Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en las olas de calor marinas a nivel superficial en el sistema norte de la Corriente del Humboldt

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Rodrigo MOGOLLÓN ABURTO

ASESOR

Dr. Jorge Martín QUISPE SÁNCHEZ

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mogollón, R. (2024). *Impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en las olas de calor marinas a nivel superficial en el sistema norte de la Corriente del Humboldt*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos Complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Rodrigo Mogollón Aburto
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43900218
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-8049-9520
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Martín Quispe Sánchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25548660
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9488-8615
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10351868
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6743-7800
Miembro principal	
Nombres y apellidos	David Pareja Quispe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41273620
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6904-3736
Miembro suplente	
Nombres y apellidos	Fernando Mestanza Hernández

Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06585518
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6064-2783
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.4.2. Oceanografía Física y Física de la Atmósfera
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	PROCIENCIA (Ex Fondecyt) Contrato N.05-2019-FONDECYT-BM-INC.INV

Ubicación geográfica de la investigación	Instituto del Mar del Perú 12°04’01”S de latitud y 77°09’28”W de longitud
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022-2024
URL de disciplinas OCDE	1.05.01 -- Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 1.05.10 -- Investigación climática https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10 1.05.11 -- Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

RESUMEN

Se encuentra en mesa el Expediente iniciado por el Bachiller Rodrigo Mogollón Aburto para optar por el Título Profesional de Licenciado en Física.

REFERENCIA

1. Inició sus Estudios de Bachillerato en Física en el año 2005.

2. Optó el Grado Académico de Bachiller en Física en el año 2011.

3. El 19 de junio de 2024 se nombra al Jurado para la Sustentación de Tesis titulado: "Impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en las olas de calor marinas a nivel superficial en el sistema norte de la Corriente del Humboldt", el cual está conformado por los siguientes docentes:

Mg. Octavio Fashé Raymundo	(Presidente)
Dr. David Pareja Quispe	(Miembro Titular)
Dr. Jorge Martín Quispe Sánchez	(Asesor)
Ing. Fernando Mestanza Hernández	(Miembro Suplente))

Se programó la fecha de Sustentación de Tesis para el Jueves 12 de septiembre de 2024 a las 19:00 horas, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), para optar el Título Profesional de Licenciado en Física.

****

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 19:00 horas del Jueves 12 de septiembre de 2024, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Octavio Fashé Raymundo (Presidente), Dr. David Pareja Quispe (Miembro Titular), Dr. Jorge Martín Quispe Sánchez (Asesor) y el Ing. Fernando Mestanza Hernández (Miembro Suplente), se dió inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física, del Bachiller:

RODRIGO MOGOLLÓN ABURTO

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Rodrigo Mogollón Aburto a realizar una exposición del Trabajo de Tesis titulado: "Impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en las olas de calor marinas a nivel superficial en el sistema norte de la Corriente del Humboldt".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Octavio Fashé Raymundo, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

18	Dieciocho	Con Honores
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Rodrigo Mogollón Aburto. Siendo las 8:30 horas, se levanta la sesión.

Mg. Octavio Fashé Raymundo
PRESIDENTE

Dr. David Pareja Quispe
MIEMBRO TITULAR

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

Dr. Jorge Martín Quispe Sánchez
ASESOR

Ing. Fernando Mestanza Hernández
MIEMBRO SUPLENTE

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

CALIFICACIÓN DEL JURADO

RODRIGO MOGOLLÓN ABURTO

SUSTENTACIÓN DE TESIS

"Impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en las olas de calor marinas a nivel superficial en el sistema norte de la Corriente del Humboldt"

JURADO CALIFICADOR	NOTA	FIRMA
Mg. Octavio Fashé Raymundo PRESIDENTE	18	
Dr. David Pareja Quispe MIEMBRO PRINCIPAL	18	
Dr. Jorge Martín Quispe Sánchez ASESOR	19	
Ing. Fernando Mestanza Hernández MIEMBRO SUPLENTE	18	
PROMEDIO FINAL	18	

CONDICIÓN : con Honores

HORA : 19:00 horas

FECHA : Jueves 12 de septiembre de 2024

Dirección: Calle Germán Amézaga N.º 375 - Lima
Facultad de Ciencias Físicas
Apartado Postal: 14-0149 – Lima 14 Perú

Escuela Profesional de Física
6197000 Anexo 3805
E-mail eapfis@unmsm.edu.pe

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Jorge Martín Quispe Sánchez, en mi condición de asesor acreditado con el Acuerdo del Comité de Gestión N° 081 – EPF – FCF - 22. de la tesis de Licenciatura, cuyo título es Impacto de la variabilidad atmosférica y oceánica en las Olas de Calor Marinas a nivel superficial en el Sistema Norte de la Corriente de Humboldt, presentado por el bachiller Rodrigo Mogollón Aburto para optar el título de Licenciado en Física, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 5 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Firma del Asesor

DNI:25548660

Jorge Martín Quispe Sánchez:

Escaneado con CamScanner





El presente trabajo fue posible gracias al financiamiento del proyecto Concytec-Banco mundial, denominado "Caracterización y pronóstico de eventos extremos en el mar peruano usando un sistema operacional de información oceánica", a través de su unidad ejecutora PROCIENCIA (ex Fondo Nacional de Desarrollo Cientyfico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica, FONDECYT). Este trabajo es también una contribución conjunta entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Institut de Recherche pour le Developpement (IRD) de Francia, a través de la red internacional GDRI DEXICOTROP. Las simulaciones fueron realizadas en el ambiente computacional del Laboratório de Modelado Oceanográfico, ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC) del IMARPE. Los diagnósticos fueron simulados en el ambiente computacional del LOCEAN de Francia.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Facultad de Ciencias Físicas

Copyright © - All rights reserved. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2024.

En la elaboración de este trabajo, se ha utilizado la herramienta ChatGPT exclusivamente para mejorar la calidad de la redacción y realizar correcciones ortográficas. Es importante destacar que los análisis, resultados, interpretaciones y conclusiones presentados en este documento son completamente originales y de autoría propia, sin intervención alguna de la inteligencia artificial en dichos aspectos. El uso de esta herramienta se ha limitado únicamente a garantizar una presentación clara y libre de errores gramaticales, respetando en todo momento la integridad y autenticidad del contenido académico. El autor declara que no hay conflicto de interés.

.....
Rodrigo Mogollón Aburto

Resumen

Este estudio tuvo por objetivo evaluar la importancia de la variabilidad de los forzamientos atmosféricos y oceanográficos en reproducir las caracteríticas observadas de las Olas de Calor Marinas (MHWs) detectadas en la superficie durante las dos últimas décadas (2000-2019) en el Sistema Norte de la Corriente del Humboldt (NHCS). Para este fin, se implementó un experimento de sensibilidad que consistió en una serie de simulaciones hidrodinámicas en alta y baja frecuencia para discriminar las perturbaciones de origen atmosférico u oceanográfico en la generación y cese de estos eventos extremos. Los resultados mostraron que las características de las MHWs en una simulación con alta variabilidad atmosférica y baja variabilidad oceanográfica son similares a aquellas que incluyen ambas componentes sinópticas. Sin embargo, al remover la variabilidad atmosférica, se observó una disminución en la cantidad de eventos de MHWs, que son más prolongados, menos frecuentes, menos intensos y menos severos. Se identificó dos regiones costeras, al norte y al sur, con alta incidencia de MHWs, donde las anomalías térmicas asociadas son capturadas de manera realista por simulaciones con alta variabilidad atmosférica. Además, mediante el balance de calor, se evidenció la importancia de los procesos advectivos y los flujos de calor en la génesis y disipación de las MHWs en ambas regiones. En el norte, los eventos cortos son impulsados principalmente por causas advectivas, mientras que los eventos persistentes muestran una contribución equitativa entre advección y flujos de calor. Por otro lado, en el sur, los cambios en los flujos de calor son determinantes en la formación de las MHWs, mientras que la advección contribuye ligeramente al enfriamiento. Durante la fase de disipación de las MHWs, el enfriamiento está dominado por procesos advectivos, esencialmente afloramiento costero. Los resultados obtenidos respaldan la necesidad de considerar la variabilidad atmosférica de alta frecuencia al usar las salidas de las simulaciones de modelos climáticos globales para una reproducción realista de las MHWs de corta y transitiva duración en el NHCS. Así mismo, se demuestró que las MHWs detectadas en una simulación forzada con una frecuencia mensual, sólo es capaz de reproducir MHWs de larga duración, logrando capturar parcialmente la intensidad de estos eventos persistentes. Esto es crucial para comprender y proyectar el impacto de estos eventos en el contexto del cambio climático futuro al usar salidas de los modelos climáticos. En resumen, la inclusión de la variabilidad atmosférica permitió analizar con precisión tanto MHWs de larga duración como eventos más cortos, reduciendo la dependencia de productos oceánicos de alta frecuencia y permitiendo estudiar la gama casi completa de MHWs. Se espera que este estudio aporte significativamente a futuros trabajos de pronóstico bajo diferentes escenarios climáticos.

Palabras Clave

Modelo CROCO, Olas de Calor Marinas, Sistema Norte de la Corriente del Humboldt, Variabilidad atmosférica y oceanográfica

Abstract

This study aimed to assess the importance of the variability in atmospheric and oceanographic forcings in reproducing the observed characteristics of Marine Heatwaves (MHWs) detected at the surface during the last two decades (2000-2019) in the Northern Humboldt Current System (NHCS). To this end, a sensitivity experiment was implemented, consisting of a series of high- and low-frequency hydrodynamic simulations to distinguish atmospheric or oceanographic perturbations in the generation and cessation of these extreme events. The results showed that the characteristics of MHWs in a simulation with high atmospheric variability and low oceanographic variability are similar to those that include both synoptic components. However, when atmospheric variability was removed, a decrease in the number of MHW events was observed, resulting in longer, less frequent, less intense, and less severe events. Two coastal regions, one in the north and one in the south, were identified as having high MHW incidence, where the associated thermal anomalies were realistically captured by simulations with high atmospheric variability. Moreover, through heat balance analysis, the importance of advective processes and heat fluxes in the genesis and dissipation of MHWs in both regions was demonstrated. In the north, short events are primarily driven by advective causes, while persistent events show an equal contribution between advection and heat fluxes. On the other hand, in the south, changes in heat fluxes are decisive in the formation of MHWs, while advection slightly contributes to cooling. During the dissipation phase of MHWs, cooling is dominated by advective processes, primarily coastal upwelling. The results obtained support the need to consider high-frequency atmospheric variability when using outputs from global climate model simulations to realistically reproduce short and transient MHWs in the NHCS. Additionally, it was demonstrated that MHWs detected in a simulation forced with monthly frequency can only reproduce long-duration MHWs, partially capturing the intensity of these persistent events. This is crucial for understanding and projecting the impact of these events in the context of future climate change when using outputs from climate models. In summary, the inclusion of atmospheric variability allowed for accurate analysis of both long-duration MHWs and shorter events, reducing the dependence on high-frequency oceanic products and enabling the study of nearly the full range of MHWs. It is expected that this study will significantly contribute to future forecasting efforts under different climate scenarios.

Agradecimientos

En el trayecto de esta travesía académica, que se ha extendido por más de una década, han sido numerosos los obstáculos y desafíos que he enfrentado. Sin embargo, durante este recorrido he encontrado luces de apoyo que han guiado mis pasos con firmeza. En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi siempre compañera de vida Lorena, quien ha sido mi inspiración constante y mi roca inquebrantable a lo largo de estos años. Su amor, paciencia y comprensión han sido la brújula que me ha mantenido en rumbo, incluso en los momentos más oscuros. También debo reconocer el inmenso valor y la fuerza indomable de mi madre, quien, con coraje y determinación, enfrentó el desafío del cáncer con una fortaleza inigualable, quien para mi es un ejemplo de resiliencia. Año tras año me recordaba con insistencia la importancia de completar esta tesis, que hoy te la dedico. A mi fiel compañero Kusi, que con su lealtad y compañía ha llenado mis días de alegría y consuelo, una deuda de gratitud infinita. También, agradezco profundamente a mi padre, quien ha sido mi sostén a lo largo de mi vida académica incluso desde que subíamos las escaleras que nos llevaban al colegio, un vívido ejemplo de perseverancia. Por último, pero no menos importante, quiero extender mi más sincero agradecimiento a Jorge Quispe, mi asesor de tesis, por ser mi primer mentor en este viaje académico y por inculcarme la pasión por la oceanografía desde el inicio. Su guía y conocimientos fueron fundamentales en cada paso.

A todos y cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento y dedicación.

Rodrigo Mogollón Aburto

Contenido

Resumen 6

Resumen 7

Agradecimientos 8

Glossary 16

I Introducción 17

1 Introducción 19

II Antecedentes 20

2 Antecendentes 22

III Planteamiento del Problema de Investigación 24

3 Planteamiento del Problema de Investigación 26

3.1 Planteamiento del Problema 26

3.2 Objetivos 27

3.2.1 Objetivo General 27

3.2.2 Objetivos Específicos 27

IV Marco Teórico 28

4 Marco Teórico 30

4.1 El Sistema de la Corriente de Humboldt 30

4.2 Olas de Calor Marinas (MHWs) 31

V Metodología 33

5 Metodología 35

5.1 Modelo Hidrodinámico y Forzantes 35

5.2 Dominios de Análisis 35

5.3 Detección de Olas de Calor Marinas (MHWs) 36

5.4 Bases de Datos Adicionales 37

5.5 Experimento de Sensibilidad 38

5.6 Métricas Estadísticas 39

5.7 Análisis del Balance de Calor 40

5.8 Rangos de Duración de las MHWs 41

VI Resultados y Discusiones **43**

6 Resultados y Discusiones **45**

6.1 MHWs Regionales 45
6.2 MHWs Costeros 48
6.2.1 Región Costera Norte 48
6.2.2 Región Costera Sur 53
6.3 Controladores de las MHWs 57
6.3.1 Generación de las MHWs 57
6.3.2 Declive de las MHWs 58

VII Conclusiones **61**

7 Conclusiones **63**

Bibliografía **69**

Apéndice **70**

Lista de Figuras

1 Propiedades de la superficie del mar y esquema de circulación oceánica. (a) Salinidad de la superficie del mar (SSS, sombreado de colores) y circulación superficial. (b) Temperatura de la superficie del mar (SST, sombreado de colores en °C) y circulación subsuperficial. Nota. Adaptado de "Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data" (p. 5252), por Chaigneau et al. (2013) JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 118. 30

2 Dominio de simulación, incluyendo las áreas de análisis consideradas en este estudio. El mapa de color denota el total de eventos MHWs detectados por pixel, derivados de data observacional de sensoramiento remoto (OSTIA). 36

3 Características promedio de las MHWs. La primera columna representa la densidad de las MHWs, seguida de la intensidad, duración, frecuencia y categoría máxima en las columnas dos a cinco, respectivamente. La primera fila corresponde a observaciones de alta frecuencia (OSTIA), mientras que las filas dos a cinco muestran los resultados para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente. 46

4 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación HF. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 941). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. 49

5 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación HFatm_LFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 838). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 49

6 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 779). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 50

7 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 682). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 50

8 Series de tiempo que representan la intensidad de las MHW detectadas en la región costera norte, entre las observaciones (OSTIA) y las salidas del modelo para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente (paneles a-d). Como referencia, la línea gris sólida representa las observaciones en los paneles a-d. El panel e muestra el índice ENSO (ITCP). Los números entre paréntesis mostrados en las leyendas denotan el número total de eventos detectados en cada simulación. 52

9 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación HF. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 699). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. 53

10 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación HFatm_LFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 738). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 54

11 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 714). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 54

12 Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 705). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento. . 55

13 Series de tiempo que representan la intensidad de las MHW detectadas en la región costera del sur, entre las observaciones (OSTIA) y las salidas del modelo para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente (paneles a-d). Como referencia, la línea gris sólida representa las observaciones en los paneles a-d. El panel e muestra el índice ENSO (ITCP). Los números entre paréntesis mostrados en las leyendas denotan el número total de eventos detectados en cada simulación. 56

14 Contribución media de los procesos advectivos y de los flujos de calor en la generación de las MHWs categorizados por rango de duración (eventos cortos, transitorios y persistentes). El análisis fue realizado para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, desde la primera hasta la cuarta columna, respectivamente. La primera fila (paneles a-d) exhibe los resultados para la caja costera norte, mientras que la segunda fila (paneles e-h), para la caja costera sur. 59

15 Contribución media de los procesos advectivos y de los flujos de calor en el declive de las MHWs categorizados por rango de duración (eventos cortos, transitorios y persistentes). El análisis fue realizado para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, desde la primera hasta la cuarta columna, respectivamente. La primera fila (paneles a-d) exhibe los resultados para la caja costera norte, mientras que la segunda fila (paneles e-h), para la caja costera sur. 60

A1 Los paneles a y c muestran las anomalías diarias de la temperatura superficial del mar ($T'_{z=0m}$) y las anomalías de la altura del nivel del mar (SSH'), respectivamente. Las áreas grises sombreadas representan el rango de desviaciones estándar espaciales asociadas con las observaciones (OSTIA y DUACS, respectivamente), mientras que la línea negra sólida representa los resultados modelados. Las anomalías de temperatura modeladas a 150 m de profundidad ($T'_{z=150m}$) se comparan con los resultados de un producto de reanálisis validado (GLORYS) en el panel b. El panel d ilustra las fluctuaciones mensuales de la profundidad de la termoclina (tcd), donde la tcd modelada se interpoló en espacio y tiempo para que coincidiera con las observaciones obtenidas de boyas ARGO. El panel e muestra el índice ENSO, con valores positivos y negativos que indican períodos de El Niño y La Niña, respectivamente. El análisis se realiza entre las latitudes 3-18°S dentro de la banda costera de 250 km. Las anomalías y estadísticas se calculan en relación con sus respectivos conjuntos de datos, cuya tendencia y ciclo anual han sido removidos. Los siete primeros años de la simulación (1993-1999) se excluyeron del análisis (periodo spin-up). Adaptado de Mogollón et al. (2023). 73

A2 Diagrama tiempo-profundidad de la temperatura observada (flotadores ARGO) y modelada (paneles a y b, respectivamente). De manera similar, los paneles c y d corresponden a la salinidad. La línea negra sólida denota la isoterma de 20°C y la isohalina de 35, para los paneles superiores e inferiores, respectivamente. Los datos se promediaron dentro de la banda costera de 250 km entre 3-18°S. Adaptado de Mogollón et al. (2023). 74

A3 Perfil costero medio anual de la velocidad del viento y sus componentes (panel superior), rotacional del viento (panel del medio) y velocidades de bombeo de Ekman (panel inferior) para los datos de viento ERA5 originales (Orig) y corregidos (Corr). Se eligió una caja costera representativa de 1° (~ 12.8°S) para realizar esta ilustración. Adaptado de Mogollón et al. (2023) . 76

Lista de Tablas

1 Experimentos de Sensibilidad. El término HF se refiere a high-frequency (alta frecuencia) y el término LF se refiere a low-frequency (baja frecuencia). 38

2 Métricas estadísticas calculadas sobre el dominio regional en la Figura 3 incluyen la desviación estándar (σ), el coeficiente de correlación (r), el error promedio (AE), el error absoluto promedio (AAE), el porcentaje de sesgo (PB) y el índice de confiabilidad (RI). Para una explicación detallada, consulte la sección 5.6 47

Glosario

AAE Average Absolute Error.

AE Average Error (sesgo).

CMEMS Copernicus Marine Environment Monitoring Service.

CMIP5 Proyecto de Inter-comparación de Modelos de Clima Acoplados versión 5.

EBUS Eastern Boundary Upwelling System.

ENSO El Niño-Oscilación Sur.

ERA5 ECMWF re-analysis.

FONDECYT Fondo Nacional de Desarrollo Cientıfico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica.

GEBCO General Bathymetric Chart of the Oceans.

GLORYS12V1 Global Ocean Physics Reanalysis at 1/12° horizontal resolution, v.1.

IMARPE Instituto del Mar del Perú.

IRD Institut de recherche pour le développement.

LMOECC Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático.

LOCEAN Laboratory of Oceanography and Climate : Experiments and numerical Approaches.

MEF Modelling Eficiency.

MHWs Marine Heatwaves.

NHCS Northern Humboldt Current System.

PB Percentage of Bias.

PCC Peruvian Coastal Current.

RI Reliability Index.

SST Sea Surface Temperature.

I

Introducción

Capitulo 1: Introducción

Los eventos extremos que generan un abrupto aumento de la temperatura superficial del agua de mar, conocidas como Olas de Calor Marinas (MHWs, por sus siglas en inglés), han emergido como un área de interés creciente en la investigación oceanográfica debido a su impacto significativo en los ecosistemas marinos y en el clima global. Estos eventos tienen repercusiones profundas en la biodiversidad marina, la productividad pesquera y los patrones climáticos a escala mundial. Es crucial comprender la naturaleza y las causas subyacentes de las MHWs para poder mitigar sus efectos adversos y adaptarse a los cambios que generan en los ecosistemas oceánicos.

En particular, el Sistema Norte de la Corriente de Humboldt (NHCS, por sus siglas en inglés) se ha convertido en un área de interés especial para el estudio de las MHWs debido a su alta sensibilidad a las variaciones climáticas y oceanográficas. La región costera peruana alberga una de las áreas más productivas de los oceanos globales, con una biodiversidad marina única y una pesquería altamente productiva. Sin embargo, las MHWs pueden perturbar este delicado equilibrio, alterando los ecosistemas marinos y afectando la abundancia y distribución de especies de interés comercial.

En este estudio, se adopta un enfoque integral para abordar la compleja problemática de las MHWs en el NHCS. Se propone un experimento de sensibilidad utilizando modelado numérico con el fin de evaluar el papel desempeñado por la variabilidad atmosférica y oceanográfica en la génesis y cese de estos eventos extremos. Además, se busca evaluar la capacidad del modelo para reproducir fielmente las características de las MHWs superficiales de diferentes duraciones en la región.

La sección metodológica detalla la configuración del modelo utilizado, el método empleado para la detección de las MHWs, los conjuntos de datos utilizados, el dominio de estudio y el experimento de sensibilidad desarrollado para investigar las distintas influencias en la ocurrencia de estos eventos extremos. Los resultados presentados en la sección correspondiente ofrecen un análisis detallado de los patrones promedio de las características de las MHWs obtenidas a partir de las simulaciones de sensibilidad. Se examina tanto a nivel regional como costero, proporcionando una comprensión más completa de la distribución y la intensidad de estos eventos en el NHCS. Además, se profundiza en la importancia de los procesos físicos subyacentes que contribuyen a la generación y cese de las MHWs.

Finalmente, en la sección de conclusiones, se sintetizan los hallazgos más relevantes encontrados en este estudio, destacando las implicaciones para la comprensión de las MHWs en el NHCS. Como material suplementário, se incluyen tres apéndices que proporcionan detalles adicionales sobre la validación de la simulación control, el enfoque empleado para mejorar los forzamientos atmosféricos y el script elaborado para la detección de MHWs.

II

Antecedentes

Capitulo 2: Antecendentes

En los oceános existen eventos climáticos extremos de temperaturas anómalamente cálidas, conocidas como Olas de Calor Marinas, que tienen un impacto devastador sobre los ecosistemas marinos a todo nivel (Frölicher and Laufkötter, 2018; Oliver et al., 2020). Por ejemplo, mortalidad masiva de organismos, redistribución y cambios en la abundancia de especies lo cual impacta en la pesca y en toda la cadena económica asociada, entre otros (Smale et al., 2017; Jones et al., 2018). Por ejemplo, Cabello et al. (2002) determinó las condiciones ambientales naturales y antropogénicas que desencadenan eventos de mortandad de las conchas de abanico en la bahía de Paracas, lo cual podría estar relacionado a una MHW ocurrida durante Mayo-Junio del 2000. En consecuencia, es importante producir estrategias efectivas de adaptación para poder tener la capacidad de proyectar los efectos de las MHWs en el NHCS.

Dado que la actual definición de MHW (Hobday et al., 2016, 2018) requiere de datos de temperatura de varias décadas a una frecuencia diaria, el estudio de estos eventos se ve limitado a niveles superficiales, por ejemplo el uso de datos provenientes de sensoramiento remoto (Oliver et al., 2018; Holbrook et al., 2019; Oliver et al., 2020). Dada la falta de datos óptimos en subsuperficie (Schlegel et al., 2019) y también por el hecho que casi todos los modelos climáticos suelen guardar salidas a una frecuencia mensual, la mayoría de trabajos sobre MHWs bajo un contexto de cambio climático futuro podrían estar subestimando el real impacto térmico al no considerar la importancia de la frecuencia en los forzamientos atmosféricos y oceanográficos. Donner et al. (2005) estudió el blanqueamiento de corales derivado de MHWs de larga duración haciendo uso de salidas de gruesa resolución espacial y temporal (mensual) de modelos atmosféricos y oceanográficos de circulación general bajo un escenario de cambio climático futuro hasta el 2100. Spillman et al. (2013) evaluó la capacidad de un modelo de pronóstico estacional para predecir condiciones anormalmente cálidas varios meses antes, proporcionando una advertencia temprana de blanqueamiento en la Gran Barrera de Coral frente a Australia. Jacox et al. (2019) evaluó la habilidad en pronosticar una MHW de larga vida en el sistema de California usando un conjunto de salidas de 8 modelos climáticos globales acoplados. Taschetto et al. (2014) también utilizó 34 modelos climáticos del Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados (CMIP5, por sus siglas en inglés) para representar El Niño-Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) bajo escenarios de forzamientos históricos y proyecciones futuras de cambio climático hasta el 2100. Dado que El Niño puede ser considerada una MHW de características particulares (como alta intensidad, larga duración y baja frecuencia) (Frölicher and Laufkötter, 2018), estos trabajos también se enfocaban en MHWs persistentes o de larga duración. Dado que los modelos utilizados en trabajos anteriores ofrecen salidas en una frecuencia mensual, los trabajos realizados se limitan al estudio predictivo de MHWs persistentes, impidiendo así incorporar las MHWs de vida corta duración que son más frecuentes y a veces más intensas que las de larga duración, como lo es en el NHCS (Pietri et al., 2021; Mogollón et al., 2023).

Por lo antes expuesto, en el presente estudio analizaremos la importancia de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en capturar realísticamente las características de las MHWs superficiales en la región más productiva del NHCS mediante el uso de una serie de experimentos numéricos de sensibilidad.

III

Planteamiento del Problema de Investigación

Capitulo 3: Planteamiento del Problema de Investigación

3.1 Planteamiento del Problema

A partir de las indagaciones realizadas, se evidencia que son pocas o nulas las investigaciones publicadas sobre este tema de investigación propuesto que se enfoca únicamente en la frecuencia de los forzamientos utilizados por los modelos para estudiar eventos extremos como las llamadas MHWs. Menos aún, dedicado a uno de los ecosistemas más importantes de los océanos globales, como lo es el NHCS. Hasta donde sabemos, todas las investigaciones que se han realizado se limitan a evaluar y pronosticar el impacto de las MHWs de larga duración debido a la escala de tiempo (mensual) con el que los modelos son alimentados y que suelen escribir sus salidas. En consecuencia, se suele despreciar las MHWs de corta duración que son incluso más frecuentes que las de larga duración. En ese sentido, mediante la utilización de la herramienta de modelaje numérico, se propone hacer un estudio de sensibilidad para identificar los requisitos mínimos respecto a la variabilidad atmosférica y oceanográfica para poder generar y reproducir fielmente las MHWs de superficie de diferentes duraciones.

En vista del creciente interés de la comunidad científica en pronosticar estos eventos extremos que tienen un negativo impacto sobre la producción primaria, en el presente estudio se propone evaluar la frecuencia mínima necesaria para poder reproducir realísticamente las propiedades observadas de las MHWs en el NHCS. De esta forma, podremos también evaluar la importancia de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en la etapa de formación y cese. Este tipo de estudio de sensibilidad no se ha realizado antes debido principalmente a la dificultad en llevar a cabo varias simulaciones de al menos dos décadas a una frecuencia de forzamiento y escritura diaria.

Sobre lo anterior, se considera además que las limitaciones computacionales suelen ser una de las principales razones, ya que el peso de los archivos de salida es grande (decenas de GB por año), así como el tiempo real que toma lanzar varias simulaciones hidrodinámicas de alta frecuencia y resolución el cual podría demorar más de dos meses. Sin embargo, gracias a la colaboración del Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC), dependiente de la Dirección General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), estos experimentos numéricos de sensibilidad fueron realizados en el potente cluster disponible en su ambiente computacional. Cabe mencionar que los diagnósticos de todas las simulaciones fueron simuladas en el cluster del LOCEAN del IRD de Francia.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General

Evaluar el impacto de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en la generación y reproducción de las MHWs observadas en superficie mediante un conjunto de simulaciones hidrodinámicas de alta y baja frecuencia durante el periodo 2000-2019 en la región costera más productiva del NHCS.

3.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar un conjunto de simulaciones hidrodinámicas de sensibilidad en alta y baja frecuencia, pero de alta resolución espacial.
- Validar la simulación control con datos observados disponibles.
- Identificar las MHWs ocurridas durante el periodo de estudio en todas las simulaciones de sensibilidad.
- Comparar las principales características de las MHWs (intensidad, duración, frecuencia anual y categoría de severidad)
- Mostrar el impacto de incorporar la variabilidad sinóptica atmosférica y oceanográfica en la fiel reproducción de las características de las MHWs cuando comparadas con las obtenidas a nivel superficial a través del sensoramiento remoto.
- Evaluar el rol de los procesos advectivos y los flujos de calor durante la generación y cese de los eventos.

IV

Marco Teórico

4.1 El Sistema de la Corriente de Humboldt

Los sistemas de afloramiento de bordes orientales (EBUS, por sus siglas en inglés) son las regiones más productivas de los océanos a nivel global (Pocklington, 1981). El EBUS del Humboldt se encuentra en la costa occidental de Sudamérica, extendiéndose desde el norte de Perú hasta el sur de Chile. En Perú, abarca aproximadamente 1700 kilómetros de costa, desde la frontera con Ecuador hasta el límite con Chile (ver Fig. 1). Específicamente, el NHCS, es una región marina altamente dinámica y productiva.

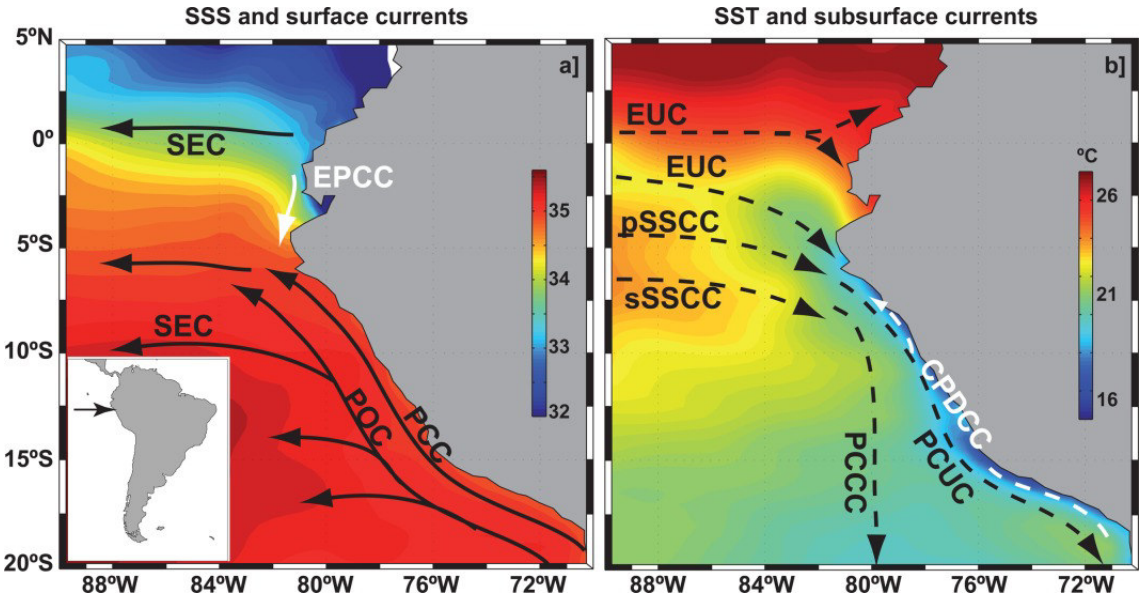

Figure 1: *Propiedades de la superficie del mar y esquema de circulación oceánica. (a) Salinidad de la superficie del mar (SSS, sombreado de colores) y circulación superficial. (b) Temperatura de la superficie del mar (SST, sombreado de colores en °C) y circulación subsuperficial. Nota. Adaptado de "Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data" (p. 5252), por Chaigneau et al. (2013) JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 118.*

Ubicado en el Océano Pacífico Sur frente a las costas peruanas, el NHCS se caracteriza por tener una alta producción biológica sostenida por un intenso afloramiento costero a lo largo de todo el año (Strub et al., 2013). Este proceso físico lleva aguas repletas de nutrientes inorgánicos hacia la superfície (Chavez, 1995), haciendo posible el sostenimiento de una persistente alta tasa de productividad primaria.

La región peruana está influenciada por los vientos Alisios del sureste, que soplan a lo largo de la costa, contribuyendo al afloramiento costero a lo largo del año, siendo máximo en invierno austral (Julio-Agosto) y mínimo durante el verano, contribuyendo a que el NHCS sea una de las áreas marinas más productivas del mundo, sustentando así una rica biodiversidad marina. La Corriente Costera Peruana (PCC, por sus siglas en inglés)

es la componente costera y dominante en el NHCS (ver Fig. 1), caracterizada por su alta productividad biológica debido al permanente afloramiento de aguas frías y nutritivas. Estas aguas son el resultado de la divergencia de Ekman, que trae aguas frías desde la subsuperfície debido principalmente al accionar del viento en dirección paralela a la costa.

El NHCS se ve influenciado por modos de variabilidad climática a escala interanual, lo que lo convierte en un área especialmente sensible a las perturbaciones oceánicas ecuatoriales debido a su proximidad al Ecuador y las conexiones directas subsuperficiales entre el EBUS del Humboldt y el Sistema de Corrientes Ecuatoriales (Montes et al., 2011). Durante los eventos de El Niño, las aguas cálidas del Pacífico Ecuatorial se desplazan hacia el Este, el cual tiene un impacto significativo en el NHCS. Durante estos eventos, se observan efectos devastadores en la productividad biológica y en las comunidades marinas de la región (Barber and Kogelschatz, 1990). Por ejemplo, el aumento de la profundidad de la capa de mezcla y de la nutriclina durante eventos El Niño intensifican las limitaciones de luz y nutrientes para el crecimiento del fitoplancton, lo que resulta en una disminución de la productividad (Barber and Chavez, 1983; Espinoza-Morriberón et al., 2017).

Por el contrario, durante los eventos de La Niña se observa una inesperada leve disminución de los vientos con dirección favorable al afloramiento. Sin embargo, a pesar de esta disminución, las aguas afloradas transportadas por la Corriente Ecuatorial y la Contra-Corriente Perú-Chile están enriquecidas en nutrientes. La posición e intensidad de estas importantes fuentes de surgencia son mucho más favorables durante La Niña en comparación con las condiciones de El Niño (Colas et al., 2008; Montes et al., 2010, 2011; Espinoza Morriberón et al., 2017), lo que contribuye a aumentar la productividad biológica y las capturas pesqueras en la región.

4.2 Olas de Calor Marinas (MHWs)

Las MHWs son eventos climáticos extremos de temperaturas anómalamente cálidas y pueden ser de 2 tipos según su origen. El primero es atribuído a cambios locales debido a los flujos de calor aire-mar y/o a variaciones en los patrones de viento. El segundo, es atribuído a forzamientos remotos por el transporte del contenido de calor o a través de las teleconexiones.

Las MHWs operan en un abanico de escalas de tiempo. Las que suelen ser de corta duración (días/semanas) son probablemente originadas debido a perturbaciones atmosféricas (locales), como por ejemplo, debido a una intensificación de la radiación incidente, disminución de la intensidad del viento, debilitamiento de la pérdida de calor del oceáno, entre otros factores físicos (Elzahaby and Schaeffer, 2019; Cooley et al., 2022; Mogollón et al., 2023). Por otro lado, las MHWs que son de larga duración (meses/estaciones) son generalmente debido a perturbaciones oceánicas (remotas) asociadas al transporte de calor desde otras regiones (Behrens et al., 2019), como por ejemplo lo que sucede durante

la fase cálida del ENSO en el mar peruano debido a las ondas Kelvin ecuatoriales y las subsecuentes ondas atrapadas a la costa (Colas et al., 2008; Echevin et al., 2014).

La mayoría de los trabajos publicados en la literatura describen las MHWs desde una perspectiva global (Oliver et al., 2018, 2020; Holbrook et al., 2019, 2020), y algunos se enfocan en eventos específicos desde una perspectiva más regional, como es el caso de los recurrentes eventos en el Mar de Tasmania (Oliver et al., 2017; Behrens et al., 2019; Elzahaby and Schaeffer, 2019), en la region tropical de Australia (Benthuysen et al., 2018; Heidemann and Ribbe, 2019), en la región noreste del oceano Pacífico (Chen et al., 2015), y en la región del Atlántico norte (Gawarkiewicz et al., 2019). Por otro lado, pocos trabajos se han enfocado en la regiones costeras. Por ejemplo, Marin et al. (2021) evaluó las principales características y tendencias de las MHWs para la región costera global, mientras que Varela et al. (2021) examinó la ocurrencia de las MHWs en las regiones costeras y sus asociadas regiones oceánicas adyacentes en todos los EBUS.

En el caso particular del EBUS del Humboldt, un estudio reciente (Pietri et al., 2021), basado en la temperatura superficial del mar (SST) satelital de largo plazo, concluyó que las MHWs superficiales de larga vida, asociados con la variabilidad remota ecuatorial, afectan preferentemente el dominio costero al norte de los 15°S y que los eventos de larga duración han decrecido tanto en ocurrencia como en intensidad durante las 4 últimas décadas, cuando se consideran eventos El Niño. También, muestran que los eventos de vida corta, asociados con el relajamiento de los vientos, son más comunes en la porción sur del NHCS, y estos sí presentan una tendencia positiva en relación a su intensidad. Recientemente, Mogollón et al. (2023) mostraron la estructura tridimensional de las MHWs en el NHCS usando un modelo numérico. Los autores concluyeron que el estrés térmico está confinado en los primero 250 m de la columna de agua y que el debilitamiento de los vientos en combinación con la relajación de la pérdida de calor (debido a la componente latente de los flujos de calor) son factores preacondicionantes para el desgatillamiento de las MHWs.

Relacionado con el fenómeno El Niño, este de por sí puede ser considerado una MHW extrema de larga duración pero de baja frecuencia (Holbrook et al., 2020), con conocidos efectos adversos en el suministro de nutrientes, en las tasas de producción primaria y también en la productividad pesquera (Barber and Kogelschatz, 1990). Este tipo de MHWs han sido ampliamente estudiadas en el pasado (Colas et al., 2008; Echevin et al., 2014; Mogollón and Calil, 2017; Espinoza-Morriberón et al., 2017; Espinoza Morriberón et al., 2018; Mogollón, 2020). Sin embargo, menos atención se le ha dado a los eventos de calentamiento de corta duración (MHWs de vida corta) que podrían tener un impacto igual o más significativo que los ocurridos bajo condiciones ENSO. Por ejemplo, como lo ocurrido durante el llamado El Niño Costero durante el verano del 2017 en la costa norte del Perú (Echevin et al., 2018; Ledesma et al., 2021).

V

Metodología

Capitulo 5: Metodología

5.1 Modelo Hidrodinámico y Forzantes

Este estudio se basa en la configuración del modelo utilizado en el trabajo de Mogollón et al. (2023). El desempeño de la configuración del modelo y la simulación control en la región de estudio se validó exhaustivamente y se detalló en los apéndices e información complementaria del estudio mencionado (ver también Apéndice I). Para mayor claridad, se proporciona a continuación una descripción resumida de la configuración del modelo y los forzantes utilizados:

El modelo hidrodinámico utilizado fue el Coastal and Regional Ocean COmmunity model (ERA5 v1.1, proporcionado por `www.croco-ocean.org`), que cubre el área entre 70 y 96°W y desde 5°N hasta 22°S (Figura 2), con una resolución horizontal de 1/11° (aproximadamente 10 km). El modelo cuenta con 40 niveles sigma verticales. Los datos topográficos utilizados en el modelo se obtuvieron del Gráfico Batimétrico General de los Océanos (grilla GEBCO_2014) (Weatherall et al., 2015).

Los forzantes superficiales, que incluyen temperatura del aire, temperatura de la superficie del mar, precipitación total, radiación solar, radiación térmica, humedad específica y componentes de velocidad del viento, se prescribieron a partir del reanálisis atmosférico global ERA5 (Hersbach et al., 2018, 2020). ERA5 tiene una resolución espacial de 1/4°. Se aplicó una corrección analítica a los campos de viento de ERA para reproducir artificialmente la atenuación del viento costero. Más detalles sobre esta metodología es proporcionado en el Apéndice II.

Para las condiciones de frontera oceánicas, prescribimos temperatura, salinidad, altura de la superficie del mar y velocidades de corriente utilizando salidas diarias de una simulación hidrodinámica del océano global (PSY4QV3R1) producida por Mercator-Ocean (`www.mercator-ocean.fr`) a una resolución horizontal de 1/12°. Los datos se obtuvieron del Servicio de Monitoreo del Medio Ambiente Marino de Copernicus (CMEMS) y cubrieron el período desde 2008 hasta 2019. Antes de 2008, se utilizó la versión hindcast de la simulación de Mercator, conocida como GLORYS12V1, debido a la falta de disponibilidad de datos. La validación de la física del modelo se proporciona en el Apéndice I.

5.2 Dominios de Análisis

El dominio regional de análisis abarca un rango de latitud de 3 a 21°S y un rango de longitud de 70 a 93°W (Figura 2). Este límite geográfico proporciona una perspectiva amplia de las características de las MHW desde un punto de vista regional (etiquetado como *Regional domain*).

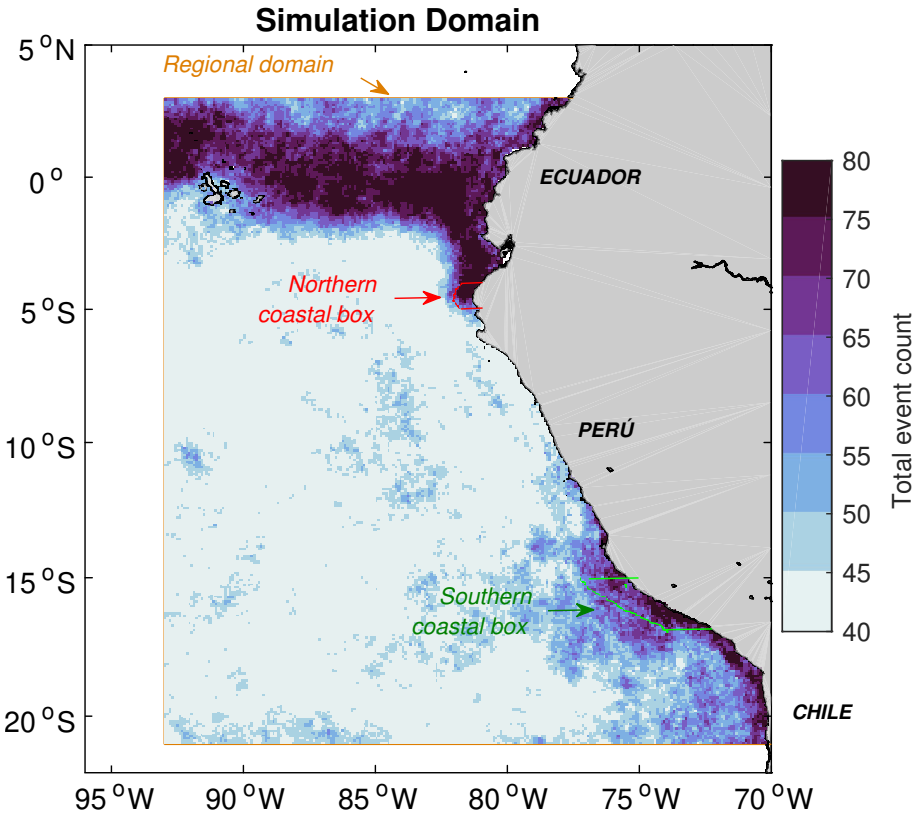

Figure 2: *Dominio de simulación, incluyendo las áreas de análisis consideradas en este estudio. El mapa de color denota el total de eventos MHWs detectados por pixel, derivados de data observacional de sensoramiento remoto (OSTIA).*

La Figura 2 muestra también dos regiones costeras donde el recuento de MHW es alto. La primera es una caja costera al norte, delimitada por la franja costera de 80 km que abarca de 4˚S a 5˚S de latitud (etiquetado como *Northern coastal box*). El enfoque en esta subregión más pequeña tuvo como objetivo proporcionar información detallada sobre la influencia de la variabilidad ecuatorial. Además, la Figura 2 resalta una caja costera del sur (etiquetado como *Southern coastal box*), definida por la franja costera de 200 km que abarca de 15˚S a 17˚S de latitud. Esta caja en particular se seleccionó para resaltar las diferencias contrastantes observadas en una región ubicada más al sur, donde también se detectaron un total de MHWs elevado.

5.3 Detección de Olas de Calor Marinas (MHWs)

Para mantener la coherencia, la definición de MHWs fue la misma que en Mogollón et al. (2023), basado en los criterios de Hobday et al. (2016) para definir las MHWs. Se estableció una climatología de referencia utilizando 20 años de datos de temperatura diaria (2000-2019). Las MHWs fueron identificadas con base a umbrales de temperatura (percentil 90) y una duración de al menos cinco días, considerándose como un solo evento concatenado las discontinuidades de menos de tres días. El lector debe referirse al Apéndice III donde se proporciona el script creado para la detección unidimensional.

Se emplearon varias métricas, incluyendo densidad, intensidad, duración y frecuencia, para caracterizar las MHWs. Estas medidas cuantitativas proporcionan un marco sólido para la comparación y facilitan una comprensión integral de las características de las MHWs. Específicamente, la métrica de “Densidad" corresponde al número total de eventos de MHWs a lo largo del período de dos décadas. La métrica de “Intensidad" mide la anomalía de temperatura en ˚C. La métrica de “Duración" representa la longitud promedio de tiempo, en días, durante la cual una región experimenta condiciones de MHWs, con un requisito mínimo de cinco días debido a la restricción de persistencia. La métrica de “Frecuencia" indica el número promedio de eventos de MHWs que ocurren anualmente. Además, se adoptó el esquema de categorización de MHWs basado en intensidad para cada punto en el espacio y el tiempo (Hobday et al., 2018). En el mencionado trabajo se propuso basar las categorías en múltiplos del valor representado por la diferencia local entre la media climatológica y el percentil 90 (el umbral utilizado para identificar las MHWs). Por lo tanto, las categorías son moderadas (1-2×), fuertes (2–3×), severas (3–4×) y extremas (> 4×).

Se debe tener en cuenta que la caracterización de las MHWs en este estudio se basa en una perspectiva euleriana. Esto significa que no se siguen los parches individuales de MHWs en el espacio y el tiempo (tracking), sino que se presentan las propiedades promedio de todos los eventos de MHWs en cada punto de la grilla. En general, estas métricas proporcionan información sobre la ocurrencia, la fuerza, la duración, la frecuencia y la severidad de los eventos de MHWs en la región de estudio.

5.4 Bases de Datos Adicionales

Las observaciones de la temperatura superficial del mar fueron obtenidas del producto Global SST & Sea Ice Analysis, L4 OSTIA proporcionado por CMEMS (Good et al., 2020). Este conjunto de datos reprocesado, denominado “OSTIA", integra datos in situ y de satélite para generar mapas diarios de SST libres de “huecos" a una resolución de 0.05˚. Para garantizar la consistencia con los resultados modelados, las observaciones fueron interpoladas a la resolución espacial de la grilla del modelo. Aquí, esta base de datos es considerada como la observación.

También se utilizó el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) (Quispe-Ccalluari et al., 2018), que es una herramienta valiosa para monitorear eventos de El Niño y La Niña en la costa de Perú. Captura el 87.7% de la variación total de las anomalías de la SST en el ecosistema de afloramiento peruano. El índice ITCP se calcula como un promedio móvil de 3 meses del primer componente principal normalizado de las anomalías de la SST en la zona costera. Debe persistir durante al menos tres meses consecutivos por encima o por debajo de ciertos umbrales para ser categorizado como un período cálido o frío. Por lo tanto, el ITCP tiene tres condiciones: frío (< −0.6), neutral (-0.6 a 0.4) y cálido (> 0.4).

5.5 Experimento de Sensibilidad

El experimento de sensibilidad implica la realización de 4 simulaciones, que difirieron únicamente en la frecuencia de actualización de los forzamientos atmosféricos y oceanográficos. Las descripciones detalladas de cada simulación se proporcionan en la Tabla 1.

Las simulaciones cubren un período de 27 años, desde 1993 hasta 2019. Sin embargo, los primeros siete años de cada simulación se designaron como período de ajuste (spin-up), lo que permite que el modelo alcance un estado en el que las corrientes simuladas y otras variables hidrodinámicas se alinien con la variabilidad sinóptica observada. Esto significa que el período de análisis se centra en las dos décadas más recientes, que abarcan desde 2000 hasta 2019. En todos los casos, inicializamos el modelo desde el mismo estado físico atmosférico y oceánico correspondiente al 1 de enero de 1993. Las salidas numéricas se promediaron y almacenaron diariamente.

Table 1: *Experimentos de Sensibilidad. El término HF se refiere a high-frequency (alta frecuencia) y el término LF se refiere a low-frequency (baja frecuencia).*

Experimento	**Frecuencia de actualización**		**Interpretación**
	Atmósfera	**Océano**	
HF	diario	diario	Simulación (control) de alta frecuencia. Captura la variabilidad sinóptica completa
HFatm_LFoce	diario	mensual	Principalmente forzado por la variabilidad atmosférica
LFatm_HFoce	mensual	diario	Principalmente forzado por la variabilidad oceánica
LF	mensual	mensual	Simulación con baja frecuencia atmosférica y oceánica, carente de variabilidad sinóptica

En cuanto a la frecuencia, las simulaciones difieren en función de si el forzamiento se actualiza mensual o diariamente. En el caso del forzamiento mensual, se calcula un promedio mensual a partir de los datos diarios disponibles. Este enfoque elimina la variabilidad diaria mientras conserva la variabilidad mensual durante toda la simulación. Es importante tener en cuenta que el campo de forzamiento mensual se somete a interpolación lineal a lo largo de los días entre los valores mensuales anteriores y posteriores. Por otro lado, las simulaciones con forzamiento diario mantienen la variación diaria, lo que permite la variabilidad sinóptica del forzamiento respectivo.

A partir de la Tabla 1, se asume que todas las MHW detectadas en el experimento etiquetado como “HF" deben coincidir con las observaciones derivadas de datos satelitales, ya que puede capturar toda la variabilidad sinóptica. Además, las MHW detectadas en el experimento etiquetado como “HFatm_LFoce" deben atribuirse principalmente a per-

turbaciones atmosféricas, ya que este experimento está forzado por una atmósfera de alta frecuencia y un océano de baja frecuencia. De manera similar, las MHW detectadas en el experimento etiquetado como “LFatm_HFoce" se atribuyen principalmente a perturbaciones oceánicas, ya que este experimento está forzado por una atmósfera de baja frecuencia y un océano de alta frecuencia. Por último, se espera que las MHW obtenidas en el experimento etiquetado como “LF" estén asociadas con variabilidad intraestacional/interanual acoplada, probablemente relacionada con MHW persistentes, porque el modelo fue forzado por una atmósfera y un océano de baja frecuencia.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}}$$

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{n}$$

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i|}{n}$$

$$PB = |\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i}.100\%| \quad (1)$$

$$RI = \exp\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(log\frac{O_i}{P_i})^2}$$

$$MEF = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2)}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}$$

5.6 Métricas Estadísticas

Se emplearon una serie de métricas cuantitativas (ver ecuaciones 1) para comparar el rendimiento del modelo (P) en replicar las características de las MHWs observadas (O). Estas métricas estadísticas comprenden el coeficiente de correlación (r), el error promedio o sesgo (AE), el error absoluto promedio (AAE), el porcentaje de sesgo (PB), el índice de confiabilidad (RI) y la eficiencia del modelado (MEF).

El coeficiente de correlación (r) evalúa en qué medida los valores simulados y observados exhiben una variación mutua. Idealmente, este coeficiente debería acercarse a la unidad, lo que significa una correspondencia sólida entre los dos conjuntos de datos. Mientras tanto, las medidas de *AE* y *AAE* cuantifican las magnitudes de las discrepancias entre los valores modelados y observados, ofreciendo colectivamente información sobre la precisión de las predicciones del modelo. Los valores que se acercan a cero indican una alineación estrecha entre la salida del modelo y las observaciones. *PB* sirve como un indicador de rendimiento, caracterizando el sesgo del modelo. Por otro lado, *RI* proporciona una cuantificación del factor promedio por el cual los valores modelados difieren de los datos observados. Una predicción favorable del modelo resulta en valores de *RI* que se acercan a la unidad, indicando una correspondencia confiable con las observaciones. *MEF* mide la capacidad del modelo para predecir una variable en relación con el promedio

de los datos observados. Un valor que se aproxima a 1 significa un acuerdo sólido entre los resultados del modelo y las observaciones. Para una comprensión más completa de estos parámetros, los lectores deben consultar Maréchal (2004); Stow et al. (2009).

Cuando se evalúa el rendimiento del modelo utilizando la métrica *MEF*, un valor mayor que 0.65 indica una predicción excelente, mientras que los valores en el rango de 0.50 a 0.65 se consideran muy buenos. Las predicciones que caen en el rango de 0.20 a 0.50 se clasifican como buenas, mientras que los valores menores que 0.20 sugieren predicciones pobres. Del mismo modo, la métrica *PB* proporciona una evaluación del rendimiento del modelo según los siguientes criterios: valores por debajo de 10 son excelentes, 10 a 20 se consideran muy buenos, 20 a 40 se consideran buenos y los valores que superan los 40 indican un rendimiento del modelo deficiente.

5.7 Análisis del Balance de Calor

Para obtener una comprensión de los principales impulsores físicos detrás de la generación y declive de las MHWs, se llevó a cabo un análisis del presupuesto de temperatura (o balance de calor) para cada experimento de sensibilidad detallado en la sección 5.5. Este enfoque también fue utilizado en Mogollón et al. (2023), aunque desde una metodología basada en composiciones. El objetivo actual es diferenciar entre las MHWs originadas en diferentes ubicaciones (norte y sur) y duraciones (ver sección 5.8) en cada una de las simulaciones del experimento de sensibilidad. Esto contrasta con el enfoque anterior de promediar todos los eventos detectados en una sola simulación de alta frecuencia.

En resumen, el modelo analiza la evolución de varios términos en la ecuación de temperatura tridimensional para comprender los factores que influyen en los cambios de temperatura. Estos términos incluyen advección, flujos de calor y mezcla, que se promedian verticalmente sobre la capa de mezcla para inferir la tendencia de la temperatura. La ecuación 2 ilustra este cálculo, donde T representa la temperatura potencial, y u, v, y w denotan las componentes de la corriente oceánica. “Advection" comprende la advección horizontal ($hadv$) y vertical ($vadv$). El término “Heat fluxes" indica el almacenamiento de flujo de calor en la capa de mezcla, abarcando componentes turbulentos y radiativos como los flujos de calor solar (Q^*) y no solar (Q_s). “Entrainment" combina el flujo de difusión vertical y el entrainment/detrainment en la base de la capa de mezcla. El modelo calcula estos términos diariamente, con la difusión vertical casi despreciable en comparación con el entrainment, y la mezcla horizontal es despreciada debido a su menor magnitud (no se muestra).

Examinamos los términos del balance de calor de la capa de mezcla durante 4 días antes del inicio y después del final de cada evento de MHW. Este período de 4 días fue elegido en función de análisis previos (no mostrados) que indicaron la consistencia general de signo de cada término del presupuesto. Específicamente, cada término debe exhibir

un signo consistentemente positivo o negativo, y la suma de todos los términos (es decir, la tasa de cambio de la SST) debe ser positiva durante el inicio de la MHW (indicando calentamiento) y negativa durante el declive de la MHW (indicando enfriamiento). Este enfoque facilita una comparación entre las condiciones pre y post-MHW, ofreciendo valiosa información sobre los factores que influyen en la generación y cese de las MHWs.

$$\frac{\partial \mathrm{SST}}{\partial t} = Advection + Heatflux + Entrainment$$

$$Advection = \underbrace{-\langle u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\rangle}_{\mathrm{hadv}} - \underbrace{\langle w\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial t}\rangle}_{\mathrm{vadv}}$$

$$Heatflux = \underbrace{\frac{Q^* + Q_s[1 - f(z)|_{z=-h}]}{\rho_0 C_p h}}_{\text{heat flux storage}} \qquad (2)$$

$$Entrainment = \underbrace{-\frac{k_z \frac{\partial T}{\partial t}|_{z=-h}}{h}}_{\text{vertical diffusion}} - \underbrace{\frac{1}{h}\frac{\partial h[\mathrm{SST} - \mathrm{T}|_{z=-\mathrm{h}}]}{\partial t}}_{\text{entrainment/detrainment}}$$

Para evaluar la contribución relativa de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en la generación y terminación de las MHWs, se llevó a cabo un análisis del balance de calor para cada una de las simulaciones de sensibilidad. Se compararon la influencia de los procesos advectivos y los flujos de calor en la dinámica de las MHWs. No se consideraron los términos de “Entrainment" en los análisis, ya que estos son siempre negativos (indicando enfriamiento) y tienden a contrarrestar las contribuciones de la advección y los flujos de calor, que pueden cambiar de signo y son los principales impulsores de la tendencia de la SST.

5.8 Rangos de Duración de las MHWs

Para el análisis del balance de calor, se han establecido tres ventanas de tiempo para categorizar las MHWs en función de su duración. Estas categorías son las siguientes:

i) Vida corta (Short-lived MHWs): Se definen como eventos breves en una escala diaria que tienen una duración de entre 5 y 10 días.

ii) Transitorios (Transitional MHWs): Estos eventos tienen una duración de semanas o meses. Cuantitativamente, duran más de 10 días pero menos de 2 meses.

iii) Persistentes (Persistent MHWs): Se definen como eventos de larga duración en escalas interestacionales, que duran más de 2 meses.

Análisis previos indicaron que las conclusiones derivadas de esta categorización no cambian significativamente si se utilizan rangos de duración más específicos. Además, consideramos que esta categorización temporal nos permite describir la fenomenología de

manera efectiva sin aumentar innecesariamente la complejidad del análisis.

VI

Resultados y Discusiones

6.1 MHWs Regionales

Los eventos de MHW aparecen comunmente en la banda ecuatorial y a lo largo de la región costera peruana, como se muestra en la Figura 3a. Específicamente, la parte norte del área de estudio y la región costera sur, aproximadamente alrededor de 15°S, exhiben una notable concentración de eventos. Se observa una disminución significativa en el número total de eventos de MHW cuando se degrada la frecuencia de los forzamientos (Figuras 3c-e). Las simulaciones forzadas con datos atmosféricos de alta frecuencia (por ejemplo, HF y HFatm_LFoce) se asemejan estrechamente al patrón de densidad de MHW observado. En contraste, las simulaciones forzadas con datos atmosféricos de baja frecuencia (como LFatm_HFoce y LF) subestiman significativamente la densidad de MHW. Específicamente, las simulaciones HF y HFatm_LFoce (Figuras 3b y 3c, respectivamente) reproducen el patrón espacial de densidad de MHW observado, como lo demuestra su alta correlación (r = 0.73) y AAE relativamente bajo en comparación con otras simulaciones (consulte también la Tabla 2). Ambas simulaciones son calificadas como predicciones “muy buenas" según la métrica PB. En contraste, la simulación LFatm_HFoce (Figura 3d) no logra capturar la distribución espacial observada de la densidad de MHW, lo que resulta en AAE significativamente más altos en comparación con las simulaciones anteriores. La densidad de MHW modelada de LFatm_HFoce se considera “buena". De manera similar, la simulación LF (Figura 3e) muestra desviaciones significativas de las observaciones y las simulaciones anteriores (por ejemplo, HF o HFatm_LFoce). La métrica PB indica que la densidad de MHW de LF se califica como “pobre". Para una evaluación cuantitativa completa, consulte la Tabla 2 en más detalle.

La intensidad media de las MHWs muestra un prominente gradiente hacia el noroeste, con intensidades más bajas en la región sur y mayores hacia el ecuador, como se muestra en la Figura 3f. Las simulaciones HF y HFatm_LFoce reproducen de cerca la distribución observada de la intensidad de las MHWs, como se muestra en las Figuras 3g y 3h, respectivamente. Ambas simulaciones muestran una alta correlación con las observaciones ($r \sim 0.92$) y son calificadas como predicciones “excelentes" según los valores de PB (Tabla 2). Sin embargo, en la simulación HFatm_LFoce, la intensidad de las MHWs es ligeramente menor que en la simulación HF. Parece que hay una disminución en la intensidad promedio a medida que se degrada la frecuencia de los forzantes. En consecuencia, cuando se utilizan forzantes de baja frecuencia para impulsar el modelo, la intensidad promediada de las MHWs tiende a ser menor en comparación con las simulaciones con forzantes de mayor frecuencia o incluso con solo la atmósfera de alta frecuencia. Como tal, las simulaciones LFatm_HFoce y LF subestiman la intensidad de las MHWs en comparación con las observaciones, como se ilustra en las Figuras 3i y 3j. A pesar de que ambas simulaciones muestran un sesgo frío, aún se consideran soluciones “muy buenas".

Los eventos MHW más largos se observan principalmente en las región central y

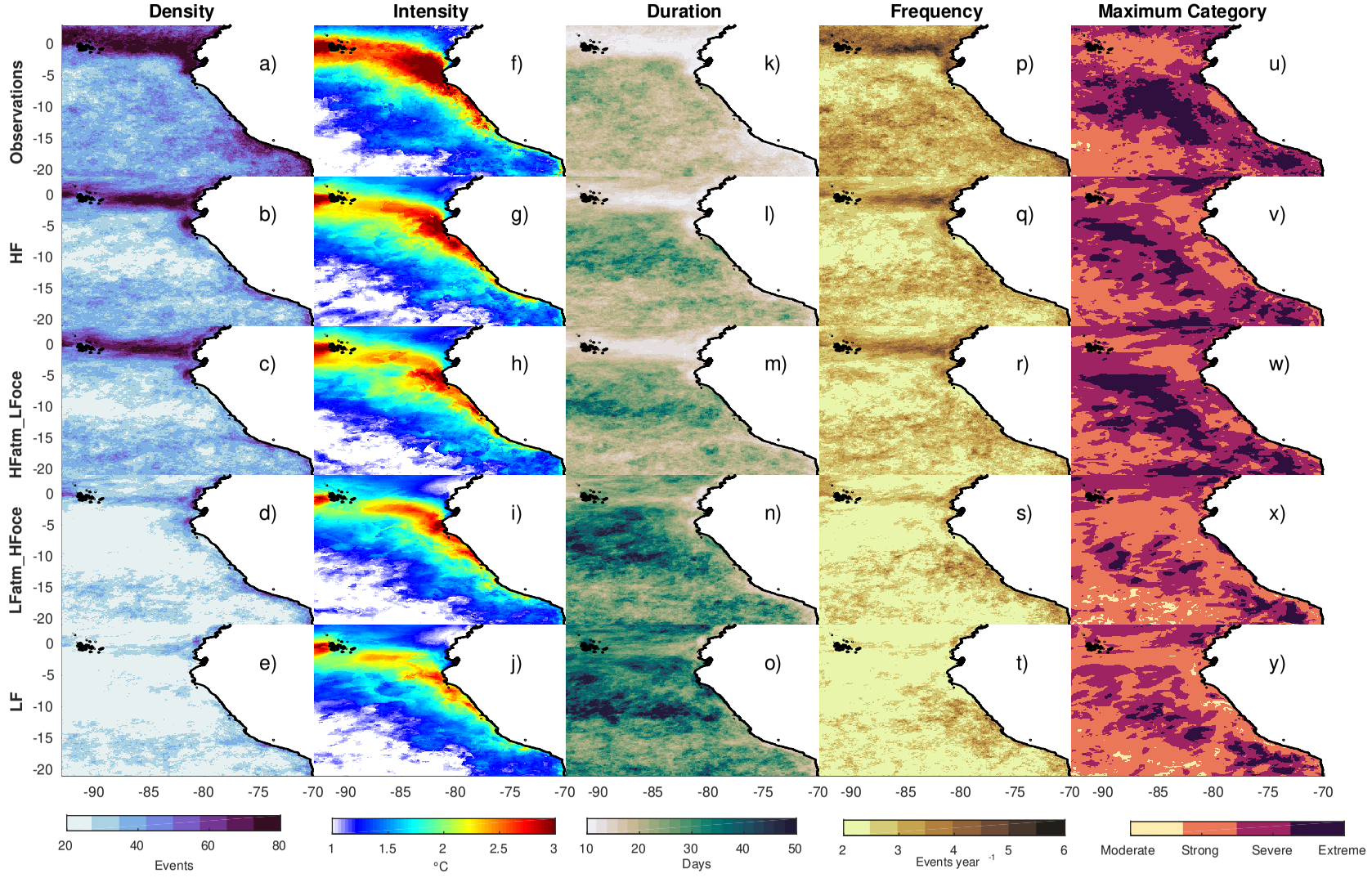

Figure 3: *Características promedio de las MHWs. La primera columna representa la densidad de las MHWs, seguida de la intensidad, duración, frecuencia y categoría máxima en las columnas dos a cinco, respectivamente. La primera fila corresponde a observaciones de alta frecuencia (OSTIA), mientras que las filas dos a cinco muestran los resultados para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente.*

Table 2: *Métricas estadísticas calculadas sobre el dominio regional en la Figura 3 incluyen la desviación estándar (σ), el coeficiente de correlación (r), el error promedio (AE), el error absoluto promedio (AAE), el porcentaje de sesgo (PB) y el índice de confiabilidad (RI). Para una explicación detallada, consulte la sección 5.6*

N=68580	DENSIDAD (σ_{obs} = 13,3 eventos)				INTENSIDAD (σ_{obs} = 0,57 °C)				DURACIÓN (σ_{obs} = 3,9 días)				FRECUENCIA (σ_{obs} = 0.59 Eventos año $^{-1}$)				CATEGORIA MÁXIMA (σ_{obs} = 0,73)				
	HF	HFatm_LFoce	LFatm_HFoce	LF	HF	HFatm_LFoce	LFatm_HFoce	LF	HF	HFatm_LFoce	LFatm_HFoce	LF	HF	HFatm_LFoce	LFatm_HFoce	LF	HF	HFatm_LFoce	LFatm_HFoce	LF	
σ_{mod}	11.7	11.3	7.64	5.99	0.50	0.49	0.45	0.43	5.05	5.36	7.35	7.85	0.51	0.49	0.48	0.46	0.65	0.68	0.65	0.65	
r	0.73	0.73	0.59	0.36	0.92	0.91	0.91	0.90	0.58	0.57	0.52	0.37	0.47	0.49	0.35	0.16	0.39	0.44	0.31	0.37	
AE	-7.90	-8.69	-18.3	-21.1	-0.06	-0.08	-0.18	-0.21	3.28	3.68	10.7	13.6	-0.39	-0.42	-0.74	-0.91	10-3	0.04	-0.41	-0.39	
AAE	6.67	6.96	12.6	14.4	0.12	0.13	0.15	0.17	2.83	3.06	7.39	9.36	0.38	0.38	0.55	0.65	0.36	0.34	0.45	0.41	
PB	17.2	18.9	39.9	45.9	3.41	4.86	10.7	12.7	1.3	20.6	59.9	76.2	12.1	13.2	23.2	28.3	0.05	1.26	14.4	13.6	
RI	1.11	1.12	1.23	1.27	1.05	1.05	1.06	1.07	1.10	1.10	1.20	1.25	1.09	1.09	1.13	1.16	1.10	1.10	1.13	1.13	

oceánica, mientras que los eventos más cortos son más comunes dentro de la banda ecuatorial, como se muestra en la Figura 3k. La duración promedio de las MHWs aumenta a medida que la frecuencia de los forzantes disminuye. Esto significa que el patrón de duración está influenciado por una mayor proporción de eventos más largos cuando se utilizan forzantes de baja frecuencia para forzar el modelo o cuando el modelo es principalmente forzado con una atmósfera de baja frecuencia, lo que resulta en una duración promedio de MHW más larga. Según el PB, la simulación HF (Figuras 3l) se considera una solución “muy buena". Además, la simulación HFatm_LFoce (Figuras 3m) se considera una solución “buena". Por otro lado, las simulaciones LFatm_HFoce (Figuras 3n) y LF (Figuras 3o) se califican como soluciones “pobres" (Tabla 2).

Además, cuando el modelo se ve forzado por forzamientos de alta frecuencia (Figura 3q) o solo por una atmósfera de alta frecuencia (Figura 3r), el modelo captura con éxito la frecuencia anual observada de MHW (Figura 3p). En contraste, cuando la variabilidad atmosférica sinóptica se elimina, como en LFatm_HFoce y LF (Figuras 3s,t, respectivamente), se produce una disminución significativa en el recuento anual de eventos MHW. De hecho, las simulaciones LFatm_HFoce y LF se califican como soluciones “pobres".

En las simulaciones HF y HFatm_LFoce (Figuras 3v y 3w, respectivamente), la categoría máxima de MHW se ajusta estrechamente al patrón observado (Figura 3u). Además, ambas son consideradas predicciones del modelo “excelentes". Sin embargo, las simulaciones LFatm_HFoce y LF (Figuras 3x y 3y, respectivamente) carecen de eventos de categoría extrema y muestran parches dispersos de severidad moderada de MHW en la región sur oceánica y a lo largo del área costera central, lo cual no es consistente con las observaciones.

6.2 MHWs Costeros

En esta sección, se analizan las características de las MHWs detectadas en dos regiones costeras, una al norte y otra al sur, como se muestra en la sección 5.2 y en la Figura 2.

6.2.1 Región Costera Norte

A continuación, se proporciona un compilado ilustrativo y detallado de todas las MHWs detectadas la región costera norte, ordenadas de forma cronológica para los experimentos HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce, LF en Figuras 4, 5, 6, 7, respectivamente.

La Figura 8 muestra la evolución temporal de las anomalías de temperatura asociadas a las MHWs detectadas en la región costera del norte. Según las observaciones, se detectaron 70 eventos, de los cuales 41 son de vida corta, 27 son de vida transitoria y

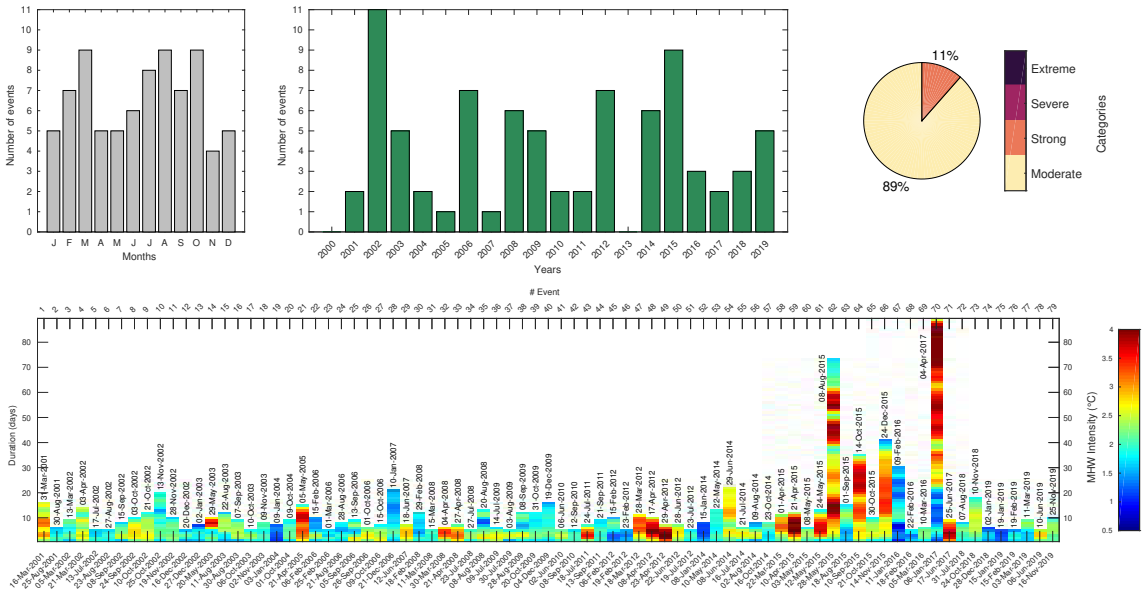

Figure 4: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación HF. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 941). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

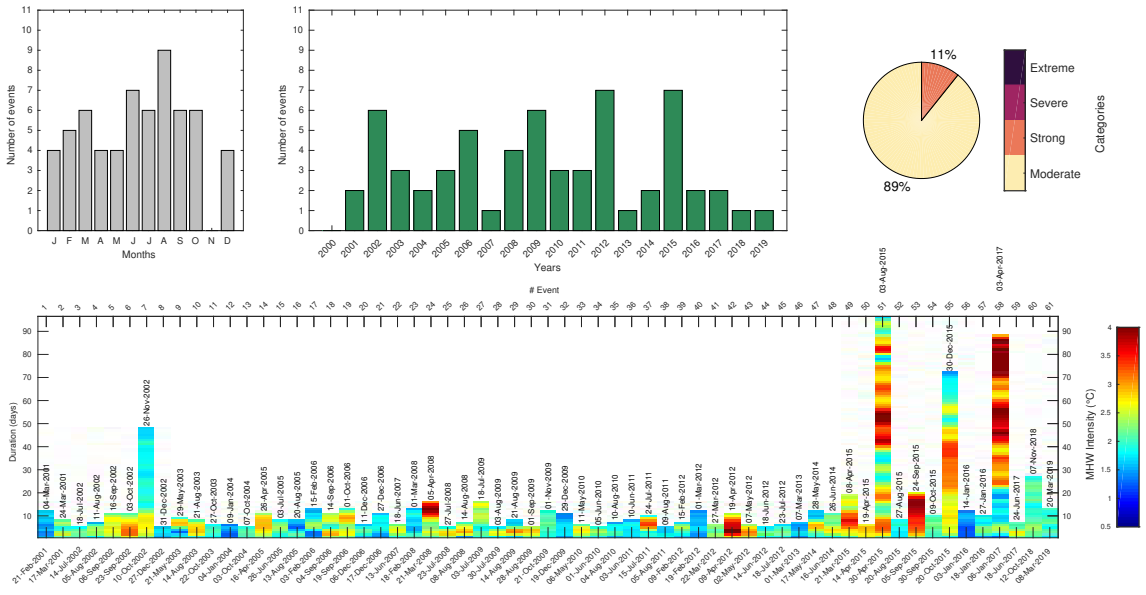

Figure 5: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación HFatm_LFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 838). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

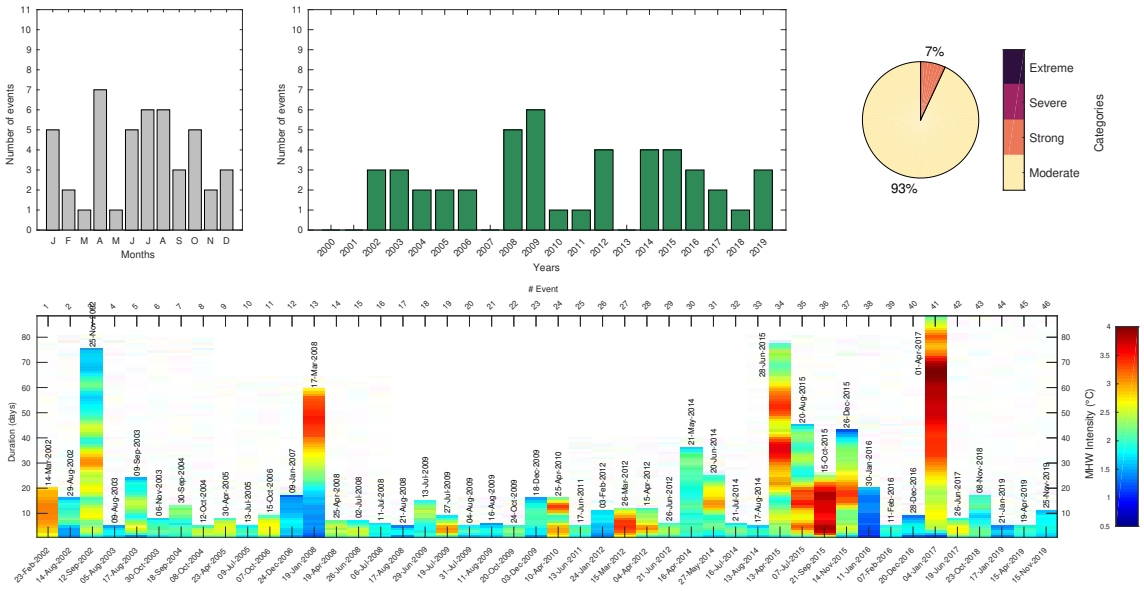

Figure 6: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 779). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

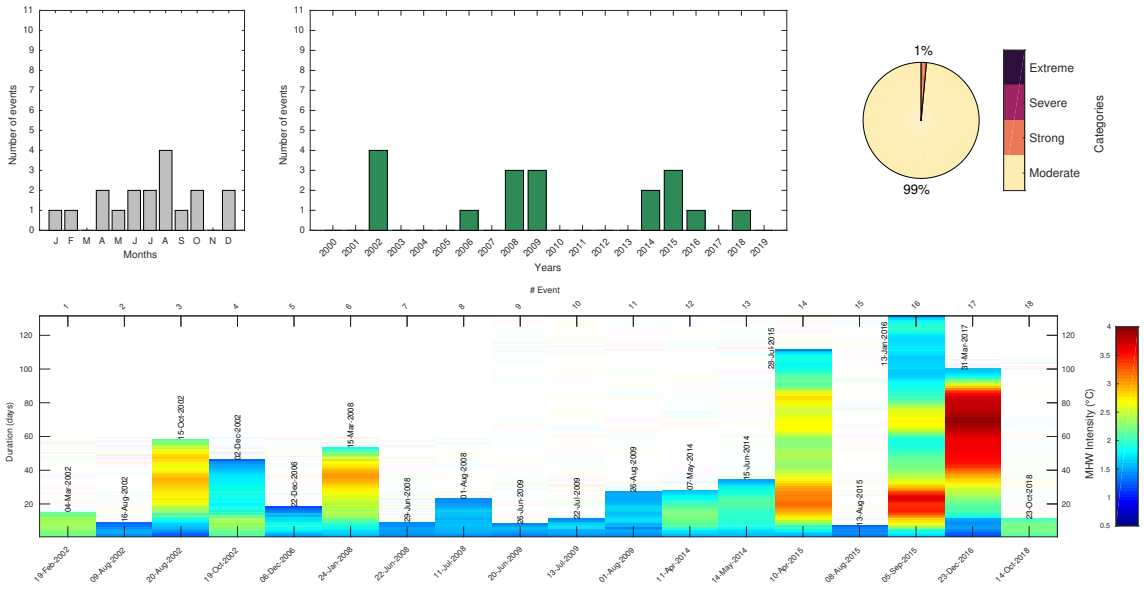

Figure 7: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera norte para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 682). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

2 eventos tienen una duración persistente. En la simulación HF, se detectaron en total 79 eventos (ver también Figura 4), un número cercano a lo observado. Esta aparente discrepancia se debe a la detección de 5 eventos más que son de corta duración (5 a 10 días) y 4 eventos más de duración transitoria (10-60 días). Por otro lado, en la simulación HFatm_LFoce el número total de eventos detectados se redujo a 61 (ver también Figura 5), principalmente debido a una disminución en los eventos de vida corta.

La intensidad de las MHWs en las simulaciones HF y HFatm_LFoce (Figura 8a,b) coincide estrechamente con el patrón observado, representado por la línea gris. Ambas simulaciones (σ_{HF} = 0.75°C y σ_{HFatm_LFoce} = 0.68°C, respectivamente) capturan bien la amplitud de las intensidades observadas (σ_{obs} = 0.81°C). Las simulaciones HF y HFatm_LFoce muestran una correlación positiva ($r \sim 0.65$) con las observaciones y exhiben un pequeño sesgo frío (AE = −0.18°C y -0.23°C, respectivamente). La eficiencia del modelado (MEF = 0.5 y 0.39) califica a HF y HFatm_LFoce como soluciones “muy buenas" y “buenas", respectivamente.

Cuando el modelo es forzado con datos atmosféricos de baja frecuencia pero los datos oceánicos de alta frecuencia, es decir, LFatm_HFoce, las intensidades modeladas de las MHW no se alinean perfectamente con las observaciones (Figura 8c). Las métricas estadísticas revelan una amplitud de oscilación un poco más reducida (σ_{LFatm_HFoce} = 0.64°C), una correlación moderada (r = 0.53) y un sesgo frío más pronunciado (AE = −0.27°C) en comparación con las simulaciones anteriores. Respecto al número de MHWs, la simulación LFatm_HFoce reproduce en total solo 46 eventos (ver también Figura 6) de los 70 observados, debido principalmente a una disminución de los eventos cortos y transitorios.

Cuando el modelo es forzado con datos atmosféricos y oceánicos de baja frecuencia, es decir, LF en la Figura 8d, la correlación disminuye (r = 0.4) y la desviación estándar del modelo tiende a disminuir ligeramente (σ_{LF} = 0.63°C). Es evidente que las intensidades de las MHWs de la simulación LF exhiben un mayor sesgo frío (AE = −0.48°C) cuando se comparan con las simulaciones que sí incluyen la variabilidad sinóptica atmosférica, como HF o HFatm_LFoce. Respecto al número de MHWs, la simulación LF reproduce en total solo 18 eventos (ver también Figura 7) de los 70 observados, debido principalmente a una disminución abrupta de los eventos cortos (4 eventos) y transitorios (11 eventos).

A lo largo del período analizado, la ocurrencia de MHWs muestra una correlación positiva con la fase cálida de ENSO, El Niño, como se indica en la Figura 8e. En general, se encontró que la presencia de períodos de El Niño potencia la ocurrencia de MHWs con diferentes duraciones, que van desde eventos de corta vida hasta eventos persistentes que abarcan varios meses. Por ejemplo, las MHW ocurridas durante los episodios de El Niño, como en 2002-2003, mediados de 2006 hasta principios de 2007, mediados de 2009 hasta principios de 2010, mediados de 2012, mediados de 2014, 2015-2016, principios del 2017 y transición 2018-2019. Esto está en concordancia con lo demostrado por Mogollón et al. (2023), donde se muestra que El Niño actúa como un importante

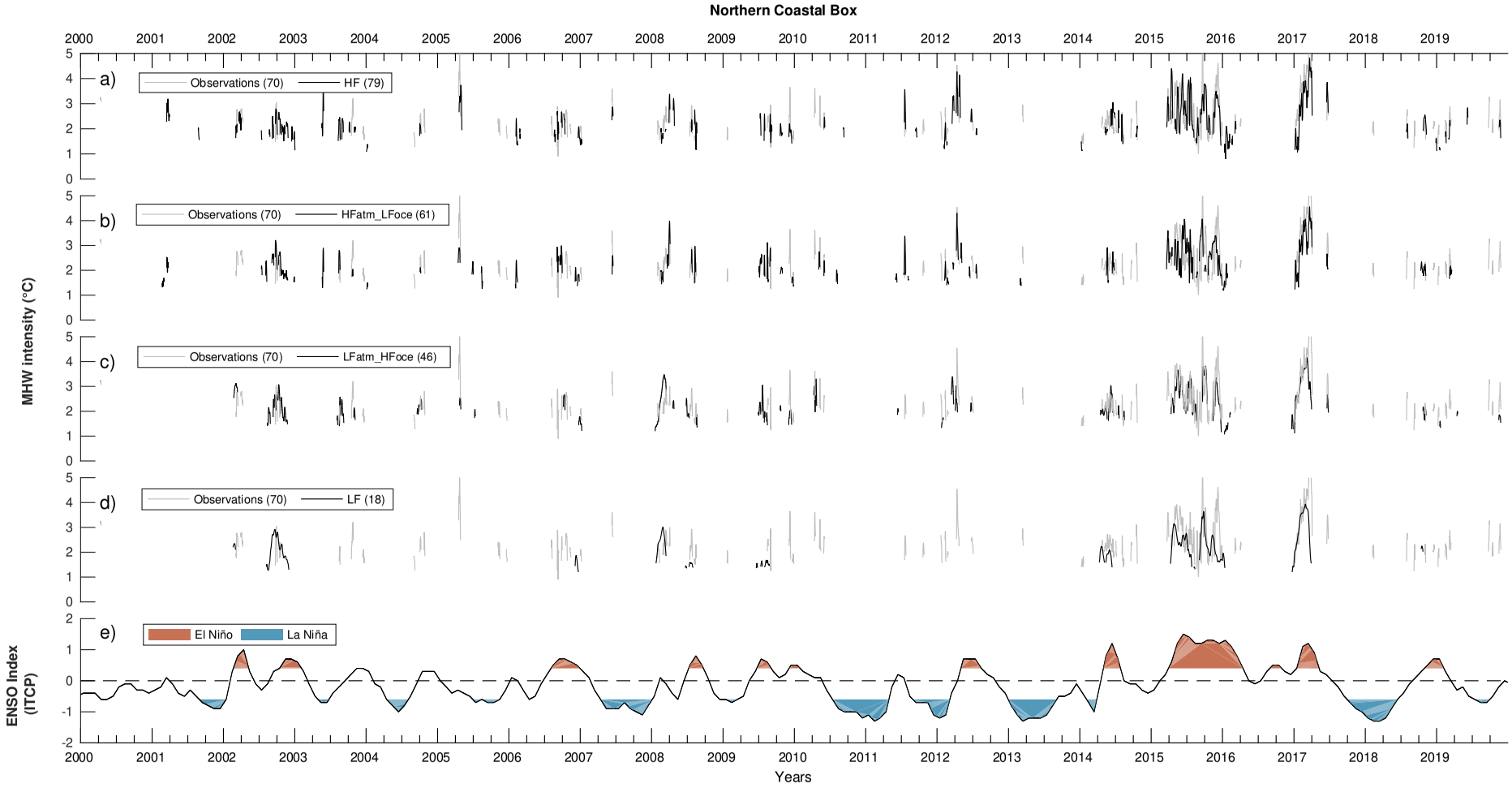

Figure 8: *Series de tiempo que representan la intensidad de las MHW detectadas en la región costera norte, entre las observaciones (OSTIA) y las salidas del modelo para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente (paneles a-d). Como referencia, la línea gris sólida representa las observaciones en los paneles a-d. El panel e muestra el índice ENSO (ITCP). Los números entre paréntesis mostrados en las leyendas denotan el número total de eventos detectados en cada simulación.*

factor precondicionante para la generación y evolución de varios MHWs con diferentes duraciones. Sin embargo, es importante destacar también que existen eventos cortos que ocurren durante los períodos fríos de ENSO, como los detectados durante el año 2005 hasta mediados de 2006 o durante mediados de 2017 hasta mediados de 2018.

En el dominio norte, los MHWs están fuertemente influenciados por la variabilidad ecuatorial y la señal asociada de ENSO, lo que resulta en fluctuaciones más pronunciadas en la intensidad, tal como se aprecia en las Figuras 8a,b. Sin embargo, estas fluctuaciones se ven bastante alisadas en las simulaciones que no incorporan la variabilidad sinóptica atmosférica, como es el caso de LFatm_HFoce y HF (Figuras 8c,d, respectivamente).

6.2.2 Región Costera Sur

A continuación, se proporciona un compilado ilustrativo y detallado de todas las MHWs detectadas la región costera sur, ordenadas de forma cronológica para los experimentos HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce, LF en Figuras 9, 10, 11, 12, respectivamente.

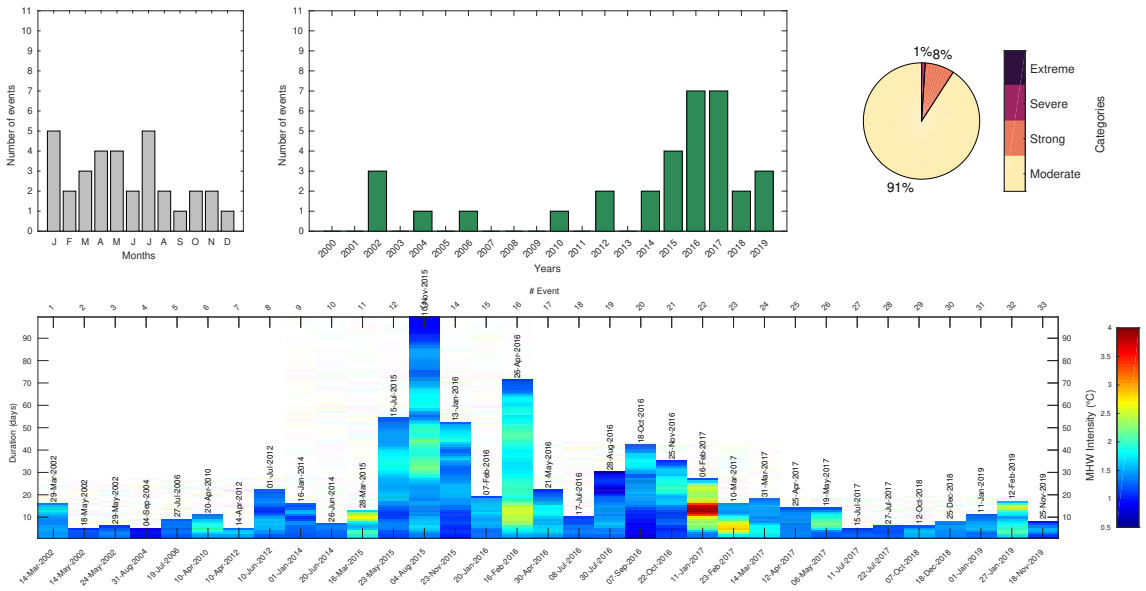

Figure 9: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación HF. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 699). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

Similar al análisis anterior, la Figura 13 muestra la evolución temporal de las anomalías de temperatura asociadas a las MHWs detectadas en la región costera del sur. Según las observaciones, se detectaron 62 eventos, de los cuales 34 son de vida corta y 28 son de vida transitoria. En la simulación HF, se detectaron en total 33 eventos (ver también Figura 9), casi la mitad de lo observado. Esta discrepancia se debe principalmente a la

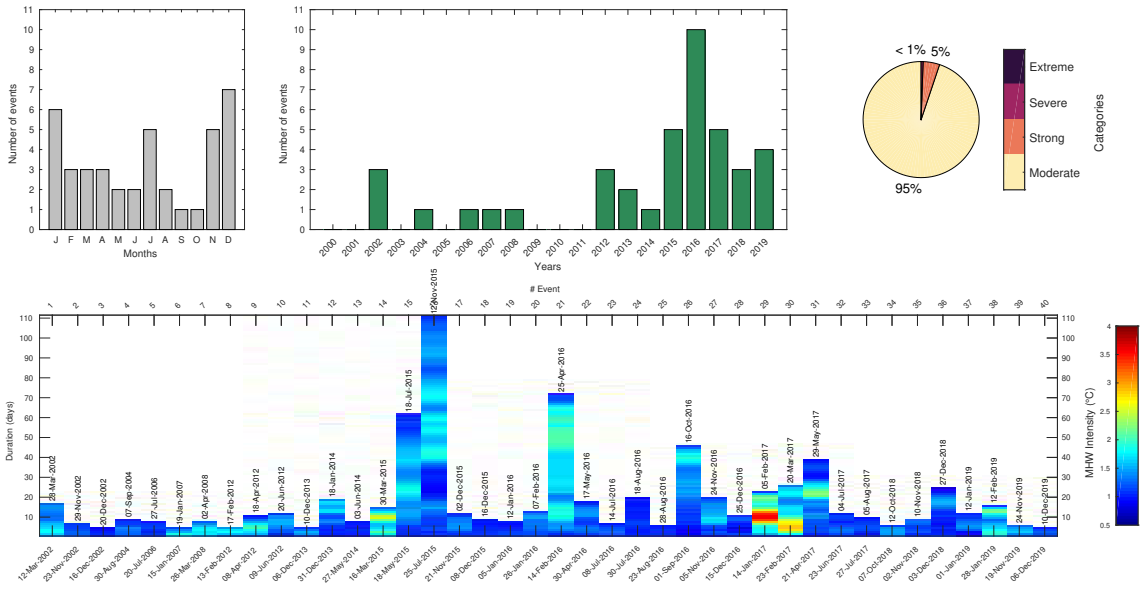

Figure 10: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación HFatm_LFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 738). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

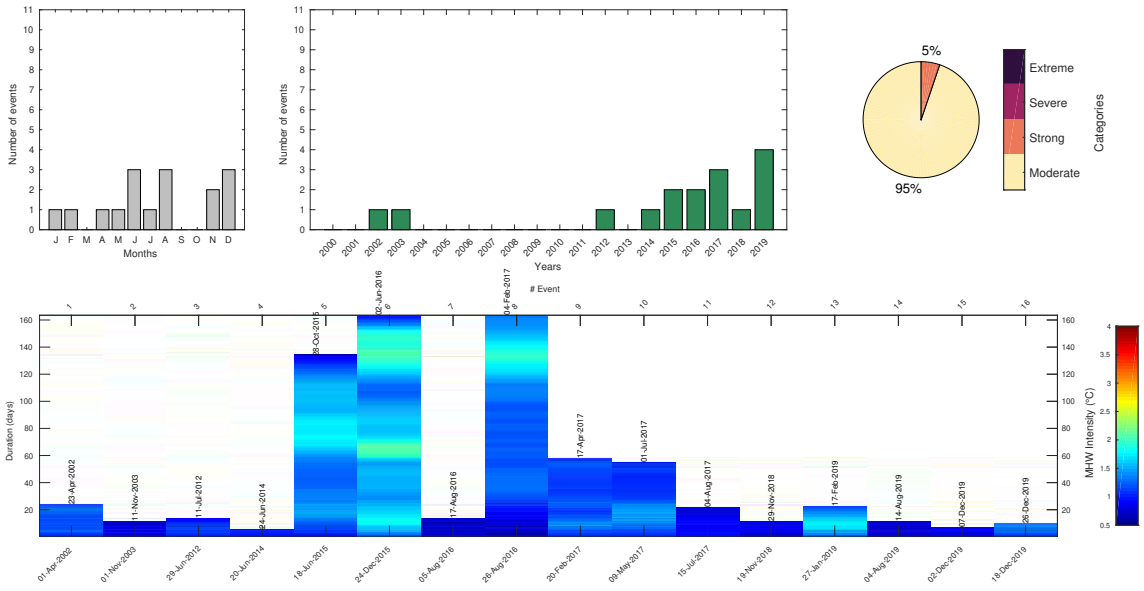

Figure 11: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 714). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

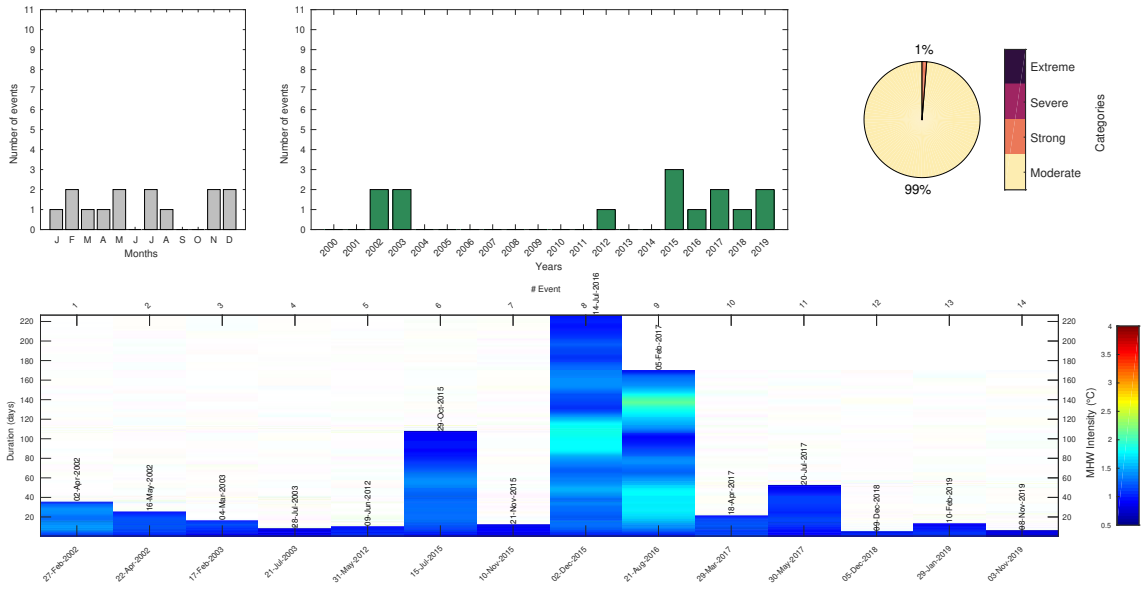

Figure 12: *Cronología de las MHWs detectadas en la región costera sur para la simulación LFatm_HFoce. Los paneles superiores muestran la distribución mensual e interanual del número de MHWs. El diagrama de pie muestra el porcentaje de días que la región estuvo bajo condición MHW clasificada por categorias (días totales = 705). Los histogramas del panel inferior representan la evolución de la intensidad de las MHWs (barra de colores) junto con su duración (eje y). El eje x superior indica el recuento de eventos, y las fechas de inicio y fin están marcadas en los extremos de cada evento.*

detección de muchos eventos de corta duración (5 a 10 días) en el producto observacional que no han sido detectados en las simulaciones, tal como se aprecia en Figura 13a. En el caso de la simulación HFatm_LFoce, el número total de eventos detectados aumentó a 40 (ver también Figura 10), principalmente debido a un aumento en la detección de eventos de vida corta.

Al igual que lo encontrado para la región costera norte, la intensidad de las MHWs en las simulaciones HF y HFatm_LFoce (Figura 13a,b) está altamente correlacionada con las observaciones ($r \sim 0.7$). Ambas simulaciones ($\sigma_{HF} = 0.40°C$ y $\sigma_{HFatm_LFoce} = 0.38°C$, respectivamente) capturan bien la amplitud de la intensidad MHW observada ($\sigma_{obs} = 0.46°C$). Las simulación HF exhibe un pequeño sesgo cálido ($AE = 0.15°C$), mientras que la simulación HFatm_LFoce posee un sesgo casi nulo ($AE = -0.01°C$). La eficiencia del modelado califica a HF como una solución “muy buena" ($MEF = 0.56$), mientras que la simulación HFatm_LFoce es calificada como “excelente" ($MEF = 0.67$).

En el caso de LFatm_HFoce, las intensidades modeladas no reproducen realísticamente las observaciones (Figura 13c). La amplitud de oscilación de las anomalías térmicas modeladas son más reducidas ($\sigma_{LFatm_HFoce} = 0.31°C$) cuando comparada con las observaciones ($\sigma_{obs} = 0.46°C$). Además, LFatm_HFoce muestra una correlación pobre ($r = 0.21$). Respecto al número de MHWs, la simulación LFatm_HFoce reproduce en total solo 16 eventos (ver también Figura 11) de los 62 observados, debido principalmente a una disminución abrupta de los eventos cortos y transitorios, en ese orden de importan-

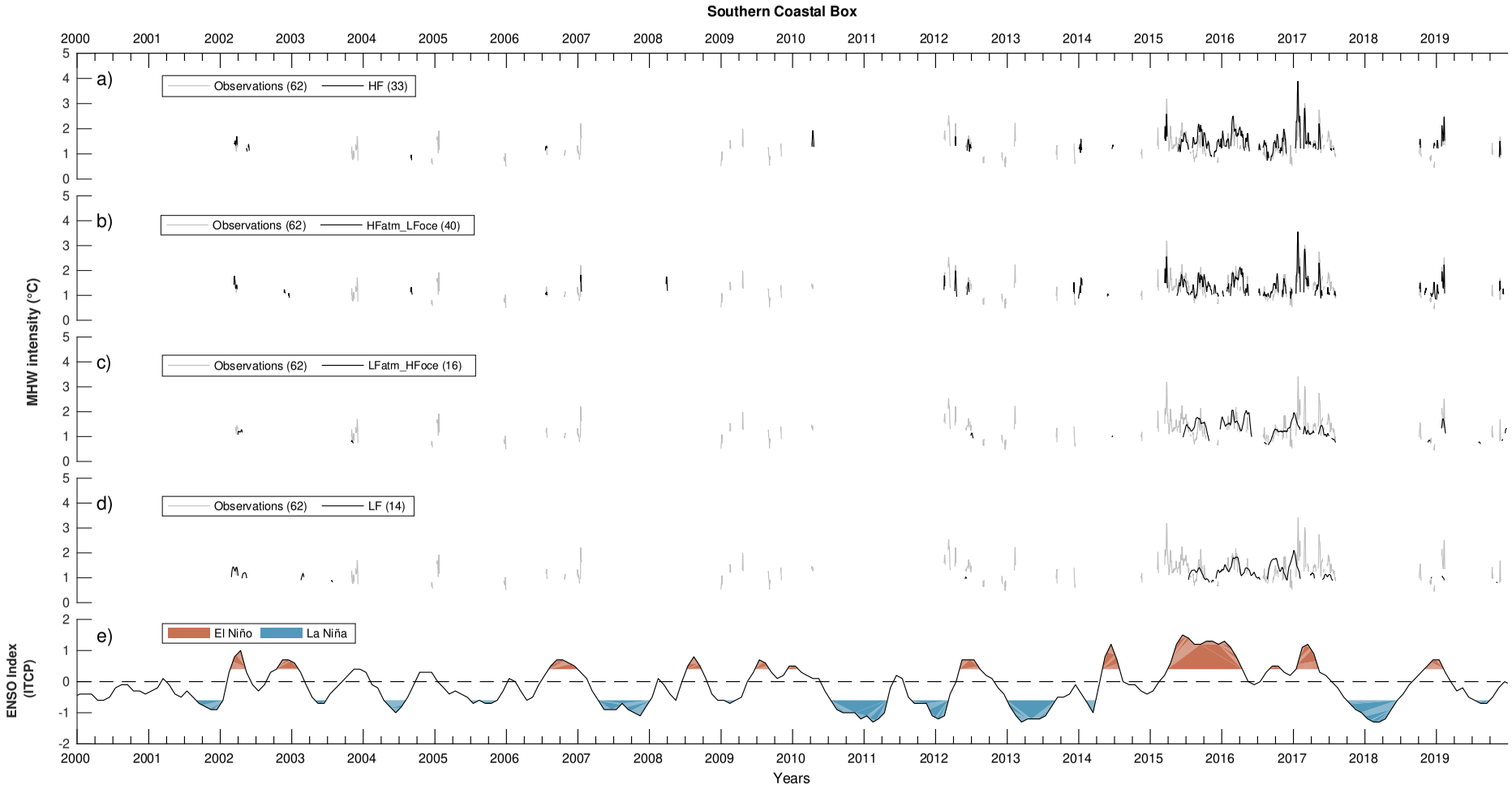

Figure 13: *Series de tiempo que representan la intensidad de las MHW detectadas en la región costera del sur, entre las observaciones (OSTIA) y las salidas del modelo para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, respectivamente (paneles a-d). Como referencia, la línea gris sólida representa las observaciones en los paneles a-d. El panel e muestra el índice ENSO (ITCP). Los números entre paréntesis mostrados en las leyendas denotan el número total de eventos detectados en cada simulación.*

cia.

Por otro lado, cuando el modelo es forzado con datos atmosféricos y oceánicos de baja frecuencia, es decir, LF en la Figura 13d, la correlación es prácticamente nula y la desviación estándar del modelo disminuye (σ_{LF} = 0.26°C). Respecto al número de MHWs, la simulación LF reproduce en total solo 14 eventos (ver también Figura 12) de los 62 observados, debido principalmente a la incapacidad del modelo en representar eventos cortos y transitorios, pero también a un aumento de eventos persistentes. Como se aprecia en Figura 13d, parece que al degradar la frecuencia de los forzamientos atmosféricos y oceanográficos, los únicos eventos que pueden ser detectados son los de mayor duración, evidenciando las MHWs persistentes, sin embargo estas a su vez parecen tener anomalías térmicas más frías que las observadas. Estas MHWs detectadas en LF sólo aparecen durante periodos El Niño (Figura 13e), lo cual demuestra que una simulación con forzamientos de baja frecuencia (mensuales) sólo permite detectar los eventos más extremos y que en el NHCS estaría estrechamente asociados a la variabilidad ecuatorial, cuya señal a pesar de ser menor en la región sur, aún es capturada en las simulaciones.

6.3 Controladores de las MHWs

En esta sección se evalúa la importancia de la variabilidad atmosférica frente a la variabilidad oceanográfica mediante el uso del balance de calor (ver sección 5.7) en cada una de las simulaciones de sensibilidad. Básicamente, se comparó la influencia de los procesos advectivos y los flujos de calor en la generación y declive de las MHWs.

6.3.1 Generación de las MHWs

La Figura 14 presenta la contribución media de los procesos advectivos y los flujos de calor durante la génesis de las MHWs, categorizadas por su rango de duración, tanto para la región norte como para la sur. En términos generales, se observa que la formación de las MHWs en la región norte está influenciada por ambos procesos, tanto la advección como los cambios en los flujos de calor, ambos contribuyendo al calentamiento. Sin embargo, la magnitud de su contribución varía según la frecuencia del forzamiento y el rango de duración de los eventos. Específicamente, en la simulación HF (Figura 14a), se aprecia que los eventos de vida corta son impulsados en mayor proporción por procesos advectivos, mientras que a medida que los eventos se prolongan, la influencia de la advección disminuye y la de los flujos de calor aumenta significativamente, especialmente en el caso de los eventos más persistentes. Este fenómeno se observa especialmente durante los periodos de El Niño, donde existe un fuerte acoplamiento entre el océano y la atmósfera.

La simulación HFatm_LFoce (Figura 14b) presenta una distribución similar a la de HF, aunque con diferencias apenas en la magnitud. Sin embargo, en la simulación

LFatm_HFoce (Figura 14c), donde se retira la variabilidad sinóptica atmosférica, se observa que la contribución de los flujos de calor supera a la de los procesos advectivos en la generación de las MHWs persistentes. Este hallazgo sugiere que sin la variabilidad atmosférica diaria, las condiciones favorables al desarrollo de una MHW se mantienen por un período prolongado, lo que resulta en un calentamiento más rápido, con tasas de aumento de temperatura de más de 1°C por día. Como consecuencia, los eventos son más duraderos y pueden generar pseudo MHWs durante el proceso de detección. En la simulación LF (Figura 14d), donde la frecuencia de los forzamientos se ha reducido de diaria a mensual, se observa un comportamiento similar al encontrado en LFatm_HFoce, pero con una menor amplitud de calentamiento. Basándonos en lo expuesto, podemos afirmar que las MHWs formadas en la región costera norte son el resultado de una combinación de factores remotos y locales. En resumen, se observa que la formación de las MHWs en esta región está influenciada en mayor proporción por causas advectivas que por anomalías en los flujos de calor.

En contraste con lo observado en la región norte, los procesos advectivos en la región sur (Figura 14e-h) contribuyen negativamente (enfriamiento) a la formación de las MHWs. Sin embargo, este ligero enfriamiento es ampliamente superado por el calentamiento asociado a los flujos de calor. Este hallazgo está en línea con lo reportado por Mogollón et al. (2023), quienes demostraron que la disminución de la pérdida de calor oceánico, principalmente atribuible a la componente del calor latente, debido al debilitamiento de los vientos con dirección favorable al afloramiento costero, es una característica típica durante la formación de las MHW. Por lo tanto, se puede afirmar que las MHWs formadas en la región costera sur se deben principalmente a factores locales. En síntesis, se observa que la formación de las MHWs en la región sur está principalmente influenciada por anomalías en los flujos de calor.

6.3.2 Declive de las MHWs

La Figura 15 presenta la contribución de la advección y los flujos de calor al cese de las MHWs. Al igual que en el análisis anterior, las dos primeras filas muestran la distribución para las regiones norte y sur, respectivamente. A diferencia de la fase de formación, durante el cese de las MHWs, los procesos advectivos desempeñan un papel crucial en el enfriamiento (Figura 15a y e). Mogollón et al. (2023) demostraron que durante el declive de una MHW típica, se intensifican los vientos con dirección favorable al afloramiento costero. En este sentido, el enfriamiento asociado a los procesos advectivos se atribuye al afloramiento costero, que transporta aguas frías hacia la superficie y luego las advecta horizontalmente en dirección offshore. Por otro lado, los procesos físicos derivados de anomalías en los forzamientos atmosféricos contribuyen consistentemente al calentamiento incluso durante la etapa de cese; sin embargo, este calentamiento se ve contrarrestado por los procesos de “Entrainment", lo que lleva a un enfriamiento general (no mostrados) y marca el fin del evento.

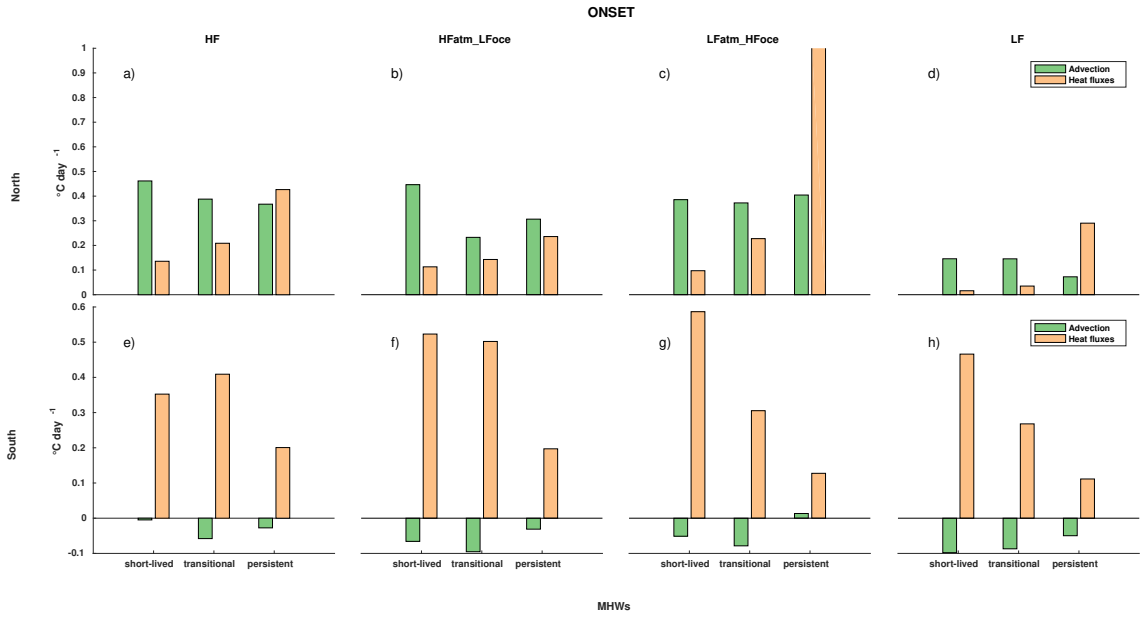

Figure 14: *Contribución media de los procesos advectivos y de los flujos de calor en la generación de las MHWs categorizados por rango de duración (eventos cortos, transitorios y persistentes). El análisis fue realizado para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_HFoce y LF, desde la primera hasta la cuarta columna, respectivamente. La primera fila (paneles a-d) exhibe los resultados para la caja costera norte, mientras que la segunda fila (paneles e-h), para la caja costera sur.*

En el caso de la simulación HFatm_LFoce (Figura 15b), la contribución de los procesos advectivos en los eventos transitorios y persistentes es pequeña (y positiva) en comparación con la de los flujos de calor. Esto sugiere que cuando se elimina la variabilidad oceánica, la contribución advectiva al enfriamiento no se captura realísticamente durante el cese de las MHWs en el norte. Por otro lado, cuando se elimina la alta variabilidad atmosférica pero se mantiene la variabilidad sinóptica oceánica (Figura 15c), el enfriamiento asociado a la advección vuelve a desempeñar un papel preponderante. En contraste, si se eliminan tanto la variabilidad atmosférica como la oceánica (Figura 15d), se obtiene una distribución muy diferente de los procesos advectivos, y ahora las MHWs se ven terminadas únicamente por el enfriamiento asociado a la mezcla vertical, ya que el afloramiento costero no se representa adecuadamente en escalas de tiempo diarias. En resumen, para representar realísticamente el declive de las MHWs en la región costera norte, se necesita la variabilidad combinada de los forzamientos atmosféricos y oceánicos.

En la región costera sur (Figura 15e-h), los procesos advectivos contribuyen consistentemente al enfriamiento durante el cese de las MHWs de cualquier duración. Es importante destacar que si solo se considera la variabilidad atmosférica de alta frecuencia y se mantiene la variabilidad oceánica de baja frecuencia (Figura 15f), existe una ligera sobreestimación de la contribución del calentamiento asociado a los flujos de calor en los eventos de corta duración durante la fase de declive. A pesar de esto, se considera que la simulación HFatm_LFoce reproduce realísticamente la distribución encontrada en la simulación HF (Figura 15e). Es importante destacar que a medida que se degrada la

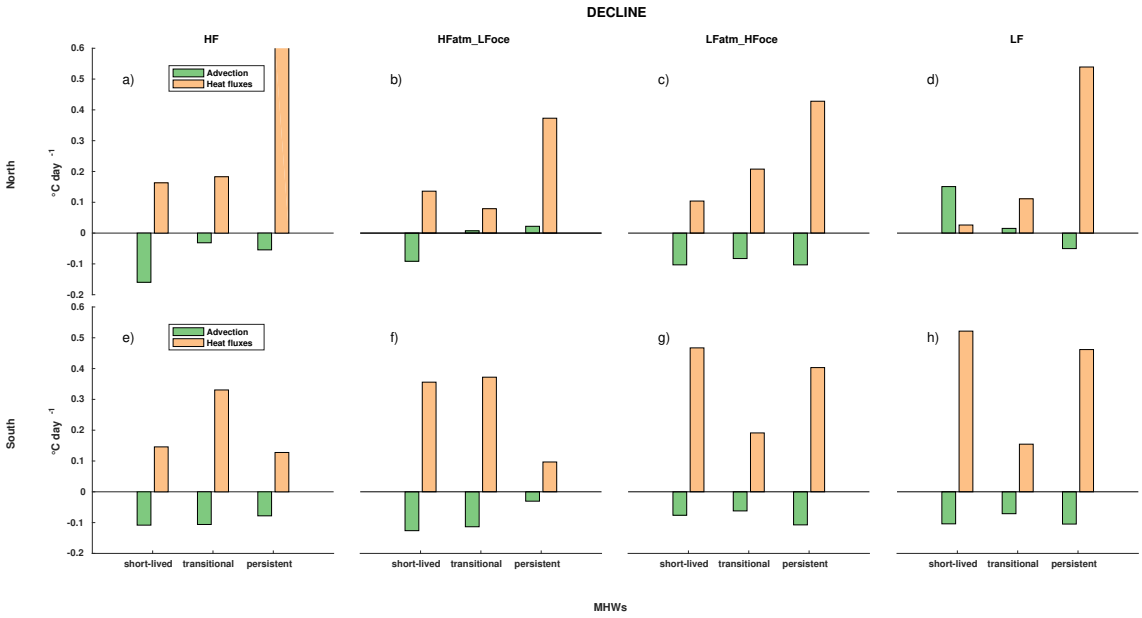

Figure 15: *Contribución media de los procesos advectivos y de los flujos de calor en el declive de las MHWs categorizados por rango de duración (eventos cortos, transitorios y persistentes). El análisis fue realizado para las simulaciones HF, HFatm_LFoce, LFatm_-HFoce y LF, desde la primera hasta la cuarta columna, respectivamente. La primera fila (paneles a-d) exhibe los resultados para la caja costera norte, mientras que la segunda fila (paneles e-h), para la caja costera sur.*

frecuencia de los forzamientos, existe una sobreestimación del calentamiento asociado a los flujos de calor durante la etapa del cese de los MHWs del sur. Esto se hace evidente tanto en las simulaciones LFatm_HFoce y LF (Figuras 15g y h respectivamente). En consecuencia, este sesgo positivo podría contrarrestar el efecto de enfriamiento liderado por la advección, lo que resultaría en una extensión del ciclo de vida de las MHWs del sur. En resumen, para reproducir realísticamente el declive de las MHWs en el sur, al menos se necesita la variabilidad de alta frecuencia atmosférica.

VII

Conclusiones

Capitulo 7: Conclusiones

En este estudio, se llevó a cabo una serie de simulaciones hidrodinámicas plurianuales para explorar el papel de la variabilidad atmosférica y oceanográfica en la reproducción de las características promedio de las MHWs en el NHCS durante las últimas dos décadas. Los hallazgos indican que las características de las MHWs obtenidas en una simulación forzada con una atmósfera de alta frecuencia y un océano de baja frecuencia son muy similares a una simulación que incluye ambas componentes de variabilidad sinóptica. Por el contrario, cuando el modelo se fuerza sin la variabilidad sinóptica atmosférica, se detectan menos eventos de MHWs, que a su vez tienden a ser más largos, menos frecuentes, menos intensos y menos severos.

Para evaluar la variabilidad latitudinal, se identificaron dos regiones costeras, una al norte y otra al sur, ambas caracterizadas por ser regiones de alta incidencia de MHWs. Se demuestra que en ambas regiones costeras las anomalías térmicas inducidas por las MHWs son realísticamente capturadas por simulaciones forzadas con al menos la alta variabilidad atmosférica. De manera similar, si se retira la variabilidad atmosférica, la intensidad de las MHWs es igualmente débil que en una simulación de baja frecuencia. Específicamente, la región norte está fuertemente influenciada por la variabilidad ecuatorial asociada al ENSO, que a su vez es un precursor de la generación de eventos de distintas duraciones.

Mediante el balance de calor, también se evaluó la influencia de los procesos advectivos y los flujos de calor en la génesis y el cese de las MHWs de diferente duración y localización. Los hallazgos demuestran que ambos procesos (advectivos y flujos de calor) desempeñan un papel en la formación de los eventos en el norte. Específicamente, los eventos cortos del norte están fuertemente inicializados por causas advectivas, pero a medida que duran más, ambos procesos tienden a contribuir en casi la misma proporción, como es el caso de los eventos persistentes. Si retiramos la alta variabilidad atmosférica, esta contribución relativa entre ambos procesos tiende a mantenerse para los eventos cortos y transitorios, sin embargo, en el caso de los eventos persistentes, la contribución de los flujos de calor al calentamiento supera largamente la de la advección.

En contraste con lo encontrado en la región norte, los cambios en los flujos de calor son los principales responsables de la formación de las MHWs del sur. Con base en los resultados, los procesos responsables de la formación de las MHWs tanto para la costa norte como la sur, son bien capturados en una simulación que posee al menos la variabilidad sinóptica atmosférica.

También, se demuestra que durante la fase de declive de las MHWs, tanto del norte como del sur, el enfriamiento se debe principalmente a los procesos advectivos, esencialmente el afloramiento costero, mientras que los flujos de calor contribuyen consistentemente al calentamiento. Específicamente, cuando se remueve la variabilidad sinóptica

oceánica, el enfriamiento debido a procesos advectivos no es realísticamente capturado en las MHWs del norte. Pero si se remueve la variabilidad sinóptica atmosférica, la contribución relativa de ambos procesos tiende a replicar lo obtenido en una simulación de alta frecuencia. Esto demuestra que para reproducir realísticamente el cese de las MHWs del norte, se requiere la variabilidad combinada tanto atmosférica como oceanográfica.

Respecto a las MHWs del sur, a medida que se degrada la frecuencia de los forzamientos, el calentamiento asociado a los flujos de calor es sobreestimado, por lo que para reproducir realísticamente el declive de las MHWs en el sur, al menos se necesita la variabilidad de alta frecuencia atmosférica.

Por lo expuesto, los resultados respaldan la idea de que las investigaciones que utilizan salidas de datos mensuales de modelos climáticos globales pueden no capturar de manera realista las MHWs de corta duración. En cambio, la investigación que se basa en salidas de modelos climáticos globales que incorporan variabilidad atmosférica de alta frecuencia puede analizar de manera efectiva tanto MHWs de larga duración como eventos de duración más corta. Esto es significativo porque reduce la dependencia de productos de alta frecuencia disponibles, que a menudo son intensivos en recursos y difíciles de obtener para proyectar el impacto de las MHWs en el contexto del cambio climático futuro. Esto enfatiza la importancia de considerar al menos la variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el downscaling regional de las simulaciones de modelos climáticos globales para capturar y comprender con precisión casi toda la gama de eventos de MHW.

Referencias

Albert, a., Echevin, V., Lévy, M., and Aumont, O. (2010). Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *Journal of Geophysical Research*, 115(C12):C12033.

Barber, R. and Kogelschatz, J. (1990). Nutrients and productivity during the 1982/83 El Niño. In *Elsevier oceanography series*, volume 52, pages 21–53. Elsevier.

Barber, R. T. and Chavez, F. P. (1983). Biological consequences of el Niño. *Science*, 222(4629):1203–1210.

Behrens, E., Fernandez, D., and Sutton, P. (2019). Meridional oceanic heat transport influences marine heatwaves in the Tasman Sea on interannual to decadal timescales. *Frontiers in Marine Science*, 6:228.

Benthuysen, J. A., Oliver, E. C., Feng, M., and Marshall, A. G. (2018). Extreme marine warming across tropical Australia during austral summer 2015–2016. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2):1301–1326.

Boé, J., Hall, A., Colas, F., McWilliams, J. C., Qu, X., Kurian, J., and Kapnick, S. B. (2011). What shapes mesoscale wind anomalies in coastal upwelling zones? *Climate dynamics*, 36(11):2037–2049.

Cabello, R., Tam, J., and Jacinto, M. E. (2002). Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Perú) en junio del 2000. *Rev Peru Biol*, 9(2):49–65.

Cambon, G., Goubanova, K., Marchesiello, P., Dewitte, B., Illig, S., and Echevin, V. (2013). Assessing the impact of downscaled winds on a regional ocean model simulation of the Humboldt system. *Ocean Modelling*, 65:11–24.

Capet, X., Marchesiello, P., and McWilliams, J. (2004). Upwelling response to coastal wind profiles. *Geophysical Research Letters*, 31(13).

Chaigneau, A., Dominguez, N., Eldin, G., Vasquez, L., Flores, R., Grados, C., and Echevin, V. (2013). Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard adcp data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10):5251–5266.

Chavez, F. P. (1995). A comparison of ship and satellite chlorophyll from California and Peru. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12):24855–24862.

Chen, K., Gawarkiewicz, G., Kwon, Y.-O., and Zhang, W. G. (2015). The role of atmospheric forcing versus ocean advection during the extreme warming of the Northeast US continental shelf in 2012. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(6):4324–4339.

Colas, F., Capet, X., McWilliams, J. C., and Shchepetkin, A. (2008). 1997–1998 El Niño off peru: A numerical study. *Progress in Oceanography*, 79(2-4):138–155.

Colas, F., McWilliams, J. C., Capet, X., and Kurian, J. (2012). Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Climate dynamics*, 39(1):509–529.

Cooley, K. M., Fewings, M. R., Lerczak, J. A., O'Neill, L. W., and Brown, K. S. (2022). Role of sea surface physical processes in mixed-layer temperature changes during summer marine heat waves in the Chile-Peru current system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(7):e2021JC018338.

Donner, S. D., Skirving, W. J., Little, C. M., Oppenheimer, M., and Hoegh-Guldberg, O. (2005). Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology*, 11(12):2251–2265.

Echevin, V., Albert, A., Lévy, M., Graco, M., Aumont, O., Piétri, A., and Garric, G. (2014). Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves. *Continental Shelf Research*, 73:14–30.

Echevin, V., Colas, F., Espinoza-Morriberon, D., Vasquez, L., Anculle, T., and Gutierrez, D. (2018). Forcings and evolution of the 2017 coastal El Niño off northern Peru and Ecuador. *Frontiers in Marine Science*, 5:367.

Edwards, K. A., Rogerson, A. M., Winant, C. D., and Rogers, D. P. (2001). Adjustment of the marine atmospheric boundary layer to a coastal cape. *Journal of the atmospheric sciences*, 58(12):1511–1528.

Elzahaby, Y. and Schaeffer, A. (2019). Observational insight into the subsurface anomalies of marine heatwaves. *Frontiers in Marine Science*, 6:745.

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., and Graco, M. (2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7):5423–5444.

Espinoza Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam Málaga, J. L., Gutiérrez Aguilar, D. A., Graco, M. I., Ledesma Rivera, J., and Quispe Ccalluari, C. (2018). Oxygen variability during ENSO in the Tropical South Eastern pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5:526.

Espinoza Morriberón, D., Ledesma Rivera, J., Colas, F., Echevin, V., Anculle, T., and Tam Málaga, J. (2017). Productividad en el sistema de afloramiento peruano durante El Niño 2015-2016.

Frölicher, T. L. and Laufkötter, C. (2018). Emerging risks from marine heat waves. *Nature communications*, 9(1):1–4.

Gawarkiewicz, G., Chen, K., Forsyth, J., Bahr, F., Mercer, A. M., Ellertson, A., Fratantoni, P., Seim, H., Haines, S., and Han, L. (2019). Characteristics of an advective marine heatwave in the middle atlantic bight in early 2017. *Frontiers in Marine Science*, 6:712.

Good, S., Fiedler, E., Mao, C., Martin, M. J., Maycock, A., Reid, R., Roberts-Jones, J., Searle, T., Waters, J., While, J., et al. (2020). The current configuration of the ostia system for operational production of foundation sea surface temperature and ice concentration analyses. *Remote Sensing*, 12(4):720.

Heidemann, H. and Ribbe, J. (2019). Marine heat waves and the influence of El Niño off southeast Queensland, Australia. *Frontiers in Marine Science*, 6:56.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., and Thépaut, J.-N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on August-2020)*.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., et al. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141:227–238.

Hobday, A. J., Oliver, E. C., Gupta, A. S., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Thomsen, M. S., Wernberg, T., et al. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2):162–173.

Holbrook, N. J., Gupta, A. S., Oliver, E. C., Hobday, A. J., Benthuysen, J. A., Scannell, H. A., Smale, D. A., and Wernberg, T. (2020). Keeping pace with marine heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(9):482–493.

Holbrook, N. J., Scannell, H. A., Gupta, A. S., Benthuysen, J. A., Feng, M., Oliver, E. C., Alexander, L. V., Burrows, M. T., Donat, M. G., Hobday, A. J., et al. (2019). A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nature Communications*, 10(1):1–13.

Jacox, M. G., Tommasi, D., Alexander, M. A., Hervieux, G., and Stock, C. A. (2019). Predicting the evolution of the 2014–2016 california current system marine heatwave from an ensemble of coupled global climate forecasts. *Frontiers in Marine Science*, 6:497.

Jones, T., Parrish, J. K., Peterson, W. T., Bjorkstedt, E. P., Bond, N. A., Ballance, L. T., Bowes, V., Hipfner, J. M., Burgess, H. K., Dolliver, J. E., et al. (2018). Massive mortality of a planktivorous seabird in response to a marine heatwave. *Geophysical Research Letters*, 45(7):3193–3202.

Ledesma, J., Graco, M., Tam, J., Díaz, K., Anculle, T., García, W., Bernales, A., Quispe, D., Espinoza-Morriberón, D., Carhuapoma, W., et al. (2021). Efectos de El Niño costero 2017 sobre la oxigenación, fertilidad y productividad del mar frente a las costas del Perú. *Boletin Instituto del Mar del Perú*, 36(2):409–427.

Maréchal, D. (2004). A soil-based approach to rainfall-runoff modelling in ungauged catchments for england and wales.

Marin, M., Feng, M., Phillips, H. E., and Bindoff, N. L. (2021). A global, multiproduct analysis of coastal marine heatwaves: Distribution, characteristics, and long-term trends. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2):e2020JC016708.

Mogollón, R. (2020). ENSO-driven CO2 efflux variability and the role of the upwelling region on the carbon exchange in the Northern Humboldt Current System. *Journal of Marine Systems*, 201:103240.

Mogollón, R. and Calil, P. H. (2017). On the effects of ENSO on ocean biogeochemistry in the Northern Humboldt Current System (NHCS): A modeling study. *Journal of Marine Systems*, 172:137–159.

Mogollón, R., Pietri, A., Tam, J., and François, C. (2023). Comprenhensive characterization of marine heatwaves in the coastal Northern Humboldt Current System during recent decades. *Ocean Modelling*, (Manuscript under publication process).

Montes, I., Colas, F., Capet, X., and Schneider, W. (2010). On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent. *Journal of Geophysical Research*, 115(C9):C09003.

Montes, I., Schneider, W., Colas, F., Blanke, B., and Echevin, V. (2011). Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999–2001 and El Niño 2002–2003. *Journal of Geophysical Research*, 116(C12):C12022.

Oliver, E. C., Benthuysen, J. A., Bindoff, N. L., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Mundy, C. N., and Perkins-Kirkpatrick, S. E. (2017). The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave. *Nature communications*, 8(1):1–12.

Oliver, E. C., Benthuysen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W., and Gupta, A. S. (2020). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13.

Oliver, E. C., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuysen, J. A., Feng, M., Gupta, A. S., Hobday, A. J., et al. (2018). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature communications*, 9(1):1–12.

Pietri, A., Colas, F., Mogollon, R., Tam, J., and Gutierrez, D. (2021). Marine heatwaves in the humboldt current system: from 5-day localized warming to year-long El Niños. *Scientific Reports*, 11(1):1–12.

Pocklington, R. (1981). Organic matter in upwelling off Northern Perú, november 1977.

Quispe-Ccalluari, C., Tam, J., Demarcq, H., Chamorro, A., Espinoza-Morriberón, D., Romero, C., Dominguez, N., Ramos, J., and Oliveros-Ramos, R. (2018). An index of coastal thermal effects of El Niño Southern Oscillation on the Peruvian Upwelling Ecosystem. *International Journal of Climatology*, 38(7):3191–3201.

Schlegel, R. W., Oliver, E. C., Hobday, A. J., and Smit, A. J. (2019). Detecting marine heatwaves with sub-optimal data. *Frontiers in Marine Science*, 6:737.

Smale, D. A., Wernberg, T., and Vanderklift, M. A. (2017). Regional-scale variability in the response of benthic macroinvertebrate assemblages to a marine heatwave. *Marine Ecology Progress Series*, 568:17–30.

Spillman, C., Alves, O., and Hudson, D. (2013). Predicting thermal stress for coral bleaching in the great barrier reef using a coupled ocean–atmosphere seasonal forecast model. *International Journal of Climatology*, 33(4):1001–1014.

Stow, C. A., Jolliff, J., McGillicuddy Jr, D. J., Doney, S. C., Allen, J. I., Friedrichs, M. A., Rose, K. A., and Wallhead, P. (2009). Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems. *Journal of Marine Systems*, 76(1-2):4–15.

Strub, P. T., Combes, V., Shillington, F. A., and Pizarro, O. (2013). Currents and processes along the eastern boundaries. *Ocean Circulation and Climate: A 21st Century Perspective*, pages 339–384.

Taschetto, A. S., Gupta, A. S., Jourdain, N. C., Santoso, A., Ummenhofer, C. C., and England, M. H. (2014). Cold tongue and warm pool ENSO events in CMIP5: mean state and future projections. *Journal of Climate*, 27(8):2861–2885.

Varela, R., Rodríguez-Díaz, L., de Castro, M., and Gómez-Gesteira, M. (2021). Influence of eastern upwelling systems on marine heatwaves occurrence. *Global and Planetary Change*, 196:103379.

Weatherall, P., Marks, K., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V., and Wigley, R. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2(8):331–345.

Apéndice

Apéndice I

Validación

Esta sección presenta la validación de la simulación control (HF), la cual, al integrar la variabilidad completa (atmosférica y oceanográfica), teóricamente debería ser una solución muy cercana a las observaciones. Es importante señalar que esta simulación se llevó a cabo anteriormente y se publicó en Mogollón et al. (2023), por lo que el presente trabajo se basa en un estudio de modelado previo. Se remite al lector a esa referencia bibliográfica para obtener más detalles.

Durante los primeros años de la simulación (Fig. A1a y Fig. A1c), existen sesgos positivos ligeramente mayores en la temperatura superficial y en el nivel del mar ($T'_{z=0m}$ y SSH', respectivamente) modelado que pueden atribuirse al periodo spin-up. Sin embargo, durante las últimas dos décadas, que corresponden al período de análisis, la simulación HF ha demostrado una excelente capacidad para reproducir la variabilidad temporal observada. La alta correlación positiva entre $T'_{z=0m}$ y SSH' con el índice ENSO (Fig. A1e) destaca la sensibilidad del modelo a eventos cálidos extremos como el evento de El Niño en 2015-2016 y la MHW que ocurrió en 2017.

El modelo también es capaz de capturar la variabilidad de la temperatura a 150 m de profundidad de manera realista. Esto se evidencia en la Fig. A1b, donde se muestra que el modelo reproduce de manera satisfactoria la variabilidad observada de la temperatura subsuperficial. Dado que los datos de alta frecuencia en niveles subsuperficiales son limitados, se utilizaron salidas de un producto de reanálisis (GLORYS) validado como observaciones.

La oscilación mensual de la profundidad de la termoclina (*tcd*) muestra oscilaciones con la amplitud correcta y está altamente correlacionada con el *tcd* observado de boyas ARGO (Fig. A2d). El error absoluto promedio confirma aún más la capacidad del modelo para capturar la variación temporal del *tcd* a escalas temporales mensuales. Dado que la profundidad de la termoclina sirve como un indicador de la distribución vertical de la temperatura, el cercanía entre las observaciones y los resultados del modelo verifica el realismo del modelo en toda la columna de agua.

Los resultados de la Figura A2 muestran que el modelo reproduce con precisión los perfiles verticales de temperatura y salinidad, capturando la evolución temporal observada a lo largo de la columna de agua. El modelo captura con éxito el ciclo anual de la temperatura, incluyendo la magnitud, rangos de profundidad y timing. Sin embargo, existe un sesgo frío en los niveles superficiales, que podría atribuirse a un exceso de afloramiento costero en el modelo. Además, el sesgo frío en la superficie puede deberse a errores de interpolación en el producto grillado de ARGO y la resolución horizontal gruesa asociada de las observaciones en comparación con el modelo. El modelo captura

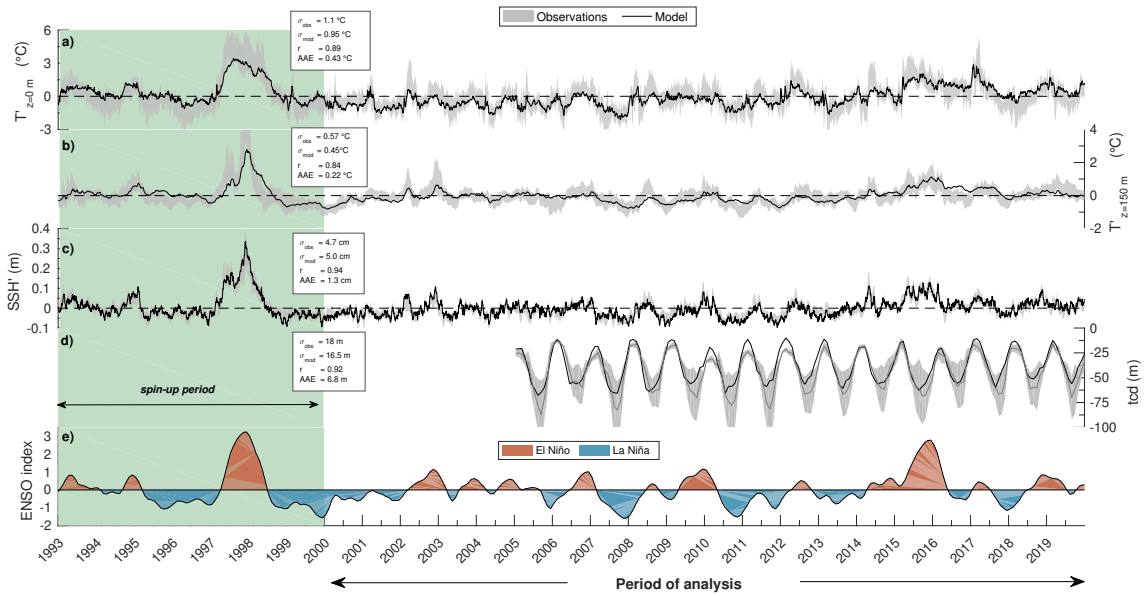

Figure A1: *Los paneles a y c muestran las anomalías diarias de la temperatura superficial del mar ($T'_{z=0m}$) y las anomalías de la altura del nivel del mar (SSH'), respectivamente. Las áreas grises sombreadas representan el rango de desviaciones estándar espaciales asociadas con las observaciones (OSTIA y DUACS, respectivamente), mientras que la línea negra sólida representa los resultados modelados. Las anomalías de temperatura modeladas a 150 m de profundidad ($T'_{z=150m}$) se comparan con los resultados de un producto de reanálisis validado (GLORYS) en el panel b. El panel d ilustra las fluctuaciones mensuales de la profundidad de la termoclina (tcd), donde la tcd modelada se interpoló en espacio y tiempo para que coincidiera con las observaciones obtenidas de boyas ARGO. El panel e muestra el índice ENSO, con valores positivos y negativos que indican períodos de El Niño y La Niña, respectivamente. El análisis se realiza entre las latitudes 3-18°S dentro de la banda costera de 250 km. Las anomalías y estadísticas se calculan en relación con sus respectivos conjuntos de datos, cuya tendencia y ciclo anual han sido removidos. Los siete primeros años de la simulación (1993-1999) se excluyeron del análisis (periodo spin-up). Adaptado de Mogollón et al. (2023).*

de manera efectiva la variabilidad temporal de los campos hidrográficos, reproduciendo con precisión eventos como La Niña en 2008 y El Niño en 2015-2016.

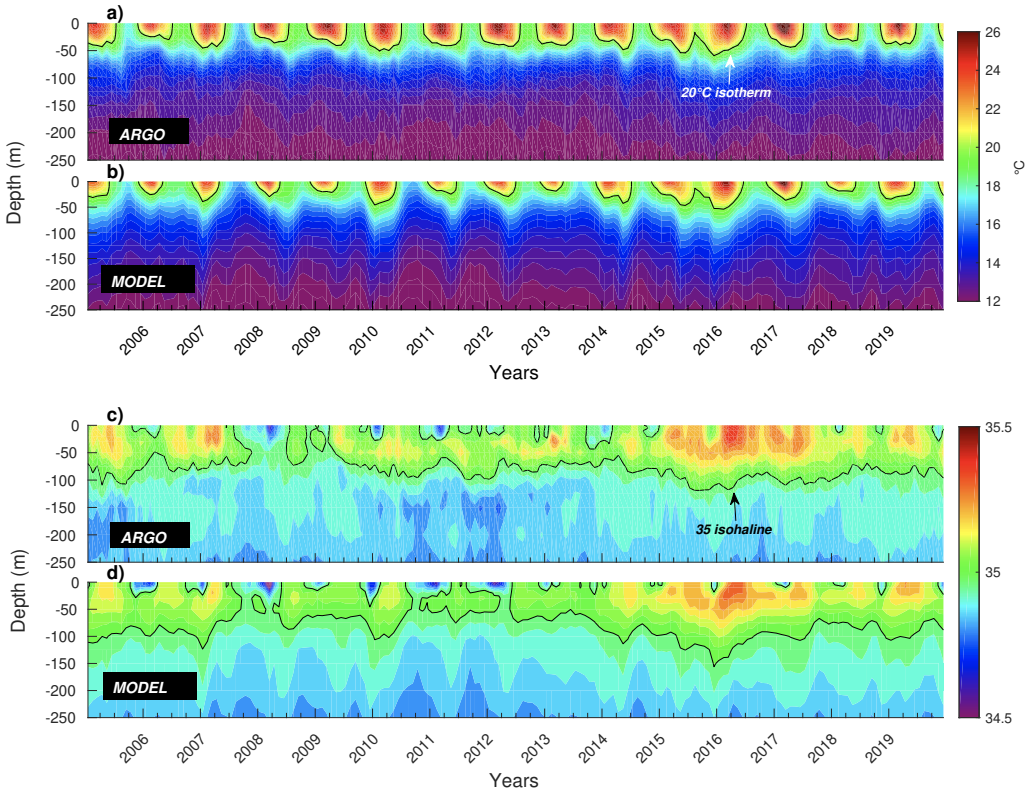

Figure A2: *Diagrama tiempo-profundidad de la temperatura observada (flotadores ARGO) y modelada (paneles a y b, respectivamente). De manera similar, los paneles c y d corresponden a la salinidad. La línea negra sólida denota la isoterma de 20°C y la isohalina de 35, para los paneles superiores e inferiores, respectivamente. Los datos se promediaron dentro de la banda costera de 250 km entre 3-18°S. Adaptado de Mogollón et al. (2023).*

Apéndice II

Decaimiento del Viento (Drop-off)

Esta sección ofrece una descripción detallada de la metodología empleada para corregir los campos de viento utilizados en este estudio. Es una traducción literal al idioma español con base en el material suplementario de Mogollón et al. (2023).

Es sabido que al simular la hidrodinámica del NHCS mediante el forzamiento del modelo con vientos de baja resolución espacial, como los extraídos de productos de reanálisis, puede llevar a una representación poco realista de la circulación de afloramiento a lo largo de la costa peruana (Albert et al., 2010; Colas et al., 2012; Cambon et al., 2013). La disminución de la magnitud del viento, a medida que se acerca a la costa, ocurre principalmente debido a causas orográficas y gradientes térmicos (Edwards et al., 2001; Boé et al., 2011). Los análisis preliminares mostraron que este efecto se hace notable dentro de la banda costera de 150 km. La anchura costera donde ocurre este fenómeno también es conocida como la drop-off zone del viento (Capet et al., 2004), y los vientos derivados de reanálisis suelen fallar en capturar el perfil de viento costero observado.

La disminución del viento hacia la costa induce un patrón negativo del rotacional del viento, lo que estimula velocidades verticales positivas en la base de la capa de Ekman superficial (bombeo de Ekman) y también ejerce una influencia importante en la dinámica de la contracorriente ecuatorial. Dado que esta disminución puede afectar fuertemente la circulación costera, se debe prescribir una disminución artificial en los campos de viento antes del inicio de cualquier simulación. Con este fin, se propuso una corrección empírica y analítica.

Consistió básicamente en reducir exponencialmente la magnitud del viento en un factor climatológico espacial y temporalmente dependiente a lo largo de la drop-off zone para cada componente del viento. Los datos de viento observados se extrajeron del Servicio de Monitoreo del Medio Ambiente Marino del Copernicus (CMEMS) - Viento - METOP-A ASCAT v2. Se adquirieron componentes zonales y meridionales de los vientos ASCAT (en el nivel de procesamiento 3) a 10 m sobre la superficie del mar a una escala temporal diaria y una resolución espacial de 12.5 km para ambos trayectorias (ascendente y descendente) entre 2007 y 2016. Los datos se promediaron para crear una climatología mensual de 10 años. A pesar de las incertidumbres en las estimaciones de viento derivadas del scatterómetro asociadas con la contaminación terrestre, creemos que el método propuesto puede ayudar a corregir de manera realista la variabilidad transversal a la costa del viento ya que la disminución del viento tiene lugar sobre un ancho transversal significativo a lo largo de la costa peruana. La metodología es la siguiente:

i) En primer lugar, se estimó el ancho de la drop-off zone (en km) como la distancia a la costa donde el perfil del viento disminuye un 10% de su valor máximo dentro de la banda

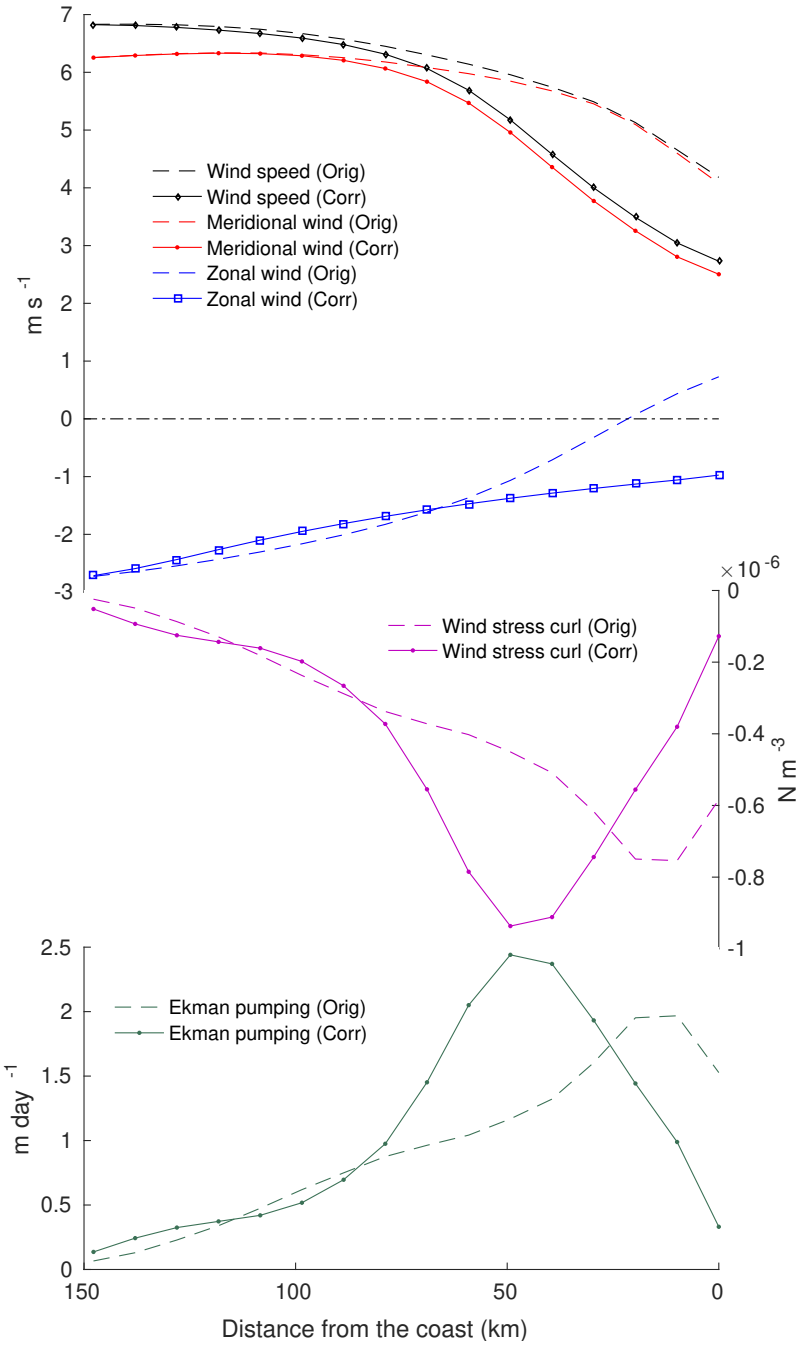

Figure A3: *Perfil costero medio anual de la velocidad del viento y sus componentes (panel superior), rotacional del viento (panel del medio) y velocidades de bombeo de Ekman (panel inferior) para los datos de viento ERA5 originales (Orig) y corregidos (Corr). Se eligió una caja costera representativa de 1° (~ 12.8°S) para realizar esta ilustración. Adaptado de Mogollón et al. (2023)*

costera de 150 km. Este porcentaje se eligió empíricamente. En general, los resultados indicaron (no mostrados) que el ancho de la drop-off zone asociado con los componentes meridionales y zonales del viento se vuelve más grueso hacia el sur y hacia el norte, respectivamente.

ii) Se impone una atenuación exponencial (o crecimiento en el caso de la componente zonal) exclusivamente a lo largo de la dimensión horizontal (x), donde d es el ancho latitudinal-mensual variable de la drop-off zone para cada componente, es decir, $-d < x < 0$.

$$v_c = v_a \, . \, e^{\left[-ln(\frac{v_e}{v_a}).\frac{x}{d}\right]} \quad (3)$$

v_c es el perfil de viento corregido. v_a es el valor costero climatológico (un promedio entre los dos puntos de grilla más cercanos a la costa en cualquier latitud y mes del año) para cada componente del viento ASCAT de alta resolución. v_e denota el valor del viento (para cada componente) extraído del reanálisis ERA5 a la distancia del comienzo de la drop-off zone (en $x = -d$). En consecuencia, cualquier perfil de viento ERA5 comenzará a disminuir su magnitud, siguiendo una curva exponencial, a partir de d km de la costa ($\lim_{x \to -d} v_c = v_e$) hasta alcanzar los valores climatológicos de ASCAT en la costa ($\lim_{x \to 0} v_c = v_a$). Además, entre la región costera adyacente y el comienzo de la drop-off zone, se aplicó un promedio móvil (4 píxeles) para suavizar la transición.

iii) v_c sobrescribe v_e para cada componente del campo de viento dentro de 6°-18°S. Esta banda latitudinal se eligió porque el rotacional del viento tiende a ser intenso en comparación con otras regiones (no mostrado). Además, estos límites latitudinales muestran valores medios anuales de rizado del viento mayores que 10^{-7} N.m^{-3}. La corrección se aplicó para cada día de todo el período de la simulación.

La Figura A3 ilustra la corrección del perfil del viento dentro de una caja costera de 1° a una latitud nominal de 12.8°S. Como se puede ver, los perfiles medios anuales difieren significativamente después de aplicar la corrección. Originalmente, la componente zonal de los vientos ERA5 (línea azul punteada) exhibe un cizallamiento horizontal sobreestimado, lo que lleva a velocidades zonales de viento en dirección hacia la costa (positivas) poco realistas dentro de los primeros 25 km de la costa. Después de la corrección, el viento zonal disminuye suavemente hacia la costa, manteniendo una dirección hacia el oceano abierto (valores negativos), como se esperaba (línea azul cuadriculada). En contraste, la componente meridional del viento ERA5 original (línea roja punteada) no logra capturar la disminución en la magnitud, mientras que el perfil meridional corregido (línea roja sólda) ahora se dirige exponencialmente hacia los valores observados en la costa, como se esperaba. En consecuencia, el pico del rotacional del viento ahora se encuentra más alejado de la costa, donde sus velocidades asociadas de bombeo de Ekman pueden dar forma de manera más precisa a la distribución espacial de las corrientes costeras en la región (Colas et al., 2012). Se realizaron dos experimentos climatológicos paralelos para cuantificar cuánto altera la corrección propuesta de la disminución del

viento a la circulación. Los resultados (no mostrados) demostraron que el uso de vientos ERA5 sin corregir puede inducir una Contracorriente Peruano-Chilena (PCUC) más lenta y más atrapada en la costa, así como un núcleo más rápido y profundo de la Corriente Costera Peruana (PCC), lo que lleva a un transporte neto poleward de 0.8 Sv menor. Este déficit representa aproximadamente la mitad del transporte observado (Chaigneau et al., 2013). Después de la corrección, hay una SST más fría en la costa y una temperatura más cálida en niveles subsuperficiales (~100 m) en comparación con la simulación no corregida. Esto se debe tanto a velocidades de bombeo de Ekman asociadas más altas en la costa como en parte a la corrección de la dirección favorable a la surgencia de los vientos, a pesar de que estos últimos se reducen en magnitud. En resumen, el uso de los vientos ERA5 junto con la corrección de la disminución del viento costero produce una simulación con habilidades muy cercanas a un experimento forzado con vientos derivados de satélites de alta resolución, lo que hace que la solución sea más realista.

Apéndice III

Script de Detección MHW Unidimensional

Este apéndice proporciona el script creado en lenguaje de programación MATLAB para detectar, organizar, caracterizar y graficar las MHWs a partir de una serie de tiempo de temperatura.

```
function [Anomalies,Categories,tiempo_anal,Ts2,Te2,ii,AnomperDuration,AnomperEvent,D2,dummy_monthly,dummy_yearly,icum,mhwdays]=...
MHW_2023_1D(SST_sim,tiempo_sim)
% This function detects and organizes the features of marine heatwaves
% throughout a temperature time-series, based on Hobday et al., 2016 and 2018.
%
%                                 INPUTS
% SST_sim(T,1)   : Daily time-series of sea surface temperature, where T is its lenght
% tiempo_sim(T,1): associated time vector and must be of the same size as SST_sim.
%
%                                 OUTPUTS
% Anomalies(t,1)      : Is the time-series of MHW's intensity [in °C] / (non-MHW condition = NaN)
% Categories(t,1)     : Is the time-series of MHW's category [non-dim] / (non-MHW condition = NaN)
% tiempo_anal(t,1)    : daily time vector of the period of analysis (see 'Notes' at the end).
% Ts2(N,1)            : vector that contains the start dates of all MHWs chronologically.
% Te2(N,1)            : vector that contains the end dates of all MHWs chronologically.
% ii                  : Is the total number of detected MHWs [events]. Here, ii == N.
% AnomperDuration(:,1): Average MHW's intensity per duration [in °C].
% AnomperEvent(N,1)   : Average MHW's intensity per event [in °C].
% D2(N,1)             : Average MHW's duration [in days] per event chronologically ordered.
% dummy_monthly(1,12) : Number of events detected in each month of the year.
% dummy_yearly(1,yrs) : Number of events detected in each year throughout the period of analysis (see 'Notes' at the end).
% icum                : Average cumulative intensity [in °C year].
% mhwdays(yrs,1)      : yearly MHW exposure [in days]
%
% 'Notes': The period of analysis is chosen manually in the first section, namely "User definitions", of this script.
% 'T' equals 't' only if the loaded period of the input temperature field (tiempo_sim) is the same as the period of analysis (tiempo_anal).
% In general t<=T. Here you should also define the baseline period where the climatology will be computed.
% By default, the climatological base period is the same as the period of analysis. The percentile threshold can be fixed as well.
% By default, it was set as 90th. To facilitate the creation of the time vector, you should run offline:
% tiempo_sim = (datenum(Initialyear,1,1):datenum(Finalyear,12,31))';
%
% Additional routines are needed to run this function. Please, download and 'add to path' the following two non-native packages
% https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27485-boundedline-m
% https://github.com/chadagreene/CDT
%
% Written by Rodrigo Mogollón (IMARPE), last update May 2023
%
% Example
% load('dailySST_at_Callao_1993_2019.mat');
% MHW_Imarpe_1D(SST_sim,tiempo_sim);

%% USER DEFINITIONS
Ys   = 2000;  % Start year of the climatological base period
Ye   = 2019;  % End   year of the climatological base period
perc = 90;    % Percentile (th)
Yi   = 2000;  % Start year of the period of analysis
Yf   = 2019;  % End year   of the period of analysis

create_plot      = 1; % '1' to create some figures.

%% CLIMATOLOGICAL MEAN AND THRESHOLD
warning off

for year=Ys:Ye
    indices(year,1) = find(tiempo_sim == datenum(year,1,1)); % 1st of Jan of each year
end; clear year

if leap_year(Ye) == 1
   dt = 365;
else
   dt = 364;
end
swl  = 5;
% Sliding window of length 'swl' to perfom the 11-day window centered mean [days before and after]
% Squeeze the reference period ('shrink' the window size near the endpoints of the input to include only existing elements)
baseperiod = movmean(squeeze(SST_sim(indices(Ys):indices(Ye)+dt)),[swl swl],1,'Endpoints','shrink'); % 'omitnan'?
clear indices swl dt
```

```
tiempo_clim = (datenum(Ys,1,1):datenum(Ye,12,31))';
for year=Ys:Ye
    indices(year,1) = find(tiempo_clim == datenum(year,1,1)); % 1st of Jan of each year
end
clear year tiempo_clim

k=0;
for y = Ys:Ye
    k=k+1;
    abc  =  squeeze(baseperiod(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)); % each year [365 or 366]

   if leap_year(y) == 1
   abc(60)=[];      % leap year without 29 Feb
   end

   T(k,:) = abc;    % [years of the reference period,365 days,lat,lon]
   clear abc
end
clear baseperiod indices k

% (non-leap) Climatological mean
Tmean = squeeze(nanmean(T,1))'; % [365]

% (non-leap) Threshold
Thold = squeeze(prctile(T,perc))'; clear T % [365]

% Moving average of 31 days for both, mean and thold
Tmean = smooth(squeeze(Tmean),31,'moving');  % 31 days moving-average
Thold = smooth(squeeze(Thold),31,'moving');

% Thold_leap and Tmean_leap: from 365 to 366
Thold_leap = Thold; Thold_leap(60) = squeeze((Thold(59)+Thold(60))./2);
Thold_leap(61:366) = squeeze(Thold(60:365));

Tmean_leap = Tmean; Tmean_leap(60) = squeeze((Tmean(59)+Tmean(60))./2);
Tmean_leap(61:366) = squeeze(Tmean(60:365));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  END OF USER DEFINITIONS  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%  INSTANTANEOUS THRESHOLD and ANOMALIES
SST = squeeze(SST_sim(find(tiempo_sim == datenum(Yi,1,1)):find(tiempo_sim == datenum(Yf,12,31)),:,:)); clear SST_sim
tiempo_anal = (datenum(Yi,1,1):datenum(Yf,12,31))';

for year=Yi:Yf
    indices(year,1) = find(tiempo_anal == datenum(year,1,1)); % 1st of Jan of each year
end
clear year

% Loop to infer Umbral (defined as daily SST - Thold) and Anom (daily SST - Tmean)
for y = Yi:Yf
    if y == Yi
        if leap_year(y) == 0
        Umbral = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Thold;
        Anom   = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Tmean;
        else
        Umbral = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Thold_leap;
        Anom   = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Tmean_leap;
        end
    else
        if leap_year(y) == 0
        Umbral_tmp = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Thold;
        Anom_tmp   = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Tmean;
        else
        Umbral_tmp = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Thold_leap;
        Anom_tmp   = squeeze(SST(indices(y):indices(y)+sum(eomday(y,[1:12]))-1)) - Tmean_leap;
        end

    Umbral = [Umbral;Umbral_tmp]; clear Umbral_tmp
    Anom   = [Anom;Anom_tmp]; clear Anom_tmp
    end
end
clear Tmean Tmean_leap y indices Thold Thold_leap
Umbral_cat = Umbral;         % To infer categories ahead

Umbral(Umbral<=0)=NaN;    % Positive values : MHW
Umbral = Umbral./Umbral;  % 1: MHW    NaN: ~MHW

%% FILTERING (Persistence)
Umbral = double(~isnan(Umbral)); % 1:MHW   0:~MHW
% MHW :  0  1  1  1  1  1  0
```

```
%           ts             te

abc = Umbral(:,1);
        % gap = 2 days
        if mean(abc)~=0              % If there is at least 1 MHW
              w=0;
            for t=2:size(Umbral,1)
                  if abc(t,1)==0 && abc(t-1,1)==1
                     w=w+1;
                     te(w,1)=t;  % índices donde 0
                  end
            end

          if exist('te')==1;
              if te(w)<=size(abc,1)-2   % Checking and filling the gaps
                    ww = w;
              else
                    ww = w-1;
              end
              for t=1:ww
                    if abc(te(t)+1)==0 && abc(te(t)+2)== 1 % gap of 2 days ahead --->
                    abc(te(t),1) = 1; abc(te(t)+1,1) = 1;
                    end
              end
              clear w ww te t
          end

        end

        % gap = 1 day
        if mean(abc)~=0              % If there is at least 1 MHW
              w=0;
            for t=2:size(Umbral,1)
                  if abc(t,1)==0 && abc(t-1,1)==1
                     w=w+1;
                     te(w,1)=t;  % índices donde 0
                  end
            end

            if exist('te')==1;
              if te(w)<=size(abc,1)-2   % Checking and filling the gaps
                    ww = w;
              else
                    ww = w-1;
              end
              for t=1:ww
                    if abc(te(t))==0 && abc(te(t)+1)== 1   % gap of 1 day ahead  --->
                    abc(te(t),1) = 1;
                    end
              end
              clear w ww te t
            end
        end

        % Removing isolated points
        if mean(abc)~=0              % If there is at least 1 MHW
            for t=2:size(abc,1)-1
                  if abc(t-1,1)==0 && abc(t,1)==1 && abc(t+1,1)==0
                     abc(t,1)=0;    % MHW of 1 single day within the interior
                  end
            end
            if abc(end,1) == 1 && abc(end-1,1) == 0
                     abc(end,1)=0;  % MHW of 1 single day at the final edge
            end
            if abc(1,1) == 1 && abc(2,1) == 0
                     abc(1,1)=0;    % MHW of 1 single day at the beginning
            end
             if abc(1,1) == 1 && abc(2,1) == 1 && abc(3,1) == 1 && abc(4,1) == 1 && abc(5,1) == 0
                     abc(5,1)=1;    % MHW of 4 days at the beginning
            end
        end

        % Tstart and Tend
        if mean(abc)~=0
              k=0;w=0;
            for t=2:size(Umbral,1)
              if abc(t-1,1)==0 && abc(t,1)==1
              k=k+1;
              ts(k,1)=t; % índices donde 1
              end
              if abc(t,1)==0 && abc(t-1,1)==1
              w=w+1;
```

```
            te(w,1)=t;  % índices donde 0
            end
          end

             if exist('ts')==0  % En caso solo haya 1 MHW y esté al inicio
                if size(te,1) == 1; ts(1,1)=1; end
             end
             if exist('te')==0  % En caso solo haya 1 MHW y esté al final
               if size(ts,1) == 1; te(1,1)=size(abc,1); end
             end

          if ts(end)==size(abc,1)
          ts = squeeze(ts(1:end-1,1)); % Because the very last starting point does not have its end
          end

          if k>w && isempty(ts(1:end-1,1))==0
          ts = squeeze(ts(1:end-1,1)); % Because the last starting point does not have its end
          end

          if k<w
          te = squeeze(te(2:end,1));   % Because the first discarded MHW does not have its start
          end

          if k==w && abc(1,1)==1 && abc(end,1)==1
          ts = squeeze(ts(1:end-1,1));  % Because there are valid points at the start and at the end
          te = squeeze(te(2:end,1));    % of the time series, causing an undesired shift
          end

          if size(ts,1) ~= size(te,1)
             display(['Revisar i=',num2str(i),' j=',num2str(j)])
          end

        Ts(1:size(ts,1),1) = ts; clear ts
        Te(1:size(te,1),1) = te; clear te
        else                               % Just to keep the same size
        Ts(:,1) = 0; clear ts
        Te(:,1) = 0; clear te
        end
        clear abc

clear Umbral

% Mask
Ts(Ts==0)=NaN; Te(Te==0)=NaN;

% Duration "D", in days, will be generated again later
D = Te-Ts;

% Test (te > ts)
if min(min(min(D))) >= 0
    display('Looks good')
end

% Persistence >= 5 days
Ts(D<5)=NaN;
Te(D<5)=NaN; clear D

%% Remove NaN values due to the persitency criterium applied, and reshaping...
Te2 = Te; clear Te
Te2(double(isnan(Te2))==1)=[];

Ts2 = Ts; clear Ts
Ts2(double(isnan(Ts2))==1)=[];

% Número total de eventos por pixel
ii = size(Te2,1);

% Duration matrix (Tend - Tstart)
D2  = Te2 - Ts2;

% throughout the entire period of analysis
display(['================== ',num2str(perc),' % ==================']);
display(['Total number of events: ', num2str(ii)]);
display(['Minimum duration between all the events recorded: ', num2str(min(min(min((D2))))),' days']);
display(['Mean duration between all the events recorded: ', num2str(round(nanmean(nanmean(nanmean((D2)))))),' days']);
display(['Maximum duration between all the events recorded: ', num2str(max(max(max((D2))))),' days']);

%% FREQUENCY: event count per month and year
        if isnan(ii)~=1
        tabla = datevec(tiempo_anal(squeeze(Ts2(1:ii))));
        tabla = squeeze(tabla(:,1:2)); % [events,date] where 'date' contains years/month (days, hours, minutes and seconds were cut off)
        k = 0;
```

```
        for m = 1:12
            k=k+1;
            dummy_monthly(k) = sum(tabla(:) == m); % Cuántas veces se repite 'January' entre todos los MHWs detectados en (i,j)?
        end
        k = 0;
        for y = Yi:Yf
            k=k+1;
            dummy_yearly(k) = sum(tabla(:) == y);  % Cuántas veces se repite '2015' entre todos los MHWs detectados en (i,j)?
        end
        clear tabla k
        else
            dummy_monthly(:)=0;
            dummy_yearly(:)=0;
        end

% throughout the entire period of analysis
 display(['Minimum frequency: ', num2str(round(min(min(min((dummy_yearly)))),1)),' events in one of the years']);
 display(['Temporal Mean frequency: ', num2str(round(nanmean(nanmean(nanmean((dummy_yearly)))),1)),' throughout the entire period of analysis']);
 display(['Maximum frequency: ', num2str(round(max(max(max((dummy_yearly)))),1)),' events in one of the years']);

%% filtering Anom matrix within the MHWs events (i.e. including persistence criterium)
% Per Event
% Valor promedio de la SSTa en cada evento (en orden cronológico para cada particular(i,j)),
% computado entre toda la duración de su respectivo evento
% Nota: su gráfico horizontal carece de sentido debido a que las fechas de los eventos varían de punto a punto.
% Sólo sirve para extraer info para cada punto (i,j) independientemente ---> [# de Evento,lat,lon]

            if isnan(ii)==0

            for t=1:ii
            i1 =  squeeze(Ts2(t,1));   % The beginning of each MHW
            i2 =  squeeze(Te2(t,1))-1; % One day before its non-MHW index
                if isnan(i1)==0  && isnan(i2)==0
                valor = squeeze(Anom(i1:i2,1));
                AnomperEvent(t,1) = squeeze(nanmean(valor,1)); clear i1 i2 valor
                end
            end
            else
            AnomperEvent(:,1)=NaN;
            end

%AnomperEvent(AnomperEvent==0)=NaN;

% Per Duration
% Variación temporal de la SSTa para cada particular (i,j), computado entre todos sus respectivos eventos.
% Nota: su gráfico horizontal muestra la Intensidad (min,mean or max) ---> [máxima duración,lat,lon]


            if isnan(ii)==0

            for t=1:ii
            i1 =  squeeze(Ts2(t,1));   % The beginning of each MHW
            i2 =  squeeze(Te2(t,1))-1; % One day before its non-MHW index
                if isnan(i1)==0  && isnan(i2)==0
                valor = squeeze(Anom(i1:i2,1));
                abc(1:size(valor,1),t) = valor; clear i1 i2 valor
                end
            end
            abc(abc==0)=NaN;
            valor2=squeeze(nanmean(abc,2));clear abc
            AnomperDuration(1:size(valor2,1),1)=valor2; clear valor2

            else
            AnomperDuration(:,1)=NaN;
            end

%AnomperDuration(AnomperDuration==0)=NaN;

%throughout the entire period of analysis
display(['Minimum intensity of one of the MHW: ', num2str(round(min(min(min((AnomperDuration)))),1)),' °C']);
display(['Temporal mean intensity of the MHWs: ', num2str(round(nanmean(nanmean(nanmean((AnomperDuration)))),1)),' °C']);
display(['Maximum intensity of one of the MHW: ', num2str(round(max(max(max((AnomperDuration)))),1)),' °C']);

%% Cumulative Intensity
%for t=1:size(AnomperDuration,1)-1
%areas(t,1) = (AnomperDuration(t) + AnomperDuration(t+1)).*(1/2);
%end
areas = AnomperEvent.*D2;
icum = squeeze(nansum(areas,1)); clear areas;
icum = icum./365;  %    °C year

%%  Reconstructing Anomalies and Categories final matrixes
```

```
Anomalies=nan(size(Anom,1),1);
Categories=nan(size(Anom,1),1);

% cat : Thold - Tmean = (Thold - SST) + (SST - Tmean) = -(SST - Thold) + Anom = Anom - Umbral;
Umbral_cat = Anom - Umbral_cat;

% Categorization
Catego = Anom;
Catego(Catego<=0)=NaN;          % non-MHW
for t=1:size(Anom,1)
            if      Anom(t) <= 2.*(Umbral_cat(t))
        Catego(t) = 1;
            elseif  Anom(t) > 2.*(Umbral_cat(t)) && Anom(t) <= 3.*(Umbral_cat(t))
        Catego(t) = 2;
            elseif  Anom(t) > 3.*(Umbral_cat(t)) && Anom(t) <= 4.*(Umbral_cat(t))
        Catego(t) = 3;
            elseif  Anom(t) > 4.*(Umbral_cat(t))
        Catego(t) = 4;
            else
        Catego(t) = NaN;
            end
end
clear Umbral_cat Umbral;

        if isnan(ii) == 0
for t=1:ii
    i1 =  squeeze(Ts2(t));   % The beginning of each MHW
    i2 =  squeeze(Te2(t))-1; % One day before the consecutive non-MHW index

        if isnan(i1)==0  && isnan(i2)==0     % ...if i1,i2 were generated
        valor = squeeze(Anom(i1:i2));
        Anomalies(i1:i2) = valor; clear valor
        valor = squeeze(Catego(i1:i2));
        Categories(i1:i2) = valor; clear i1 i2 valor
        end
end
        else
        Anomalies(:) = NaN;
        Categories(:) = NaN;
        end

clear Anom Catego

%% MHWdays (in a year)
mhwdays=nan(Yf-Yi+1,1);
k=0;
for ano=Yi:1:Yf
    k=k+1;
    t1 = datenum(ano,1,1); t2=datenum(ano,12,31);
    ppw = squeeze(Anomalies(find(tiempo_anal==t1):find(tiempo_anal==t2),1));
    mhwdays(k,1) = nansum(double(~isnan(ppw)));
    clear ppw t1 t2
end
mhwdays(mhwdays==0)=NaN;

%% PLOTS
if create_plot==1

figure
set(gcf,'position',[10,10,1600,800])
tt = Yi:Yf; tt=tt';
subplot(2,4,1)
e = nanstd(dummy_monthly);
%[l,p] = boundedline(1:1:12,dummy_monthly,e,'-o','transparency', 0.1);
plot(1:1:12,dummy_monthly,'-sk');
ylim([0 8]); xlim([1 12]);  set(gca,'xtick',1:1:12,'xticklabel',{'J' 'F' 'M' 'A' 'M' 'J' 'J' 'A' 'S' 'O' 'N' 'D'});
clear l p e t; ylabel('Number of events'); xlabel('Months')
subplot(2,4,[2,3])
e = nanstd(dummy_yearly);
%[l,p] = boundedline(tt,dummy_yearly,e,'-o','transparency', 0.1);
plot(tt,dummy_yearly,'-sk');
ylim([0 12]); xlim([Yi Yf]);  set(gca,'xtick',Yi:1:Yf,'XtickLabelRotation',0,'XAxisLocation','bottom');
ylabel('Number of events');  xlabel('Years')
subplot(2,4,4)
pp = [sum(Categories == 1);sum(Categories == 2);sum(Categories == 3);sum(Categories == 4)];
pie(pp);caxis([0.5 4.5]);cmocean('matter',4);
cbp=colorbar;set(get(cbp,'ylabel'),'String','Categories');
set(cbp,'YTick',1:1:4,'yticklabel',{'Moderate' 'Strong' 'Severe' 'Extreme'})
display([num2str(nansum(Categories./Categories)),' days meet MHW criteria:'])
display([num2str(pp(1)),' MHW days of Category 1'])
display([num2str(pp(2)),' MHW days of Category 2'])
display([num2str(pp(3)),' MHW days of Category 3, and '])
```

```
display([num2str(pp(4)),' MHW days of Category 4'])

% Pointwise figure
for t=1:1:ii
    i1 =  squeeze(Ts2(t));   % The beginning of each MHW
    i2 =  squeeze(Te2(t))-1; % One day before the consecutive non-MHW index

        if isnan(i1)==0  && isnan(i2)==0     % ...if i1,i2 were generated
        valor = squeeze(Anomalies(i1:i2));
        Anom2(1:size(valor,1),t) = valor;
        clear i1 i2 valor
        else
        Anom2(:,t) = NaN; clear i1 i2 valor
        end

end
Anom2(Anom2==0)=NaN;

subplot(2,4,[5,6,7,8])
imagescn(1:ii,1:size(Anom2,1),Anom2);  colormap(jetvar); caxis([0.5 4])
set(gca,'xtick',1:ii,'xticklabel',[datestr(tiempo_anal(squeeze(Ts2(1:ii))))],'XTickLabelRotation',45,'Fontsize',6);
%ylim([0 max(D2(:))+4]); ylabel('Duration (days)'); hold on;
ylabel('Duration (days)'); hold on;
cb=colorbar('east');  set(get(cb,'ylabel'),'String','MHW Intensity (°C)','Fontsize',8);
aa= get(cb); aa =  aa.Position; %gets the positon and size of the color bar
set(cb,'Position',[aa(1)+0.070 aa(2) aa(3) aa(4)]); colormap(jet);
for t=1:ii
text(t,D2(t)+1,num2str(datestr(tiempo_anal(Te2(t)-1))),'Rotation',90,'Fontsize',6)
end

ax1=gca;
ax2 = axes('Position', get(ax1, 'Position'),'Color', 'none');
set(ax2, 'XAxisLocation', 'top','YAxisLocation','Right');
% set the same Limits and Ticks on ax2 as on ax1;
set(ax2, 'XLim', get(ax1, 'XLim'),'YLim', get(ax1, 'YLim'));
set(ax2, 'XTick', get(ax1, 'XTick'), 'YTick', get(ax1, 'YTick'),'XTickLabelRotation',45,'Fontsize',6);
xlabel('# Event');
clear ax1 ax2 cb l p Anom2

end
end
```