



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
OCEANOGRÁFICAS**



**“Comparación de regímenes de variabilidad ambiental entre
las localidades de Chome y Las Cruces, Chile central”**

Tavaré Alexandra Alfaro Avalos

Seminario de Título presentado al

DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Para optar al Título de

BIÓLOGA MARINA

Concepción – Chile

2024

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor Guía

Dr. Fabián Tapia Jorquera

Director de Tesis

Ha sido aprobada por la

Siguiente Comisión

Evaluada

Dr. Diego Narváez Rodríguez

Dr. Sergio Navarrete Campos

Jefe de Carrera

Dr. Ariel Valenzuela Saldías

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Juan y Alejandra, por ser el pilar más importante en mi vida. Todo lo que soy es gracias a ustedes, me enseñaron a ser fuerte, esforzada, valiente, perseverante, limpia, inteligente, amable, leal... y a tener un mal carácter. A pesar de todo lo que hemos vivido, su amor y apoyo han sido incondicional, y eso es algo que valoro con todo mi corazón. Gracias por ser mis padres, creer en mí y amarme tanto.

A mi novio y compañero de aventuras, Axel. No sabría expresar lo que significas para mí, me has acompañado, apoyado, creído siempre en mí y me has dado fortaleza y amor. Te agradezco con el alma el ser tú, por escucharme, protegerme, hacerme reír y reír conmigo, por enseñarme y crecer juntos. Has sido fundamental en este proceso, gracias por tu amor incondicional.

A mi abuelo, Mario Hugo, a quien amo y extraño cada día. Gracias por siempre acompañarme y darme fortaleza.

A mis sobrinos, a quienes adoro con el corazón. Gracias por ser un gran motor e inspiración para esforzarme y hacer las cosas bien. Cada uno, a su manera, es increíble y especial, y espero que siempre sigan siendo las personas maravillosas y alegres que son. Me siento profundamente orgullosa de ustedes.

A mi profesor guía, Fabián Tapia, por su increíble conocimiento, paciencia y orientación a lo largo de este procesos. Admiro su pasión, compromiso y dedicación por enseñar. Muchas gracias por la confianza depositada en mí, el tiempo dedicado y la oportunidad de aprender.

A mis compañera de laboratorio, a Celeste por su disposición inagotable para ayudar a todos, su inteligencia, organización, pasión y amabilidad. Gracias por siempre ayudarme, aclarar mis dudas, compartir ideas y reír juntas en el proceso. Y a Kriss, mi amiga y compañera de conversaciones científicas (y no tan científicas). Es una persona increíblemente inteligente, motivada, esforzada y alegre. Gracias por siempre ser mi amiga.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, hermanos y primos (D, B, L) por siempre celebrar conmigo cuando se debía y cuando no, por escucharme y creer en mí. También a mis compañeros del COPAS que siempre han sido amables y me han apoyado, así como a todos los profesores que han sido parte de mi formación y me han ayudado. A cada persona que, de una u otra manera, han estado presentes ya sea con conocimientos, experiencias, risas o una sonrisa siempre. Gracias por hacer de este proceso algo tan significativo y enriquecedor.

Muchas gracias a todos.

INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE TABLAS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS	
Área de estudio.....	16
Metodología por objetivo específico.....	18
RESULTADOS	
Caracterización de las principales componentes de variabilidad.....	21
Evaluación de la importancia relativa de diferentes periodos de variabilidad....	32
Comparación de la variabilidad de temperatura y oxígeno entre localidades.....	33
DISCUSIÓN.....	39
CONCLUSIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	46
MATERIAL SUPLEMENTARIO.....	49

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa de las localidades de estudio en Chile central	17
Fig. 2. Series de tiempo de temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L) para Chome y Las Cruces, acompañadas de histogramas que representan frecuencias relativas.	25
Fig. 3. Climatologías de la temperatura (°C) y del oxígeno disuelto (mg/L) en Chome y Las Cruces.....	26
Fig. 4. Gráficos de contorno con promedios horarios y mensuales de la temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L) para la localidad de Chome y Las Cruces.....	28
Fig. 5. Campos promedio de velocidad (m/s) y estrés del viento (Pa) para el periodo 2014-2023, y diagramas de dispersión de las componentes zonal y meridional del viento para series de tiempo extraídas de la grilla ERA5 para las localidades de Las Cruces y Chome.....	29
Fig. 6. Series de tiempo del stress del viento (Pa) y transporte de Ekman (m ² /s), con las climatologías de cada variable para el stress del viento y el transporte de Ekman en puntos cercanos a las localidades de Chome y Las Cruces.....	31
Fig. 7. Diagramas espectrales obtenidos para las series de tiempo de temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L) para cada localidad de estudio.....	34
Fig. 8. Porcentajes de la densidad espectral total correspondientes a variabilidad sinóptica, diurna, semidiurna y de alta frecuencia en las series de tiempo de temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L) de cada localidad de estudio.....	35
Fig. 9. Razones entre porcentajes de variabilidad total correspondientes a la suma de la variabilidad diurna, semidiurna y de alta frecuencia con la variabilidad sinóptica, y la variabilidad de alta frecuencia con la sinóptica, para las series de tiempo de temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L)	37
Fig. 10. Matrices de correlación de Spearman entre localidades para temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L), calculadas a partir de la contribución relativa de cada banda espectral (sinóptica, diurna, semidiurna y alta frecuencia)	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas, fechas y profundidades de todas las localidades de estudio	17
Tabla 2. Estadígrafos básicos de las series de tiempo de temperatura para cada localidad de estudio	22
Tabla 3. Estadígrafos básicos de las series de tiempo de oxígeno disuelto para cada localidad de estudio	23
Tabla 4. Constituyentes principales de Marea para cada localidad de estudio	32
Tabla 5. Valores de suma de cuadrado entre localidades a partir de diagramas de dispersión para la temperatura y el oxígeno disuelto.....	39

INDICE DE MATERIAL SUPLEMENTARIO

Tabla S1. Comparaciones múltiples post-hoc para la temperatura (°C) entre localidades.....	51
Tabla S2. Comparaciones múltiples post-hoc para el oxígeno disuelto (mg/L) entre localidades.....	51
Fig. S1. Campos promedio de velocidad en primavera-verano y otoño-invierno, y stress del viento en primavera-verano y otoño-invierno para el periodo 2014-2023.....	52
Fig. S2. Diagramas de dispersión de la contribución espectral de las bandas sinóptica, diurna, semidiurna y de alta frecuencia entre pares de las localidades de estudio para la temperatura (°C) y el oxígeno disuelto (mg/L).	53

RESUMEN

Los ecosistemas costeros marinos son altamente dinámicos debido a la interacción de su topografía y geomorfología con diversos procesos físicos, ecológicos y biológicos. La variabilidad ambiental en estos ecosistemas ocurre a diversas escalas temporales, afectando la estructura y funcionamiento de las comunidades costeras. Este estudio compara los regímenes de variabilidad temporal, especialmente en las bandas de frecuencia sinóptica, diurna, semidiurna y de alta frecuencia, en temperatura y oxígeno disuelto en el agua de fondo de las localidades de Chome (36°46'S, 72°12'W) y Las Cruces (33°30'S, 71°37'W) en Chile central. Se utilizaron registros continuos de temperatura y oxígeno disuelto de 2017-2019 para Chome y de 2015-2017 para Las Cruces. Además, para contextualizar lo observado en estas localidades, se analizaron registros de las mismas variables en localidades cerca de interés: Coliumo y Algarrobo.

Las Cruces destacó como la localidad más cálida y con las mayores concentraciones promedio de oxígeno disuelto. En contraste, Chome y Algarrobo fueron las localidades más frías, presentando una mayor dispersión, particularmente en Chome. La variabilidad estacional fue dominante en las series de tiempo de temperatura y oxígeno disuelto en Chome y Las Cruces, especialmente en Chome, donde los mínimos registros para ambas variables durante primavera-verano se relacionaron con viento sur favorable a surgencia costera, alcanzando niveles de hipoxia en verano.

Descontando la señal estacional, la variabilidad a escala sinóptica fue la principal contribuyente a la variabilidad total en todas las localidades. Sin embargo, las bandas de variabilidad de corto periodo (bandas diurna, semidiurna y alta frecuencia) también tuvieron una contribución importante, especialmente en Las Cruces que presentó las mayores contribuciones de las bandas de corto periodo en temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mg/L), concordando este último con las contribuciones de Chome, pero destacando para Chome la banda de variabilidad de alta frecuencia y para Las Cruces la banda diurna.

Chome y Las Cruces presentaron mayores similitudes en términos de la contribución de bandas de corto periodo, perfiles de variabilidad y valores absolutos de sus contribuciones

en oxígeno disuelto. Sin embargo, Chome también mostró una alta similitud con Algarrobo en la variabilidad de alta frecuencia, perfil de variabilidad y valores absolutos en temperatura. Por el contrario, Coliumo fue la localidad con menor similitud respecto a las demás, destacándose por las menores contribuciones de las bandas de corto periodo y diferencias significativas en los valores absolutos de estas contribuciones.

Estos resultados subrayan la potencial importancia de la variabilidad ambiental de corto periodo en la costa de Chile central e indican que la similitud entre regímenes de variabilidad no depende necesariamente de la proximidad geográfica entre localidades. Factores locales como la topografía costera y patrones de viento, que pueden generar condiciones similares entre localidades distintas y, al mismo tiempo, diferencias marcadas entre localidades cercanas. Por lo tanto, para comprender la dinámica de sistemas costeros y su impacto en las comunidades biológicas, es necesario considerar análisis más detallados de la topografía costera y su interacción con procesos oceanográficos locales y regionales en diferentes escalas temporales.

ABSTRACT

Marine coastal ecosystems are highly dynamic due to the interaction of their topography and geomorphology with various physical, ecological, and biological processes. Environmental variability in these ecosystems occurs at different temporal scales, affecting the structure and functioning of coastal communities. This study compares temporal variability regimes, particularly in the synoptic, diurnal, semi-diurnal, and high-frequency bands, in temperature and dissolved oxygen in the bottom waters of two sites in central Chile: Chome (36°46'S, 72°12'W) and Las Cruces (33°30'S, 71°37'W). Continuous records of temperature and dissolved oxygen were used for Chome (2017–2019) and Las Cruces (2015–2017). To contextualize the observations in these locations, records of the same variables were analyzed for two nearby sites: Coliumo and Algarrobo. Las Cruces was the warmest location, with the highest average oxygen concentrations. In contrast, Chome and Algarrobo were the coldest locations, exhibiting greater variability, particularly in Chome. Seasonal variability dominated the time series of temperature and dissolved oxygen in both Chome and Las Cruces, especially in Chome, where the minimum values of temperature and dissolved oxygen recorded during spring-summer were associated with southerly winds favorable to coastal upwelling, reaching hypoxic levels in summer.

After discounting the seasonal signal, synoptic-scale variability was the main contributor to the total variability across all locations. However, short-period variability bands (diurnal, semi-diurnal, high frequency) also made significant contributions, especially in Las Cruces, which exhibited the highest contributions from short-period bands in both temperature and dissolved oxygen. In the case of dissolved oxygen, these contributions aligned with those of Chome, but Chome stood out in the high-frequency variability band, while Las Cruces was characterized by the diurnal band.

Greater similarities were found between Chome and Las Cruces in terms of the contribution of short-period bands, variability profiles, and absolute values of their contributions in dissolved oxygen. However, Chome also showed high similarity with Algarrobo in high-frequency variability, variability profiles, and absolute temperature

values. Coliumo was the most dissimilar location, standing out for its lower contributions from short-period bands and significant differences in the absolute values of these contributions.

These results underline the potential importance of short-period environmental variability along the central Chilean coast and indicate that similarities between variability regimes do not necessarily depend on the geographical proximity of locations. Local factors, such as coastal topography and wind patterns, which can create similar conditions between distant locations while generating marked differences between nearby ones. Therefore, understanding the dynamics of coastal systems and their impact on biological communities, it is necessary to conduct more detailed analyses of coastal topography and its interaction with local and regional oceanographic processes at different temporal scales.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas costeros marinos se caracterizan por ser sistemas altamente dinámicos, siendo áreas geográficas de gran complejidad y productividad debido a la interacción de diversos procesos físicos, ecológicos y biológicos; su topografía y geomorfología son importantes moduladores de la circulación, lo que a su vez influye en las condiciones hidrográficas y fisicoquímicas de estos ambientes (Hernández 2021).

La estructura, funcionamiento e interacciones de las comunidades costeras responden a patrones de variabilidad ambiental a lo largo del tiempo y espacio (Hernández 2021, Parada *et al.* 2013). Las fluctuaciones ambientales ocurren a diversas escalas temporales, tanto a largo plazo (o baja frecuencia) como patrones estacionales o interanuales (e.g. ENSO), y a corto plazo (alta frecuencia), con cambios en escalas de días, horas e incluso minutos, como cambios en las condiciones de luz y viento, fluctuaciones asociadas a mareas, y variabilidad de alta frecuencia.

Existen diversos ejemplos de aspectos ecológicamente importantes que se ven afectados por variaciones de pequeña escala, como las fluctuaciones de biomasa del fitoplancton con el ciclo de las mareas (Blauw *et al.* 2012), las inyección de nutrientes generada por mareas internas y su incorporación por macroalgas costeras (Ladah *et al.* 2012), la interacción de la variabilidad diurna del viento y la temperatura en aguas costeras con los ciclos de surgencia y relajación (Kaplan *et al.* 2003), con ciclos mareales (Bonicelli *et al.* 2014) y con descargas de agua dulce en la costa (Piñones *et al.* 2005) para determinar patrones de asentamiento en larvas de invertebrados (Vargas *et al.* 2006, Tapia y Navarrete 2010). Se ha establecido que las fluctuaciones de alta frecuencia en temperatura y otras variables asociadas pueden afectar diversos procesos biológicos y ecológicos tanto en costas templadas como en sistemas de arrecife (Pineda 1999, Ladah *et al.* 2005, Leichter *et al.* 2014).

Este estudio se enfoca en la comparación de regímenes de variabilidad ambiental de dos localidades costeras de Chile central: Caleta Chome en la Región del Biobío y Las Cruces en la Región de Valparaíso. La Caleta Chome se encuentra en la Península de Hualpén, en el extremo norte del Golfo de Arauco, cerca de la cabecera del cañón submarino del río

Biobío. La complejidad en la batimetría costera en esta zona, su interacción con los flujos costeros forzados por el viento y por la marea, y la influencia de las descargas de agua dulce del río Biobío, generan una alta variabilidad temporal y espacial en las condiciones hidrográficas (Latapiat 2023). Esta variabilidad se presenta tanto en superficie como cerca del fondo, donde se ha encontrado que la temperatura y concentraciones de oxígeno son altamente variables en escalas temporales cortas (Latapiat 2023).

Por otro lado, la localidad de Las Cruces ubicada en el extremo norte de la Bahía de Cartagena, aproximadamente a 12 km al norte de la desembocadura y cañón del río Maipo (Piñones *et al.* 2005), y se caracteriza por una menor influencia directa de la surgencia costera (Narváez *et al.* 2004), fluctuaciones de mayor frecuencia asociadas con mareas y con el ciclo día-noche (Tapia y Navarrete 2010, Bonicelli *et al.* 2014), y frentes cálidos de periodicidad semidiurna asociados con mareas internas (Vargas *et al.* 2004).

Pese a su relevancia para numerosos fenómenos biológicos en la costa, la variabilidad ambiental de alta frecuencia no ha sido analizada y comparada entre sistemas costeros como las localidades de Chome y Las Cruces, que pese a su distancia geográfica comparten atributos como estar sometidas a un régimen de surgencia estacional, ubicarse en las cercanías de una desembocadura y cañón submarino, y albergar comunidades característica similares en ambas localidades, con dominancia de macroalgas e invertebrado propios de fondos duros y sitios de alta exposición en Chome (Hernández, 2021), y comunidades submareales dominadas por invertebrados bentónicos, macroalgas y peces de roca en las Cruces (Navarrete *et al.* 2010). Además, en ambas localidades se ha detectado la presencia del cangrejo porcelánido *Allopetrolisthes punctatus* (Guérin, 1835), conocido como “changai”, con una distribución espacial muy localizada entre las costas de Perú y Chile (Retamal 1994), una particular forma de reducir la depredación a través de la formación de agregaciones de cangrejos sobre duros y desprotegidos nunca ocupados por otras especies de porcelánicos, óptimamente expuesto respecto a los movimientos del agua (Viviani *et al.* 2010; Santa Cruz y Retamal 2018) y que aparentemente presenta una alta tolerancia a las condiciones de bajo oxígeno observadas en Caleta Chome (Latapiat, 2023). En este contexto, es pertinente preguntar cuál es el rol de la variabilidad ambiental de alta frecuencia, y en particular la variabilidad en las

concentraciones de temperatura y oxígeno disuelto entre Chome y Las Cruces, localidades geográficamente distantes pero que comparten diversos atributos geomorfológicos, no observadas en sus localidades aledañas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar las escalas de variabilidad en temperatura y oxígeno disuelto en el agua de fondo entre las localidades de Caleta Chome y Las Cruces, y comparar la importancia relativa de las variaciones de alta frecuencia en ambas localidades.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar las principales componentes de la variabilidad ambiental en la localidad de Chome y Las Cruces, específicamente temperatura y oxígeno disuelto a partir de registros continuos disponibles.
2. Evaluar la importancia relativa de las fluctuaciones de alta frecuencia versus la variabilidad sinóptica y estacional en Chome y Las Cruces.
3. Comparar similitudes y diferencias en términos de la variabilidad de alta frecuencia en temperatura y oxígeno disuelto entre Chome, Las Cruces y sus localidades aledañas.

HIPÓTESIS

1. La variabilidad de alta frecuencia en temperatura y oxígeno disuelto en Chome y Las Cruces es comparable a la variabilidad sinóptica en términos de aporte a la variabilidad total.
2. Existe una mayor similitud entre Chome y Las Cruces en términos de la variabilidad de alta frecuencia en temperatura y oxígeno que con sus localidades aledañas (Coliumo y Algarrobo, respectivamente).

METODOLOGÍA

Área de Estudio

Los registros de temperatura y oxígeno disuelto se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en dos localidades de Chile central, Las Cruces en la región de Valparaíso y Caleta Chome en la Región del Biobío, con una distancia aproximada entre localidades de 500km (Figura 1). Adicionalmente, se incluyeron registros de las mismas variables para las localidades de Algarrobo y Coliumo, cercanas a Las Cruces y Chome, respectivamente. Los registros de Chome y Coliumo fueron obtenidos en el marco del proyecto FONDECYT 1161512 (F. Tapia, Investigador Responsable) de la Universidad de Concepción. Los datos de Las Cruces y Algarrobo provienen de mediciones desarrolladas en el marco de la colaboración entre el centro COPAS Coastal de la Universidad de Concepción y el Núcleo Milenio NUTME y el Instituto Milenio SECOS, ambos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En cada sitio, los registros continuos de temperatura y oxígeno disuelto fueron obtenidos mediante sensores miniDOT (PME, USA), con una resolución temporal de 10 minutos y las fechas de muestreo que se indican en la Tabla 1. Las profundidades de instalación de los sensores variaron entre 10 y 30 m (Tabla 1).

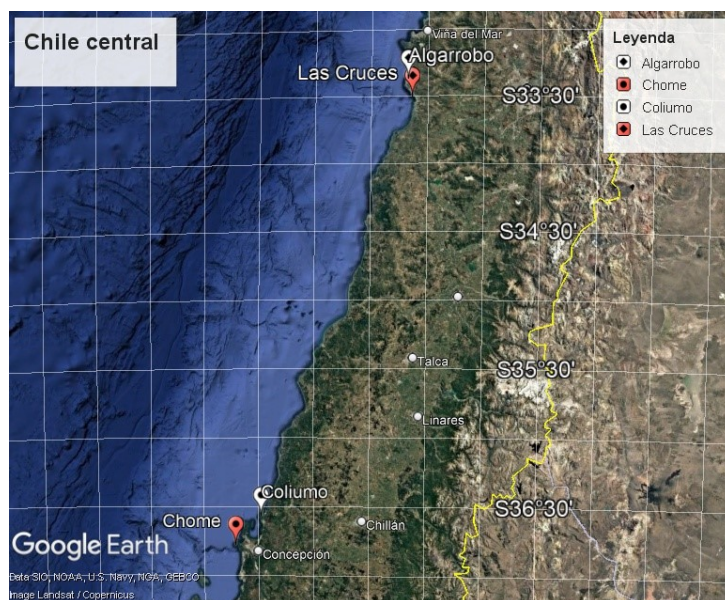


Figura 1. Mapa de las localidades de estudio en Chile Central. Fuente: Google Earth.

Tabla 1. Coordenadas, fechas y profundidades de todas las localidades de estudio.

Sitio	Coordenadas		Fechas		Profundidad (m)
	Latitud S	Longitud W	Inicio	Fin	
Algarrobo	33°21'	71°41'	22-12-2021	22-03-2023	30
Las Cruces	33°30'	71°38'	22-10-2015	20-03-2017	30
Coliumo	36°31'	73°12'	28-03-2017	20-02-2019	10
Chome	36°46'	72°56'	24-03-2017	17-09-2019	27

Estos datos fueron procesados y analizados en MATLAB, inicialmente por medio de estadística descriptiva básica para caracterizar los sitios en términos de los valores medios y rangos de variabilidad para temperatura y oxígeno disuelto, tanto por mes del año como por hora del día.

Metodología por objetivo específico (OE)

OE1. Caracterización de las principales componentes de variabilidad ambiental

Para caracterizar los principales componentes de la variabilidad en temperatura y oxígeno disuelto en cada localidad, inicialmente se generaron gráficos descriptivos como histogramas, diagramas de caja (boxplot) y climatologías diarias, mensuales y estacionales, que permitieron evaluar la variabilidad temporal para cada sitio y variable. Además, se realizó un análisis de varianza de la temperatura y oxígeno disuelto en todas las localidades de estudio, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Para evaluar los supuestos de normalidad se aplicó la prueba de *Kolmogórov-Smirnov* (Kolmogorov y Smirnov, 1933) con corrección de *Lilliefors* (Lilliefors, 1967), y la homocedasticidad se evaluó mediante la prueba de *Levene* (Levene, 1960). Los resultados permitieron rechazar la normalidad de los datos e indicaron diferencias significativas de varianza entre localidades.

Dado que los datos no cumplen con los supuestos de normalidad ni homogeneidad de varianzas ($p < 0.001$), se aplicó la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* (Kruskal y Wallis 1952) para comparar la distribución de temperatura y oxígeno disuelto entre localidades. Para identificar que localidades presentan diferencias significativas entre sí, se realizó una prueba post-hoc de comparaciones múltiples mediante la prueba de *Dunn* (Dunn 1964) con corrección de *Bonferroni* (Bonferroni, 1936), la cual permite evaluar diferencias entre grupos cuando los datos no cumplen con los supuestos paramétricos requeridos en un ANOVA convencional. Los resultados se presentan como diferencias de rangos entre localidades, intervalos de confianza al 95% y valores de p ajustado, que indican si las diferencias entre pares de localidades son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Adicionalmente, para contextualizar los patrones de variabilidad observados, se llevó a cabo un análisis de los dos principales forzantes que pueden influir en estos patrones en las series de tiempo: el viento y la marea. Para el análisis de viento, se utilizó información de campos de velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del mar, descargados del reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service), con una resolución temporal y espacial de

1 hora y 25 km (0.25°), respectivamente, para la región comprendida entre 32.5°S a 39°S y 71.25°W a 76°W, abarcando todas las localidades de estudio en un período de 10 años (2014-2023). Se generaron mapas promedio de velocidad y estrés del viento, además de mapas estacionales para analizar variaciones entre primavera-verano y otoño-invierno, con el fin identificar patrones espaciales y temporales del forzamiento atmosférico y su conexión con los patrones de variabilidad detectados en cada sitio de estudio. Posteriormente, a partir de datos topográficos y de la grilla ERA5, se seleccionaron los nodos más cercanos a cada localidad de estudio, ubicados en las latitudes 36.75°S para Chome y 33.5°S para Las Cruces. En cada nodo se analizaron las componentes dominantes del viento paralelo a la costa, evaluando cómo estos patrones afectan la dinámica costera local. Además, se estimó el transporte de Ekman, definido como el transporte perpendicular a la costa de aguas superficiales inducido por el viento dirigido hacia el ecuador. Estos análisis se complementaron con gráficos descriptivos tanto del stress del viento como el transporte del Ekman paralelo a la costa mediante series temporales horarias y promedios mensuales.

En el análisis de mareas, para Chome y Coliumo se obtuvieron datos mediante sensores de presión HOB0 Water Level Data Logger (Onset Computer Corp., USA). Para Las Cruces y Algarrobo se obtuvieron los datos mediante sensores ADCP (Teledyne Workhorse Sentinel 600 kHz, USA) anclados de 2008-2009 con intervalos de 1 minuto para Las Cruces y de 2021-2022 con intervalos cada 15 minutos para Algarrobo. Las series de tiempo de profundidad se calcularon con resolución horaria y se analizaron mediante un análisis armónico utilizando la función *t-tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002), con la que se determinaron las amplitudes y fases de las principales constituyentes mareales. Esto permitió caracterizar las diferencias entre componentes de distintas frecuencias dominantes, así como los rangos de marea en cada localidad.

OE2. Evaluación de la importancia relativa de diferentes periodos de variabilidad

Para identificar y comparar las frecuencias dominantes de temperatura y oxígeno disuelto en las localidades estudiadas, se realizó un análisis espectral de las series temporales horarias utilizando el método de Welch (Stoica y Moses 1997). Previamente, a cada serie de tiempo se le removió la tendencia lineal y se rellenaron las brechas de hasta 24 horas utilizando interpolación lineal.

La densidad espectral de potencia (Power Spectral Density, PSD) obtenida en el análisis permitió observar la distribución de la variabilidad total de una serie de tiempo entre las distintas frecuencias, expresadas en ciclos por día (cpd). Los parámetros utilizados para el cálculo de los espectros incluyeron una frecuencia de muestreo de 24 cpd, una frecuencia de Nyquist de 12 cpd, ventanas ajustadas a segunda potencia del logaritmo en base 2 de $N/4$, siendo N la longitud de las series de tiempo y con una superposición del 50% entre ventanas contiguas.

A partir de los espectros se calcularon las fracciones de variabilidad total para las bandas sinóptica (0.05-0.5 cpd), diurna (0.8-1.2 cpd), semidiurna (1.8-2.2 cpd) y de alta frecuencia (>2.2 cpd); estas fracciones se expresaron como la contribución relativa de la densidad espectral total TSD. Esta aproximación se basó en el análisis de variabilidad en temperatura costera detallado por Ladah y Tapia (2021).

OE3. Comparación de la variabilidad de temperatura y oxígeno disuelto entre localidades

Para comparar la variabilidad de la temperatura y el oxígeno disuelto, se analizó tanto la variabilidad dentro (intra-localidad) como entre (inter-localidad) las localidades de estudio. Este análisis permitió identificar las diferencias y similitudes de la variabilidad temporal de estas variables en cada sitio, así como su relación entre localidades.

La variabilidad intra-localidad se evaluó mediante los resultados de los análisis espectrales que permitieron determinar, para cada localidad, la importancia relativa de las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia en relación con la banda sinóptica. Se calculó la

razón entre la suma de los porcentajes de densidad espectral total correspondientes a las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia y el porcentaje de variabilidad explicado por la escala sinóptica ($diurna + semidiurna + alta\ frecuencia / sinóptica$). Se calculó además la razón entre la banda de alta frecuencia y la sinóptica ($alta\ frecuencia / sinóptica$).

Para analizar la variabilidad inter-localidad y evaluar la similitud de los aportes relativos de cada banda espectral entre localidades, se realizó una correlación de las contribuciones espectrales (sinóptica, diurna, semidiurna y alta frecuencia) tanto para la temperatura como para el oxígeno disuelto. La normalidad de las contribuciones se evaluó visualmente mediante histogramas y gráficos QQ-plot, y cuantitativamente mediante la prueba de *Lilliefors* (Lilliefors, 1967). Dado que las distribuciones mostraron asimetría y las pruebas de normalidad tienen baja potencia con el número reducido de observaciones ($n=4$ bandas por localidad), se realizó la correlación de *Spearman* (Spearman, 1904), apropiada para datos no paramétricos. Además, como control de robustez de los valores de significancia, se aplicó una prueba de permutación (*permutation test*, Fisher, 1935; Pitman, 1937) para así evitar depender de supuestos de normalidad o tamaño de muestra. Los resultados se representaron en matrices de correlación globales mediante mapas de color (heatmaps).

Finalmente, para cuantificar la disimilitud entre localidades en términos absolutos, se generaron diagramas de dispersión comparando las contribuciones espectrales entre pares de localidades, generando 6 combinaciones posibles para las cuatro localidades de estudio. En cada diagrama de dispersión se calculó la desviación de los puntos con respecto a la línea 1:1 (i.e. pendiente=1) que se obtendría si los valores obtenidos para dos sitios fuesen idénticos entre sí. Se calculó la suma de cuadrados de las desviaciones de los puntos respecto a esta línea, lo que proporcionó una medida de la disimilitud absoluta entre las contribuciones espectrales de las localidades. En ambos casos, se trabajó con datos transformados mediante logaritmo de base 10.

RESULTADOS

Caracterización de las principales componentes de variabilidad

A partir del cálculo de estadígrafos básicos de las series de tiempo, se observó que las temperaturas promedio son mayores en Las Cruces (12.8°C) que en Chome (11.7°C) y sus localidades cercanas. En términos de dispersión, el rango de temperaturas (máximo-mínimo) es más amplio en Las Cruces (11.1 - 17.8°C) y Chome (9.6 - 14.9°C), que en sus localidades cercanas. Cabe destacar que Chome registró tanto los valores máximos como mínimos más bajos de todas las localidades. La variabilidad relativa, evaluada mediante el coeficiente de variación (desviación estándar/promedio) mostró condiciones similares para todas las localidades variando entre 0.05 y 0.08 (Tabla 2).

Tabla 2. Estadígrafos básicos de las series de tiempo de temperatura para cada sitio de estudio. Las letras en la última columna indican agrupaciones de localidades según los resultados de la prueba post-hoc. Localidades con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$), mientras que aquellas con letras distintas sí difieren significativamente en sus valores medios ($p < 0.05$).

Sitio	Temperatura (°C)							
	Media	DE	Máximo	Mínimo	CV	P25	P50	P75
Algarrobo	11.84	0.61	14.76	10.45	0.05	11.42	11.72	12.17
Las Cruces	12.83	1.07	17.81	11.06	0.08	12.00	12.60	13.40
Coliumo	12.15	1.01	16.02	11.56	0.08	11.45	12.06	12.70
Chome	11.72	0.86	14.90	9.55	0.07	11.12	11.67	12.34

En cuanto al oxígeno disuelto, Las Cruces presentó las concentraciones promedio más altas (5.9 mg/L), mientras los valores más bajos se observaron en Chome (3.9 mg/L) y Algarrobo (3.3 mg/L). Las concentraciones máximas fueron mayores para Coliumo (15.4 mg/L) y Las Cruces (13.6 mg/L), y las menores para Chome (9.9 mg/L), mientras que las concentraciones mínimas en todas las localidades fueron inferiores a 0.1 mg/L. Al comparar la variabilidad relativa, Las Cruces mostró la mayor estabilidad (CV = 0.4), mientras que las demás localidades presentaron una variabilidad mayor y similar entre 0.7 y 0.8 (Tabla 3).

Tabla 3. Estadígrafos básicos de las series de tiempo de oxígeno disuelto para cada sitio de estudio. Las letras en la última columna indican agrupaciones de localidades según los resultados de la prueba post-hoc. Localidades con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$), mientras que aquellas con letras distintas sí difieren significativamente en sus valores medios ($p < 0.05$).

Sitio	Oxígeno Disuelto (mg/L)							
	Media	DE	Máximo	Mínimo	CV	P25	P50	P75
Algarrobo	3.32	2.72	10.61	0.03	0.82	1.16	2.52	4.66
Las Cruces	5.87	2.57	13.60	0.01	0.44	4.01	5.96	7.80
Coliumo	4.08	2.83	15.40	0.02	0.69	1.14	4.28	6.66
Chome	3.90	2.77	9.91	0.01	0.71	1.28	3.50	6.60

El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas tanto en la temperatura como en el oxígeno disuelto entre localidades ($p < 0.001$ en ambos casos).

La prueba post-hoc evidenció que todas las comparaciones entre pares de localidades difieren significativamente entre sí ($p < 0.001$ para todas las comparaciones). Los resultados indican un patrón claro en los valores promedio de temperatura, siendo Las Cruces la localidad con los valores más altos, seguida por Coliumo, Chome y finalmente Algarrobo, que presentó las temperaturas más bajas (Tabla S1). Para el oxígeno disuelto, Las Cruces nuevamente destacó como la localidad con mayores valores promedio, seguida por Coliumo, Chome y Algarrobo (Tabla S2).

En cuanto a las series de tiempo y distribuciones de frecuencia para ambas variables en Chome y Las Cruces (Fig. 2), la temperatura en Chome mostró un patrón estacional bien definido, con máximos en otoño, una disminución hacia el invierno y primavera, donde se registraron las menores temperaturas, y un aumento en verano (Fig. 2a). Por otro lado, el oxígeno disuelto exhibió mayor variabilidad, con máximos en otoño-invierno, y una marcada disminución en verano, llegando a concentraciones cercanas a 0 mg/L (Fig. 2b). En Las Cruces, la temperatura presentó un patrón estacional menos marcados que en Chome, con mínimos en invierno y máximos en primavera y verano (noviembre y febrero, Fig. 2c). En cuanto al oxígeno disuelto, se observó una alta variabilidad sin un patrón

estacional claro, aunque destacan caídas abruptas durante el invierno y la primavera (Fig. 2d).

Los histogramas adjuntos a cada serie de tiempo reflejaron las distribuciones de frecuencia de temperatura y oxígeno disuelto. En Chome, el 58.84% de los valores de temperatura se encontró entre 11.2°C y 12.8°C, y presentó una distribución multimodal, con diferentes peaks, siendo el principal entre 11.3 - 11.4°C y seguido por un rango entre 12.6°C - 12.7°C que dan cuenta de 5.24% y 4.12%, respectivamente, además, se registró una cola entre 13°C y 15°C (Fig. 2a). El oxígeno disuelto mostró una distribución asimétrica, con un peak principal en concentraciones de 0 - 0.3 mg/L (12.76%) y otro en concentraciones de 7.5 - 7.8 mg/L (4.34%). Además, se observó que el 50.69% de las concentraciones se encuentra por debajo de 3.6 mg/L (Fig. 2b). En las Cruces, la temperatura presentó una distribución bimodal, con dos peaks claros, el principal de 12.4 - 12.6°C (10.53%) y el segundo de 11.6 - 11.8°C (9.48%). El 62.18% de los valores de temperatura entre 11.6°C y 13.6°C, y se observó una cola desde aproximadamente 15°C a 18°C (Fig. 2c). El oxígeno disuelto presentó una distribución simétrica con el 58.47% de las concentraciones entre 3.3°C y 8.1°C, con su peak principal entre 7.5 - 7.8 mg/L (4.35%). Con una cola en concentraciones bajas, que contiene un peak entre 0 - 0.3 mg/L explicando el 2.7% de los datos.

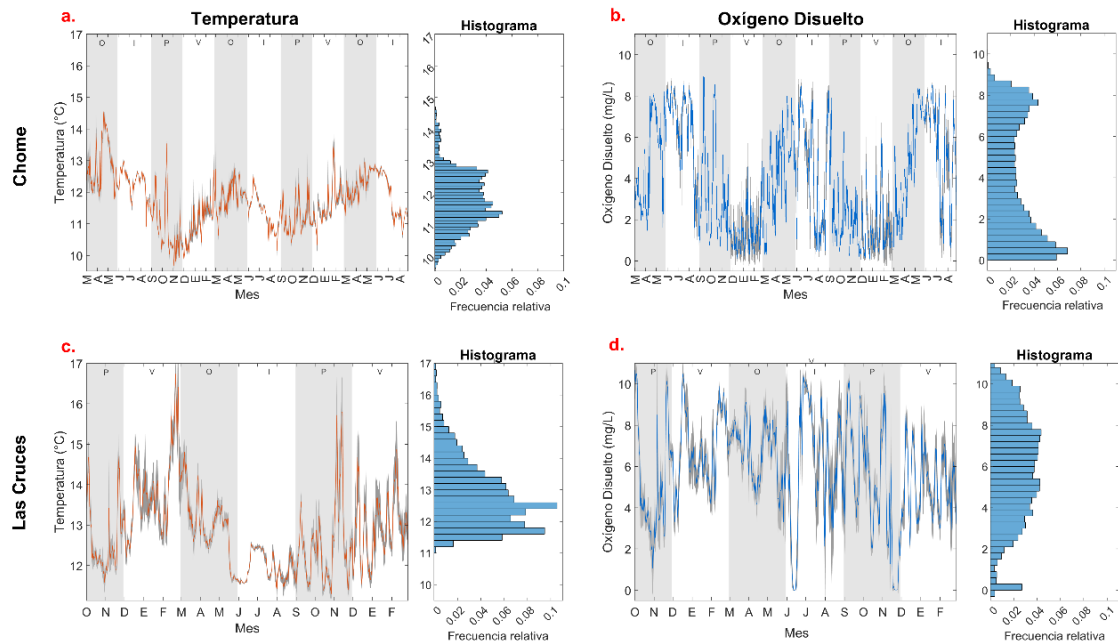


Figura 2. Series de tiempo de temperatura (izquierda, naranja) y oxígeno disuelto (derecha, azul) para Chome (a-b) y Las Cruces (c-d), acompañadas de histogramas que representan frecuencias relativas. Las barras grises en cada climatología señalan las estaciones de otoño y primavera, mientras que las etiquetas en la parte superior identifican las estaciones de otoño (O), invierno (I), primavera (P) y verano (V).

Las climatologías mensuales de la temperatura y oxígeno disuelto para Chome y Las Cruces mostraron claras diferencias en patrones estacionales entre ambas localidades (Fig. 3). En Chome las temperaturas media y mediana más altas ($\sim 12 - 14^{\circ}\text{C}$) se registraron en mayo y junio (otoño), mientras que las más bajas ($\sim 11^{\circ}\text{C}$) se registraron entre octubre y diciembre (primavera) (Fig. 3a). En Las Cruces las temperaturas máximas ($\sim 14 - 15^{\circ}\text{C}$) se alcanzaron en marzo, disminuyendo progresivamente hasta los valores mínimos ($\sim 11 - 12^{\circ}\text{C}$) en junio (Fig. 3c).

El oxígeno disuelto también mostró un patrón estacional en Chome, con concentraciones máximas ($\sim 6 - 8 \text{ mg/L}$) en mayo, junio y julio (otoño-invierno), coincidiendo con las temperaturas más altas. El valor máximo ($\sim 8 \text{ mg/L}$) se registró en julio, seguido por una caída hasta alcanzar valores mínimos cercanos a 0 mg/L en diciembre y enero (verano), este comportamiento es consistente con un sistema de surgencia costera, donde durante el

periodo de primavera-verano afloran aguas frías y pobre en oxígeno. Durante los meses de transición, como agosto y septiembre, se observa una mayor dispersión de los valores (Fig. 3b). En Las Cruces, las concentraciones de oxígeno disuelto en la mayoría de los meses permanecieron entre 5 - 8 mg/L, lo que no refleja un patrón estacional claro para esta localidad. Los valores mínimos (~ 4 mg/L) se registraron en noviembre, mientras que las máximas ($\sim 8 - 10$ mg/L) se alcanzaron en julio, mes con una marcada dispersión hacia concentraciones bajas (~ 2 mg/L) (Fig. 3d).

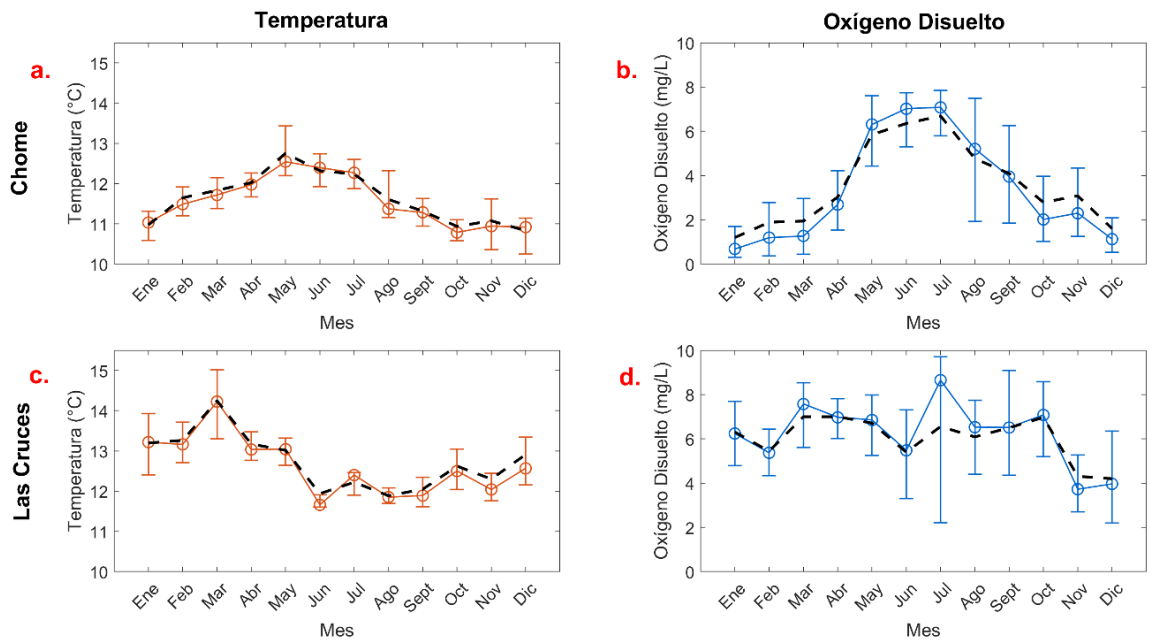


Figura 3. Climatologías de la temperatura (izquierda) y del oxígeno disuelto (derecha) en Chome (paneles superiores) y Las Cruces (paneles inferiores). Los símbolos representan la mediana y las barras de error muestran el rango entre los percentiles 25 y 75 de cada conjunto de observaciones. La línea negra discontinua representa el promedio de cada variable y mes.

Al examinar en forma conjunta la variabilidad estacional y diurna de la temperatura y oxígeno disuelto, se observaron claras diferencias en los patrones de variabilidad entre Chome y Las Cruces (Fig. 4). En Chome las variaciones diurnas de la temperatura son poco pronunciadas, y la variabilidad térmica está dominada por el ciclo estacional. Los meses más cálidos ($\sim 12 - 13^{\circ}\text{C}$) son de mayo a julio, siendo mayo el mes más cálido,

mientras que las menores temperaturas ($\sim 10 - 11^{\circ}\text{C}$) se registraron en primavera, entre octubre y diciembre (Fig. 4a). La variabilidad del oxígeno disuelto en Chome también está dominada por un patrón estacional, con condiciones de hipoxia ($< 2 \text{ mg/L}$) en verano (diciembre - febrero), eventos de hipoxia nocturnos (18:00 a 06:00) durante marzo, y un aumento de los niveles de oxígeno en invierno ($\sim 5.6 \text{ mg/L}$) (Fig. 4b). Los meses con mayor temperatura presentan mayor concentración de oxígeno, con un desfase entre los máximos de temperatura en mayo y oxígeno disuelto en julio.

En Las Cruces, aunque las variaciones diurnas son más perceptibles que en Chome, la variabilidad estacional sigue siendo dominante (Fig. 4c-d). Las temperaturas mínimas ($\sim 11 - 12^{\circ}\text{C}$) se registran en invierno, mientras que las máximas ($\sim 14 - 15^{\circ}\text{C}$) aparecen a fines de verano, con marzo como el mes más cálido y con sus mayores temperaturas entre las 12:00 y 16:00 hora local (Fig. 4c). El oxígeno disuelto presenta mayores niveles de variabilidad diurna, sobre todo entre marzo y septiembre (otoño-invierno), y un ciclo diurno casi imperceptible entre octubre y diciembre, periodo en el cual se observan las concentraciones más bajas ($\sim 2 - 4 \text{ mg/L}$). No se detectaron niveles de hipoxia ($< 2 \text{ mg/L}$) en Las Cruces, pero en verano se observan bajas concentraciones desde la noche hasta el mediodía. En invierno las concentraciones disminuyen entre la tarde y la madrugada (16:00 - 04:00), mientras que en primavera se registran valores bajo durante la noche y la madrugada, con incrementos notables entre las 10:00 y 12:00 hasta valores de $\sim 6.8 \text{ mg/L}$. Las máximas concentraciones ($\sim 8 \text{ mg/L}$) se observan de marzo a mayo, principalmente entre las 10:00 y 18:00 hora local.

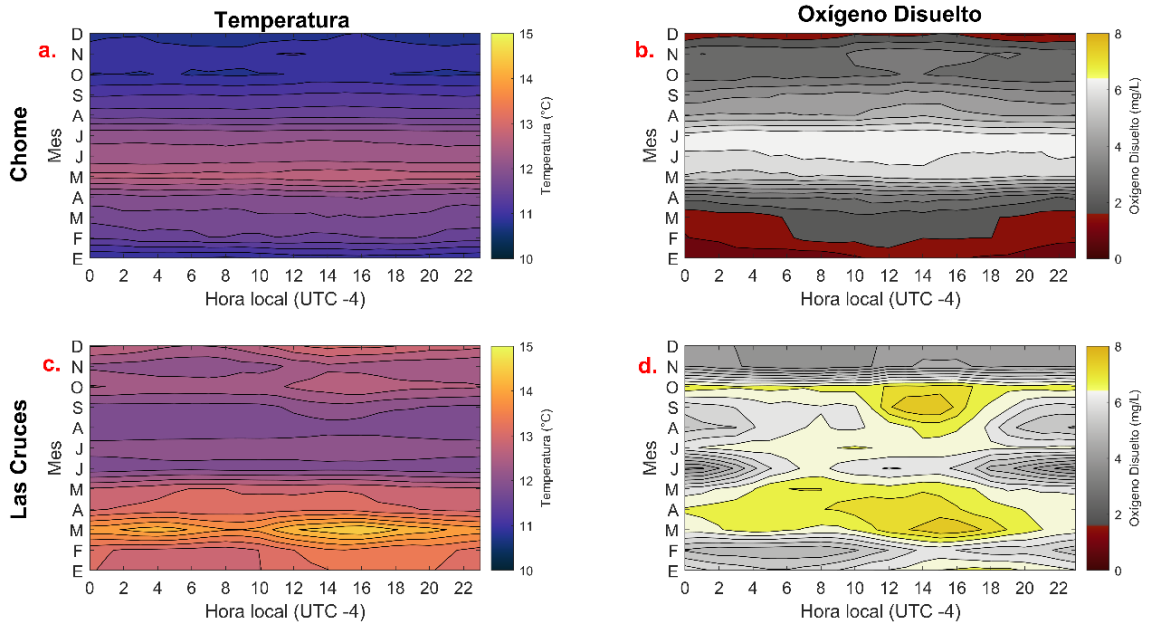


Figura 4. Gráficos de contorno con promedios horarios y mensuales de la temperatura (izquierda) y oxígeno disuelto (derecha) para la localidad de Chome y Las Cruces. Los tonos amarillos y rojos en los paneles de la derecha indican condiciones de sobresaturación e hipoxia, respectivamente.

El análisis de las componentes de viento con datos entre 2014 y 2023, mostró que la velocidad promedio del viento en la costa de Chile central aumenta hacia el norte desde aproximadamente los 37°S, con valores de 2-4 m/s en el sur, incrementando a 5 - 7 m/s hacia el norte (Fig. 5a). El stress promedio del viento en la región muestra valores similares sin grandes gradientes (0.05 - 0.1 Pa), aunque se observa un ligero aumento hacia el norte (Fig. 5b). Tanto la velocidad como el estrés del viento presentan una leve disminución cerca de la costa.

Los gráficos de dispersión de las componentes meridional (norte-sur) y zonal (este-oeste) de series de tiempo extraídas para los nodos de la grilla ERA5 más cercanos a Las Cruces y Chome mostraron leves diferencias en la orientación dominante del viento (Fig. 5c-d). En ambas localidades, el eje dominante del viento se orienta en forma paralela a la costa, con una dirección noreste que varía entre 13° y 18° al este del norte geográfico para Las

Cruces y Chome, respectivamente (Fig. 5c-d). El porcentaje de variabilidad total del viento explicada por el eje dominante varió entre 83% en Las Cruces y 86% en Chome.

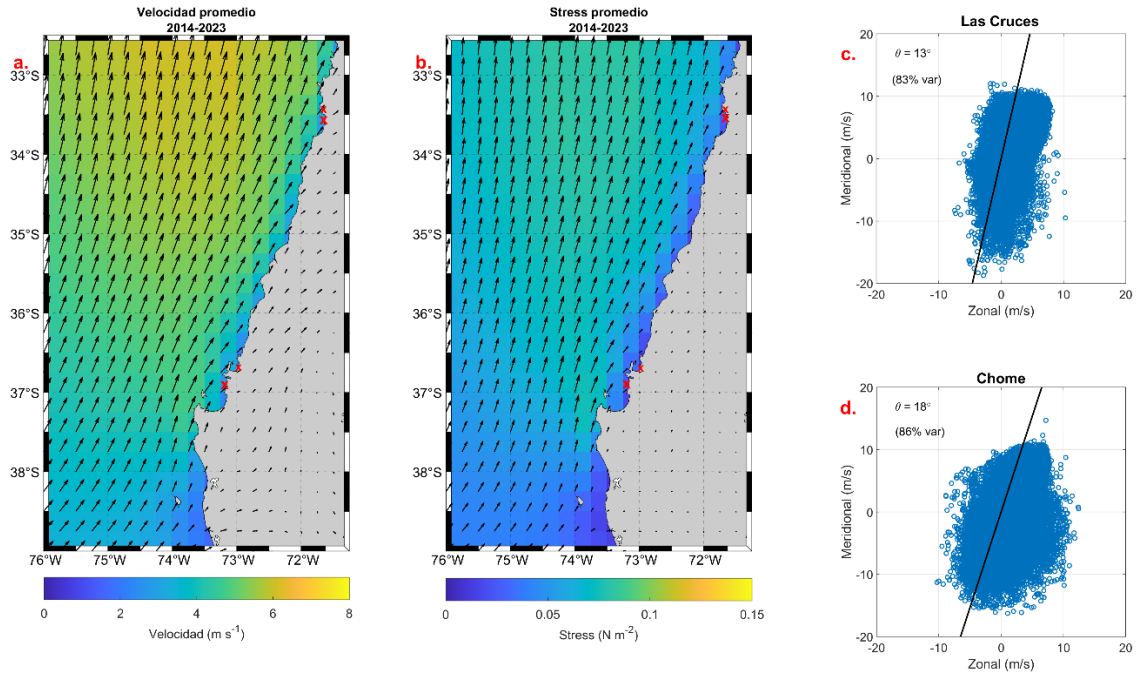


Figura 5. Campos promedio de (a) velocidad y (b) estrés del viento para el periodo 2014-2023, y diagramas de dispersión de las componentes zonal y meridional del viento para series de tiempo extraídas de la grilla ERA5 para las localidades de (c) Las Cruces y (d) Chome. Las cruces rojas indican las ubicaciones de las localidades de estudio.

Los datos estacionales mostraron que la velocidad del viento fue mayor en primavera-verano (6 - 8 m/s) que en otoño-invierno (2 - 4 m/s), con una disminución hacia el sur y la costa (Fig. S1). El stress promedio del viento sigue un patrón similar, aunque con menor intensidad, en primavera-verano, el estrés del viento aumenta (~ 0.05 Pa) desde los 38°S (cerca del Golfo de Arauco, al sur de Punta Lavapié) hacia el norte ($\sim 0.1 - 0.15$ Pa) (Fig. 11c Anexo). En otoño-invierno, las concentraciones son más uniformes, aunque también se observó una disminución del stress hacia la costa en ambas estaciones (Fig. S2).

A partir de los análisis de velocidad del viento en los nodos más cercanos a Chome y Las Cruces, se examinaron las series de tiempo (2014 - 2023) y climatologías mensuales del stress del viento y el transporte de Ekman (Fig. 6). Las series de tiempo mostraron un patrón similar para ambas localidades, con valores predominantemente positivos en

primavera-verano y con peaks negativos pronunciados para el stress del viento, acompañado de peaks positivos en el transporte de Ekman en otoño-invierno (Fig. 6a-b).

Las climatologías mensuales mostraron patrones estacionales más marcados y con mayor intensidad en Chome en comparación con Las Cruces. En ambas localidades se observaron valores mayormente positivos para el stress del viento y negativos para el transporte de Ekman, con un comportamiento inverso entre ambas variables. En Chome el stress del viento alcanzó valores positivos (viento sur) entre $\sim 0.04 - 0.06$ Pa desde septiembre a abril (primavera-verano), siendo enero (0.057 Pa) el mes con mayor stress asociada a viento sur. Estos valores coincidieron con un transporte negativo (transporte hacia el océano, i.e. upwelling) entre -0.4 y -0.7 m^2/s . Durante mayo y agosto (otoño-invierno), se registraron valores negativos (viento norte) de menor intensidad (~ 0.02 Pa), asociado a un transporte positivo (transporte hacia la costa, i.e. downwelling) (Fig. 6b-d).

Las Cruces presento un comportamiento similar que Chome, pero con la ausencia de valores negativos en el stress y valores positivos en el transporte, lo que indica una menor intensidad de la influencia de viento norte y un menor transporte favorable a hundimiento. Sin embargo, se observaron los menores valores de stress del viento (~ 0.005 Pa) y el mayor transporte en junio (-0.1 m^2/s). Por otro lado, los valores más altos (~ 0.04 Pa) y mayor transporte favorable a surgencia (-0.4 a -0.5 m^2/s) en primavera, con una leve disminución y manteniéndose entre 0.02 y 0.03 Pa hasta otoño (Fig. 6b-d).

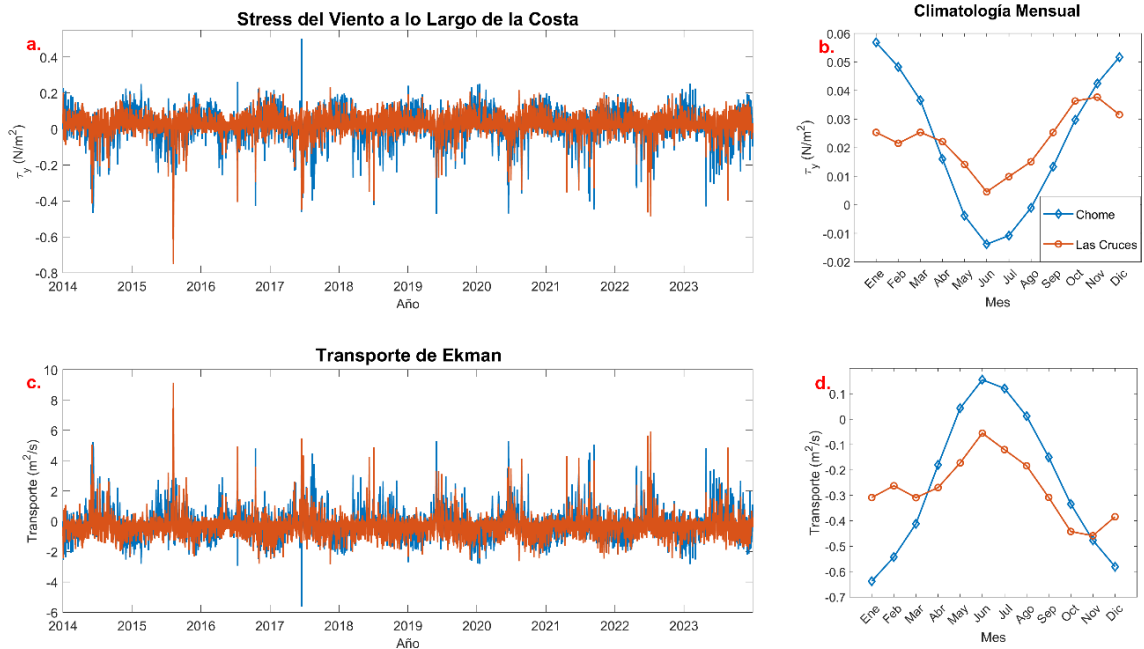


Figura 6. Series de tiempo del stress del viento (a) y transporte de Ekman (b), con las climatologías de cada variable para (c) el stress del viento y (d) el transporte de Ekman en puntos cercanos a las localidades de Chome (azul) y Las Cruces (naranja).

Finalmente, se identificaron los seis principales constituyentes mareales para todas las localidades de estudio (Tabla 4). Cada constituyente corresponde a un ciclo astronómico particular (diurno o semidiurno) y aporta con cierta amplitud (metros), que refleja cuánto contribuye a la oscilación del nivel del mar. Así, los constituyentes de mayor amplitud generan las principales variaciones mareales, mientras que los de menor amplitud solo producen oscilaciones secundarias.

Se observó que los mismos constituyentes mareales fueron significativos tanto para Chome como para Coliumo, aunque con mayores amplitudes en Chome. Por otro lado, en Las Cruces y Algarrobo, solo se diferenciaron en el constituyente mareal MU2 (Semidiurno lunar menor, 12.9h), mientras que en Chome y Coliumo fue P1 (Diurno solar, 24.1h).

En todas las localidades, el principal constituyente fue M2 (Semidiurno lunar principal), con una periodicidad de 12.4 horas, presentando una amplitud similar entre localidades, pero destacándose Chome con la mayor amplitud (0.45 m). El segundo constituyente con mayor amplitud fue S2 (Semidiurno solar, 12.0 h) en Chome y Coliumo, mientras que en Las Cruces y Algarrobo fue K1 (Diurno lunar-solar, 23.9 h). Los siguientes constituyentes significativos fueron principalmente diurnos en Chome y Coliumo (23.9, 12.7, 25.8 y 24.1 h) y semidiurnos en Las Cruces y Algarrobo (25.8, 12.0, 12.7 y 12.9 h).

Adicionalmente, al sumar las amplitudes de los seis constituyentes principales se observaron valores similares entre localidades (~0.98-1.02 m), en las cuales las mayores amplitudes se asociaron nuevamente a Chome. Esto se atribuye a una mayor entrada y salida de agua durante las marejadas, lo que implica una mayor velocidad de las mareas para esta localidad. Sin embargo, Algarrobo y Las Cruces mostraron un mayor porcentaje de variabilidad explicada por la marea en el nivel del mar, alcanzando un 98%, en contraste con Chome y Coliumo que presentaron un porcentaje de 87%, lo que sugiere que existen otros factores que contribuyen a la variabilidad en el nivel del mar para estas últimas localidades.

Tabla 4. Constituyentes principales de Marea para cada localidad de estudio. Indicado bajo el nombre de la localidad el porcentaje de variabilidad explicada por las mareas para el nivel del mar.

Componente+A1:E26s principales de Marea

Localidad	Marea	Periodo (h)	Amplitud (m)
Algarrobo 98.1%	*M2	12.4	0.4143
	*K1	23.9	0.2045
	*S2	12.0	0.1107
	*O1	25.8	0.1096
	*N2	12.7	0.1029
	*MU2	12.9	0.031
Las Cruces	*M2	12.4	0.4166

98.2%	*K1	23.9	0.1989
	*O1	25.8	0.1167
	*S2	12.0	0.1105
	*N2	12.7	0.1074
	*MU2	12.9	0.0341
Coliumo 87.2%	*M2	12.4	0.4435
	*S2	12.0	0.1554
	*K1	23.9	0.1463
	*N2	12.7	0.1009
	*O1	25.8	0.0857
	*P1	24.1	0.053
Chome 87.2%	*M2	12.4	0.4516
	*S2	12.0	0.1658
	*K1	23.9	0.154
	*N2	12.7	0.1022
	*O1	25.8	0.1
	*P1	24.1	0.0494

Evaluación de la importancia relativa de diferentes periodos de variabilidad

A partir de los diagramas espectrales obtenidos del análisis de las series de tiempo de temperatura y oxígeno disuelto, se observó que para Chome existen 3 peaks significativos para la temperatura, con frecuencias de 0.99 cpd (24.2 h), 1.28 cpd (18.8 h) y 1.93 cpd (12.4 h) (Fig. 7d). Para el oxígeno disuelto también se identificaron 3 peaks, en periodos de 24.2, 20 y 12.4 horas (Fig. 7h).

En Las Cruces, los espectros tanto de la temperatura como del oxígeno disuelto presentaron peaks diurno (24 h) y semidiurno (12.4 h) (Fig. 7b, 7f). Por otro lado, para Coliumo no se observaron señales diurnas y semidiurnas importantes para la temperatura y el oxígeno disuelto, aunque se observó una mayor dominancia de frecuencias bajas (0.4 cpd), correspondientes a periodos > 2 d (Fig. 7c, 7g). Finalmente, en Algarrobo se observó

un peak significativo en 1.92 cpd (12.5 h) tanto en la temperatura como en el oxígeno disuelto, junto con un peak menos pronunciado en periodos de 24.4 h para la temperatura y de 22.9 h para el oxígeno disuelto (Fig. 7a, 7e).

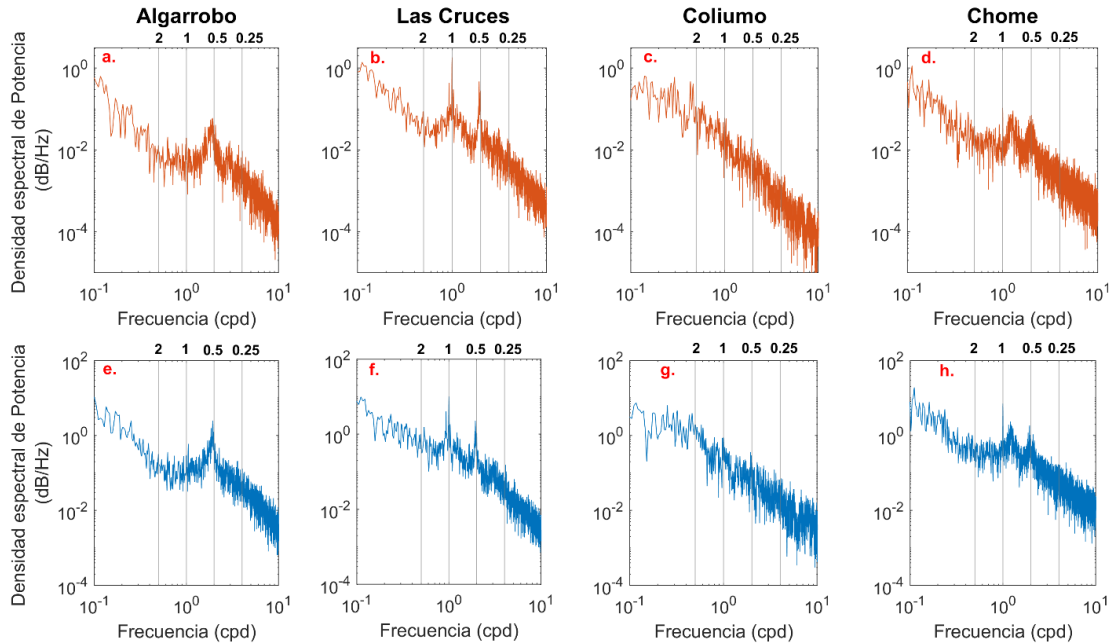


Figura 7. Diagramas espectrales obtenidos para las series de tiempo de temperatura (paneles superiores) y oxígeno disuelto (paneles inferiores) para cada localidad de estudio. Los valores de la parte superior de cada espectro indican periodos en días (líneas grises verticales).

Comparación de la variabilidad de temperatura y oxígeno entre localidades

Al calcular el porcentaje de densidad espectral total correspondiente a las bandas de frecuencia sinóptica (0.05 - 0.5 cpd), diurna (0.8 - 1.2 cpd), semidiurna (1.8 - 2.2 cpd) y de alta frecuencia (>2.2 cpd) para cada variable y localidad, se observó un claro dominio de la variabilidad sinóptica tanto para la temperatura como para el oxígeno disuelto. Coliumo destaca como la localidad con mayor contribución de la banda sinóptica en comparación con las otras bandas, alcanzando un 14.6% en temperatura y un 23.9% en oxígeno disuelto. En contraste, esta localidad también presentó la menor contribución de las bandas de periodos cortos (diurna, semidiurna y alta frecuencia) para la temperatura (1.9%) y el oxígeno (3.8%) (Fig. 8).

También se observó que para el oxígeno disuelto la contribución de todas las bandas aumento notoriamente en comparación con la temperatura, especialmente en Chome, donde el porcentaje de densidad espectral de las bandas de corto periodo es cerca el doble en el oxígeno disuelto (10.8%) que la temperatura (5.6%) (Fig. 8a-b).

Entre las localidades, Las Cruces exhibe el mayor porcentaje de densidad espectral en las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia tanto en temperatura (10.1%) como en oxígeno disuelto (11.2%), siendo dominante la banda diurna con 4.7% en temperatura y 5.6% en oxígeno disuelto. En Chome, la banda de alta frecuencia en oxígeno disuelto alcanza un 5.3%, notablemente mayor que su contribución en temperatura (2.7%) y que su contribución en otras bandas y localidades. En Algarrobo, la variabilidad sinóptica del oxígeno disuelto presenta el menor porcentaje de densidad espectral entre localidades, de solo el 11.9%, mostrando una menor contribución que en la temperatura, comportamiento no visto en las demás localidades. Las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia tienen porcentajes similares tanto en temperatura (6.7%) como en oxígeno disuelto (7%), siendo levemente dominante la banda de alta frecuencia en ambos casos, con un 3.5% para la temperatura y 3.2% para el oxígeno disuelto (Fig. 8a-b).

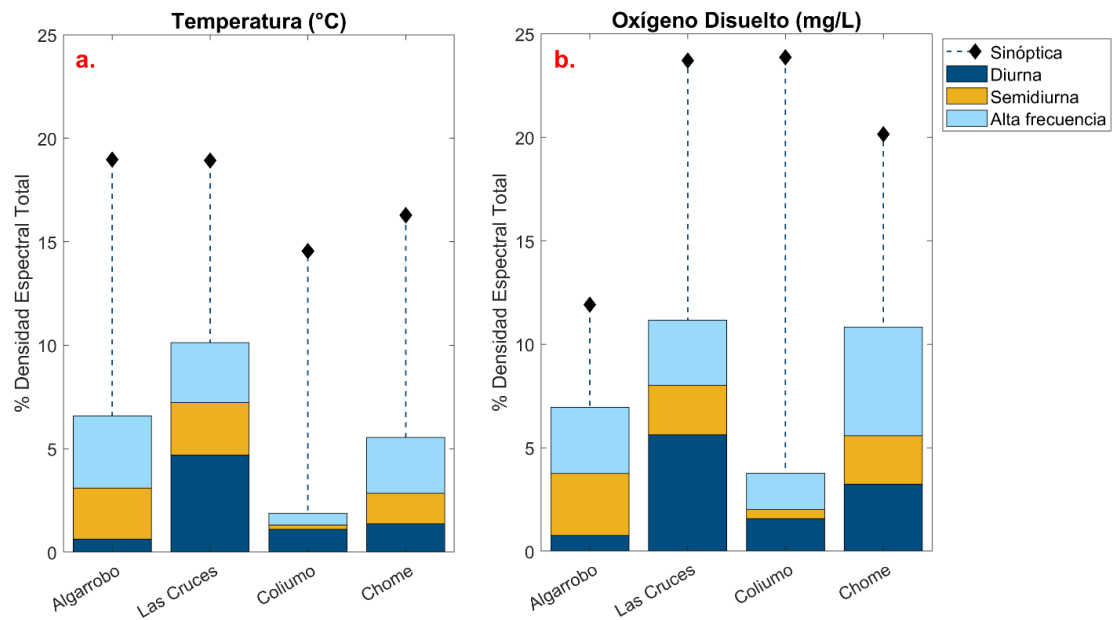


Figura 8. Porcentajes de la densidad espectral total correspondientes a variabilidad sinóptica (rombos negros), diurna (barras azules), semidiurna (barras amarillas) y de alta

frecuencia (barras celestes) en las series de tiempo de a) temperatura y b) oxígeno disuelto de cada localidad de estudio.

A partir del porcentaje de densidad espectral de la temperatura y el oxígeno disuelto para cada banda de frecuencia obtenidos en la figura 8, se comparó la variabilidad explicada por la banda de alta frecuencia con la variabilidad explicada por la banda sinóptica para todas las localidades (Figura 9). La importancia de la banda de alta frecuencia en la temperatura no superó el 20% de la banda sinóptica en ninguna localidad, siendo similar en Algarrobo, Las Cruces y Chome (0.18, 0.15 y 0.17, respectivamente), y considerablemente menor en Coliumo con solo un 0.04 (Figura 9a). El oxígeno disuelto presentó los mayores valores de la variabilidad explicada por la alta frecuencia para Algarrobo y Chome con un 0.27 y 0.26 de la variabilidad sinóptica, respectivamente, siendo cerca del doble que en la temperatura. Los menores valores se encontraron nuevamente en Coliumo con un 0.07 de la variabilidad sinóptica, y Las Cruces presentó una leve disminución en comparación con la temperatura, alcanzando una razón de 0.13 (Fig. 9b).

La variabilidad explicada en conjunto por las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia con la explicada por las fluctuaciones de escala sinóptica, mostró que la mayor variabilidad explicada en temperatura es en Las Cruces alcanzando un 54% de la variabilidad sinóptica, seguido por Algarrobo y Chome con valores similares de 35% y 34%, respectivamente, mientras que Coliumo presentó la menor razón entre las localidades (0.13) (Fig. 9a). Para el oxígeno disuelto, los menores valores también se encuentran en Coliumo (0.16), pero Algarrobo aumentó la importancia relativa de las bandas de periodos cortos alcanzando un 58% de la variabilidad sinóptica, superando a Las Cruces (47%) y Chome (54%) que también aumentó su importancia en estas bandas en comparación con la temperatura (Fig. 9b).

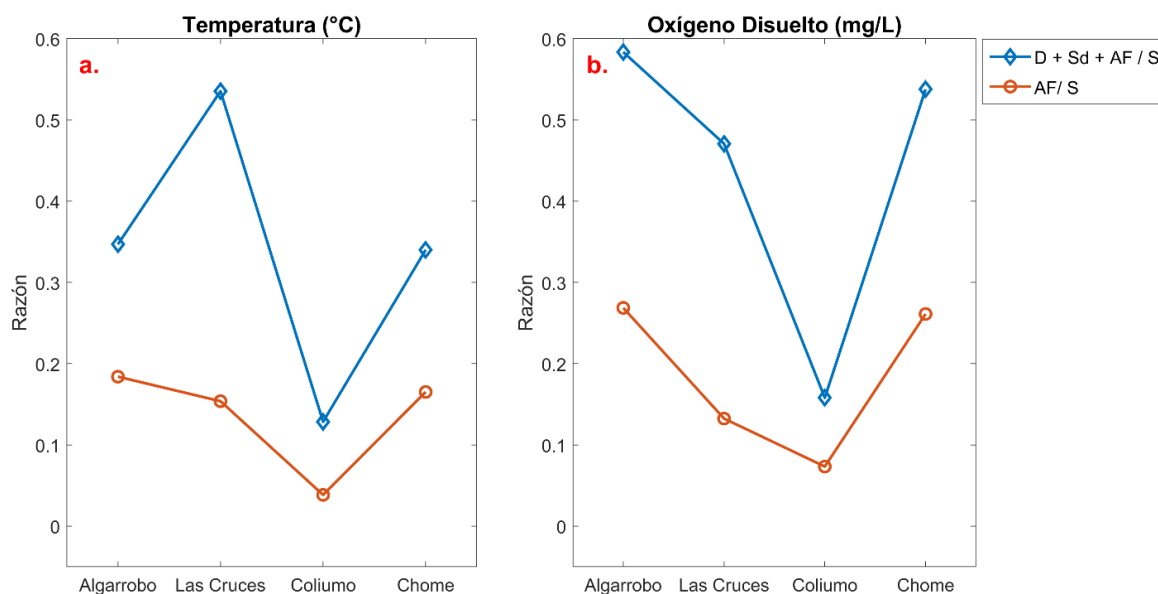


Figura 9. Razones entre porcentajes de variabilidad total correspondientes a la suma de la variabilidad diurna, semidiurna y de alta frecuencia con la variabilidad sinóptica (azul), y la variabilidad de alta frecuencia con la sinóptica (naranja), para las series de tiempo de a) temperatura y b) oxígeno disuelto.

Los análisis de correlación de Spearman entre localidades mostraron patrones contrastantes para la temperatura y oxígeno disuelto (Fig. 10). Para la temperatura se observó una alta correlación entre Algarrobo-Chome y Las Cruces-Coliumo ($\rho = 1$), mientras que el resto de las comparaciones mostraron valores moderados ($\rho = 0.4$). En el caso del oxígeno disuelto, las correlaciones fueron mayores que en temperatura, alcanzando valores de $\rho = 0.8 - 1$ entre Coliumo, Chome y Las Cruces, mientras que Algarrobo presentó correlaciones más bajas con el resto de las localidades ($\rho = 0.4$), siendo la localidad con las mayores diferencias en el orden de contribución relativa de las bandas. Sin embargo, los valores de significancia obtenidos mediante pruebas de permutación fueron $p > 0.05$, por lo que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar correlaciones significativas entre localidades.

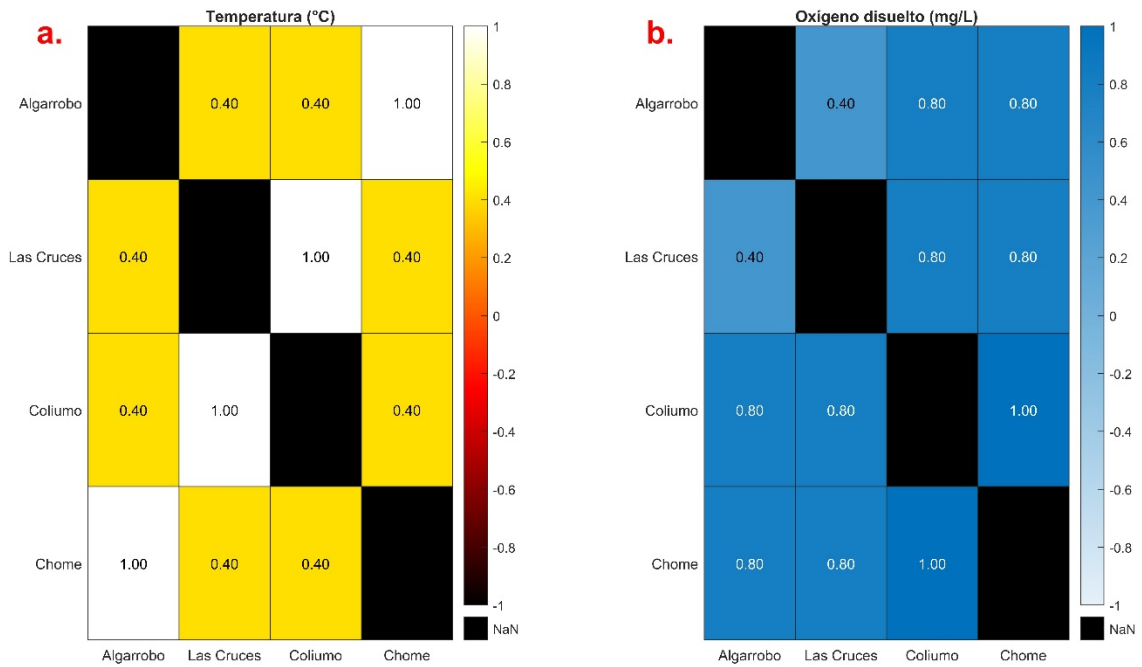


Figura 10. Matrices de correlación de Spearman entre localidades para (a) temperatura y (b) oxígeno disuelto, calculadas a partir de la contribución relativa de cada banda espectral (sinóptica, diurna, semidiurna y alta frecuencia). Los valores indican el coeficiente de correlación (ρ) entre pares de localidades. Las pruebas de significancia (p-value) se presentan en el texto.

Finalmente, la suma de cuadrados obtenidas para evaluar disimilitud entre pares de localidades (Tabla 5) indicaron que, en cuanto a la temperatura, las localidades más similares (i.e. con los menores valores de disimilitud) fueron Chome y Algarrobo (0.17), y Chome y Las Cruces (0.34). En contraste, la localidad de Coliumo fue la que mostró mayores diferencias con todas las otras localidades, con valores entre 1.2 y 2.1 para la suma de desviaciones al cuadrado (Tabla 5). Este patrón se repitió para el oxígeno disuelto, con los mayores valores en las tres comparaciones que incluyen a Coliumo. Los menores valores, y por lo tanto la mayor similitud entre sitios, correspondieron a la comparación entre Chome y Las Cruces (0.11), y entre Chome y Algarrobo (0.51). Por lo tanto, las localidades más similares en cuanto a la variabilidad de temperatura y oxígeno disuelto fueron Chome, Las Cruces y Algarrobo.

Cabe destacar que, aunque Coliumo presenta una alta similitud con las demás localidades en los análisis de correlación, sus valores absolutos difieren considerablemente, con los valores más altos de suma de cuadrados, tanto para la temperatura como en el oxígeno disuelto. Esto indica que, si bien su patrón de variabilidad de las distintas bandas es similar con las otras localidades, los porcentajes de variabilidad total explicados por las cuatro bandas estudiadas son diferentes a las demás localidades.

Tabla 5. Valores de suma de cuadrados entre localidades a partir de diagramas de dispersión para la temperatura (naranja) y el oxígeno disuelto (azul).

	Algarrobo	Las Cruces	Coliumo	Chome
Algarrobo		0.76	1.89	0.17
Las Cruces	0.85		2.13	0.34
Coliumo	0.95	0.91		1.23
Chome	0.51	0.11	0.86	

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron diversos patrones de variabilidad temporal en la temperatura y oxígeno disuelto en el agua de fondo, con diferencias entre las localidades estudiadas en cuanto a las escalas temporales dominantes y la influencia de los principales forzantes físicos.

Los análisis estadísticos permitieron observar diferencias significativas entre localidades tanto en temperatura como oxígeno disuelto (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$), mostrando un patrón espacial consistente entre ambas variables. Las Cruces se destacó por presentar los valores más altos, mientras que Algarrobo y Chome presentaron los valores más bajos, con Coliumo en una posición intermedia. Este patrón sugiere una diferenciación ambiental marcada entre las localidades, que podría estar asociada a factores oceanográficos locales, tales como la intensidad del afloramiento costero, la exposición a masas de agua subsuperficiales o la circulación local.

Las Cruces se caracterizó por ser la localidad más cálida y con las mayores concentraciones promedio de oxígeno disuelto. En contraste, Algarrobo y Chome registraron las menores temperaturas y concentraciones promedio de oxígeno disuelto, con una mayor dispersión de los valores observados en oxígeno disuelto, especialmente en Chome. A pesar de estas diferencias, todas las localidades presentaron concentraciones mínimas cercanas a niveles de anoxia (<0.1 mg/L).

Se observó que Chome tiene un ciclo estacional inverso en oxígeno disuelto, con máximos en otoño-invierno coincidiendo con las mayores temperaturas. Este patrón podría estar relacionado con procesos de mezcla más intensa en invierno y con la influencia del río Biobío, que durante la época de mayor descarga aporta agua más frías y oxigenadas a la costa. En verano, en cambio, la intensificación de la surgencia permite el acceso de aguas subsuperficiales pobres en oxígeno, lo que favorece los eventos de hipoxia costera y explica las concentraciones mínimas registradas.

En términos de variabilidad temporal, tanto Chome como Las Cruces estuvieron dominadas por el ciclo estacional, aunque Las Cruces presentó una mayor influencia del ciclo día-noche, como lo indicó el análisis espectral, que mostró una clara dominancia de

la banda diurna en las fluctuaciones de corto periodo. Esta variabilidad podría estar asociada a la influencia de la bahía de Cartagena, ubicada a 20 km al norte de un fuerte centro de surgencia en Punta Toro (Wieters *et al.* 2003), lo que genera una “sombra de surgencia” que calienta las aguas en Las Cruces y contribuye a fluctuaciones diurnas en la temperatura que abarca la mayor parte de la columna de agua (Kaplan *et al.* 2003; Tapia y Navarrete 2010; Bonicelli *et al.* 2014). En contraste, Chome presentó un patrón estacional más marcado que Las Cruces, donde las mínimas temperaturas y concentraciones de oxígeno disuelto coincidieron con viento sur favorable a surgencia costera durante primavera-verano, evidenciando condiciones de hipoxia en verano. En Chome, esta variabilidad estacional se asoció también con una mayor intensidad de los vientos y valores más altos de stress y transporte de Ekman en comparación con las otras localidades, lo que resalta la mayor intensidad de los procesos costeros asociados con el viento en esta área.

Los constituyentes y amplitudes mareales fueron similares en todas las localidades, asociados principalmente a mareas diurnas y semidiurnas, y destacando a la marea M2 (12.4 h) como la más significativa. Las mayores amplitudes se observaron en Chome, lo que se atribuye a una mayor entrada y salida de agua durante las marejadas, e implica una mayor velocidad de las mareas para esta localidad. Sin embargo, Chome junto con Coliumo, presentaron el menor porcentaje de variabilidad del nivel del mar explicado por las mareas, lo que sugiere que existen otros factores que contribuyen a la variabilidad del nivel del mar y que se podrían atribuir a la dominancia de la variabilidad sinóptica en Coliumo y la variabilidad de alta frecuencia en Chome.

De acuerdo con los análisis espectrales, la variabilidad térmica y de oxígeno disuelto en el agua de fondo tiene un claro dominio de las fluctuaciones a escala sinóptica, siendo hasta 90% más importante que las fluctuaciones de corto periodo en localidades como Coliumo, con una clara dominancia de la banda sinóptica y contribuciones mínimas de las bandas de corto periodo en comparación con las otras localidades de estudio, lo que sugiere una dinámica más influenciada por procesos de mayor escala, como eventos de surgencia costera. En Algarrobo, las contribuciones de las bandas de corto periodo en temperatura y oxígeno disuelto fueron similares, sugiriendo un equilibrio entre los

forzantes locales y regionales, aunque con una menor relevancia de la banda sinóptica en el oxígeno disuelto, un patrón inverso al observado en las otras localidades.

En Las Cruces y Chome, las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia tuvieron una mayor importancia que en las otras localidades. En Las Cruces, estas bandas fueron dominantes tanto en temperatura como en oxígeno disuelto, indicando la influencia de procesos relacionados con el ciclo día-noche, como también se ha reportado en estudios previos (Tapia y Navarrete 2010, Bonicelli *et al.* 2014). Asimismo, investigaciones como las de Narváez *et al.* (2004) y Vargas *et al.* (2004) han documentado fluctuaciones de mayor frecuencia asociadas con mareas internas y frentes cálidos con periodicidad semidiurna. Aunque Narváez *et al.* (2004) documentaron una menor influencia de la surgencia costera en Las Cruces, este estudio mostró que esta localidad presentó una de las mayores contribuciones de la banda sinóptica tanto en temperatura como en oxígeno disuelto.

En Chome, la contribución de todas las bandas es notablemente mayor en el oxígeno disuelto que en la temperatura, llegando a valores similares a Las Cruces, pero siendo dominante la variabilidad de alta frecuencia, lo cual destaca la sensibilidad del oxígeno disuelto a procesos rápidos como mezcla turbulenta y eventos biogeoquímicos transitorios, que concuerda con los reportados en Latapiat (2023), donde se encontró que existe una alta variabilidad temporal y espacial en la columna de agua.

Comparado con los análisis realizados en Latapiat (2023), donde se utilizaron los mismos datos empleados en este estudio para Chome y Coliumo, se observaron diferencias importantes en las razones entre el aporte de la variabilidad de corto periodo y la sinóptica. En el trabajo de Latapiat, Chome se destacó entre las demás localidades por presentar variabilidad de corto periodo que en total fue más importante que la variabilidad sinóptica (razón>1). Estas diferencias pueden atribuirse a los rangos considerados para calcular el aporte de la banda sinóptica a la variabilidad total. Mientras que Latapiat (2023) definió esta banda entre 0.1 y 0.5 cpd (periodos de 10-2 días), en este estudio se utilizó un rango más amplio, entre 0.05 y 0.5 cpd (periodos de 20-2 días), lo que redujo la importancia relativa de las fluctuaciones de corto periodo en Chome y resaltó la dominancia de las

variaciones sinópticas. Este enfoque permitió identificar a Coliumo como la localidad con menor contribución de las bandas de corto periodo y un claro dominio de la banda sinóptica, contrastando con la interpretación previa donde Chome era la localidad más diferenciada. Esta diferencia destaca la importancia de la definición de las bandas espectrales, ya que puede influir significativamente en la interpretación de los patrones de variabilidad y en la comparación entre localidades.

Los análisis de correlación de Spearman entre localidades no mostraron asociaciones estadísticas significativas (test de permutación $p > 0.05$), pero se observaron tendencias distintas entre variables. Para la temperatura destacaron las similitudes entre Algarrobo-Chome y Las Cruces-Coliumo, en oxígeno disuelto las correlaciones más altas se dieron entre Coliumo, Chome y Las Cruces. Esto indica que, aunque no hay evidencia estadística para afirmar correlaciones consistentes, existen afinidades en los perfiles de variabilidad que pueden relacionarse con forzantes físicos y biogeoquímicos comunes entre localidades.

La comparación absoluta mediante suma de cuadrados mostro que Chome fue la localidad que mostró la mayor similitud con las demás localidades, particularmente con Algarrobo en temperatura y con Coliumo en oxígeno disuelto. En contraste, Algarrobo fue la localidad que presentó los menores niveles de similitud con otras localidades, mostrando perfiles de variabilidad similares únicamente con Chome para ambas variables. En términos de los valores absolutos de los aportes de cada banda a la variabilidad total, Coliumo presentó las mayores disimilitudes con las demás localidades. Esto sugiere que, aunque su patrón de variabilidad sigue una tendencia similar de las bandas de frecuencia con Chome y Las Cruces, hay otras fuentes de variabilidad más importantes afectando a este sitio. Además, se observó que los valores absolutos también fueron mayores en el oxígeno entre localidades en comparación con la temperatura, sugiriendo mayores similitudes en la variabilidad de la temperatura entre las localidades.

Respecto a las hipótesis planteadas, los resultados obtenidos no respaldaron complemente la primera hipótesis, que planteaba que la variabilidad de alta frecuencia en temperatura y oxígeno disuelto en Chome y Las Cruces sería comparable a la variabilidad sinóptica en

términos de su aporte a la variabilidad total. Aunque en Las Cruces y Chome se observaron contribuciones importantes de las bandas de corto periodo, especialmente en oxígeno disuelto, éstas fueron claramente menores en comparación con la banda sinóptica, lo cual destaca la dominancia de los procesos de mayor escala temporal (e.g. surgencia costera) como principales moduladores de la variabilidad en el agua de fondo.

En cuanto a la segunda hipótesis, los resultados concuerdan parcialmente, ya que se encontró una mayor similitud entre Chome y Las Cruces a diferencia de las otras localidades, en términos de la contribución de las bandas de corto periodo a su aporte a la variabilidad total, además de presentar las mayores similitudes en su perfil de variabilidad y valores absolutos para el oxígeno disuelto. Sin embargo, también se observó que Chome comparte las mayores similitudes con Algarrobo en términos del aporte de la variabilidad de alta frecuencia y las mayores similitudes en los perfiles de variabilidad y valores absolutos en la temperatura. Esto sugiere que Chome presenta similitudes en su variabilidad de temperatura y oxígeno más marcadas con localidades distantes, como Algarrobo y Las Cruces, que, con su localidad aledaña, Coliumo. Este comportamiento podría estar relacionado con diferencias en los forzantes físicos y biogeoquímicos dominantes, como la topografía costera y la influencia de la surgencia, que generan dinámicas locales distintas.

Por lo tanto, considerar la variabilidad temporal de frecuencias más altas que la variabilidad estacional y sinóptica para las condiciones de temperatura y oxígeno del agua en las costas de Chile central, con una extensión de costa de más de 8.000 km (BCN, 2024), puede mejorar nuestra comprensión sobre las diferencias entre localidades separadas por menos de 500 km. Aunque este estudio se centró en el patrón temporal del forzamiento atmosférico y no los procesos que lo influyen, estudios futuros deberían considerar factores como la descarga de nutrientes, actividad humana, batimetría y topografía costera también influyen en las condiciones fisicoquímicas del agua, y analizar su interacción con los procesos de surgencia y mezcla, así como su impacto en las condiciones fisicoquímicas y biológicas en estas localidades, que presentan claras diferencias pese a su cercanía y claras similitudes pese a su distancia.

En un país como Chile, con una extensa línea de costa y una alta productividad marina, es fundamental realizar análisis más detallados de la topografía costera y su interacción con procesos oceanográficos en diferentes escalas temporales, especialmente las de corto periodo, que pueden tener un impacto significativo en las condiciones físicoquímicas del agua y en los procesos biológicos asociados. Asimismo, explorar otros factores como la descarga de nutrientes y batimetría es clave para comprender la dinámica oceanográfica y las diferencias entre localidades con características contrastantes dentro de una misma región costera.

CONCLUSIONES

1. Las Cruces destacó como la localidad más cálida, con las mayores concentraciones promedio de oxígeno disuelto. En contraste, Chome y Algarrobo fueron las localidades más frías y con menores concentraciones promedio, observándose en Chome una mayor dispersión de valores. A pesar de estas diferencias, todas las localidades presentaron mínimos cercanos a condiciones de hipoxia (< 2 mg/L)
2. La variabilidad estacional dominó las series de tiempo de temperatura y oxígeno disuelto para Chome y Las Cruces, especialmente en Chome, donde sus mínimas de temperatura y concentraciones de oxígeno disuelto coincidieron con la época en que predominan los vientos favorables a surgencia (primavera-verano), asociado a una mayor intensidad de los procesos costeros asociados con el viento. Además, Chome presentó las mayores amplitudes mareales entre las localidades estudiadas, lo que, aunque principalmente relacionado con las fuerzas gravitacionales podría estar influido indirectamente por la interacción de los vientos intensos con las mareas y el transporte de Ekman. Esta interacción podría amplificar las fluctuaciones del nivel del mar y acentuar la dinámica costera.
3. En todas las localidades, la banda sinóptica fue el principal contribuyente a la variabilidad total, superando notablemente las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia, resaltando la importancia de los procesos a escala sinóptica característicos de sistemas de surgencia de borde oriental.

4. Coliumo fue la localidad con mayores diferencias en términos de la importancia relativa de la variabilidad de corto periodo con respecto a la variabilidad sinóptica, con las menores contribuciones de las bandas diurna, semidiurna y de alta frecuencia, y una alta dominancia de la banda sinóptica. Además, mostró las mayores diferencias en valores absolutos con las otras localidades, aunque se observó una alta similitud en su perfil de variabilidad o aporte relativo de las diferentes bandas con Chome y Las Cruces.
5. Aunque Chome y Las Cruces mostraron una mayor similitud en la contribución de las bandas de corto periodo, perfil de variabilidad y valores absolutos en el oxígeno disuelto, Chome también presentó similitudes notables con Algarrobo en la variabilidad de alta frecuencia, perfil de variabilidad y valores absolutos en la temperatura. Esto sugiere que Chome comparte patrones más similares con localidades geográficamente distantes, como Algarrobo y Las Cruces, que, con su localidad vecina, Coliumo. Esto indica que la proximidad geográfica no determina necesariamente el grado de similitud en regímenes de variabilidad ambiental entre localidades costeras.
6. La variabilidad temporal de periodos cortos no debe ser ignorada en el análisis de las condiciones fisicoquímicas en localidades costeras. Factores locales como la topografía costera y los patrones de viento pueden generar diferencias significativas incluso en localidades cercanas como Chome y Coliumo, mientras que pueden generar a su vez similitudes en localidades más distantes como Chome, Las Cruces y Algarrobo.
7. Este estudio resalta la importancia de analizar procesos oceanográficos en múltiples escalas temporales para comprender la dinámica costera en Chile central. La identificación de diferencias y similitudes de forzantes físicos y biogeoquímicos proporciona una base para avanzar en la gestión y conservación de ecosistemas marinos en un país con más de 8.000 km de costa y una de las zonas de surgencia más productivas del mundo.

BIBLIOGRAFÍA

Blauw AN, Beninca E, Laane RW, Greenwood N, Huisman J (2012). Dancing with the tides: fluctuations of coastal phytoplankton orchestrated by different oscillatory modes of the tidal cycle. *PLoS One* 7(11). e49319.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, BCN. Disponible en: https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/index_html. Acceso 20 diciembre de 2024.

Bonferroni C (1936). Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilita. *Publicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e commerciali di Firenze* 8. 3-62.

Bonicelli J, Moffat C, Navarrete S, Largier J, Tapia FJ (2014). Spatial differences in thermal structure and variability within a small bay: Interplay of diurnal winds and tides. *Continental Shelf Research* 88. 72-80.

Bonicelli J, Tapia FJ, Navarrete S (2014). Wind-driven diurnal temperature variability across a small bay and the spatial pattern of intertidal barnacle settlement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 461. 350-356.

Dunn O (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics* 6(3). 241-252.

Fisher R (1935). *The Design of Experiments*. Oliver & Boyd. Edinburgh.

Hernández AF (2021). Patrones espaciales en el bentos submareal y su relación con regímenes de variabilidad en condiciones oceanográficas en la costa de Chile Central. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Manejo de Recursos Acuáticos Renovables. Universidad de Concepción. 149pp.

Hernández A, Tapia FJ (2021). Connecting spatial structure in subtidal benthic communities with temporal variability in bottom temperature and dissolved oxygen along an upwelling coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 250. 107166.

Kaplan D, Largier J, Navarrete S, Guíñez R, Castilla C (2003). Large diurnal temperature fluctuations in the nearshore water column. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57. 385–398.

Kolmogorov A (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giornale dell’Istituto Italiano degli Attuari* 4. 83-91

Kruskal W, Wallis W (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47(260). 583-621.

Ladah L, Filonov A, Lavín M, Leichter J, Zertuche-González J, Pérez-Mayorga D (2012). Cross-shelf transport of sub-thermocline nitrate by the internal tide and rapid (3–6 h) incorporation by an inshore macroalga. *Continental Shelf Research* 42. 10-19.

Ladah L, Tapia FJ (2021). Internal wave intensity and angle of propagation modulate small-scale settlement patterns of intertidal barnacles during peak recruitment. *Marine Ecology Progress Series* 678. 81-93.

Ladah L, Tapia FJ, Pineda J, López M (2005). Spatially heterogeneous, synchronous settlement of *Chthamalus* spp. larvae in northern Baja California. *Marine Ecology Progress Series* 302. 177-185.

Latapiat C (2023). Factores ambientales determinantes de la abundancia del “changai” (*Allopetrolisthes punctatus*) en el macrobentos de caleta Chome. Tesis para optar al título de Bióloga Marina. Universidad de Concepción. 52pp.

Leichter J, Stokes M, Vilchis L, Fiechter J (2014). Regional synchrony of temperature variation and internal wave forcing along the Florida Keys reef tract. *Journal of Geophysical Research* 119. 548-558.

Levene H (1960). Robust test for equality of variances. En I. Olkin (Ed.), *Contributions to probability and Statistics*. 278-292pp.

Lilliefors H (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknow. *Journal of the American Statistical Association* 62(318). 399-402.

Narváez D, Poulin E, Leiva G, Hernández E, Castilla J, Navarrete S (2004). Seasonal and spatial variation of nearshore hydrographic conditions in central Chile. *Continental Shelf Research* 24. 279–292.

Navarrete S, Gelcich S, Castilla J (2010). Long-term monitoring of coastal ecosystems at Las Cruces, Chile: Defining baselines to build ecological literacy in a world of change. *Revista Chilena de Historia Natural*. 83(1). 143-157.

Parada C, Yannicelli B, Hormazábal S, Vásquez S, Porobić J, Ernst B, Gretchina A (2013). Variabilidad ambiental y recursos pesqueros en el Pacífico suroriental: estado de la investigación y desafíos para el manejo pesquero. *Latin American Journal of Aquatic Research* 41(1). 1-28.

Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S (2002). Classical tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28 (2). 929-937.

Piñones A, Valle-Levinson A, Narváez D, Vargas C, Navarrete S, Yuras G, Castilla J (2005) Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65 (3). 513-525.

Pitman E (1937). Significance tests which may be applied to samples from any populations. *Journal of the Royal Statistical Society* 4(1). 119-130.

Retamal M (1994). Los decápodos de Chile. Vicerrectoría Académica Dirección de Docencia. Universidad de Concepción, Concepción. 256.

Santa Cruz F, Retamal M (2018). Biology, distribution, and abundance of *Allopetrolisthes punctatus* (Guérin, 1835) (Decapoda, Anomura, Porcellanidae), in the rocky subtidal of Chome, central Chile. *Latin American journal of aquatic research* 46(2). 383-391.

Smirnov N (1933). Estimate of deviation between empirical distribution functions in two independent samples. *Bulletin Moscow University* 2. 3-16

Spearman C (1904). The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology* 15(1). 72-101.

Stoica P, Moses RL (1997) Introduction to spectral analysis. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Tapia FJ, Largier, J, Castillo M, Wieters E, Navarrete S (2014). Latitudinal discontinuity in thermal conditions along the nearshore of central-northern Chile. PLoS One 9(10). e110841.

Tapia FJ, Navarrete S (2010). Spatial patterns of barnacle settlement in central Chile: Persistence at daily to inter-annual scales relative to the spatial signature of physical variability. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 392(1-2). 151-159.

Vargas C, Narváez D, Piñones A, Navarrete S, Lagos N (2006). River plume dynamic influences transport of barnacle larvae in the inner shelf off central Chile. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 86(5). 1057-1065.

Vargas C, Narváez D, Piñones A, Venegas R, Navarrete S (2004). Internal tidal bore warm fronts and settlement of invertebrates in central Chile. Estuarine, Coastal and Shelf Science 61. 603-612.

Viviani C, Hiller A, Werding B (2010). Swarming in open space in the rocky intertidal: a new population-settlement strategy in the Eastern Pacific porcellanid crab, *Allopetrolisthes punctatus* (Decapoda, Anomura, Porcellanidae). Crustaceana. 435-442.

Wieters E, Kaplan D, Navarrete S, Sotomayor A, Largier J, Nielsen K, Véliz F (2003). Alongshore and temporal variability in chlorophyll *a* concentration in Chilean nearshore waters. Marine Ecology Progress Series 249. 93-105.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Tabla S1. Comparaciones múltiples post-hoc (prueba de Dunn con corrección de Bonferroni) para la temperatura (°C) entre localidades. Se presentan los intervalos de confianza al 95% (IC inf/sup), la diferencia de rango entre pares de localidades, donde los valores positivos indican que la primera localidad tuvo en promedio temperaturas más altas que la segunda; y el p ajustado, que representa el nivel de significancia corregido por comparaciones múltiples. Resaltando en rojo la localidad con el mayor valor en cada comparación.

Temperatura (°C)

Localidad 1	Localidad 2	IC inf.	IC sup.	Dif. rango	p_ajustado
Algarrobo	Las Cruces	-17073	-16456	-17690	0
Algarrobo	Coliumo	-5924.9	-5346	-6503.8	8.6e-16
Algarrobo	Chome	1648.7	2199.9	1097.4	1.8e-14
Las Cruces	Coliumo	11148	11705	10591	0
Las Cruces	Chome	18722	19250	18193	0
Coliumo	Chome	7573.6	8056.8	7090.4	0

Tabla S2. Comparaciones múltiples post-hoc (prueba de Dunn con corrección de Bonferroni) para el oxígeno disuelto (mg/L) entre localidades. Se presentan los intervalos de confianza al 95% (IC inf/sup), la diferencia de rango entre pares de localidades, donde los valores positivos indican que la primera localidad tuvo en promedio temperaturas más altas que la segunda; y el p ajustado, que representa el nivel de significancia corregido por comparaciones múltiples. Resaltando en rojo la localidad con el mayor valor en cada comparación.

Oxígeno disuelto (°C)

Localidad 1	Localidad 2	IC inf.	IC sup.	Dif. rango	p_ajustado
Algarrobo	Las Cruces	-15211	-14599	-15823	0
Algarrobo	Coliumo	-4397.3	-3819.6	-4975	6.3E-89
Algarrobo	Chome	-3623.9	-3077.3	-4170.5	9.98E-68
Las Cruces	Coliumo	10814	11370	10257	0
Las Cruces	Chome	11587	12111	11063	0
Coliumo	Chome	773.4	1256.9	289.9	0.00015

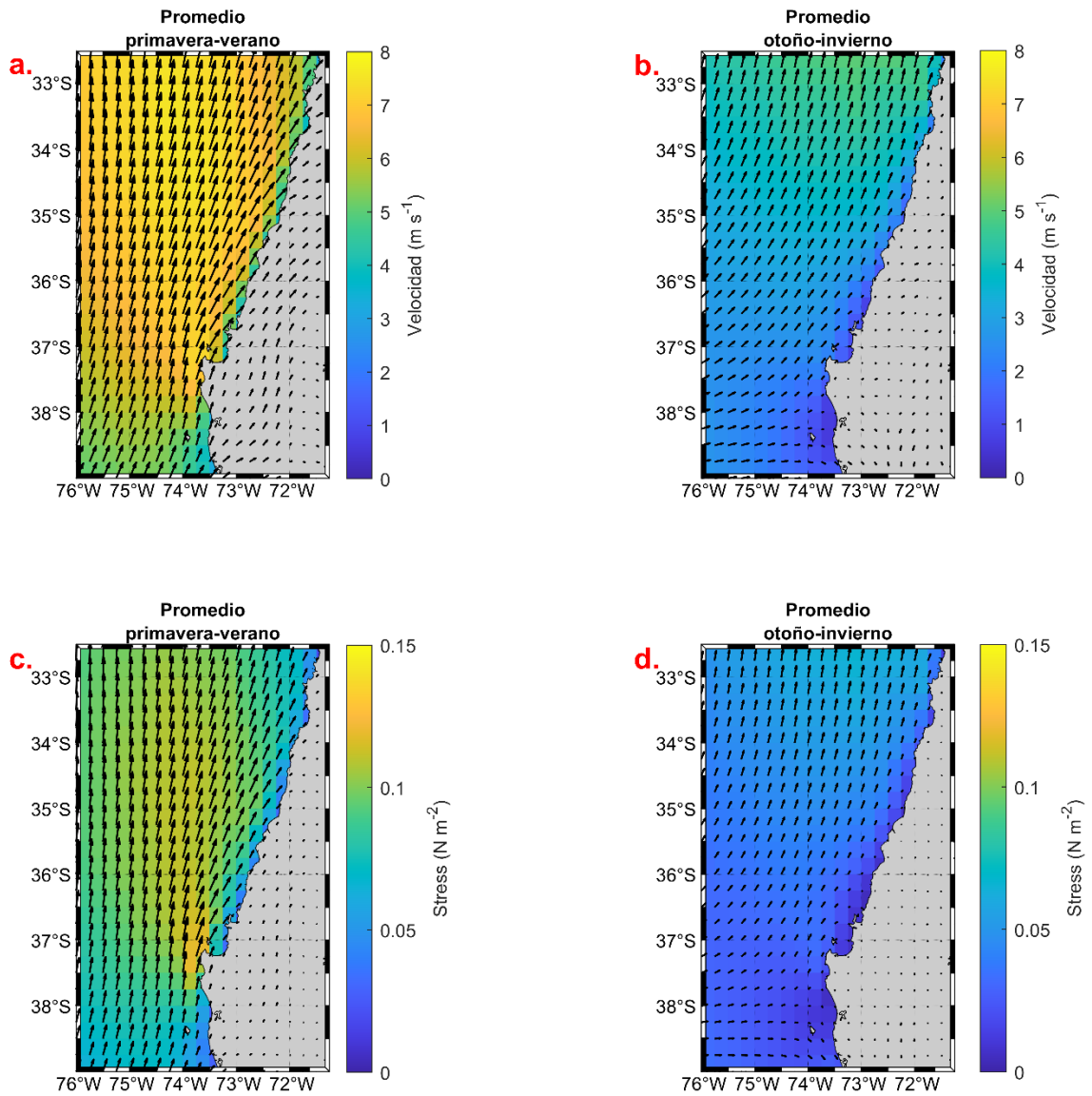


Figura S1. Campos promedio de velocidad en (a) primavera-verano y (b) otoño-invierno, y stress del viento en (c) primavera-verano y (d) otoño-invierno para el periodo 2014 - 2023.

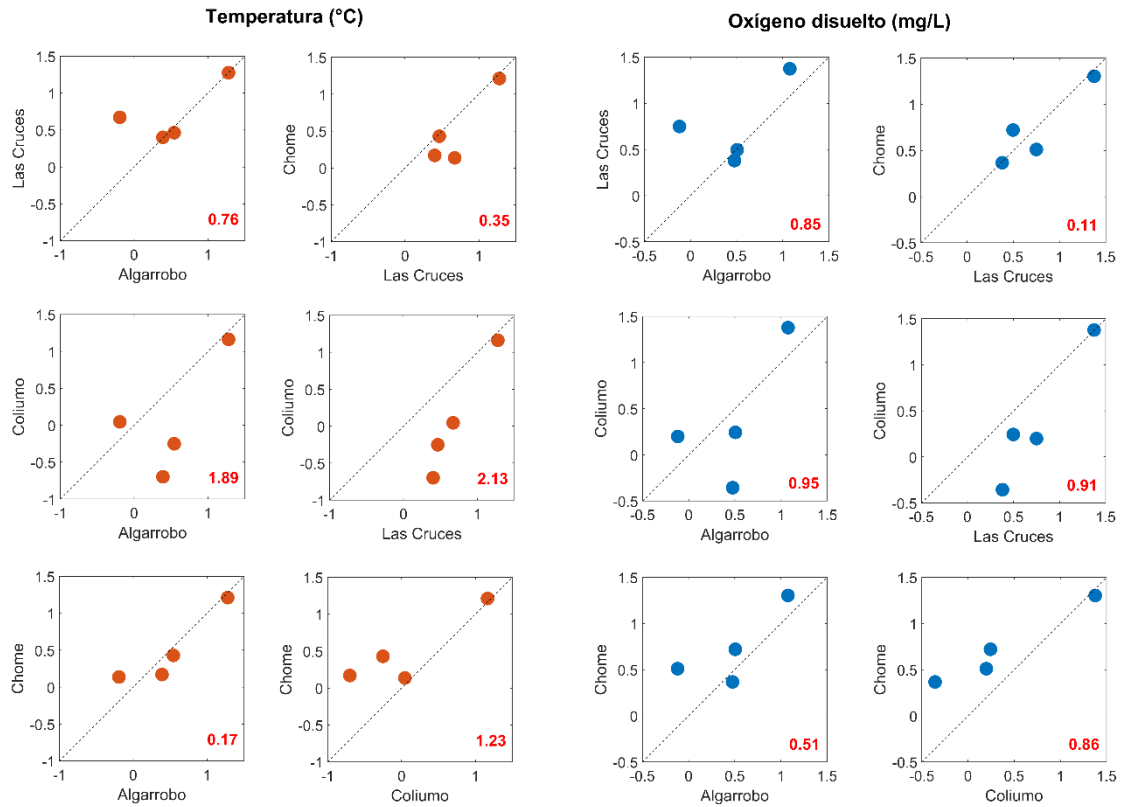


Figura S2. Diagramas de dispersión de la contribución espectral de las bandas sinóptica, diurna, semidiurna y de alta frecuencia entre pares de las localidades de estudio para la temperatura (naranja) y el oxígeno disuelto (azul). La línea negra punteada es una recta con pendiente = 1 y los números en rojo indican la suma de cuadrados de las desviaciones entre los puntos y la línea.