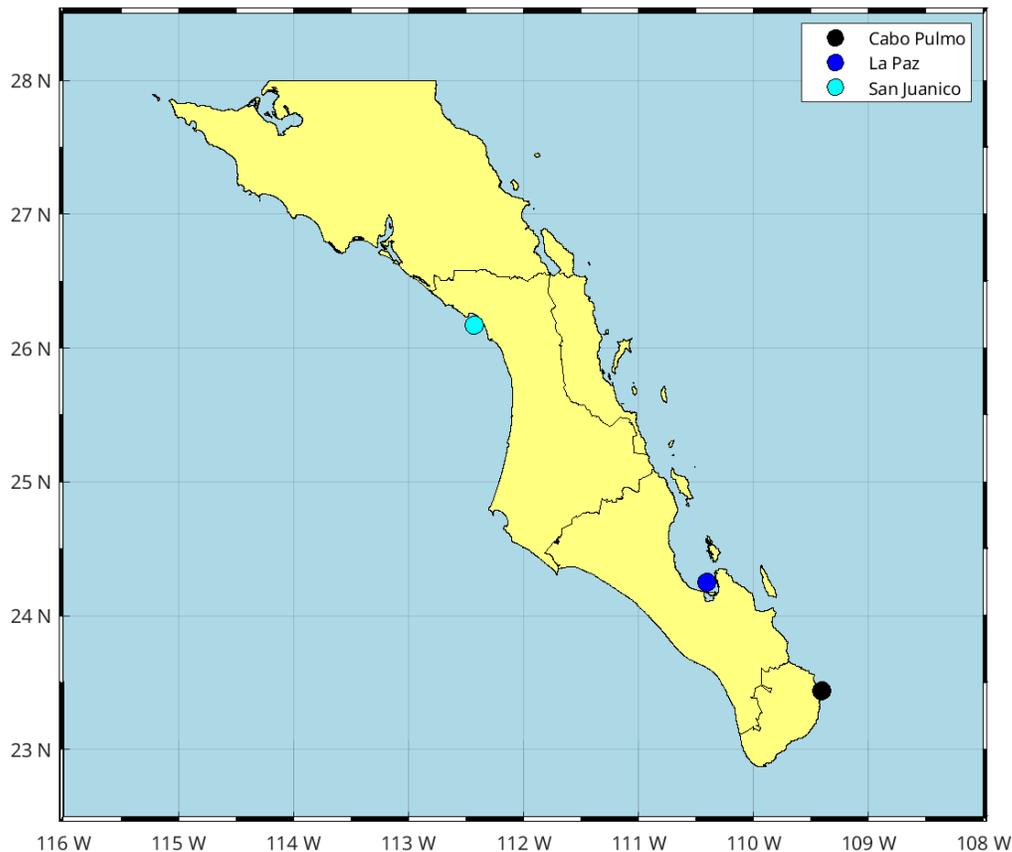


Figura 1: Zona de interés, región oceanográfica de Baja California Sur. Los círculos de colores marcan sitios para el análisis de series de tiempo.

2. Método

Las variables de interés seleccionadas para el presente reporte incluyen las derivadas de satélites, modeladas e información *in situ*, y se describen a continuación:

2.1. Información satelital

Nivel de Mar Absoluto (NMA). El NMA se refiere al nivel del mar determinado por múltiples misiones de altimetría satelital, pero a diferencia de las anomalías, la referencia es el geode. El NMA incluye la tendencia de largo período debida al calentamiento global. Es un producto global, libre de huecos y cuenta con una resolución temporal diaria y espacial de 25x25 km. (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description) y también (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_047/description)

[ATIONS_008_046/description](#)).

Anomalía del Nivel de Mar (ANM). La ANM es un producto de la altimetría y es estimada por medio una interpolación de diversas misiones. La referencia es el promedio climatológico de 1993 a 2012 (<https://doi.org/10.48670/moi-00149>). Es un producto global, libre de huecos y cuenta con una resolución temporal diaria y espacial de 25x25 km.

Clorofila superficial (CLO). La CLO es la clorofila_a satelital. Es un producto del denominado color del océano y corresponde a la primera profundidad óptica, que es la profundidad en donde la luz disminuye el 90% (Cervantes-Duarte, 2004). Esta profundidad varía con la materia suspendida en el agua y generalmente no es mayor a 6 m de profundidad. La CLO es proporcionada por el Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) de la agencia espacial europea (ESA, por su siglas en inglés). Es un producto global libre de nubes, con una resolución temporal diaria y espacial de 4x4 km (Garnesson *et al.*, 2019), (https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_104/services).

Incluye la concentración de los principales grupos funcionales fitoplanctónicos expresada en la CLO en el agua de mar desde el espacio (IOCCG, 2014), (https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L3_MY_009_103/download?dataset=cmems_obs-oc_glo_bgc-plankton_my_l3-multi-).

Temperatura Superficial del Mar (TSM). El término TSM se refiere a la capa o piel del océano y representa la temperatura de la capa sub a una profundidad entre 10–20 μm . La TSM es un producto proporcionado por el laboratorio de oceanografía de propulsión a chorro de la agencia espacial de los Estados Unidos (JPL y NASA, respectivamente, por sus siglas en inglés). Es un producto global que no presenta huecos por nubosidad con una resolución temporal diaria y espacial de 1x1 km (Chin *et al.*, 2017), (<https://doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ04>).

2.2. Datos *in situ*

2.2.1. Viento local

Viento *in situ* o local (VTO). Los datos de viento fueron obtenidos por medio de una Estación Meteorológica Automática (EMA) del servicio meteorológico nacional. Su registro es cada 10 minutos y la forma de almacenamiento es en centrales de observación con comunicación satelital, internet o vía radio. (véase: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>).

Los datos se pre-procesaron de forma manual para identificar los valores espurios contenidos en la serie de tiempo. De igual forma, se dejaron en blanco los huecos en la serie de tiempo que ocasionó que algunos casos tuvieran un periodo de tiempo de cero observaciones mayor a un año.

Con los datos de velocidad y dirección del viento sostenido medido en las EMA se calcularon las normales climatológicas de la dirección e intensidad del viento mediante el método gráfico de la rosa de los vientos. Con este método podemos observar alguna distribución de valores atípicos del viento (magnitud y dirección) sin la necesidad de realizar algún filtrado para remover la variabilidad de alta frecuencia.

Con un análisis de cajas (boxplots) se despliegan los valores anómalos (outliers) correspondientes a la intensidad del viento sostenido en cada mes (figura 2). Con este análisis de cajas se pueden resaltar algunos fenómenos meteorológicos que promueven el aumento atípico en la intensidad de los vientos, tales como los ciclones tropicales.

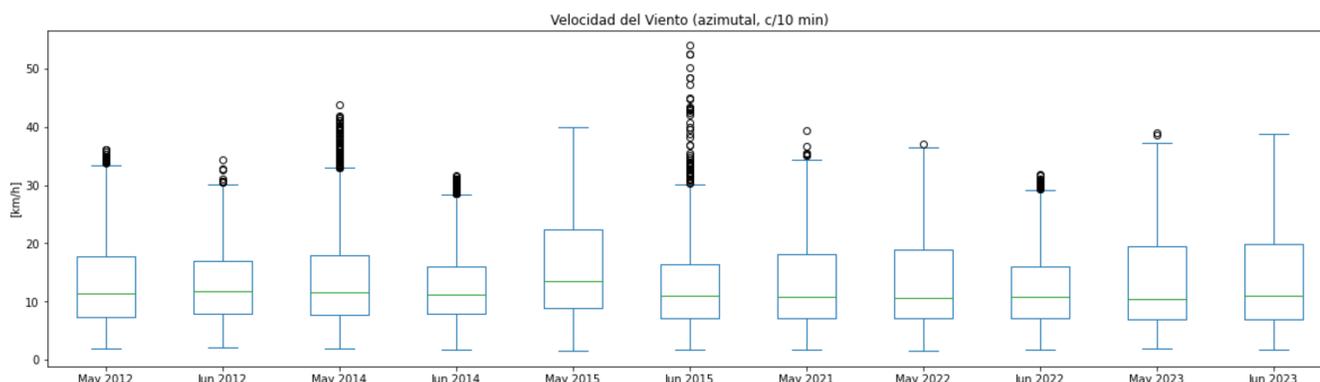


Figura 2: Ejemplo de un gráfico de cajas para los meses de mayo y junio en años selectos dentro del periodo 2012-2023 en la EMA San Juanico. Durante el mes de junio de 2015 el número de valores considerados como *outliers* o valores atípicos aumentó considerablemente debido a la influencia de la tormenta tropical Blanca (31 may - 9 jun) que cruzó por la estación de San Juanico.

2.2.2. Temperatura del aire

Adicionalmente, se hicieron estimaciones de la temperatura del aire (T_{air}) para la Bahía de La Paz por medio de una estación meteorológica Vantage Pro2 de la marca Davis Instruments ubicada en la barra arenosa conocida como El Mogote ($24^{\circ} 10' 29''$ N y $110^{\circ} 19' 36''$ W). Los datos se registran cada 2 horas y posteriormente son promediados por día, la información se almacena en archivos de acceso libre y están disponibles en <https://ulp.cicese.mx/condiciones-ambientales-observadas-en-la-bahia-de-la-paz/>.

2.3. Mapas de distribución mensual

Para la elaboración de los mapas de distribución del mes se promediaron las imágenes diarias de junio de 2023 para el área comprendida entre los 22 y 29° de latitud norte y los 108 y 116° de longitud oeste (figura 1). Con estos datos se estimaron los valores máximos, mínimos y promedio para cada pixel, además de la diferencia entre máximos y mínimos, y la anomalía mensual. Según Kushnir (1994) y Ramos-Rodríguez *et al.* (2012), para el cálculo de la anomalía mensual se estimó la climatología o promedio histórico mensual y se restó del promedio del mes de interés:

$$\text{Anomalía} = \text{promedio_mensual} - \text{climatología}$$

para el cálculo de la climatología fue necesario descargar toda la información histórica disponible para cada variable.

2.4. Análisis de series de tiempo

Para el análisis de series de tiempo se seleccionaron los sitios mostrados en la figura 1, el parque nacional Cabo Pulmo, Bahía de La Paz y San Juanico. Las variables para el análisis incluyen los datos satelitales de ANM, CLO y TSM y datos *in situ* de VTO.

Las series de las variables corresponden a las anomalías a lo largo del tiempo y se construyeron con los píxeles más cercanos a cada sitio. Las series con las anomalías para cada variable fueron estimados de la misma forma que para los mapas de distribución.

Finalmente, para ver si existe una relación entre la CLO y la TSM se descargaron los datos del índice multivariado de El Niño (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>) y se superpusieron con los valores de CLO y TSM.

Adicionalmente, se analiza el nivel del mar absoluto (NMA) en la costa occidental de la península, esto con la idea de mostrar la tendencia de largo periodo del nivel del mar en dicha costa.

2.5. Paisaje pelágico

Para describir los rasgos distintivos del Paisaje Pelágico se descargaron los datos del sitio NOAA Coastwatch (<https://coastwatch.noaa.gov/cw/satellite-data-products/multi-parameter-models/seascape-pelagic-habitat-classification.html>). Una vez recortada el área de interés, se hizo un conteo de píxeles para cada categoría de paisaje pelágico, con lo que se calculó el área ocupada por categoría, considerando que: 1 píxel equivale a 5 km². Las categorías o hábitats pelágicos dominantes fueron identificadas como aquellas con la mayor extensión total (km²) en los recortes espacial y temporal considerados. Para revelar el patrón estacional promedio del Paisaje Pelágico se calcularon las climatologías mensuales, obteniendo el promedio del mes correspondiente desde enero de 2003 hasta junio de 2023.

3. Resultados

3.1. Nivel del mar Absoluto (NMA)

Esta sección muestra la evolución a lo largo de la costa del nivel del mar absoluto. El NMA incluye la tendencia de largo período. Las unidades son metros (m) y destacan los máximos que corresponden a eventos cálidos. Por ejemplo, el Niño de 1997-1998, el 'Blob' cálido de 2014 y el Niño de 2015.

Nivel del mar Absoluto (m) a lo largo de las costas de Baja California Sur

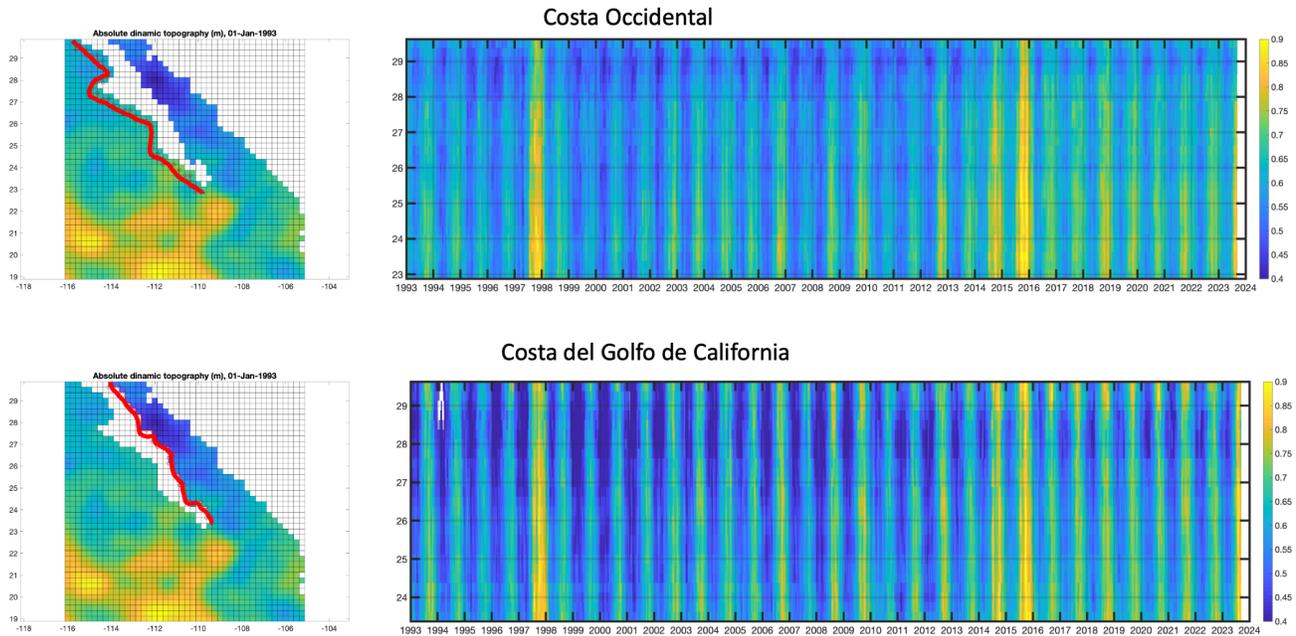


Figura 3: Evolución del Nivel del mar Absoluto a lo largo de las costas de BCS.

3.2. Mapas de distribución mensual

3.2.1. Anomalías de nivel del mar (ANM)

Las condiciones de ANM durante el mes de junio de 2023 se muestran en la figura 4. El mapa del panel **A** muestra las anomalías máximas registradas, cuyo rango se ubicó entre -0.06 y 0.31 m . El panel **B** muestra las anomalías mínimas, cuyo rango estuvo entre -0.11 y 0.18 m . El panel **C** muestra la diferencia entre anomalías máximas y mínimas ($A - B$) durante este mes, el valor máximo fue de 0.19 m . Esta imagen es útil en el sentido de mostrar las zonas donde se presentó el mayor rango de variación de nivel de mar a lo largo del mes. El panel **D** muestra las anomalías con respecto al promedio histórico o climatológico de datos de 1993 a 2012, es decir, indica las variaciones de ANM en comparación con las condiciones *normales* a lo largo del tiempo. Los colores rojos indican condiciones anómalamente positivas (mayor altura de lo normal), mientras que los colores azules indican condiciones anómalamente negativas (menor altura), el rango se ubicó entre -0.08 y 0.22 m .

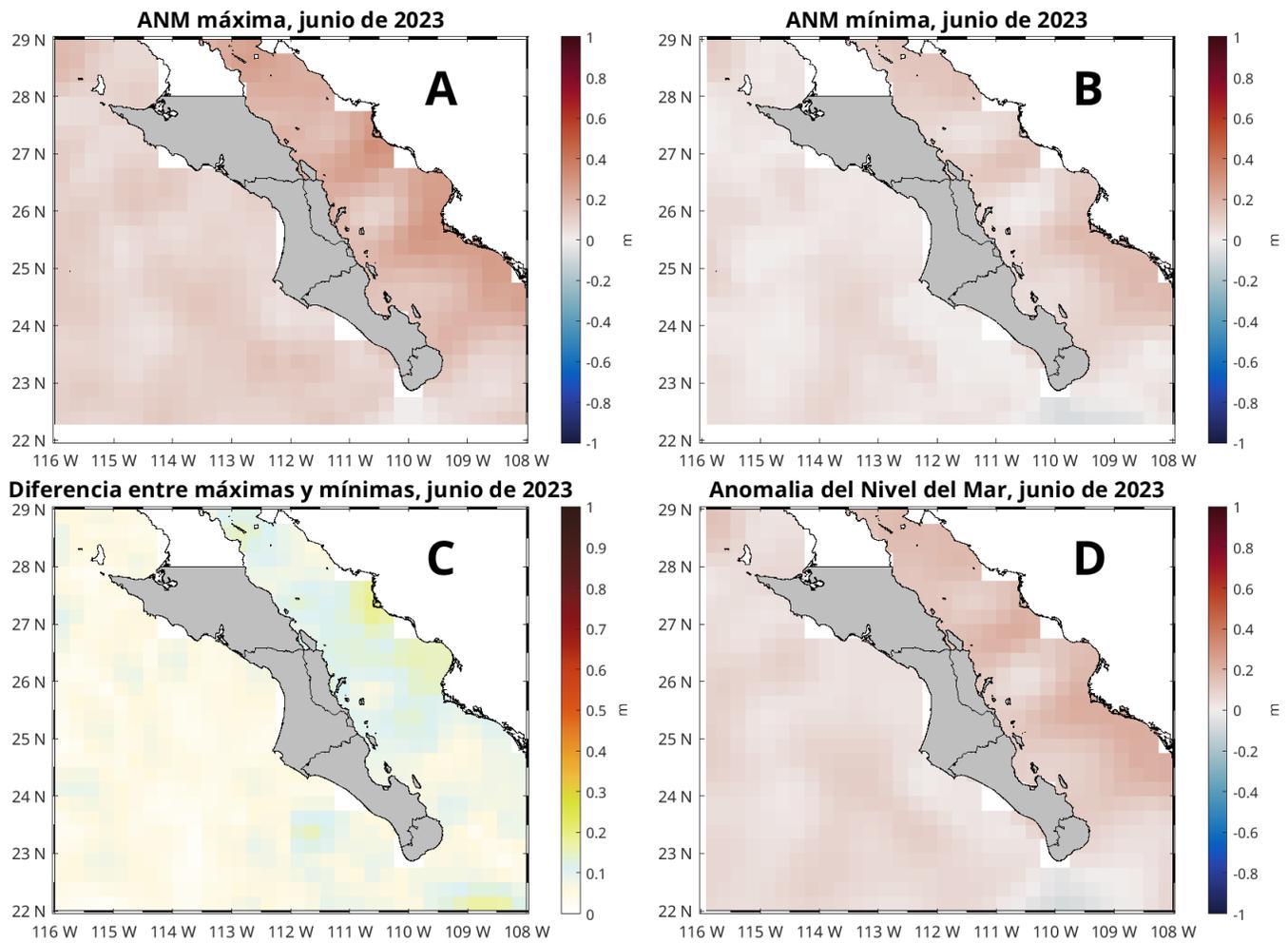


Figura 4: Condiciones de ANM durante el mes de junio de 2023. Panel A, niveles máximos, B niveles mínimos, C diferencia entre máximos y mínimos y D anomalía.

3.2.2. Clorofila superficial (CLO)

Las condiciones de CLO durante el mes de junio de 2023 se muestran en la figura 5. El mapa del panel A muestra las concentraciones máximas registradas, cuyo rango se ubicó entre 0.08 y 65.0 mg m^{-3} . El panel B muestra las concentraciones promedio, cuyo rango estuvo entre 0.06 y 30.78 mg m^{-3} . El panel C muestra la diferencia entre concentraciones máximas y mínimas (imagen no mostrada) durante este mes, cuyo valor máximo de 64.6 mg m^{-3} . Esta imagen es útil en el sentido de mostrar las zonas donde hubo las mayores variaciones de CLO a lo largo del mes. El panel D muestra las anomalías con respecto al promedio histórico o climatológico de datos desde 1997, es decir, indican las variaciones de CLO en comparación con las condiciones *normales* a lo largo del tiempo. Los colores rojos indican condiciones anómalamente positivas (mayor concentración de lo normal), mientras que los colores azules indican condiciones anómalamente negativas (menores concentraciones), el rango se ubicó entre -6.4 y 24.09 mg m^{-3} .

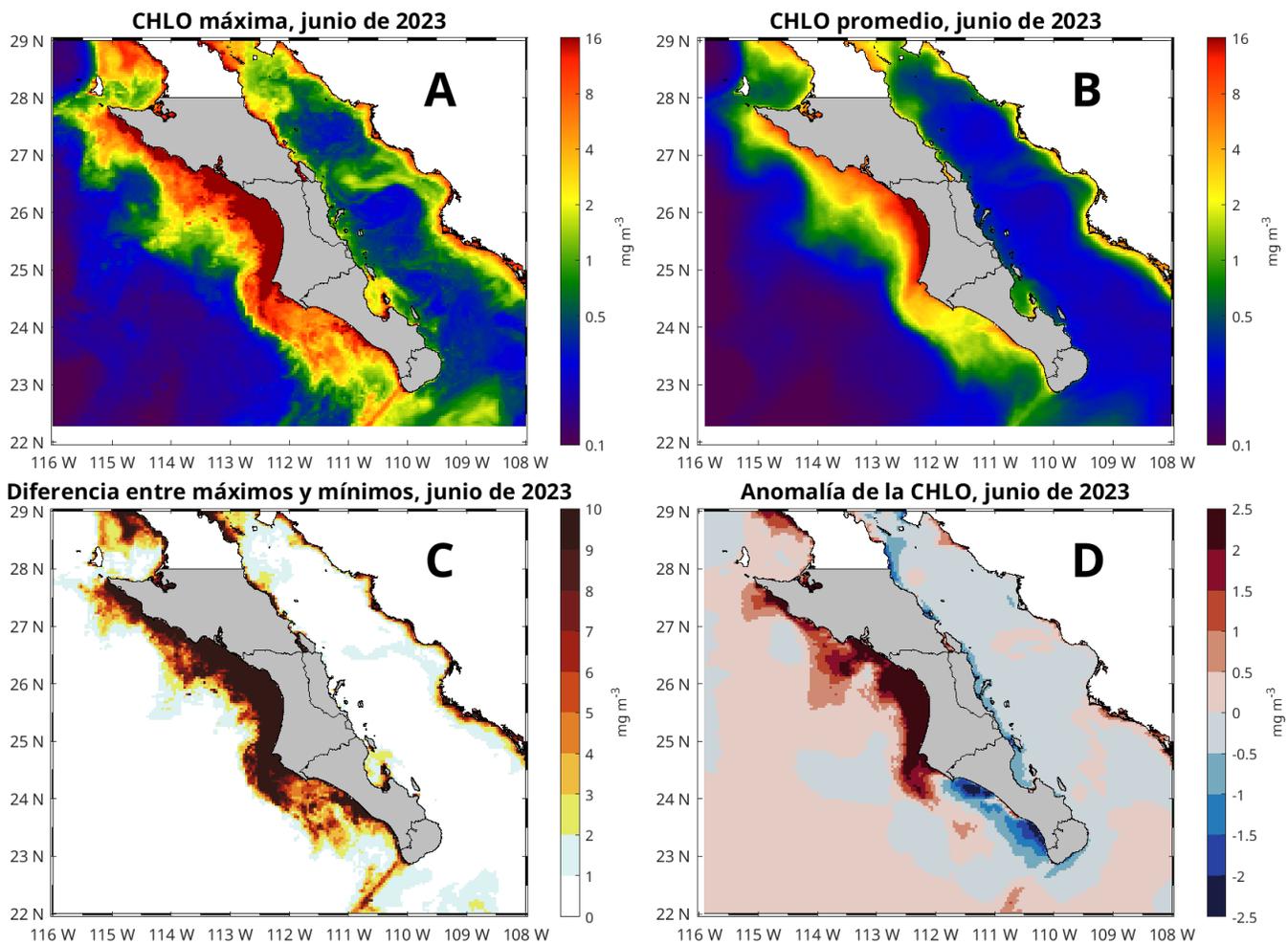


Figura 5: Concentraciones de CLO durante el mes de junio de 2023. Panel A, máximas, B promedio, C diferencia entre concentraciones máximas y mínimas y D anomalía.

3.2.3. TSM

Las condiciones de TSM durante el mes de junio de 2023 se muestran en la figura 6. El mapa del panel A muestra las temperaturas máximas registradas, cuyo rango se ubicó entre 17.8 y 31.5

°C. El panel **B** muestra el promedio de temperatura, cuyo rango estuvo entre 16.5 y 29.4.2 °C. El panel **C** muestra la diferencia entre máximos y mínimos (imagen no mostrada) durante este mes, cuyo valor más alto fue de 10.1 °C. Esta imagen es útil en el sentido de mostrar las zonas donde hubo las mayores variaciones de la TSM a lo largo del mes. El panel **D** muestra las anomalías con respecto al promedio histórico o climatológico de datos desde 2002, es decir, indican las variaciones de TSM en comparación con las condiciones *normales* a lo largo del tiempo. Los colores rojos indican condiciones anómalamente positivas (mayor o más caliente de lo normal), mientras que los colores azules indican condiciones anómalamente negativas (menores o más frías de lo normal), el rango se ubicó entre -2.2 y 3.0 °C.

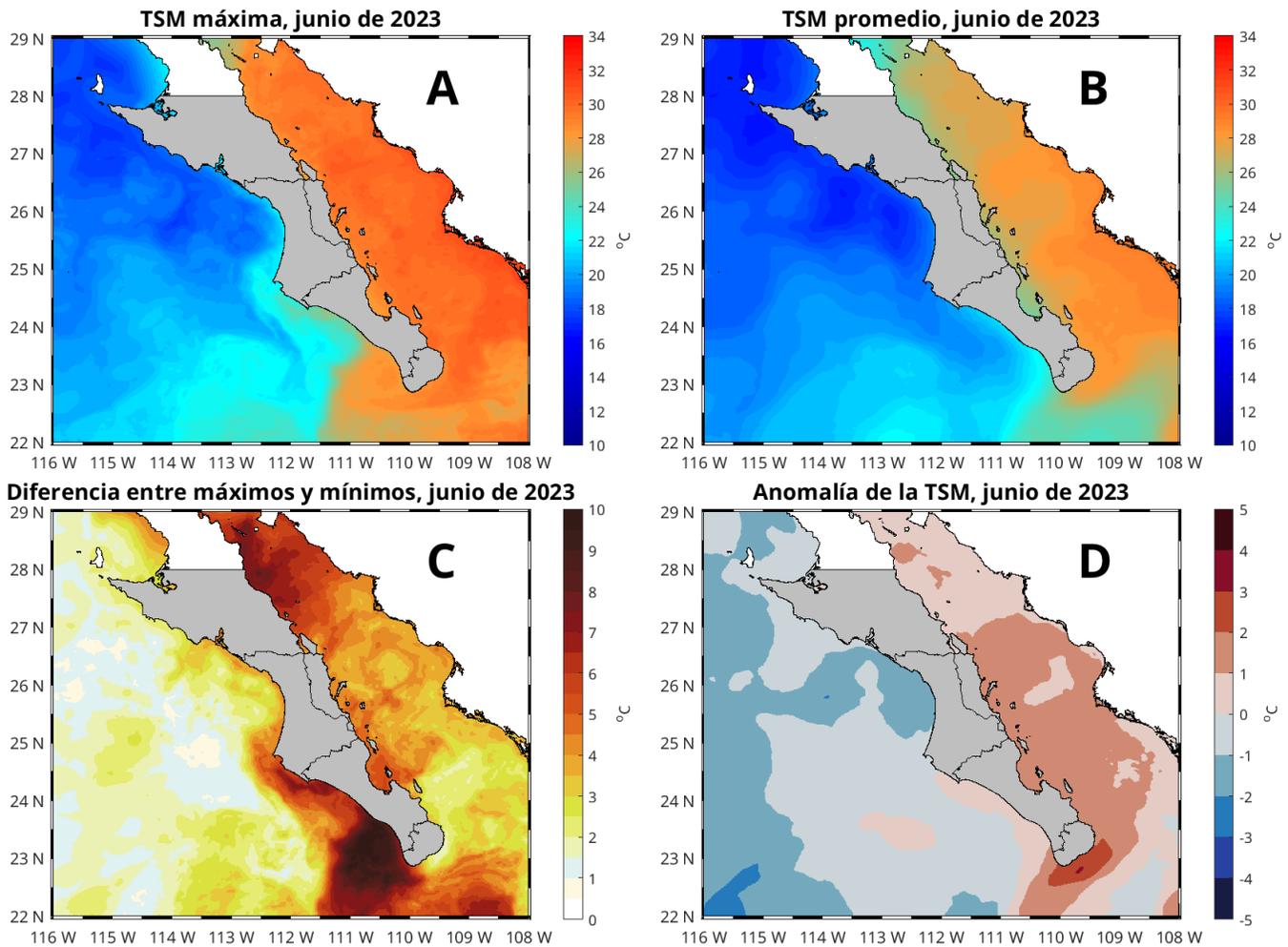


Figura 6: Condiciones de TSM durante el mes de junio de 2023. Panel A, máximos, B promedio, C diferencia entre máximos y mínimos, D anomalía.

3.3. Cabo Pulmo

3.3.1. Series de tiempo

Las condiciones climatológicas y anómalas de TSM, CLO y ANM a lo largo del tiempo (2002-2023) para Cabo Pulmo se muestran en la figura 7. Las barras azules en los paneles A, C y E, muestran las climatologías mensuales para cada variable. Las líneas negras indican los valores de cada variable para cada mes de 2023 (hasta junio). Los paneles B, D y F muestran las series de tiempo mensuales de las anomalías para cada variable. La línea negra indica los datos mensuales del índice multivariado ENOS (MEI), esto a manera de comparación.

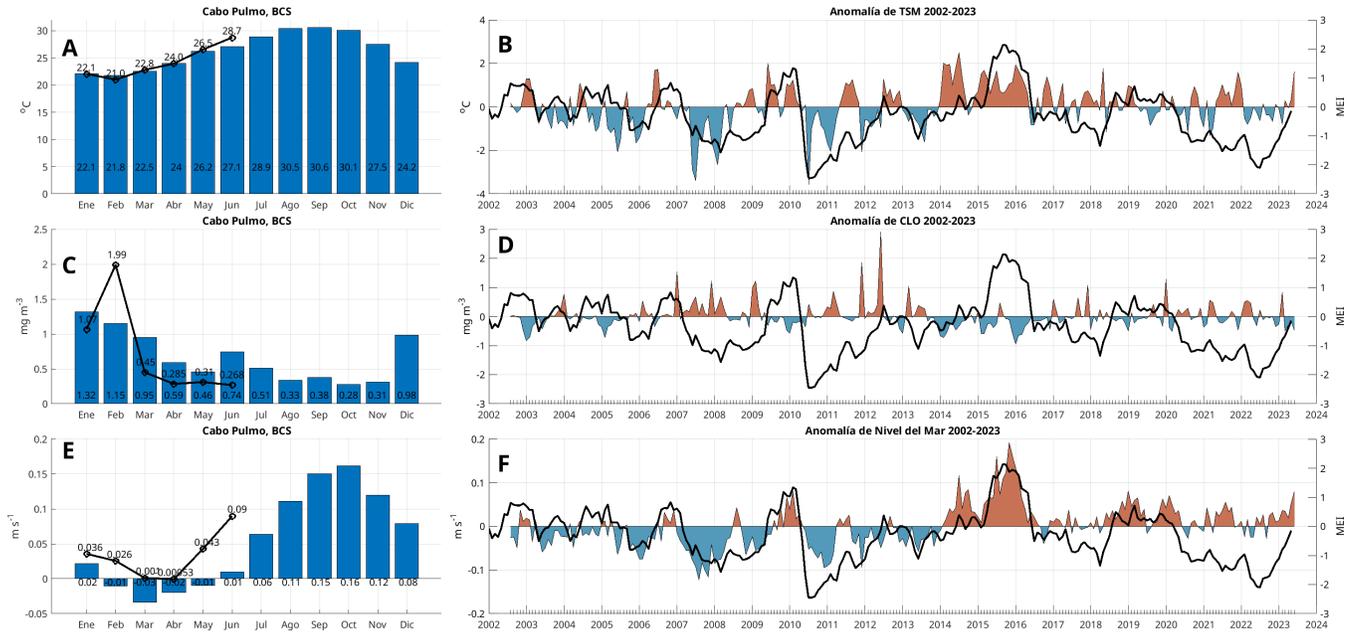


Figura 7: Climatologías mensuales y anomalías interanuales de TSM, CLO y ANM durante 2023 para Cabo Pulmo. Las barras azules en los paneles A, C y E representan las climatologías mensuales de TSM, CLO y ANM, respectivamente. Los números en la base de las barras indican los valores climatológicos de cada mes. Las líneas negras con círculos muestran los promedios mensuales de enero a junio de 2023, sus valores mensuales se indican encima de cada círculo. Las series de tiempo de los paneles B, D y F representan las anomalías interanuales de cada variable, de color azul las negativas y de color rojo las positivas. La línea negra en estos mismos paneles representa el índice MEI.

La figura 8 contiene la serie de tiempo del nivel del mar absoluto (m) en Cabo Pulmo, desde el 1 de enero de 1993 hasta el 12 de septiembre de 2023. Destacan los máximos de 1997-1998, asociado a un evento del Niño, 2014 debido al Blob cálido, y 2015 debido al evento del Niño más reciente. Esta variable contiene el incremento del nivel del mar debido al calentamiento global. En esta localidad la tendencia es de 2.6 mm/año y de 80 mm en los 30 años de este registro.

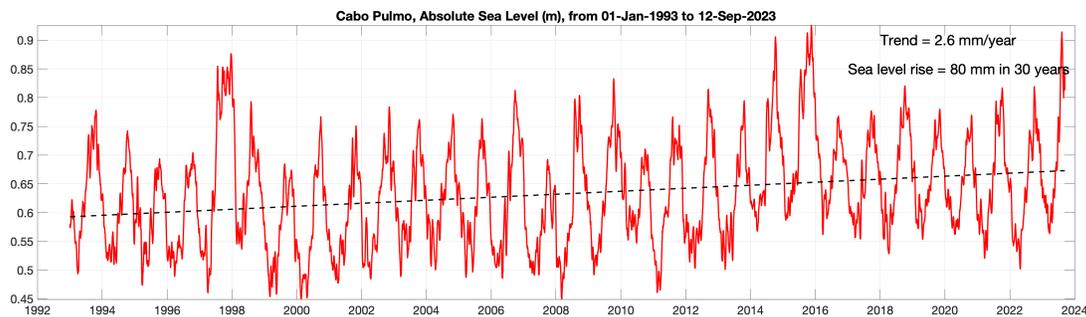


Figura 8: Nivel del mar absoluto (m) en Cabo Pulmo, BCS. Inicia el 1 de enero de 1993 y termina el 12 de septiembre de 2023. Incluye el nivel del mar con referencia al Geoide. Incluye la tendencia de largo período debida a calentamiento global.

3.3.2. Viento (VTO) *in situ*

Las observaciones de viento *in situ* registradas durante 2023 comparadas con la climatología (2014-2023) de los vientos en el mes de mayo muestran un claro aporte de los vientos provenientes del Norte en la estación de Cabo Pulmo (Fig. 9). Para junio de 2023, el aporte de los vientos provenientes del Suroeste es claro si lo comparamos con la distribución normal de la rosa de los vientos dada por la climatología local (2014-2023).

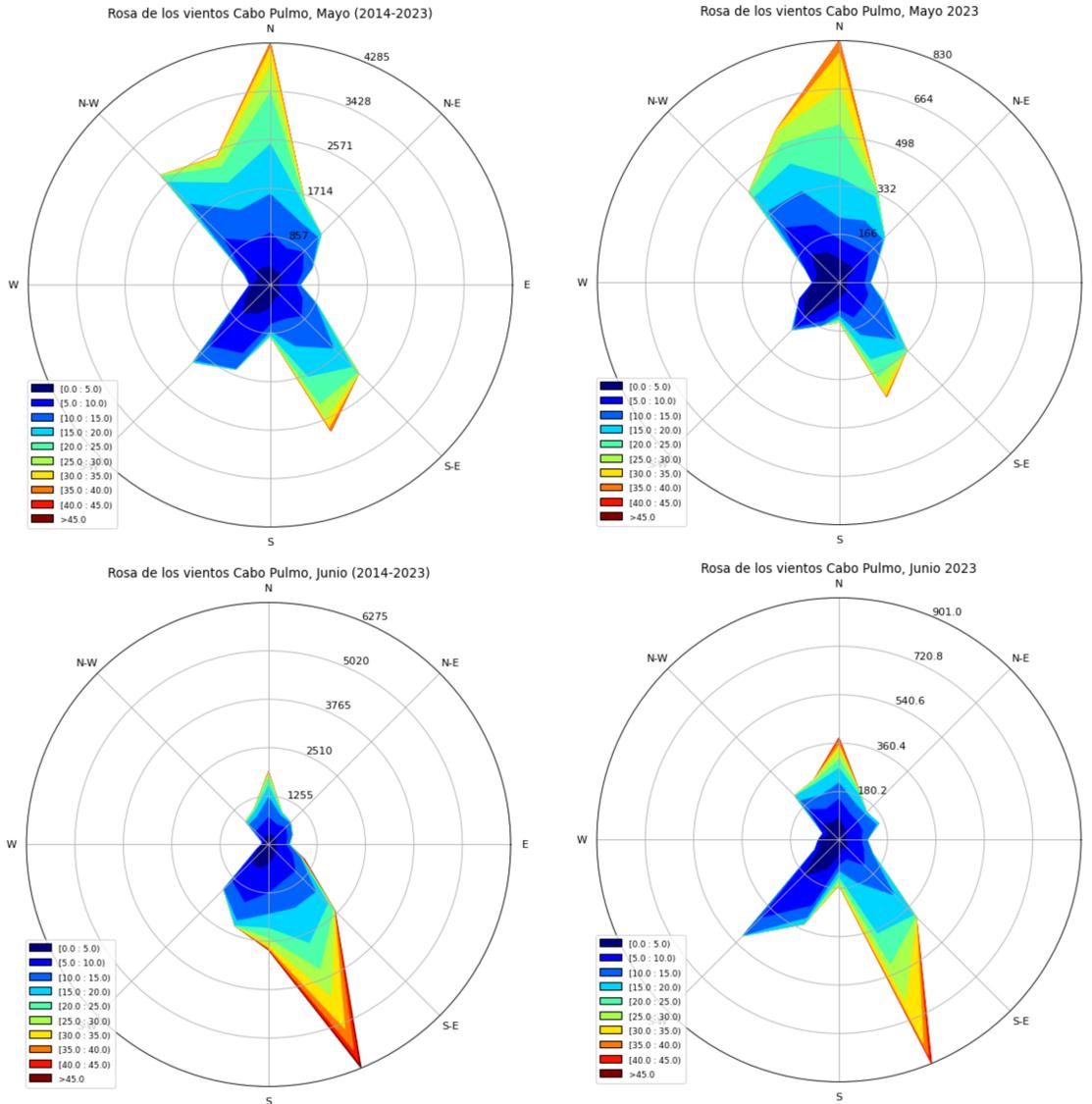


Figura 9: Climatología vs. observaciones de la dirección e intensidad de los vientos en la estación Cabo Pulmo durante los meses de mayo y junio de 2023. Un cambio del patrón normal de los vientos con una influencia de los vientos provenientes del norte y suroeste cambia ligeramente la configuración dada por las climatologías en ambos meses, respectivamente.

La intensidad del viento *in situ* registrada durante los meses de mayo y junio de 2023, vista desde el gráfico de cajas, muestra como mayo tuvo una persistencia notable de los vientos superiores a 30 km/h en comparación con años previos (Fig. 10). Al no contar con datos entre 2019 y 2022, sólo mayo de 2014 es comparable con lo ocurrido en 2023. Para el mes de junio, esta persistencia de vientos fuertes es menos notable a la de años previos. De acuerdo con el gráfico de cajas, 2014 y 2018 destacan por tener una distribución de vientos intensos persistentes, mayores a los 40 km/h. Las observaciones de junio de 2015 están en revisión, pues presentan numerosos *outliers* según la figura 10.

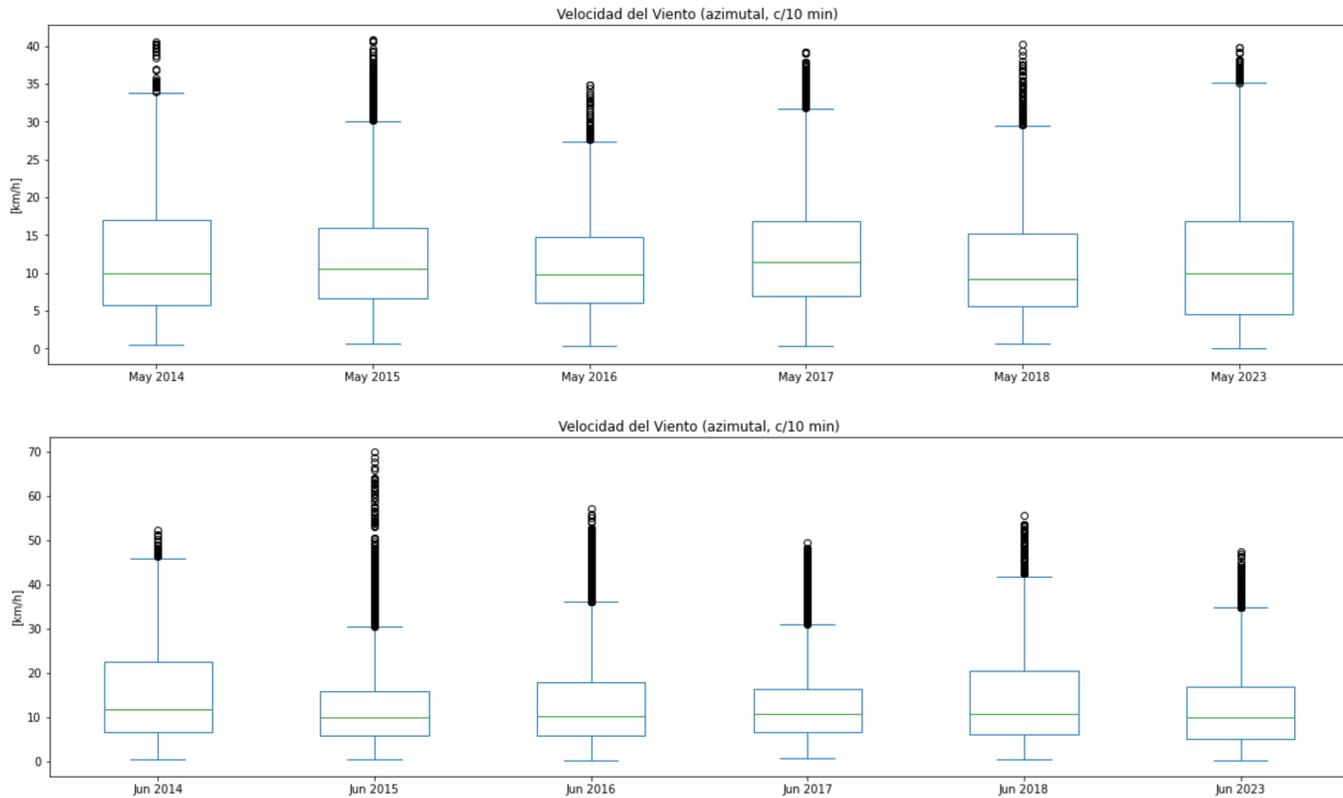


Figura 10: Análisis de caja de la intensidad de los vientos en la estación Cabo Pulmo durante los meses de mayo y junio de 2023. Los bigotes superiores de cada caja nos definen el umbral donde los vientos fuertes son persistentes durante el mes, los círculos representan aquellos eventos aislados de viento intenso (*outliers*).

3.3.3. Paisaje Pelágico (CP)

El paisaje pelágico en Cabo Pulmo y zonas adyacentes, muestran una estacionalidad bien definida. De enero a agosto, la categoría H15 disminuye del 80 al 16 %, para volver a extenderse hasta casi el 70 % hacia diciembre. El predominio de H15 indica temperatura superficial de 25.35 °C, salinidad de 35.4 ups, y concentración de clorofila de 0.32 mg·m⁻³. En sentido opuesto, H3 se expande de febrero (<5 %) a agosto (60 %); H3 se define por una temperatura superficial de 24.12 °C, salinidad de 35.34 ups y 0.15 mg·m⁻³ de clorofila. Lo que se observa en el periodo enero-julio de 2023 en la zona de Cabo Pulmo, es el colapso de H15, la expansión anómala de H11 a inicios de año (95 %) y posteriormente H3 que creció a partir de febrero y cubrió más del 80 % del área considerada en mayo y junio. Estas anomalías implican la presencia de aguas con menor temperatura y menor concentración de clorofila respecto a las condiciones promedio (figura 11a)). Si bien H15 suele ser el hábitat pelágico de mayor extensión en la zona de Cabo Pulmo, la distribución espacial en junio de 2023 muestra que fue el de menor área y se presentó de manera alternada con H11. Ambos hábitats se distribuyeron a lo largo de la costa, con un parche más oceánico que se encontró separado por una gran área dominada por H3 (80 %; (figura 11b)).

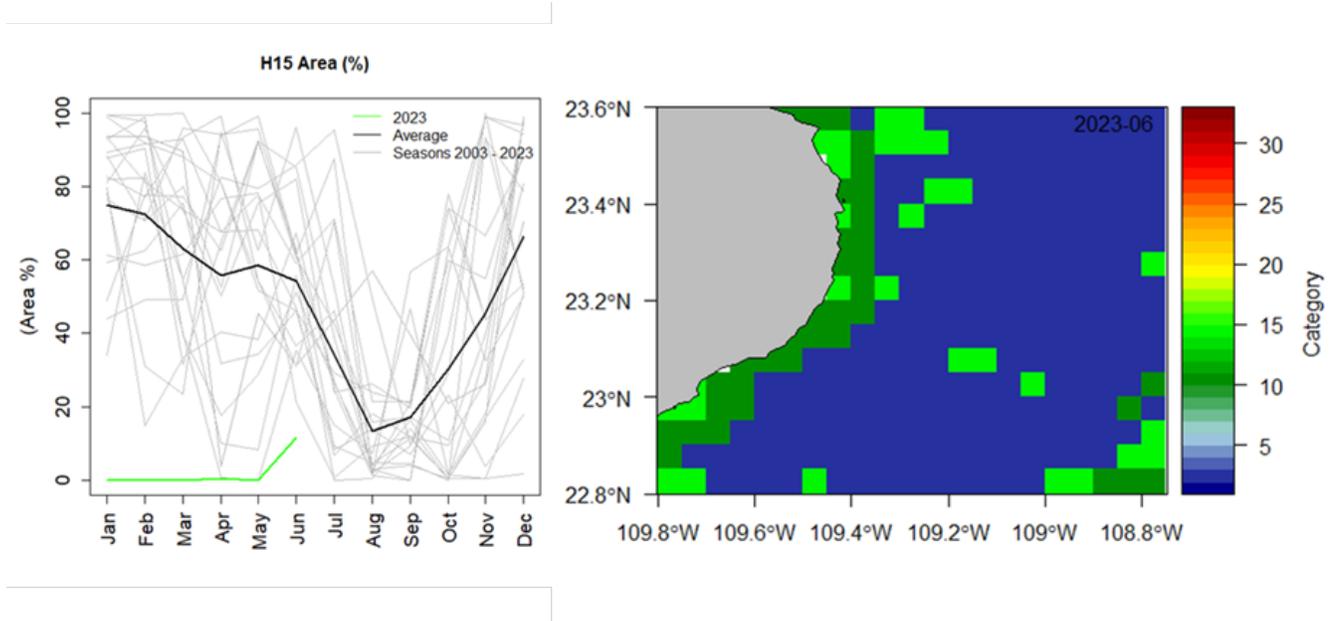


Figura 11: Paisaje Pelágico frente a Cabo Pulmo. a) Panel izquierdo: Comportamiento estacional del hábitat dominante H15 (2003-2023). b) Panel derecho: Distribución espacial de los hábitats pelágicos en Cabo Pulmo y zonas adyacentes durante junio de 2023.

3.3.4. Fitoplancton

Las climatologías de los grupos fitoplanctónicos representativos, diatomeas, dinoflagelados y cocolitofóridos a lo largo del periodo 2002-2023, se presentan en la figura 12. Los datos diarios han sido recopilados del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (CMEMS). Las barras azules indican las climatologías, mientras que las líneas negras muestran los promedios mensuales de enero a junio de 2023. Estos datos revelan dos ciclos estacionales: el primero en invierno, de diciembre hasta marzo, y el segundo en verano, con máximos promedios en junio.

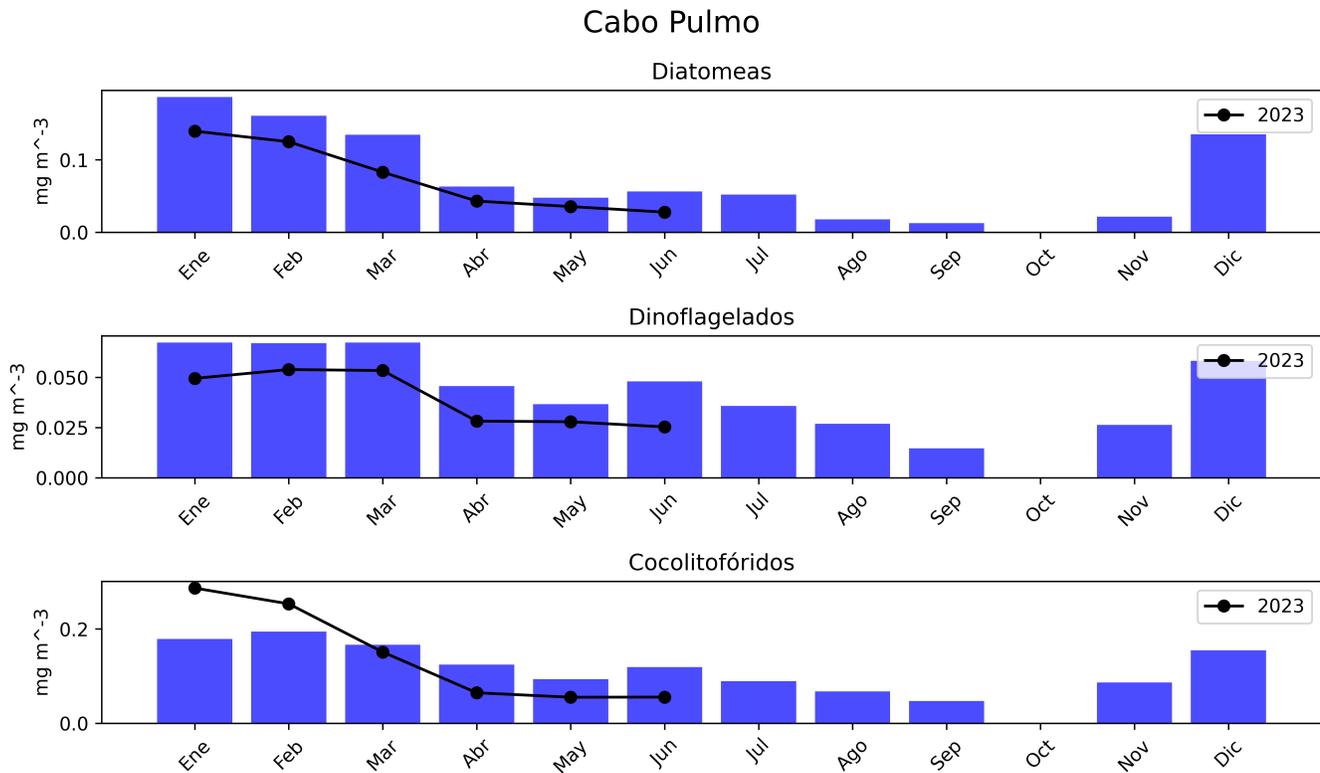


Figura 12: Climatologías de la concentración de grupos fitoplanctónicos expresada en CLO en el agua de mar en Cabo pulmo.

3.4. Bahía de La Paz

3.4.1. Series de tiempo

Las condiciones climatológicas y anómalas de TSM, CLO y ANM a lo largo del tiempo (2002-2023) para la Bahía de La Paz se muestran en la figura 7. Las barras azules en los paneles A, C y E, muestran las climatologías mensuales para cada variable. Las líneas negras indican los valores de cada variable para cada mes de 2023 (hasta junio). Los paneles B, D y F muestran las series de tiempo mensuales de las anomalías para cada variable. La línea negra indica los datos mensuales del MEI, a manera de comparación.

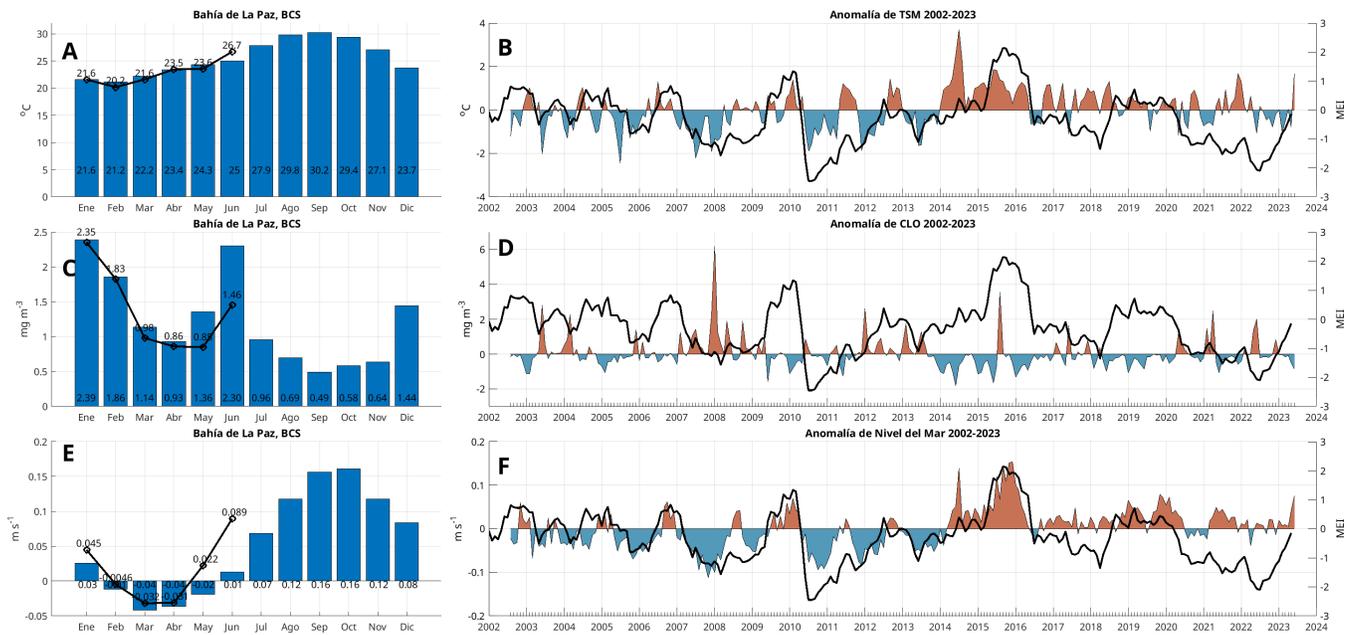


Figura 13: Climatologías mensuales y anomalías interanuales de TSM, CLO y ANM durante 2023 para la Bahía de La Paz. Las barras azules en los paneles A, C y E representan las climatologías mensuales de TSM, CLO y ANM respectivamente. Los números en la base de las barras indican los valores climatológicos de cada mes. Las líneas negras con círculos muestran los promedios mensuales de enero a junio de 2023, sus valores mensuales se indican encima de cada círculo. Las series de tiempo de los paneles B, D y F representan las anomalías interanuales de cada variable, de color azul las negativas y de color rojo las positivas. La línea negra en estos mismos paneles representa el índice MEI.

La figura 14 contiene la serie de tiempo del nivel del mar absoluto (m) en Bahía de La Paz, BCS, desde el 1 de enero de 1993 hasta el 12 de septiembre de 2023. Destacan los máximos de 1997-1998, asociado al un evento del Niño, 2014 debido al Blob cálido, y 2015 debido al evento del Niño más reciente. Esta variable contiene el incremento del nivel del mar debido al calentamiento global. En esta localidad la tendencia es de 2.4 mm/año y de 72 mm en los 30 años de este registro.

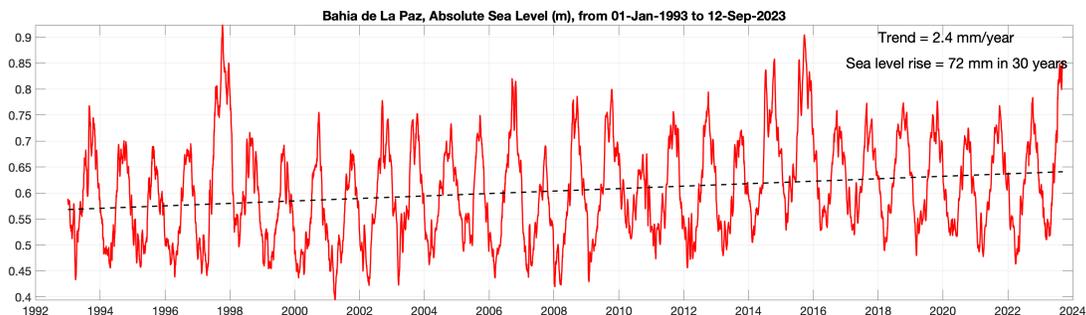


Figura 14: Nivel del mar absoluto (m) en Bahía de La Paz, BCS. Inicia el 1 de enero de 1993 y termina el 12 de septiembre de 2023. Incluye el nivel del mar con referencia al Geoide. Incluye la tendencia de largo período debida a calentamiento global.

3.4.2. Temperatura del aire

Las condiciones de Temperatura del aire (T_{air}) y velocidad del viento (VTO) en la bahía de La Paz de enero a junio de 2023 se muestran en la figura 15. El panel A muestra la marcha de la temperatura diaria del aire durante el primer semestre del 2023. Se observan valores mínimos de T_{air} de enero hasta principios de marzo de $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el incremento paulatino de T_{air} durante marzo y abril (22.0 a $26\text{ }^{\circ}\text{C}$) para mostrar un abrupto incremento durante mayo y junio (29.0 a $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los paneles B y C muestran la velocidad, rachas y dirección predominante del viento. Se observan episodios continuos de VTO y rachas máximas del norte y noroeste (8.0 a 10.0 m s^{-1}) durante los primeros meses del año (enero-febrero). Posteriormente, durante abril y mayo se presentan picos menos intensos en el VTO y su dirección (sur y suroeste) que corresponden al cambio en la dirección predominante (panel C). Este cambio en la dirección del VTO (con carácter monzónico), influye en la circulación superficial de la bahía de La Paz y en la formación de fenómenos de mesoescala, como giros, meandros y filamentos (Torres-Hernández, et al. 2022), que presentan una alta correlación con la riqueza biológica observada en la Bahía durante un ciclo anual (Herrera-Cervantes, 2019).

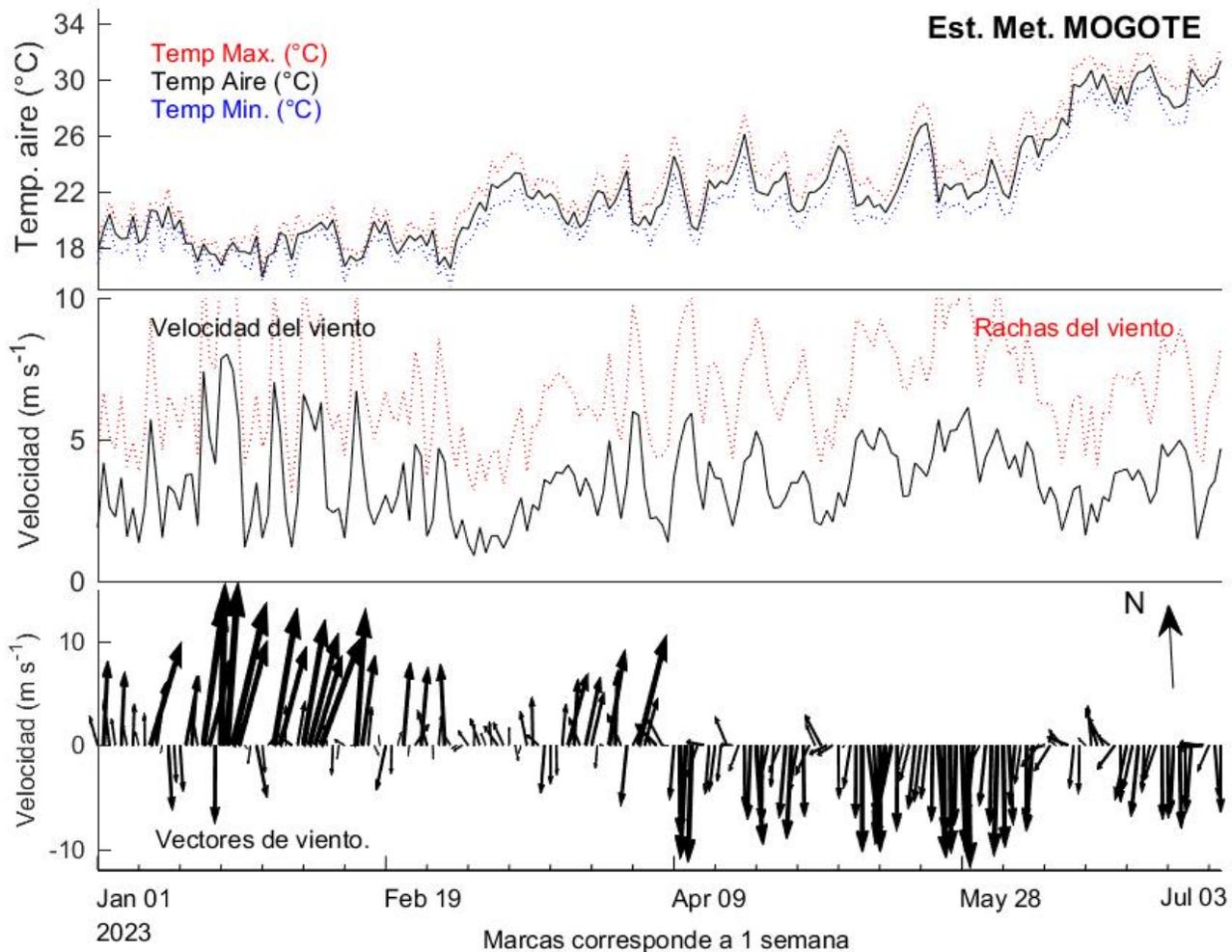


Figura 15: Series de tiempo de: A, Temperatura del aire (máximas y mínimas); B, Velocidad, rachas de viento y C, dirección predominante del viento. Datos registrados en la estación meteorológica ubicada en El Mogote, en la Bahía de La Paz.

3.4.3. Paisaje Pelágico (BLP)

El hábitat pelágico H15 es dominante en la Bahía de La Paz, particularmente entre abril y octubre, cuando llega a ocupar el 90 % del área de la bahía y la zona adyacente (figura 17a)). La categoría H15 se conforma en torno a condiciones de temperatura superficial de 25.35 °C, salinidad de 35.4 ups, y concentración de clorofila de 0.32 mg·m⁻³. La primera mitad de 2023 muestra un colapso de H15, ya que solo se presentó hasta el mes de junio (40 %), aunque aún muy por debajo del área que ha ocupado históricamente en promedio durante el mismo mes (78 %). La contracción de H15 en lo que va de 2023 implica la presencia de aguas más frías y menor concentración de clorofila (figura 17). El mapa de Bahía de La Paz muestra que en el mes de junio H15 fue el hábitat con mayor área, tanto en zonas costeras como en aguas adyacentes a la bahía (figura 17b)). En sentido estricto, H11 es el que ocupa mayor área dentro de la bahía, acompañado por áreas pequeñas y costeras ocupadas por H21 y caracterizadas por temperaturas ligeramente inferiores al resto de hábitats pelágicos, pero de mayor concentración de clorofila (figura 17b)).

3.4.4. Fitoplancton

Las concentraciones climatológicas de los grupos fitoplanctónicos representativos, diatomeas, dinoflagelados y coccolitofóridos a lo largo del periodo 2002-2023, se presentan en la figura 16. Los datos diarios han sido recopilados del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (CMEMS). Las barras azules indican las climatologías, mientras que las líneas negras muestran los promedios mensuales de enero a junio de 2023. Diatomeas y dinoflagelados exhiben dos ciclos estacionales: el primero en invierno, de diciembre hasta marzo, y el segundo en verano, con máximos promedios en junio.

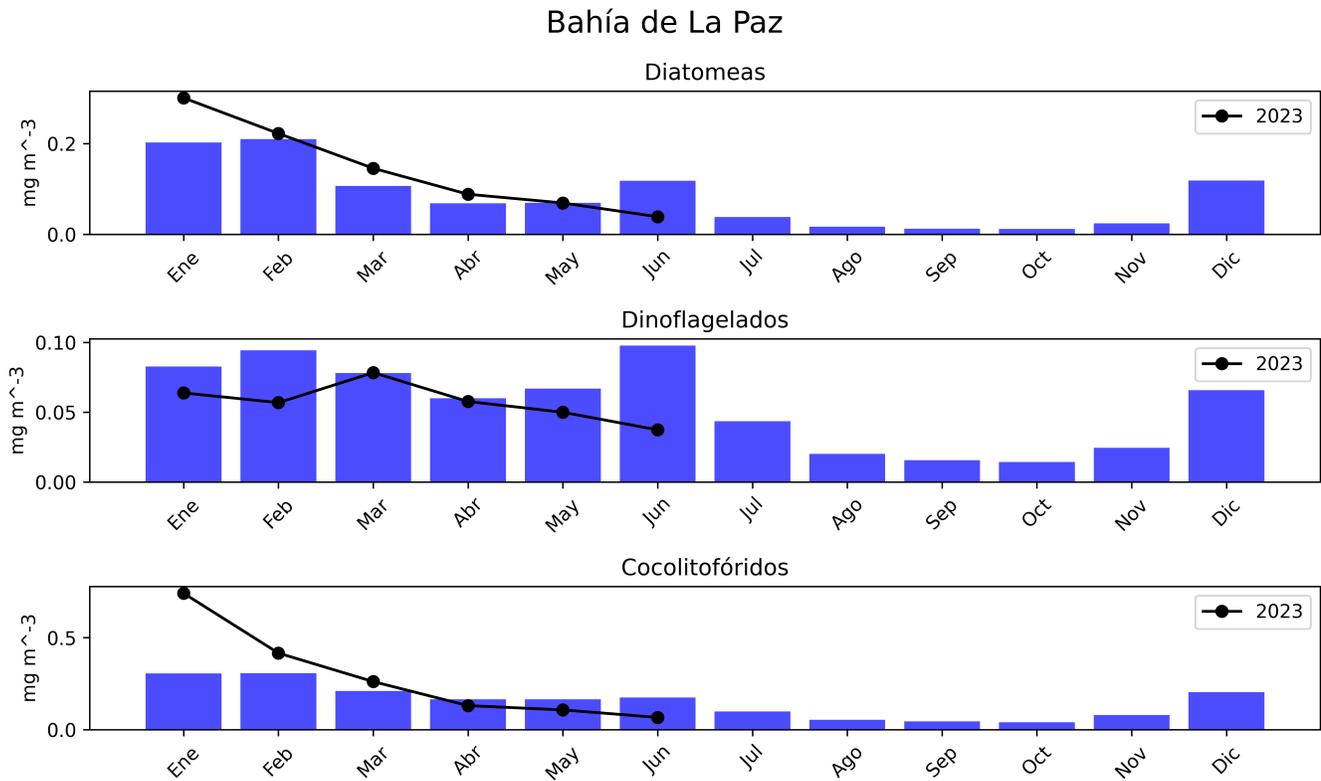


Figura 16: Climatologías de la concentración de grupos fitoplanctónicos expresada en CLO en el agua de mar en Bahía de La Paz.

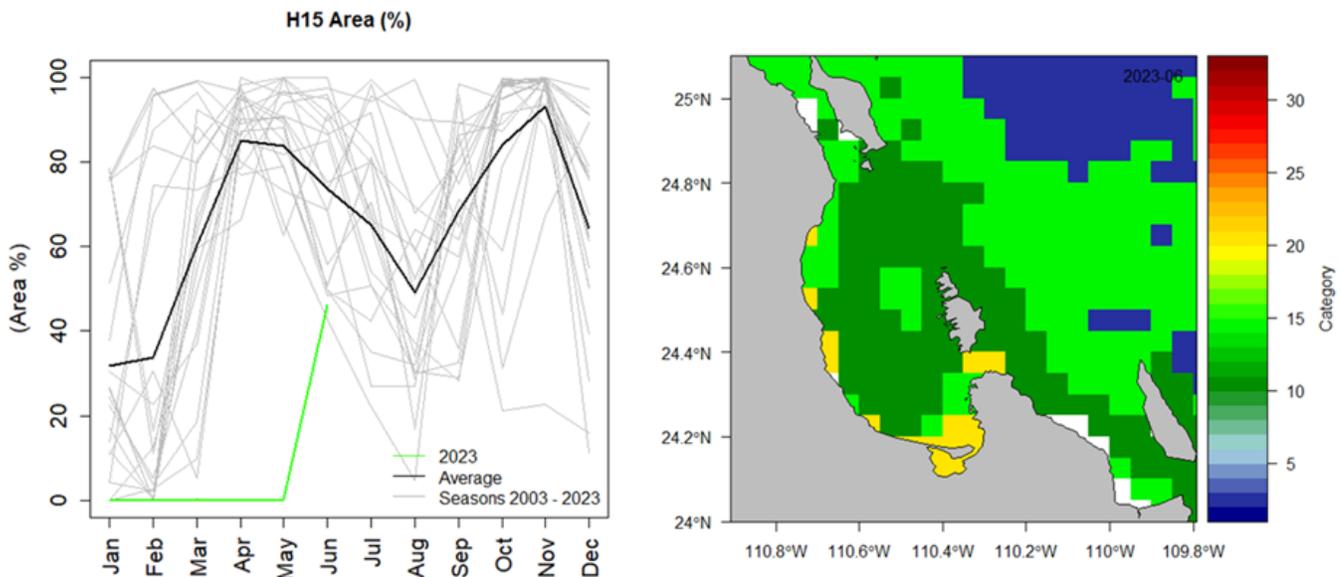


Figura 17: Paisaje Pelágico en la Bahía de La Paz. a) Panel izquierdo: Comportamiento estacional del hábitat dominante H15 (2003 - 2023). b) Panel derecho: Distribución espacial de los hábitats pelágicos en Bahía de La Paz y zona adyacente durante junio de 2023.

3.5. San Juanico, Golfo de Ulloa

3.5.1. Series de tiempo

Las condiciones climatológicas y anómalas de TSM, CLO y ANM a lo largo del tiempo (2002-2023) para San Juanico se muestran en la figura 18. Las barras azules en los paneles A, C y E, muestran las climatologías mensuales para cada variable. Las líneas negras indican los valores de cada variable para cada mes de 2023 (hasta junio). Los paneles B, D y F muestran las series de tiempo mensuales de las anomalías para cada variable. La línea negra indica los datos mensuales del MEI, a manera de comparación.

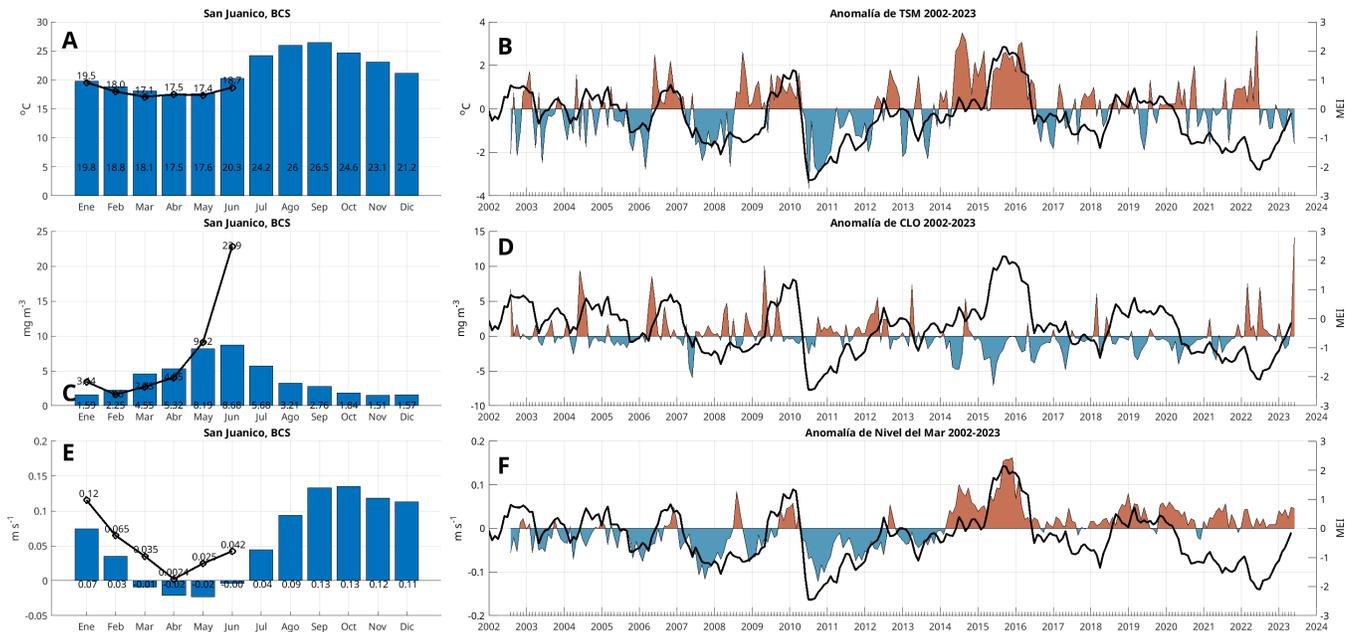


Figura 18: Climatologías mensuales y anomalías interanuales de TSM, CLO y ANM durante 2023 para San Juanico. Las barras azules en los paneles A, C y E representan las climatologías mensuales de TSM, CLO y ANM respectivamente. Los números en la base de las barras indican los valores climatológicos de cada mes. Las líneas negras con círculos muestran los promedios mensuales de enero a junio de 2023, sus valores mensuales se indican encima de cada círculo. Las series de tiempo de los paneles B, D y F representan las anomalías interanuales de cada variable, de color azul las negativas y de color rojo las positivas. La línea negra en estos mismos paneles representa el índice MEI.

La figura 19 contiene la serie de tiempo del nivel del mar absoluto (m) en San Juanico, costa pacífica norte de BCS, desde el 1 de enero de 1993 hasta el 12 de septiembre de 2023. Destacan los máximos de 1997-1998, asociado al un evento del Niño, 2014 debido al Blob cálido, y 2015 debido al evento del Niño más reciente. Esta variable contiene el incremento del nivel del mar debido al calentamiento global. En esta localidad la tendencia es de 2.7 mm/año y de 84 mm en los 30 años de este registro.

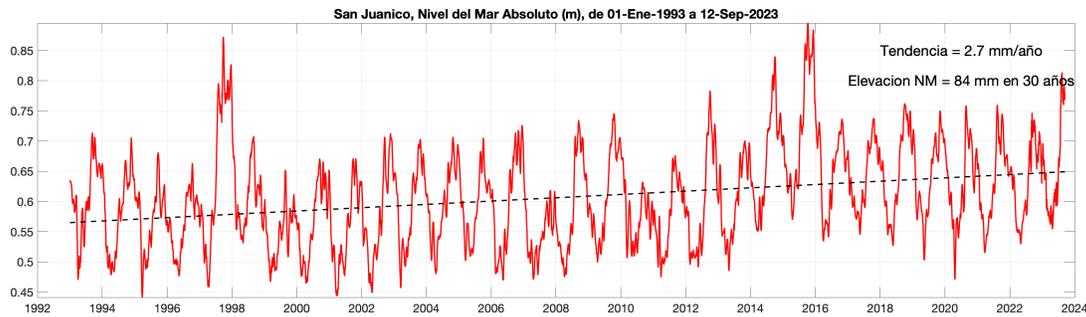


Figura 19: Nivel del mar absoluto (m) en San Juanico, costa pacífico norte de BCS. Inicia el 1 de enero de 1993 y termina el 12 de septiembre de 2023. Incluye el nivel del mar con referencia al Geoide. Incluye la tendencia de largo período debida a calentamiento global.

3.5.2. Viento (VTO) *in situ*

Las observaciones de viento *in situ* registradas durante 2023 comparadas con la climatología (2008-2023) de los vientos en los meses de mayo y junio muestran un claro aporte de los vientos provenientes del Noroeste (Fig. 20) siendo junio el mes donde es más evidente este cambio en el patrón.

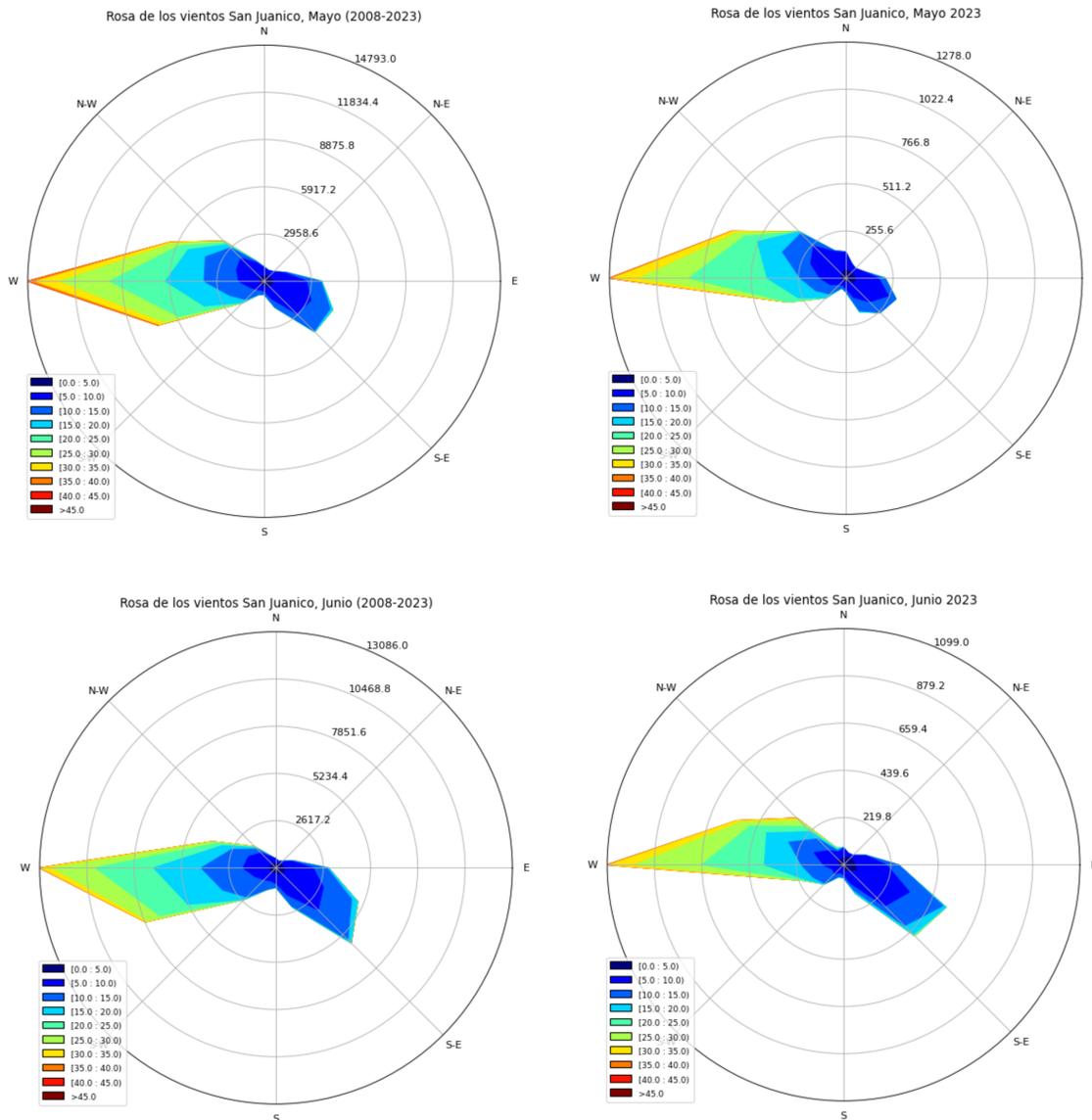


Figura 20: Climatología vs. observaciones de la dirección e intensidad de los vientos en la estación San Juanico durante los meses de mayo y junio de 2023. Un cambio del patrón normal de los vientos con una influencia de los vientos provenientes del norte cambia ligeramente la configuración dada por las climatologías en ambos meses.

La intensidad del viento *in situ* registrada durante los meses de mayo y junio de 2023, vista desde el gráfico de cajas, muestra como mayo tuvo un incremento en la frecuencia de los vientos superiores a 30 km/h que continuó durante el mes de junio (Fig. 21). De acuerdo con este gráfico de cajas los años previos a 2023, para el mes de junio, no reflejan una distribución clara en la intensidad de los vientos superiores a los 30 km/h, en la mayoría de los casos, pudieron ser eventos aislados (*outliers*) registrados por la estación meteorológica en este sitio.

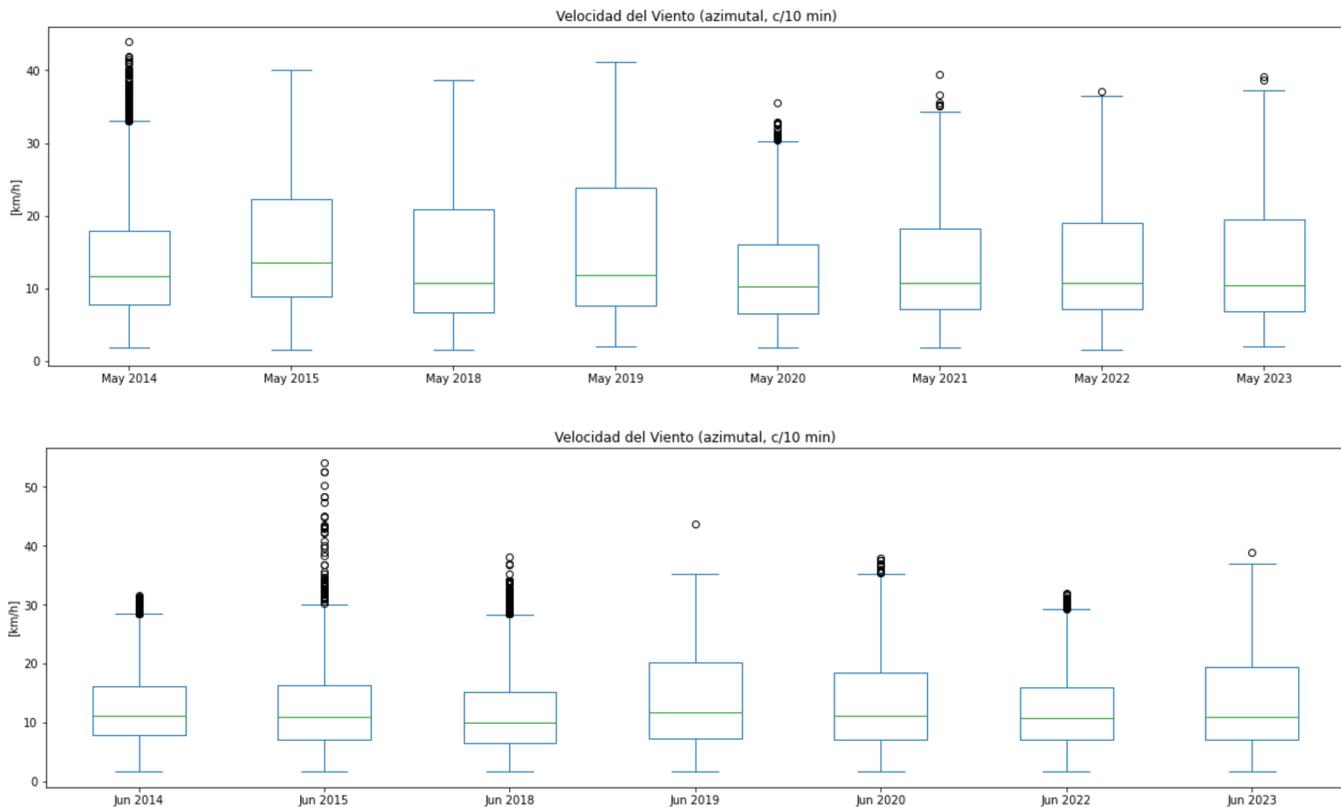


Figura 21: Análisis de caja de la intensidad de los vientos en la estación San Juanico durante los meses de mayo y junio de 2023. Los bigotes superiores de cada caja nos definen el umbral donde los vientos fuertes son persistentes durante el mes, los círculos representan aquellos eventos aislados de viento intenso (*outliers*).

3.5.3. Paisaje Pelágico (GU)

El paisaje pelágico del Golfo de Ulloa se caracteriza por su diversidad de hábitats a lo largo del año. La categoría H17, ocupa la mayor área entre enero y abril (35-40%); se define por una temperatura superficial de 20.89°C, salinidad de 33.59 ups y una concentración de clorofila de 0.17 mg·m⁻³. Por su parte, H21 crece gradualmente de menos del 10% hasta el 30-40% en junio-julio. La transición de H17 a H21 conlleva un ligero incremento en temperatura (22.54°C), salinidad (34.46 ups) y clorofila (2.09 mg·m⁻³). En condiciones promedio, H15 se expande del 16% en mayo-junio, al 40% en septiembre-octubre (figura 22a)).

Las bajas porciones de área ocupadas por H17, entre enero y mayo de 2023, no tienen precedentes en el periodo observado (2003-2023). Esto significa una contracción del típico 35-40% a menos del 5% ocupado por H17 en los primeros cinco meses del año (figura 22a)). Las variaciones históricas de H17 indican que en el pasado ya se han presentado otros colapsos del área cubierta por este hábitat pelágico, un tanto similares en porcentaje a los de 2006-2007, 2014-2015 y 2015-2016, cuando incluso llegó a desaparecer brevemente, aunque en ninguno de esos casos se presentó el desfase fenológico tan duradero de 2023. Aunque se observa la expansión ligera de H17 en junio de 2023, este se mantuvo por debajo de los mínimos históricos (figura 22). El conjunto de cambios observados en la primera mitad del 2023 indican que, casi todo el Golfo de Ulloa experimentó una disminución de temperatura (<13°C) y clorofila (<0.84 mg·m⁻³). La distribución espacial de las categorías de hábitats pelágicos en el mes de junio muestra una mayor

extensión de H21 que se presenta de la costa hacia mar adentro, seguida por H14, H7 y finalmente aparece H17 de manera dispersa. Esta distribución sugiere que la mayor concentración de clorofila se encuentra en la costa ($\sim 2.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y la presencia de un gradiente de temperatura, siendo mayor en la costa y menor hacia afuera, con excepción de los parches de H17 que implican temperaturas intermedias ($\sim 20.89^\circ\text{C}$) pero ocupando áreas pequeñas (figura 22b)).

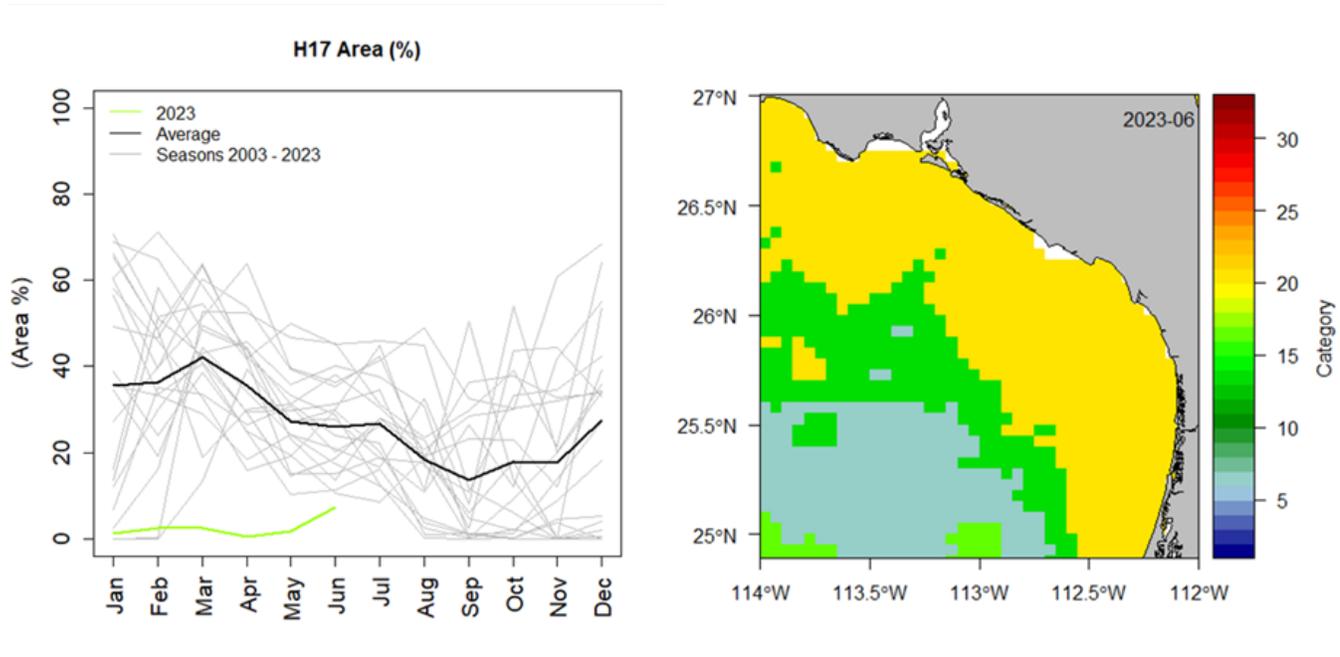


Figura 22: Paisaje Pelágico en el Golfo de Ulloa. a) Panel izquierdo: Comportamiento estacional (2003-2023) del hábitat dominante H17 en el Golfo de Ulloa. b) Panel derecho: Distribución espacial de los hábitats pelágicos en el Golfo de Ulloa durante junio de 2023.

3.5.4. Fitoplancton

Las concentraciones climatológicas de los grupos fitoplanctónicos representantes diatomeas, dinoflagelados y cocolitofóridos a lo largo del tiempo (2002-2023) se ilustran en la figura 23. Los datos diarios han sido obtenidos del CMEMS. Las barras azules reflejan las climatologías, mientras que las líneas negras representan los promedios mensuales de enero a junio de 2023. Estos datos revelan un ciclo estacional pronunciado en verano, abarcando desde abril hasta julio.

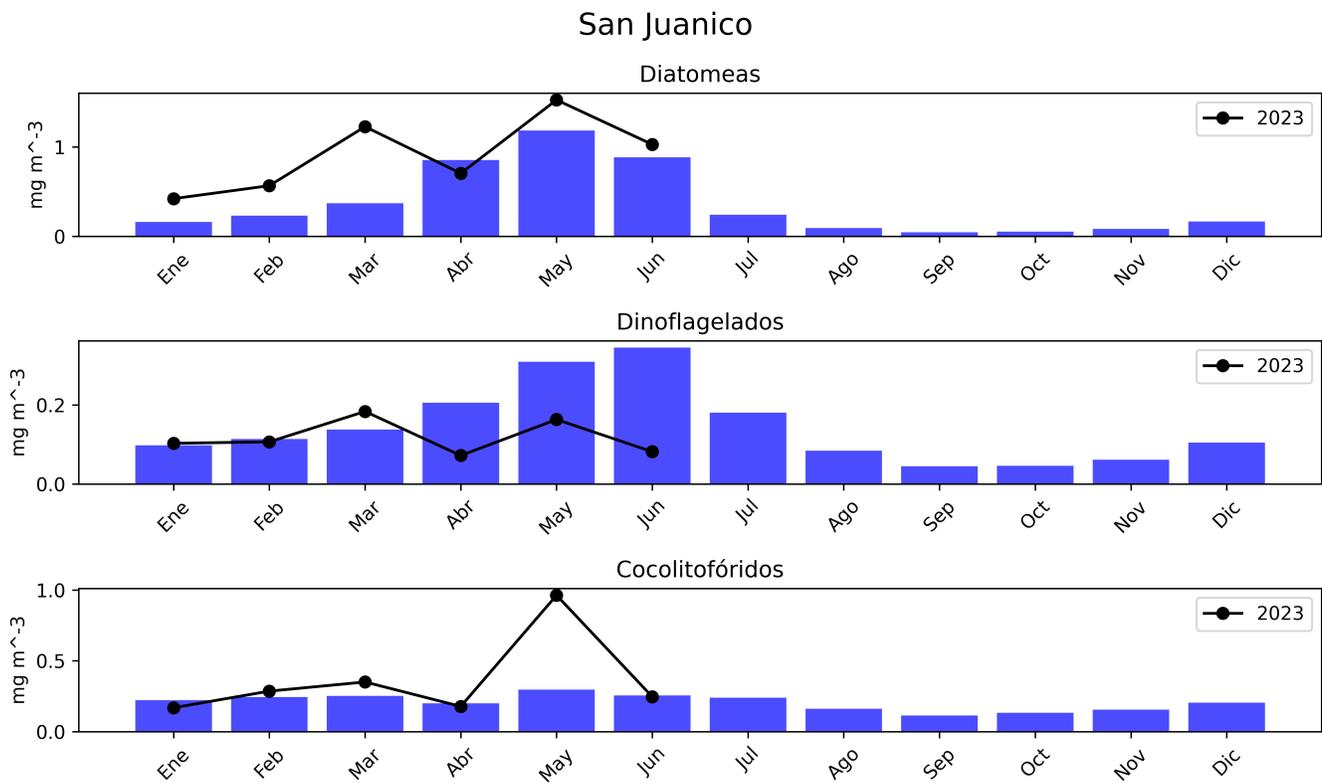


Figura 23: Climatologías de la concentración de grupos fitoplanctónicos expresada en CLO en el agua de mar en San Juanico.

3.5.5. Temperatura en el Valle de Santo Domingo, área contigua, región San Juanico-Golfo de Ulloa

Como complemento del análisis de la zona San Juanico-Golfo de Ulloa, realizado de manera previa, se presenta a continuación el análisis de las temperaturas promedio, máximas y mínimas mensuales históricas del periodo enero-junio (periodo 1981- 2017) versus las suscitadas para los mismos meses en el presente año correspondientes a la región del Valle de Santo Domingo, municipio de Comondú; principal zona agrícola de la entidad, en la que se establecen anualmente más de 29,000 hectáreas de cultivos diversos como hortalizas, cítricos, maíz, trigo, alfalfa, entre otros (SIAP, 2023) (https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/).

La figura 24, muestra los datos de temperatura media mensual (históricos vs año 2023) proporcionados por el Observatorio Meteorológico no. 3132 localizado en Ciudad Constitución (Valle de Santo Domingo) ubicado en las coordenadas geográficas 25.00° Latitud N, -111.64° Longitud Oeste. De enero a junio de 2023 se presentó una anomalía negativa de 0.3 a 1.3 °C con respecto al promedio de temperatura media mensual histórica para el mismo periodo. Por su parte, la figura 25, muestra el comparativo de los promedios de temperaturas mínimas y máximas históricas con respecto a las presentadas en 2023; en este sentido también se observa como las temperaturas máximas y mínimas enero-junio de 2023 han estado por debajo de los valores medios históricos; excepto el promedio de temperatura mínima de mayo de 2023 que presentó una anomalía positiva de 0.35 °C. En retrospectiva al análisis de TSM mostrado en la sección 3.5.1 de serie de tiempo para la región San Juanico-Golfo de Ulloa, se aprecia como las temperaturas en el ambiente de esta zona agrícola también mostraron coincidencia en la anomalía negativa con respecto a las temperaturas medias mensuales históricas.

El predominante y ligero descenso en los valores medios de las temperaturas para el periodo 2023 referido, pudo generar un leve aumento en los días a cosecha de cultivos, una disminución de las necesidades hídricas y en la incidencia de plagas y enfermedades para los cultivos presentes.

Resulta relevante monitorear y analizar el comportamiento de la temperatura en la región, al ser un factor de gran valor en la búsqueda de optimizar el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas. Algunos beneficios específicos a los que coadyuva el conocer el comportamiento de la temperatura son: a) inferir potencial productivo de cultivos, b) delimitar fechas de siembra que favorecen el buen desarrollo de los cultivos anuales o perennes (optimizar crecimiento y desarrollo de la planta, reducir la incidencia de plagas, enfermedades o malezas), e incluso c) incrementar la productividad del agua.

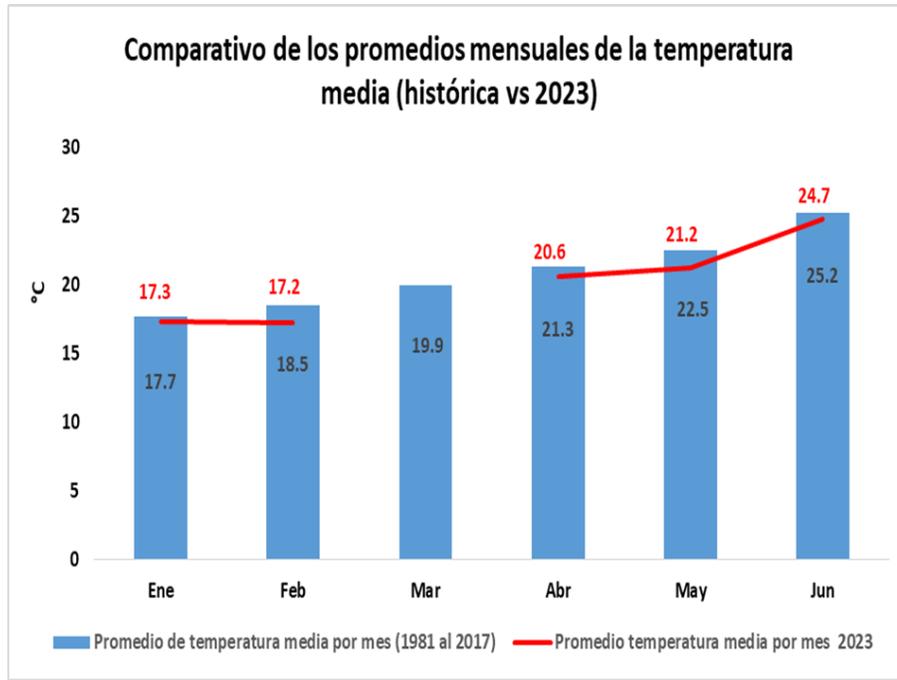


Figura 24: Comparativo de los promedios mensuales de la temperatura media (periodo 1981-2017 vs 2023) registrados en el observatorio meteorológico no. 3132 del Servicio Meteorológico Nacional en Ciudad Constitución, BCS. marzo de 2023 sin datos.

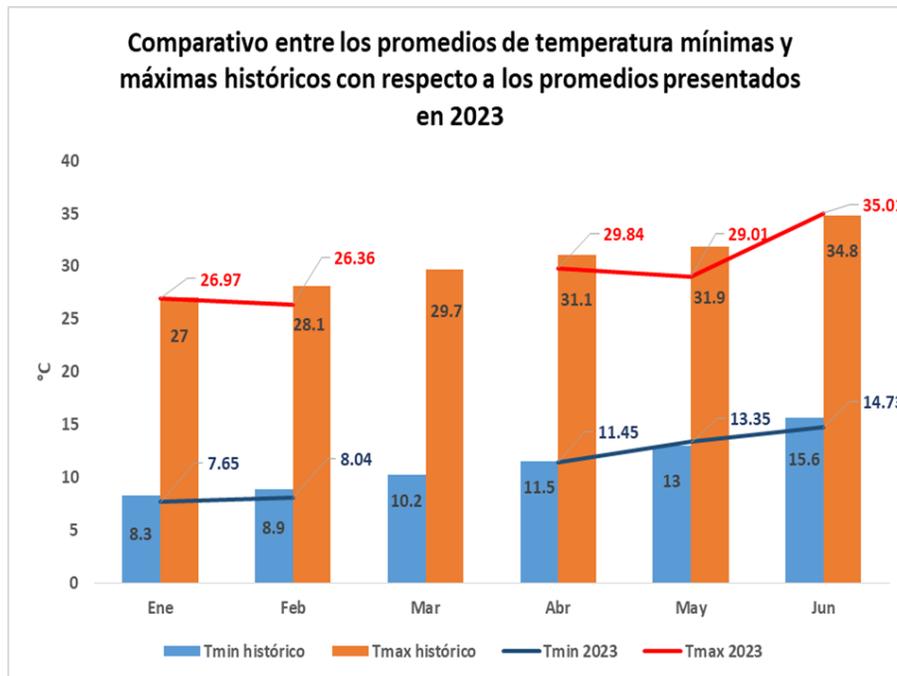


Figura 25: Comparativo entre los promedios de temperaturas máximas y mínimas históricas (1981-2017) con respecto a los promedios presentados en 2023. marzo de 2023 sin datos.

4. Glosario

- **ANM.** La Anomalía del Nivel del Mar son las desviaciones de la altura del océano con respecto a una climatología de nivel del mar. Es un producto derivado de altimetría satelital y es proporcionada por el CMEMS.
- **CLO.** La CLO se refiere a la estimación de la concentración de clorofila *a* superficial del océano, determinada por sensores ópticos satelitales.
- **CMEMS.** CMEMS son las siglas en inglés del Copernicus Marine Environmental Monitoring Service de la Unión Europea. Es un servicio que se dedica a proporcionar información del medio marino.
- **EMA.** Una EMA es una Estación Meteorológica Automática que registra de forma automática los parámetros meteorológicos de temperatura del aire, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento/ráfaga, precipitación y radiación neta.
- **NMA.** El nivel del mar absoluto (NMA) es parecido a las ANM pero en este caso la referencia es el geode terrestre. Es un producto derivado de altimetría satelital y es proporcionada por CMEMS.
- **PP.** El paisaje pelágico se puede entender como la composición dinámica de parches o hábitats pelágicos que se reconfiguran en el espacio y el tiempo en función de la hidrología, la turbulencia y la respuesta primaria de los microorganismos fotosintetizadores.
- **Tair.** Temperatura del aire registrada por una estación meteorológica Vantage Pro2 de Davis Instruments.
- **TSM.** El término TSM se refiere a la temperatura superficial del océano. Se basa en la temperatura de la capa delgada superficial hasta una profundidad entre 10–20 μm ., calibrada para hacerla equivalente a la capa superficial del océano.
- **VTO.** Los datos de VTO se refiere a los datos de magnitud y dirección del viento registrados por una EMA.

5. Referencias

Cervantes-Duarte, R. Valdez-Holguin, J. E. y Reyes-Salinas. 2004. Comparación de reflectancia in situ 443/555 y 490/555 con Clorofila a y Materia Suspendida Total en Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Hidrobiológica*, vol.14, No. 1, ISSN 0188-8897. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972004000100002&lng=es&nrm=iso.

Chin, T.M, J. Vazquez-Cuervo, and E.M. Armstrong. 2017. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>.

Garnesson, P. Mangin, A. Fanton d'Andon, O. Demaria, J. and Bretagnon, M. 2019. The CMEMS GlobColour CLOrophyll a product based on satellite observation: multi-sensor merging and flagging strategies. *OS*, 15, 819–830, 2019. <https://doi.org/10.5194/os-15-819-2019>.

Herrera-Cervantes, H. 2019. Sea surface temperature, ocean color and wind forcing patterns in the Bay of La Paz, Gulf of California: Seasonal variability. *Atmósfera* 32(1): 25-38.

IOCCG. 2014. Phytoplankton Functional Types from Space. Pp: 100-120 In: Sathyendranath, S. (ed.), *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, No. 15, IOCCG, Dartmouth, Canada.

Kavanaugh, M.T., Oliver, M J., Chavez, F. P., Letelier, R.M., Muller-Karger, F.E., Doney, S.C. 2016. Seascapes as a new vernacular for ocean monitoring, management and conservation. *ICES Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw086>.

Mears, C.; Lee, T.; Ricciardulli, L.; Wang, X.; Wentz, F., 2022: RSS Cross-Calibrated.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023. Avance de siembras y cosechas. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/.

Torres-Hernández, M. Y., A. Trasviña-Castro, A. R. Rosales-Villa, and A. J. Souza. 2022. Dynamics of the surface circulation of La Paz Bay, Mexico. *Continental Shelf Research* 235 (15): 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104664>.