



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Chetumal

Licenciatura en Biología

TITULACION INTEGRAL

TESIS

Tema:

ONDAS DE CALOR MARINA COMO FACTOR DE DETERIORO EN
CORALES DEL ARRECIFE MESOAMERICANO.

Presenta:

Jennifer Guadalupe López Ciau

Asesor externo: Dr. Oscar Fabian Reyes Mendoza.

Asesor interno: M.C. Alejandro Medina Quej.

Chetumal, Quintana Roo a 10 de junio de 2025

Resumen

El estudio analiza el impacto del cambio climático en los ecosistemas marinos del SAM, centrándose en eventos de ondas de calor marinas (MHW) y estrés térmico, y su relación con el blanqueamiento coralino. Entre los hallazgos clave se destaca que en Xcalak (México), la temperatura superficial del mar (TSM) registro un pico de 30.9°C en octubre de 2023, con resultados similares con los 29.7°C de ERDDAP y 31.6°C reportados por el *Coral Reef Watch*.

Entre 1982 y 2023 se identificaron 119 eventos de MHW en Quintana Roo (México), 121 en Belice y 122 en Honduras, con 2023 como el año con mayor frecuencia de eventos extremos. El evento más prologando ocurrió en Quintana Roo (México), durando 245 días con una intensidad acumulada de 294.18°C-días. Además, se registraron 48 eventos de Semanas de Calentamiento por Grados (DHW) que oscilaron entre 4°C-semanas y 21°C-semanas, siendo también 2023 el año con el nivel más alto (21 DHW, alerta nivel 2).

Los análisis de correlación revelaron una relación significativa entre MHW y DHW, con valores de correlación Pearson que variaron entre 0.40 y 0.57, y correlaciones cruzadas que alcanzaron hasta el 73%, indicando una causalidad temporal entre ambos fenómenos.

Los resultados muestran que los arrecifes del SAM han experimentado estrés térmico recurrente con una disminución del 17% en la cobertura coralina, lo que subraya la urgencia de implementar estrategias de conservación y restauración para mitigar los impactos futuros del calentamiento global.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a mis asesores de residencia al Dr. Oscar Fabian Reyes Mendoza y al M. C Alejandro Medina Quej por su paciencia, tiempo y disposición para el desarrollo y finalización satisfactoria de este proyecto de residencia, así como en el proceso de aprendizaje en el campo de la investigación.

Al Colegio de la Frontera Sur por abrirme las puertas y brindarme un espacio para el desarrollo de habilidades relacionadas con la investigación y divulgación científica, también la oportunidad de conocer personas maravillosas que fueron cruciales para la comprensión y desarrollo de este proyecto de residencia.

Al Instituto Tecnológico de Chetumal por la formación académica que reafirmaron mi amor por la licenciatura en Biología y por darme experiencias inolvidables dentro de sus aulas. Agradezco a los profesores por su tiempo y dedicación por brindarme herramientas necesarias para mi desarrollo en el campo laboral y de investigación.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante esta etapa. Su motivación me ayudó a superar momentos de bloqueo mental y alcanzar este logro.

Índice

Resumen.....	2
Agradecimientos.....	3
1. Introducción.....	8
2. Antecedentes.....	13
2.1 Blanqueamiento coralino.....	13
2.2 Ondas de calor marina.....	15
3. Marco teórico.....	19
3.1 Métricas para describir eventos de calentamiento.....	19
3.1.1 Temperatura Superficial del mar (TSM).....	19
3.1.2 Temperatura superficial del mar anómalas (TSMA).....	19
3.1.3 Puntos calientes (HotSpot).....	19
3.1.4 Semana de calentamiento por grados (DHW).....	20
3.1.5 Alertas de blanqueamiento (BAA).....	20
3.1.6 Percentil.....	20
3.2 Métricas que caracterizan a las MHW.....	21
3.2.1 Umbral.....	21
3.2.2 Duración.....	21
3.2.3 Intensidad (máxima, media y acumulada).....	21
3.2.4 Frecuencia.....	21
3.3 Arrecifes coralinos y estrés térmico.....	21
3.4 Relación entre el estrés térmico en corales y patrones climáticos.....	22
3.4 Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).....	23
4. Justificación.....	24
5. Pregunta de investigación.....	26
6. Objetivos.....	27
6.1 General.....	27
6.2 Específicos.....	27
7. Metodología.....	28

7.1	Área de estudio	28
7.2	Instalación del equipo	29
7.3	Base de datos	29
7.3.1	Ondas de calor marina	29
7.3.2	Grados de calentamiento semanal (DHW)	30
7.4	Detección de ondas de calor marinas	31
7.5	Análisis de datos	32
7.5.1	Series de tiempo	32
7.5.2	Umbral de blanqueamiento	32
7.5.3	Correlación de Pearson	33
7.5.4	Covarianza	33
7.5.5	Cointegración de Engle- Granger	34
7.5.6	Causalidad de Granger	34
7.5.7	Transformada de Hilbert	36
7.5.8	Correlación cruzada con desfases	36
8.	Resultados.	38
8.1	Punto <i>in situ</i>	38
8.2	MHW	39
8.3	DHW	42
8.3.1	Eventos de estrés térmico	42
8.3.2	Alertas	43
8.4	Relación MHW- DHW	45
9.	Discusión	50
10.	Conclusión	52
11.	Bibliografía	53

Índice de Figuras

Figura 1- El área de estudio in situ está ubicada en las coordenadas 18°19'24.59 N y 87°48'23.13 O, cerca del poblado de Xcalak. Esta ubicación abarca la región coralina del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. (Jennifer López, 2024).	28
Figura 2- Sensor HOBO Onset U20. HOBO Data Loggers.	29
Figura 3- TSM y profundidad obtenida del HOBO Onset U20: las temperaturas más altas se registraron entre mayo y noviembre, la intensidad máxima ocurrió en octubre, y las temperaturas más bajas entre enero a abril.	38
Figura 4- Mapa térmico del punto in situ del período 2021-2023, donde la temperatura promedio alcanzó 29.7. Se relacionó esta alza con DHW de la CRW del mismo período donde coincidieron con los picos de TSM altos, con 31.6°C el 11 de octubre de 2023 y un evento de blanqueamiento nivel 2 con valores que sobrepasaron los 8°C-semanas.	39
Figura 5- Eventos de MHW detectadas en Quintana Roo (México) entre 1982-2023. Durante este período se registró tres eventos severos con intensidades máximas entre 2.19°C y 2.29°C.	40
Figura 6- Eventos de MHW detectadas en Belice entre 1982-2023. Durante este período se registró dos eventos severos con intensidades máximas entre 2.06°C y 2.55°C.	41
Figura 7- Eventos de MHW detectadas en Honduras entre 1982-2023. Durante este período se registró siete eventos nivel fuerte con intensidades máximas entre 2.02°C y 2.38°C.	41
Figura 8- Serie temporal de TSM y DHW en México (Quintana Roo), Belice y Honduras durante el periodo de 1985- 2025. Las líneas punteadas azules indican los umbrales de blanqueamiento y las líneas negras representan las TSMA. El primer evento de blanqueamiento registrado ocurrió en 1998, cuando se superó las 4°C-semanas y las temperaturas comenzaron a intensificar a partir de 2016.	42
Figura 9- DHW y TSM en Quintana Roo (México), Belice y Honduras divididos por décadas. Los eventos de blanqueamiento fueron más frecuentes e intensos durante la década de 2015-2023 a comparación de las décadas de 1995-2005 y 2005-2015.	43
Figura 10- Total de BAA- 7 días Máx. registradas en los tres sitios de estudio divididas por décadas. Las alertas nivel 1 comenzaron a frecuentar durante la década de 1998 y las alertas nivel 2 durante la última década, en los tres sitios de estudio.	45
Figura 11- A) Gráfica de líneas de eventos de MHW en Quintana Roo (México), Belice y Honduras del período 1995- 2023. B) Series de tiempo de TSM y los DHW en Quintana Roo (México), Belice y Honduras durante el período 1995-2023. Ambas graficas se pueden observar que el evento de MHW y DHW fueron intensas en 2023.	46
Figura 12- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Q. Roo, México. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.	47
Figura 13- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Belice. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.	48
Figura 14- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Honduras. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.	49

Índice de Tablas

Tabla 1- Valores de BAA establecidos por el Coral Reef Watch.	20
Tabla 2- Niveles de blanqueamiento, de acuerdo con la Coral Reef Watch.....	31
Tabla 3- Categorización de los MHW según Hobday et al. (2016).....	32
Tabla 4- Cálculo de umbral de blanqueamiento: los datos de MMM fueron obtenidos de las Estaciones virtuales regionales de 5 km de la CRW y se le sumó 1°C para determinar dicho umbral.....	33
Tabla 5- Total de BAA- 7 días Máx. registradas en los tres sitios de estudio remoto del período 1985-2023.	44

1. Introducción

Los arrecifes coralinos es uno de los ecosistemas más importantes del nuestro planeta, tanto por la gran diversidad de fauna marina que albergan, como por su papel en la protección costera y su valor económico. A través del turismo y la pesca generan ingresos económicos valuados aproximadamente en \$35.8 mil millones de dólares cada año (Costanza *et al.*, 2014; Spalding *et al.*, 2017).

Los sistemas coralinos habitan exclusivamente en las zonas tropicales y subtropicales de nuestro planeta (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022). Están compuesto principalmente por corales escleractinios, también conocidos como corales duros, los cuales forman estructuras a base de carbonato de calcio (CaCO_3) a través de pólipos que viven en simbiosis con algas zooxantelas (Guest, 2021) ayudando a resistir las fuerzas hidrodinámicas como el oleaje y los fenómenos hidrometeorológicos (Spalding *et al.*, 2017).

La estructura arrecifal modifica el lecho marino (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022), lo cual es clasificado en tres categorías, la primera son los atolones, la segunda son los arrecifes costeros y la tercera corresponde a los arrecifes de barrera (Alcolado, 2004), siendo la más importante debido que dos áreas son consideradas como patrimonio natural de la humanidad como la Gran barrera de coral en Australia y el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), ubicada en el Caribe (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022).

El SAM es un área natural protegida que abarca grandes bosques de manglares, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral que atrae a más de 21 millones de visitantes cada año, en conjunto con la pesca y otras actividades relacionadas con el desarrollo costero aportan 6,647 millones de dólares anualmente, siendo el turismo la actividad que más contribuye (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022).

El cambio climático es uno de los temas de más relevancia en los últimos años debido a los daños que ha ocasionado en los ecosistemas terrestres y marinos, como consecuencia de las actividades humanas. Estas actividades han limitado la capacidad de los organismos adaptarse y funcionar más allá de los límites térmicos permitidos para sobrevivir (Smith *et al.*, 2023).

Un ejemplo por resaltar son los ecosistemas marinos cuya importancia en las sociedades humanas radica en su papel en la alimentación, mediante la pesquería, el turismo y en la regulación de la temperatura del planeta (Barbier *et al.*, 2011). El océano absorbe el calor generado por los gases de efecto invernadero y retener el CO₂ (Feng *et al.*, 2022) que han enfrentado un calentamiento excesivo en la superficie del mar. Este calentamiento resulta perjudicial para los organismos marinos que son termosensibles, como los corales (Smith *et al.*, 2023).

Las ondas de calor marinas (en inglés, Marine Heatwaves o MHW), son eventos discretos de calentamiento anormal en la superficie oceánica que pueden extenderse a semanas, meses e inclusive años (Oliver *et al.*, 2021). Para estudiarlas, se requiere una base de datos climatológica con al menos 30 años de registros diarios de temperatura superficial del mar (TSM). Permitiendo analizar y obtener datos sobre la duración, frecuencia e intensidad de los eventos (Hobday *et al.*, 2016; Jacox *et al.*, 2020; Oliver *et al.*, 2021).

A medida que aumenten los gases de efecto invernadero en los próximos años, las MHW se convertirán en eventos frecuentes, más intensos y prolongados (Oliver *et al.*, 2021). Generando consecuencias globales como alteraciones anatómicas y morfológicas en las especies marinas, cambios en la distribución de los organismos y la cadena trófica, pérdida de cobertura coralina (Smith *et al.*, 2023), y proliferación de algas nocivas, entre otras, que afectan a las pesquerías y el turismo, generando pérdidas económicas y desestabilización de medio de vida (Oliver *et al.*, 2018).

Los arrecifes enfrentan múltiples amenazas, entre las que destacan el estrés térmico causado por el cambio climático (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022) y la acidificación oceánica (Bove *et al.*, 2021; Fabricius, 2005; Wilkinson, 2000), factores que desencadenan el blanqueamiento coralino. Este fenómeno es una respuesta fisiológica al aumento de la temperatura en la columna de agua, que provoca la expulsión de las zooxantelas y, en consecuencia, la pérdida de pigmentación en los corales (Carballo *et al.*, 2010), dejando su estructura calcárea con una apariencia pálida.

En un evento de blanqueamiento, los corales pueden perder entre el 60-90% de sus zooxantelas y las zooxantelas restantes pueden reducir entre un 50-80% de sus pigmentos fotosintéticos (Glynn, 1996).

En casos no severos de blanqueamiento, los corales tienden a recuperarse gracias a su “resiliencia inherente”, proceso que puede durar semanas a meses (Glynn, 1996), siempre y cuando no exista otra perturbación, ya sea otro evento de blanqueamiento o enfermedades virales o bacterianas, tal como lo es el Síndrome blanco (Gallegos-Rojano *et al.*, 2022).

Sin embargo, si el evento de estrés térmico es severo y prolongado, las pocas colonias de zooxantelas que sobrevivan no se recuperan, por lo que el coral terminaría muriendo llevando al colapso de este ecosistema (Glynn, 1996).

Un ejemplo fue el blanqueamiento masivo registrado en la Gran Barrera de Coral australiana en 2016, causado por un incremento de 0.6°C de TSM (Henley *et al.*, 2024). Durante este periodo, se detectaron cinco eventos de blanqueamiento consecutivos que afectó un tercio de coral en el centro y norte de la Gran Barrera, afectando la proliferación de corales de rápido crecimiento como la *Acropora spp.* (Hughes *et al.*, 2017)

Después de ocho meses de temperaturas altas, los corales blanqueados de las zonas de la Gran Barrera de Coral mostraron una recuperación parcial: algunas colonias recobraron su coloración, sobreviviendo al evento, otros sufrieron mortalidades masivas. Solo el 1% de las colonias coralinas sobrevivientes mantuvieron signos de blanqueamiento.

Greer *et al.* (2023) documentaron otro evento entre 2016 y 2017 en el área natural protegida (ANP) de Coral Garden en Belice, asociado al NIÑO y el paso del huracán Earl en agosto de 2016, el cual redujo la cobertura coralina hasta un 16.2 m² y afectó principalmente a la especie *Acropora cerviconis*. El pico de extremo de las semanas de calentamiento por grados (DHW) registrado fue de 7.9°C-semanas, superando el umbral de blanqueamiento y debilitando aún más la resiliencia del coral en el ANP, descartando parámetros como la herbivoría, depredación, cambios en el sedimento y pH.

El Reporte del Arrecife Mesoamericano de 2024 (McField *et al.*, 2024) evaluó 286 sitios, revelando que el 39% se encuentran en mal estado, el 23% en condiciones críticas, y solo entre el 5% a 9% presentan condiciones de buenas a regulares. Los brotes de enfermedades y los eventos de blanqueamientos ocurridos desde 2022 redujeron la cobertura coralina en todo el SAM del 19% al 17% y con evidencia de mortalidad continua entre los corales formadores de arrecifes.

Este reporte destaca que el blanqueamiento de 2023, marcó un contraste con los eventos de 1995, 1998, 2017, 2019 y 2020 registrando valores extremos de DHW que oscilaron entre 16°C-semanas a 24°C-semanas lo que indica un blanqueamiento severo en las subregiones del SAM (McField *et al.*, 2024).

La NOAA a través de la página de *Coral Reef Watch* (CRW), ofrece datos de estaciones virtuales globales con métricas claves que incluyen: temperatura superficial del mar (TSM), las anomalías de temperaturas superficiales del mar (TSMA), los puntos calientes (HotSpot) y las semanas de calentamiento por grados (DHW, por sus siglas en inglés). Estos indicadores tienen el propósito de alertar y detectar sobre eventos de blanqueamiento coralino a escala global (Kayanne, 2017). Los datos del *Coral Temp* son una pieza primordial para el desarrollo de las métricas del CRW.

La TSM es una métrica fundamental para estudiar las interacciones océano-atmósfera. La NOAA emplea el producto de “CoralTemp”, que es un conjunto de datos de TSM desde 1982 hasta la actualidad, calibrada a 0.2 metros de profundidad (nivel donde habitan la mayoría de las colonias coralinas), con una resolución espacial de 5km y registros nocturnos de TSM para garantizar una mayor precisión reduciendo sesgos solares (Skirving *et al.*, 2020).

El monitoreo de TSM se realiza mediante sensores satelitales a través de infrarrojos o de microondas, mientras que las mediciones *in situ* se obtienen a partir de boyas, ya sean a la deriva o fijas a un lugar en específico (Skirving *et al.*, 2020).

Las semanas de calentamiento por grados (DHW) se definen como una métrica que cuantifica el estrés térmico acumulado, calculado como la suma de las temperaturas que

exceden el promedio mensual durante un periodo continuo de 12 semanas (Skirving *et al.*, 2020).

El objetivo principal de este trabajo es determinar la relación entre las MHW y el incremento del estrés térmico en corales, de tres sitios del SAM durante el período de 30 años.

Para la detección de MHW, se utilizan datos diarios de TSM del conjunto de OISST-V2 (*Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*, Versión 2) de la NOAA, ampliamente utilizado en estudios climáticos (Schneider *et al.*, 2013). Este conjunto de datos incluye registros de diferentes fuentes de datos como boyas, satélites (con sensores infrarrojos y de microondas), barcos oceanográficos y flotadores Argo (Reynolds *et al.*, 2007), y se interpolan en una cuadrícula de 0.25° (equivalente a 4 km) para minimizar sesgos y espacios vacíos dentro de la cuadrícula.

Para el análisis, se aplica la definición establecida por Hobday *et al.* (2016) sobre cómo identificar eventos de MHW, utilizando además el toolbox de Zhao & Marin (2019) en MATLAB, el cual permite calcular las métricas clave y categorizar los eventos de MHW según la superación del umbral establecido.

La importancia del CRW es monitorear remotamente las condiciones que pueden causar blanqueamiento, enfermedades y pérdida de cobertura coralina. Brindan información y alertas tempranas en tiempo real, tanto al público general como a investigadores, con el fin de facilitar la toma de decisiones al relacionar las interacciones entre las condiciones ambientales y el impacto en los ecosistemas, además es fundamental para generar planes de respuesta a dichos eventos de blanqueamiento.

2. Antecedentes

2.1 Blanqueamiento coralino

El primer evento de blanqueamiento coralino registrado se remonta a 1911, por parte de Mayer (1914), quien reportó un evento de estrés térmico en los arrecifes de Bird Key, Florida. Este fenómeno afectó a numerosas colonias de coral, causando la muerte de diversos peces y moluscos.

En cuanto al primer evento de blanqueamiento masivo, fue documentado por Coffroth *et al.* (1990), quien relacionó el incremento de la TSM a nivel global con el fenómeno de El NIÑO de 1982-1983, a través del análisis de datos oceanográficos y climáticos disponibles de diferentes regiones del mundo.

La relación entre el calentamiento en el Pacífico oriental y la mortalidad coralina en esa región es clara, el vínculo con eventos similares en otras zonas (como el Caribe, el Pacífico central, la Gran Barrera de Coral y el océano Índico) es menos directo. En el Pacífico central, anomalías como el descenso del nivel del mar y el aumento de ciclones fueron asociados a El NIÑO, que causaron mortalidad por exposición al aire y daños físicos.

Sin embargo, en otras regiones, como la Gran Barrera de Coral y el Caribe, aunque se registraron blanqueamientos y muertes por estrés térmico, no se pudo establecer una conexión causal definitiva con El NIÑO debido a la falta de datos oceanográficos locales y a la complejidad de las teleconexiones climáticas.

Además, muchos eventos de mortalidad coralina históricos (huracanes, mareas bajas o lluvias intensas) han ocurrido independientemente de El NIÑO, lo que dificulta atribuir exclusivamente al evento de 1982-1982 la escala global de los daños.

Berkelmans *et al.* (2004) analizaron y compararon los eventos de blanqueamiento masivo ocurridos en la Gran Barrera de Coral australiana en 1998 y 2002. Para este estudio, emplearon datos obtenidos a partir de sensores radiométricos avanzados de alta resolución de los satélites NOAA-14 y NOAA-15, usando el modelo de temperatura máxima en 3 días (max3d). En estas evaluaciones, se inspeccionaron 654 arrecifes en

1998 y 641 en 2002, incluyendo observaciones áreas tanto informadas como aleatorizadas.

Los hallazgos mostraron un aumento significativo en la severidad de blanqueo: en 1998 se registró blanqueamiento en el 42% de los arrecifes (con un 18% severos) mientras que en 2002 la incidencia alcanzó al 54% de las colonias coralinas, consolidándose como el peor evento registrado. El estudio demostró que los datos satelitales de TSM, específicamente el modelo max3d TSM, predecían el blanqueamiento con un 73.2% de precisión, superando las observaciones aéreas (56.7% en las informadas y solo el 50% de las aleatorizadas).

Además, que la proyección reveló que un aumento térmico de 1°C podría ampliar la afectación del 50% al 82% de los arrecifes, evidenciando la alta sensibilidad de los corales y pronosticando impactos catastróficos para 2050.

Skirving *et al.* (2019) analizaron el estrés térmico global entre 1985 y 2017, centrándose en el evento de blanqueamiento masivo de 2014-2017. Para ello, utilizaron indicadores como los *HotSpots* y las semanas de calentamiento por grados (DHW) del *Coral Reef Watch*, lo que permitió evaluar variaciones tanto a escala global como en las cuencas oceánicas del Atlántico, Pacífico e Índico. El estudio definió “*un año de estrés térmico*” para cada hemisferio: en el norte, abarcó del 1 de febrero al 31 de enero, mientras que, en el sur, comprendió del 1 de agosto al 31 de julio.

Los resultados mostraron que el estrés térmico afectó significativamente a los arrecifes coralinos, especialmente a partir de 2005, con eventos cada vez más duraderos. Durante el período 2014-2017, los casos en los que el DHW superó las 4°C-semanas se triplicaron en comparación con el evento de 1998. Mientras que, en 1998 aproximadamente el 20% de los corales sufrieron blanqueamiento a comparación del evento de 2016 donde esta cifra alcanzó casi el 50%, evidenciando un aumento alarmante en la intensidad y extensión del daño a los ecosistemas marinos.

Lawman *et al.* (2022) en su artículo titulado “*Rates of future climate change in the Gulf of Mexico and the Caribbean sea: Implications for Coral Reef Ecosystems*” analizaron los

efectos del blanqueamiento coralino en la costa norte del Golfo de México, Florida, la plataforma Atlántica y el Caribe occidental.

A través de simulaciones climáticas realizadas con el *Community Earth System Model* (CEMS) para el período 2015-2100, evaluaron el incremento de TSM, acidificación oceánica y mes de calentamiento por grados (DHM) como indicadores de estrés térmico.

Los resultados indican un aumento anual de TSM entre 2.2°C y 2.8 °C para 2100, con mayores alzas en el norte del Golfo de México. Para mediados de este siglo, se estima que la TSM superaran los umbrales críticos de blanqueamiento (29.5°C) en todas las regiones de estudio.

Los DHM mostraron un aumento significativo en la zona del Caribe occidental, donde podría alcanzar hasta 100 meses adicionales de condiciones perjudiciales para los corales a finales de este siglo, con mayor incidencia en verano y otoño. Aunque la acidificación oceánica representa una amenaza, la disminución estimada del pH entre el 0.2 y 0.25 unidades, con este descenso se reduce los valores de aragonita, dificultando la calcificación de los corales, lo cual su impacto es mínimo frente al estrés térmico.

2.2 Ondas de calor marina

La literatura científica evidencia que los primeros eventos de calentamiento oceánico se remontan a 1982.

El primer evento de calentamiento extremo fue reportado por Pearce *et al.* (2011), en su informe denominado “*The rise and fall of the ‘marine heat wave’ of Western Australia during the summer of 2010/2011*”, analizando este evento anómalo ocurrido entre febrero y marzo de 2011, en las costas de Australia Occidental.

El estudio combinó datos de TSM obtenidos mediante monitoreo satelital e *in situ*, complementados con observaciones de pescadores, población local y comunidad científica con el fin de analizar el impacto biológico, ecológico y económico, además de establecer relaciones con patrones climáticos (por ejemplo, La NIÑA) y el cambio climático.

Los resultados mostraron anomalías térmicas, con las TSM que superaron en más de 3°C los promedios mensuales en amplias zonas oceánicas durante febrero de 2011, alcanzando hasta 5°C superando el promedio mensual histórico en zonas costeras durante lapsos de uno o dos días a fines de febrero e inicios de marzo. Este evento extremo no fue aislado, sino que fue influenciado por una combinación de factores, que incluye un evento de La Niña y una corriente de Leeuwin de intensidad récord.

Los impactos biológicos y ecológicos fueron severos, con mortandades masivas de peces e invertebrados, alteraciones en la cadena trófica, cambios en la estructura de comunidades y efectos fisiológicos, afectando las actividades económicas que depende del turismo y las pesquerías.

A partir de estos resultados, el estudio hace hincapié en la necesidad de reforzar los monitoreos en la región para detectar cambios inusuales de TSM anómalas y profundizar en el entendimiento de las consecuencias de este fenómeno, con el fin de predecir y mitigar ondas de calor marinas futuras.

Oliver *et al.* (2018) analizaron los cambios globales y locales de las MHW mediante mediciones satelitales e *in situ* de TSM, utilizando datos desde 1900 hasta 2016. Para ello, se aplicó el concepto de Hobday *et al.* (2016) para definir las MHW como eventos que superan el percentil 90 durante más de 5 días continuos.

Los datos de TSM satelitales se interpolaron a una alta resolución espacial (0.25°) empleando la cuadrícula del conjunto de datos OISST V2 de la NOAA, el cual cuenta con registros diarios, permitiendo encontrar patrones de cambio, intensidad y duración de las MHW a través de análisis de series de tiempo y correlación.

Los resultados mostraron un aumento del 54% en los días anuales afectados por MHW, con una tendencia promedio de 0.45 eventos más por década y una frecuencia de 82% a nivel global. Las mayores variaciones se registraron en las regiones tropicales del Atlántico, donde se detectaron entre 2 a 6 eventos anuales, mientras que en el Pacífico Oriental (norte y sur), y el Indico, la frecuencia osciló entre 1 y 4 eventos anuales. En contraste, las regiones australes presentaron menos de 2 a 3 eventos anuales.

Respecto a la duración, las MHW en el Pacífico Oriental promediaron 60 días debido a la influencia de El NIÑO, mientras que en otras zonas tropicales duraron entre 10 y 15 días. Además, en 2014 y 2016 se detectó un calentamiento oceánico global que extendió la duración de estos eventos a más de 30 días.

El artículo titulado “*Marine Heatwaves in the Gulf of Mexico 1983- 2021: Statistics, recent intensifications, and threads on coral reefs*”, Feng *et al.* (2023) analizaron las características espacio-temporales, las tendencias y posibles desencadenantes geofísicos de las MHW, en el Golfo de México, determinando su impacto en los arrecifes de coral entre 1983 y 2021.

Utilizaron datos satelitales de TSM (OISST V2, con resolución diaria), DHW de la CRW, reanálisis ERA5 para variables de viento, observaciones de altimetría (AVISO) para corrientes y nivel del mar, perfiles de temperatura derivado del modelo HYCOM.

Los resultados mostraron que, durante el periodo estudiado, las MHW ocurrieron con una frecuencia superior a tres eventos anuales en las zonas costeras del norte y suroeste del Golfo de México y el Caribe, con duración promedio de 30 a 50 días e intensidades promedio entre 1 y 3°C. Entre 2016 a 2021, se registraron 78 eventos, cinco de los cuales superaron los 100 días de duración, alcanzando su máxima intensidad entre octubre y abril.

Los episodios de MHW incrementaron exponencialmente el estrés térmico en los arrecifes de Campeche y Tuxtlas, sobrepasando los umbrales de blanqueamiento entre 23.1°C y 29.6°C. En octubre de 2020, los valores de DHW rebasaron las 12°C-semanas provocando un blanqueamiento severo y mortalidad coralina en el área de estudio.

Bove *et al.* (2022), analizaron el calentamiento de los arrecifes coralinos del Caribe a lo largo de 150 años (1871-2020), dividiendo el área en ocho ecorregiones definidas por la World Wildlife Fund (WWF). Para este estudio, integraron tres bases de datos satelitales de TSM: como HadISST, Pathfinder y OISST V2.

Se reveló un calentamiento generalizado, con un aumento de 0.20°C por década. Sin embargo, las tasas varían por ecorregión: la tasa más baja se registró en las Bahamas

con $0.17^{\circ}\text{C}/\text{década}$ mientras que en el Caribe sur y oriental, alcanzaron valores altos, con $0.26^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

Además del calentamiento, se detectó un aumento en la frecuencia de MHW. Mientras que en 1987 se registraba un evento anual, para 2010 la frecuencia había incrementado a cinco eventos anuales, con uno de duración promedio de 14 días. Estos eventos de MHW han reducido el tiempo de recuperación en la estructura coralina entre eventos, que disminuyó de 377 días en 1980 a 111 días en 2010. Particularmente, el Caribe oriental registró MHW prolongados.

Si las tendencias continúan aumentando, la TSM podrían alcanzar a 1.6°C adicionales para 2100, agravando el estado de las colonias coralinas, cuya pérdida perjudicaría el equilibrio de la biodiversidad y traería consecuencias económicas de quienes depende de estos ecosistemas.

Cetina-Heredia & Allende-Arandía (2023) realizaron un análisis en el Mar Caribe para caracterizar las MHW y ondas de frío marino (MCS), evaluando su relación con los eventos de blanqueamiento coralino y las condiciones asociadas a su ocurrencia. El estudio utilizó datos de TSM del Servicio de Monitoreo Ambiental Marino de Copernicus con resolución espacial de 0.05° del periodo 1982-2021.

Los resultados mostraron un incremento significativo de TSM, con tendencias que oscilaron entre 0.004°C y 0.38°C por década. Las MHW y MCS mostraron una variabilidad estacional: las MHW alcanzaron su mayor intensidad en verano, superando el umbral en 0.47°C , mientras que las MCS fueron más intensas entre octubre y marzo, con temperaturas promedio de 0.37°C por debajo del umbral percentil 10. Además, los eventos individuales pueden persistir hasta 561 días (MHW) y 497 días (MCS).

Finalmente, el 35% de los eventos de MHW y el 17% de eventos de MCS coincidieron con eventos de blanqueamiento, mientras que el 51% restante no estuvieron relacionados a anomalías térmicas. Los análisis también indicaron que los eventos de blanqueamiento se manifiestan 272 (MHW) y 66 (MCS) días después del inicio de un evento de calentamiento o de enfriamiento extremo respectivamente.

3. Marco teórico

3.1 Métricas para describir eventos de calentamiento

3.1.1 Temperatura Superficial del mar (TSM)

Es una métrica que mide la temperatura del agua (°C) en los primeros metros del océano, medida mediante barcos, boyas y flotadores, de forma tradicional. Los satélites miden la temperatura en la capa superficial (fracciones de mm en infrarrojo o cm en microondas), pero estos requieren ajustes complejos para coincidir con las mediciones tradicionales (IPCC, 2023)

3.1.2 Temperatura superficial del mar anómalas (TSMA)

Se define como una desviación de la temperatura con respecto a su valor promedio calculado durante un período extenso, donde el promedio mensual es el más utilizado como referencia (Hobday *et al.*, 2016; IPCC, 2023). El *Coral Reef Watch* de la NOAA, considera esta métrica que se expresa en una escala que varía entre -5°C y 5°C, donde los valores positivos indican condiciones más cálidas que el promedio anual para esa fecha y localización, mientras que los valores negativos indican temperaturas anormalmente frías (Liu *et al.*, 2018).

3.1.3 Puntos calientes (HotSpot)

Es un indicador de *Coral Reef Watch* de la NOAA, que mide cuando la temperatura semanal promedio observada supera en 1°C a la semana más cálida del registro climático histórico (basado en una media mensual). Estas anomalías representan desviaciones respecto a las temperaturas típicas del verano y pueden expresarse como semanas acumuladas (Goreau & Hayes, 1994; Liu *et al.*, 2018).

Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{HotSpot} = \text{TSM actual} - \text{TSM Promedio Mensual Maximo (MMM)}$$

Los valores mayores a 1°C indican riesgo de blanqueamiento mientras los valores que alcancen los 2°C predicen daños severos en las colonias coralinas.

3.1.4 Semana de calentamiento por grados (DHW)

La semana de calentamiento por grados (°C-semanas) miden el estrés térmico que afecta a los corales cuando la TSM supera en 1°C el promedio máximo durante verano. Este indicador cuantifican el calor acumulado en un área durante las últimas 12 semanas, sumando todas las temperaturas que exceden el umbral de blanqueamiento en ese período (Maynard *et al.*, 2008).

3.1.5 Alertas de blanqueamiento (BAA)

El *Coral Reef Watch* explica que esta métrica sirve para identificar las áreas con riesgo de blanqueamiento coralino, mostrando su localización, extensión y nivel de amenaza en mapas actualizados diariamente (Liu *et al.*, 2018). Este indicador, combina dos métricas clave: DHW y los HotSpot, los datos de BAA muestran valores entre 0 y 4 (Tabla 1).

Tabla 1- Valores de BAA establecidos por el Coral Reef Watch.

Valor	Nivel de estrés	Definición
0	Sin estrés	HotSpot ≤ 0
1	Vigilancia (Bleaching Watch)	$0 < \text{HotSpot} < 1$
2	Advertencia (Bleaching Warning)	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $0 < \text{DHW} < 4$
3	Alerta nivel 1	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $4 < \text{DHW} < 8$
4	Alerta nivel 2	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $8 < \text{DHW}$

3.1.6 Percentil

Se trata de un valor estadístico que divide una distribución de datos en partes iguales, indicando el porcentaje de datos que se encuentran por debajo de un umbral específico. El percentil 90, se usa para detectar eventos extremos como las MHW y el estrés térmico coralino y nos indica que el 90% de los datos en un conjunto están por debajo del umbral y que solo el 10% restante lo supera (IPCC, 2023).

3.2 Métricas que caracterizan a las MHW

3.2.1 Umbral

Se trata de un límite crítico dentro del sistema climático (o sus forzamientos) que, al ser superado provoca un cambio cualitativo en el comportamiento del sistema. En el caso de las MHW, corresponde al percentil 90 y se calcula usando datos diarios de TSM durante un periodo en específico (Hobday *et al.*, 2016).

3.2.2 Duración

La duración de una MHW se define como el periodo consecutivo en que la temperatura supera un umbral definido, se expresa en días (Hobday *et al.*, 2016).

3.2.3 Intensidad (máxima, media y acumulada)

La intensidad de una MHW mide cuánto la TSM supera su valor normal o umbral durante el evento. Se divide en tres tipos: Intensidad máxima ($i_{\text{máx.}}$), que representa la anomalía térmica más alta registrada durante el evento; intensidad promedio (i_{mean}), que es la media de las anomalías térmicas; y la intensidad acumulada (i_{acum}), que refleja la cantidad total de calor excesivo acumulado durante todo el evento, considerando tanto la intensidad como la duración (Hobday *et al.*, 2016).

3.2.4 Frecuencia

La frecuencia se refiere al número de veces que ocurren estos eventos en un área específica durante un período de tiempo determinado, como un año o una década (Oliver *et al.*, 2021).

3.3 Arrecifes coralinos y estrés térmico.

Los corales formadores de arrecifes están constituidos de dos capas de células que mantienen una simbiosis con una microalga llamada zooxantelas. Estas habitan dentro de las células de los corales, asociadas a la membrana vacuolar (Hoegh-Guldberg, 1999). Estas microalgas transfieren nutrientes a sus hospederos, como carbohidratos y aminoácidos proporcionando aproximadamente el 95% del carbono necesario para su crecimiento, reproducción y mantenimiento (Gardner *et al.*, 2003). En compensación con

la zooxantelas, esta obtiene desechos del hospedero como amonio y fosfato (Hoegh-Guldberg, 1999).

3.4 Relación entre el estrés térmico en corales y patrones climáticos

Los arrecifes de coral enfrentan graves amenazas, entre las cuales incrementa el estrés térmico debido a múltiples factores. Las actividades antropogénicas, como la sobrepesca, alteran el equilibrio ecológico al favorecer el aumento excesivo de las algas que compiten con los corales. Además, el desarrollo costero y portuario incrementa la sedimentación y la contaminación por agentes químicos, mientras que, la acumulación de materia orgánica reduce la penetración de luz, afectando la fotosíntesis de las algas y asfixiando a las colonias coralinas (Arambucu Vizcarra et al., 2008).

Por otro lado, el cambio climático ha provocado un aumento de la TSM y la acidificación de los océanos debido a la absorción de CO₂. Estos cambios reducen la calcificación de los corales, debilitando las estructuras e incluso disolviendo el esqueleto calcáreo (Arambucu Vizcarra et al., 2008).

Uno de los fenómenos climáticos más importantes es El NIÑO, que ocurre en el Pacífico tropical y es definido como un proceso de calentamiento rápido en las aguas superficiales, con ciclos de 2 a 7 años. Engloba alteraciones como TSM y la presión atmosférica, que afecta patrones del clima (IPCC, 2023).

El fenómeno de El NIÑO está estrechamente vinculado a los eventos de blanqueamiento coralino debido al incremento de la temperatura superficial del mar. El primer evento de estrés térmico en corales ocurrió durante El NIÑO de 1982-1983. Desde entonces, estos fenómenos climáticos se han vuelto más intensos, provocando episodios de blanqueamiento más severos y prolongados, como los ocurridos durante los eventos de El NIÑO de 1996-1998, 2014-2016 (Eakin et al., 2019) y recientemente en 2023-2024 (Hoegh-Guldberg et al., 2023).

Esta tendencia se ve reforzada con el cambio climático, que ha hecho que las MHW asociadas a este fenómeno sean un 30% más frecuentes y un 15% más intensas a comparación del siglo XX, agravando aún más los impactos sobre los arrecifes del planeta (Frölicher et al., 2018).

Otras consecuencias ecológicas que ha causado El NIÑO en otras regiones ha sido el reconfigurar los patrones de los ciclones tropicales, como en el Atlántico Norte donde se reduce la frecuencia e intensidad de los huracanes en comparación con años neutros. Mientras que en el Pacífico Oriental, al ser aguas más cálidas favorecen la aparición de huracanes más fuertes y frecuentes (Gardner *et al.*, 2003).

3.4 Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM)

El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), considerado como una de las barreras coralinas más importantes del mundo, se extiende a lo largo de 1000 km en el Caribe occidental, abarcando las costas de México, Belice, Guatemala y Honduras. Su relevancia ecológica llevo a su nombramiento como área de conservación en la Declaración de Tulum en 1997 (Ardisson *et al.*, 2011), un acuerdo regional en el que estos países se comprometieron proteger los arrecifes mediante la creación de ANP, restaurar las áreas afectadas y promover el uso sostenible de los recursos costeros y marinos que ofrece el SAM (Ardisson *et al.*, 2011).

4. Justificación

El cambio climático es un tema crucial de este siglo debido al impacto en los diversos ecosistemas de nuestro planeta. Entre ellos, la pérdida de biodiversidad, reducción de cobertura coralina y de praderas marinas, así como alteraciones en la cadena trófica (Smith et al., 2023).

El incremento constante de la TSM, impulsado por la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha generado eventos de ondas de calor marinas (MHW), que afectan significativamente la salud de los sistemas coralinos a nivel mundial, los cuales han tenido un impacto notorio en años recientes. Entre ellos resaltan los episodios de blanqueamiento coralino, que afectan en las pesquerías, actividades turísticas, además del equilibrio ecológico y salud de los arrecifes.

En el Caribe Occidental, estudios recientes como Cetina-Heredía & Allende-Arandía, (2023), han identificado eventos importantes de MHW y de estrés térmico coralino en años notables como 1998, 2005, 2010 y 2017, caracterizados por más de 144 días de temperaturas extremas ($+0.54^{\circ}\text{C}$ por encima del umbral). El análisis reveló que el 35% de los blanqueamientos coralinos fueron asociados a eventos de MHW, manifestándose 28 días después de un evento térmico, aunque en casos extremos este lapso puede extenderse hasta 272 días.

El punto más alto se registró en 2023, cuando alcanzó una temperatura máxima de 18.83°C y superadas posteriormente con 19.0°C entre julio y agosto (Huang *et al.*, 2024) a nivel global, generando eventos de estrés térmicos de nivel 4 y una MHW que se prolongó por más 100 días.

El SAM es una zona extensa de cobertura coralina que abarca aproximadamente 1,000 km desde el norte de Quintana Roo hasta las costas de Honduras. Actualmente está amenazado por las actividades antropogénicas y eventos climáticos relacionados con el cambio climático.

Estas condiciones extremas han alterado significativamente la distribución y las tallas de los peces comerciales, al mismo tiempo que han deteriorado la salud de los ecosistemas

coralinos. De acuerdo con el Reporte del Arrecife Mesoamericano 2024, la cobertura coralina en la región ha experimentado una disminución del 17%, situación que clasifica a este sistema en un estado malo, acercándose a niveles críticos de degradación.

Este estudio tiene como objetivo detectar eventos de MHW y episodios de estrés térmico en corales en tres zonas del SAM: Quintana Roo (México), Belice y Honduras. La metodología combina análisis de series de tiempo basados en el marco conceptual de Hobday *et al.* (2016) para la identificación de MHW, junto con el índice DHW del CRW para evaluar eventos de estrés térmico, permitiendo así una evaluación integral de los impactos térmicos en estos ecosistemas marinos vulnerables.

5. Pregunta de investigación

- ¿Cuántos eventos de MHW y de estrés térmico coralino han sido reportados en el SAM durante los últimos 30 años?
- ¿Cómo se relacionan las MHW con la estructura coralina del SAM

6. Objetivos

6.1 General

- Determinar la relación entre las MHW y el incremento en el estrés térmico del coral en el SAM.

6.2 Específicos

- Detectar las MHW y sus métricas en los últimos 40 años en tres sitios del SAM.
- Describir los grados de calentamiento semanal en tres sitios del SAM.
- Analizar las relaciones entre las métricas de las MHW con los eventos de incremento de estrés térmico, en tres sitios del SAM

7. Metodología

7.1 Área de estudio.

Para detectar eventos de ondas de calor marina en el SAM, se seleccionaron tres sitios representativos dentro del sistema. Los puntos de estudios se promediaron para obtener los cuadrantes de cada uno de los tres sitios. En Quintana Roo, el área de estudio abarca las coordenadas 18.125° , -88.3750° , 21.6250° , $86.62.50^{\circ}$. En Belice las coordenadas son 15.8750° , -87.3750 , 18.3750° y -90.1250° . Para Honduras, el cuadrante de estudio son 15.8750° , -87.3750° , 16.6150° y -88.6250° (Figura 1).

Estos sitios fueron seleccionados para obtener datos de TSM obtenidas a partir de la página ERDDAP, utilizando las coordenadas de sus estaciones virtuales del *Coral Reef Watch* cercanas a las áreas de estudio.

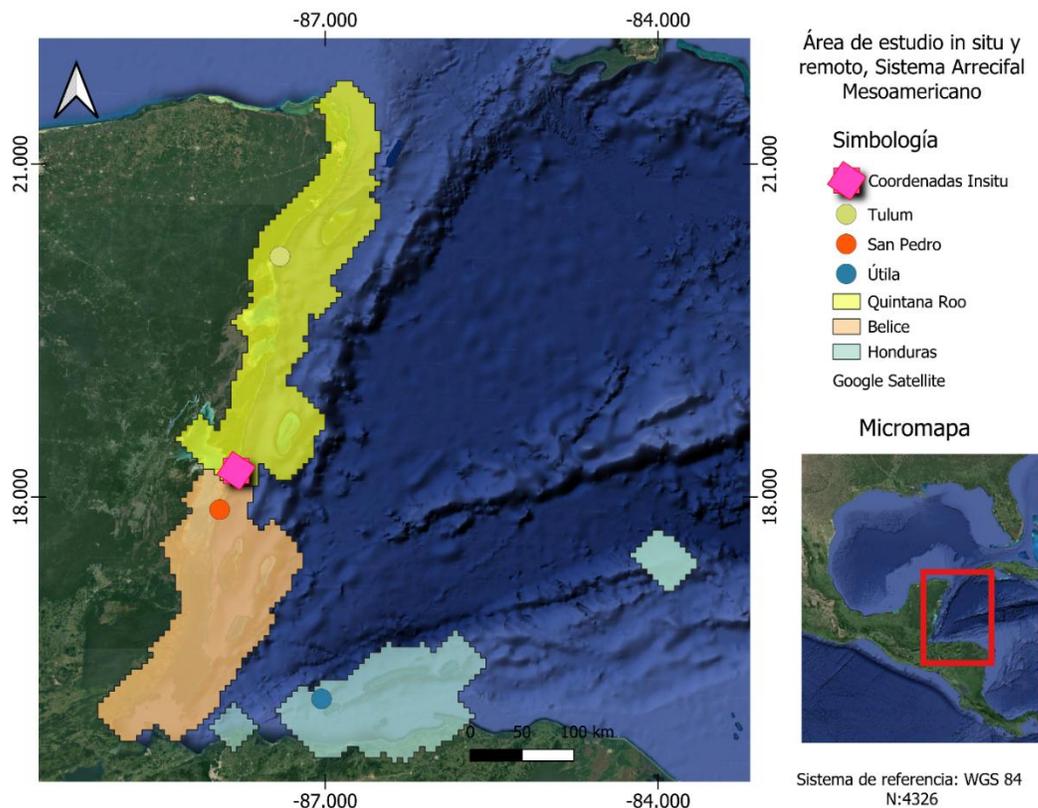


Figura 1- El área de estudio in situ está ubicada en las coordenadas $18^{\circ}19'24.59$ N y $87^{\circ}48'23.13$ O, cerca del poblado de Xcalak. Esta ubicación abarca la región coralina del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. (Jennifer López, 2024).

7.2 Instalación del equipo

Durante la visita in situ, realizada en noviembre de 2021, se instaló un sensor de profundidad y TSM modelo Hobo Onset U20 (Figura 2), programado para registrar datos cada 30 minutos, desde noviembre de 2021 hasta enero de 2024. El dispositivo fue colocado a una profundidad aproximada de 21 m.

Para su monitoreo, se planificaron dos salidas de campo: la primera, realizada el 26 de enero de 2024, que tuvo como propósito la recuperación, extracción de datos y reinstalación de un nuevo sensor. La segunda salida, llevada a cabo el día 4 de marzo de 2024, permitió la recuperación definitiva del dispositivo. La información solo se utilizó para comparar similitudes con los datos de satélite de TSM.



Figura 2- Sensor HOBOnset U20. HOBOnset Data Loggers.

7.3 Base de datos

7.3.1 Ondas de calor marina

Se descargaron datos de TSM del conjunto OISST- V2 (*Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) a través del portal ERDDAP de la NOAA (<https://www.ncei.noaa.gov/erddap/index.html>). Estos datos abarcan una cuadrícula de 0.25° (equivalentes a 4 km) con una resolución temporal diaria. El OISST- V2 proporcionan promedios diarios de TSM ajustados mediante un suavizado espacial basado en un promedio de 7 días de datos *in situ*, lo que reduce sesgos y elimina los ciclos diurnos (Reynolds *et al.*, 2007).

Este conjunto de datos se genera combinando observaciones del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución en el Infrarrojo (AVHRR) y el Radiómetro Avanzado de Escaneo de Microondas (AMSR) a partir de 1982 hasta 2023.

7.3.2 Grados de calentamiento semanal (DHW)

Para el análisis y caracterización histórica de TSM y DHW en los tres sitios de estudio, se utilizaron datos de la NOAA obtenidos a través de la página *Coral Reef Watch* (<https://coralreefwatch.noaa.gov>) cubriendo el período de 1985 a 2023. Esta base de datos proporciona información satelital en forma de alertas de blanqueamiento (BAA), mediante las estaciones virtuales ubicadas alrededor del mundo, incluidas las de nuestros puntos de interés.

Esta página también incluye datos de anomalías de TSM, puntos calientes (“HotSpot”), promedio mensual máximo (MMM), DHW y TSM en el percentil 90. Cabe destacar que los datos de TSM están basados en la información de “*Coral Temp*”, versión 1.0 que combina diferentes análisis históricos globales de TSM para identificar patrones térmicos relevantes (Skirving *et al.*, 2020).

Los datos obtenidos tienen una resolución espacial de 5km x 5km por pixel y son generados diariamente por medio de los satélites GOES (Satélite Geoestacionario Operacional Medioambiental), específicamente las GOES- 13 y GOES-15.

Los puntos calientes (HotSpots, término en inglés) se detectan cuando la TSM incrementa, superando el umbral crítico establecido por el percentil 90 de la serie histórica (Wilkinson, 2004). Esta métrica calcula la diferencia entre la TSM actual y el promedio mensual máximo (MMM). Si el resultado es mayor que 0, indica un mayor riesgo de blanqueamiento coralino (Skirving *et al.*, 2020).

La métrica DHW cuantifica la intensidad y duración del estrés térmico acumulado, siendo un indicador clave para predecir el riesgo de blanqueamiento y mortalidad en corales. Su cálculo se basa en la suma acumulada de anomalías térmicas semanales (valores por encima del MMM) durante un período de 12 semanas consecutivas (van Hooidonk & Huber, 2009). Según los estándares establecidos, cuando el DHW supera 4°C-semanas, se considera que existe un riesgo significativo de blanqueamiento coralino, mientras que al alcanzar 8°C-semanas, el estrés térmico es tan severo que puede provocar blanqueamiento masivo y mortalidad en especies termosensibles (Gierz *et al.*, 2020; Kayanne, 2017).

La alerta de blanqueamiento se obtiene combinando los valores de HotSpots y de DHW durante una semana, lo que permite asignar un nivel de estrés de 1 al 4 (Liu *et al.*, 2018).

Tabla 2- Niveles de blanqueamiento, de acuerdo con la Coral Reef Watch.

Nivel de estrés	Definición	Interpretación
No estrés	HotSpot ≤ 0	No hay blanqueamiento
Observación de blanqueamiento	$0 < \text{HotSpot} < 1$	
Alerta de blanqueamiento	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $0 < \text{DHW} < 4$	Riesgo de posible blanqueamiento.
Alerta nivel 1	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $4 < \text{DHW} < 8$	Riesgo de blanqueamiento en todo el arrecife.
Alerta nivel 2	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $8 < \text{DHW} < 12$	Riesgo de blanqueamiento con mortalidad de corales sensibles al calor.
Alerta nivel 3	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $12 < \text{DHW} < 16$	Riesgo de mortalidad en múltiples especies.
Alerta nivel 4	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $16 < \text{DHW} < 20$	Riesgo severo, mortalidad en múltiples especies (>50% de corales).
Alerta nivel 5	$1 \leq \text{HotSpot}$ y $20 \leq \text{DHW}$	Riesgo de mortalidad casi total (>80% de los corales).

7.4 Detección de ondas de calor marinas

El análisis se realizó con el toolbox de Zhao & Marin (2019) en MATLAB, que permite detectar, visualizar y calcular tendencias térmicas anuales de MHW. Cada uno de los eventos detectados se categorizan según el porcentaje de días en los que la TSM superó el percentil 90 durante el episodio (Hobday *et al.*, 2016, 2018) (Tabla 3). Estas categorías ayudan a entender la gravedad del evento y sus posibles impactos en los ecosistemas marinos. Cuanto mayor sea la categoría, más intenso y dañino será la MHW.

Tabla 3- Categorización de los MHW según Hobday et al. (2016).

Valor % días	Categoría
1-2x	Moderado I
2-3x	Fuerte II
3-4x	Severo III
>4x	Extremo IV

7.5 Análisis de datos

7.5.1 Series de tiempo

El análisis de series de tiempo permite estudiar las variaciones en un conjunto de datos mediante su representación espectral, identificando las funciones periódicas dominantes que explican su comportamiento (Thomson & Emery, 2014). Para este estudio, se procesaron los datos de TSM y DHW, desde 1982 (para MHW) y 1985 (para DHW) hasta 2023 utilizando MATLAB.

El análisis comparativo se organizó por décadas para detectar cambios significativos, eventos claves de blanqueamiento coralino y MHW, así como patrones de variación térmica. Los valores de DHW se trabajaron dentro del rango de 0°C-semana a 25°C-semana, escala que abarca desde condiciones normales hasta eventos de estrés térmico extremo, lo que permite cuantificar la intensidad y frecuencia de los episodios de estrés térmico en el periodo estudiado.

7.5.2 Umbral de blanqueamiento

Para identificar los eventos de blanqueamiento coralino se utiliza los rangos establecidos por la CRW de la NOAA. Cuando los valores de DHW alcanzan 4°C- semana ocurre un evento de blanqueamiento. Al llegar a 8°C- semana ocurre un blanqueamiento generalizado y una muerte de corales termosensibles, mientras que los valores superiores a 8°C-semana desencadenan mortalidad masiva en las colonias de coralinas.

El umbral de blanqueamiento para cada uno de los sitios se calculó sumando 1°C al promedio mensual máximo de temperatura (MMM), calculado a partir de los doce promedios mensuales diarios proporcionados por las estaciones virtuales del CRW (Tabla 4). Este valor marca el límite térmico crítico que los corales pueden tolerar antes de comenzar a sufrir estrés térmico.

Tabla 4- Cálculo de umbral de blanqueamiento: los datos de MMM fueron obtenidos de las Estaciones virtuales regionales de 5 km de la CRW y se le sumó 1°C para determinar dicho umbral.

	Quintana Roo (México)	Belice	Honduras
Promedio Mensual Máximo (MMM)	28.7392	28.8660	28.8700
+1			
Umbral de blanqueamiento	29.7392	29.8660	29.8700

7.5.3 Correlación de Pearson

El coeficiente de Pearson es un indicador estadístico que cuantifica la relación lineal entre dos variables (MHW y DHW). Representado con la letra “r”, este coeficiente toma valores entre -1 y 1 (Roy-García *et al.*, 2019). Un valor de -1 indica una relación negativa, donde una variable aumenta mientras que la otra disminuye (si MHW no incrementan los valores de DHW). Un valor de 1, representa una relación positiva, donde ambas variables aumentan juntas (si MHW incrementan los valores de DHW). Si la relación de estas dos variables resulta no ser lineal, esto significará que este coeficiente no es representativo (Aranibar, 2017).

7.5.4 Covarianza

Es un método estadístico que evalúa la relación entre una variable dependiente y una independiente, controlando al menos una variable adicional (covariables), lo cual reduce la heterogeneidad causada por la variable dependiente de interés por la influencia de una o varias variables cuantitativas (Aranibar, 2017).

En nuestro estudio se definieron las MHW como variable independiente y el índice DHW como variable dependiente en la serie temporal, utilizando específicamente la intensidad máxima (i_{max}) para el caso de MHW y los valores de DHW.

7.5.5 Cointegración de Engle- Granger

Es un método estadístico aplicado a dos series temporales (y_t y x_t) que analiza la relación a largo plazo entre dos variables que, eventualmente, pueden converger y comportarse como variables estacionarias (cuyas propiedades estadísticas no cambian con el tiempo) o no estacionarios (si las propiedades no cambian con el tiempo) (Montero, 2013).

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \epsilon_t$$

Donde:

- β_0 : Intercepto, es decir el punto en el cual la recta estimada cruza el eje y_t y cuando $x_t = 0$,
- β_1 : Coeficiente de la relación lineal,
- ϵ_t : Residuos de la estimación, que representan las diferencias entre los valores de y_t y los valores predichos por la ecuación.

En nuestro estudio se definieron las MHW como variable x_t y el índice DHW como variable y_t en la serie temporal, utilizando específicamente la intensidad máxima para el caso de MHW y los valores de DHW.

7.5.6 Causalidad de Granger

Este concepto estadístico, permite evaluar si la información pasada de una variable x_t (MHW) ayuda a predecir los valores futuros de la variable y_t (DHW) más allá de lo que ya explica su propio pasado (Acín Coello de Portugal, 2022; Bodri & Cermak, 2007).

Este método estadístico se hacen dos regresiones:

1. Modelo sin x_t (solo con retardos de y_t):

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-i} + \epsilon_t$$

Donde:

- α_0 : Intercepto,
- α_i : Coeficientes autorregresivos,
- p : Numero de rezagos (lags) seleccionados,
- ϵ_t : Terminio de error.

2. Modelo con x_t (incluyendo retardos de X):

$$y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^p \gamma_j x_{t-j} + \mu_t$$

Donde:

- β_0 y β_i : Coeficientes para y_t ,
- γ_j : Coeficientes que capturan el efecto de los rezagos de x_t sobre y_t ,
- μ_t : Terminio de error del modelo completo.

Por último, se realiza una prueba de hipótesis para determinar si los coeficientes γ_j son estadísticamente significativos mediante un test F que permitirá comparar los dos modelos:

$$F = \frac{(RSS_{restr} - RSS_{completo})/p}{RSS_{completo}/(n - k)}$$

Donde:

- RSS_{restr} : Suma de los residuos al cuadrado del modelo restringido,
- $RSS_{completo}$: Suma de los residuos al cuadrado del modelo completo,
- p : Número de rezagos para x_t ,
- n : Número de observaciones,
- k : Número de parámetros estimados en el modelo completo.

7.5.7 Transformada de Hilbert

Se trata de un método matemático que analiza la relación entre dos señales (X y Y) en términos de amplitudes instantáneas y fases instantáneas (Shumway & Stoffer, 2017). Las amplitudes instantáneas representan la magnitud de las oscilaciones de las dos señales (MHW y DHW) analizadas mientras que las fases instantáneas permiten entender los desfases o sincronizaciones de dos señales a lo largo del tiempo (Matsuki *et al.*, 2023).

Dada una señal $x(t)$, la transformada de Hilbert se define como:

$$\mathcal{H}\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

Donde:

- $\mathcal{H}\{x(t)\}$: Transformada de Hilbert de $x(t)$,
- $x(\tau)$: Señal original
- $t - \tau$: Retardo en la integración. La integral es interpretada como el valor principal de Cauchy para evitar singularidades cuando $t = \tau$.

7.5.8 Correlación cruzada con desfases

Es un análisis que se utiliza para medir la relación entre dos series temporales X_t (MHW) y Y_t (DHW), considerando desplazamientos temporales entre ellas, lo cual puede extenderse a series multivariadas, donde se evalúan múltiples componentes a la vez. Permiten identificar el grado y la dirección de la correlación en diferentes desfases temporales (Shumway & Stoffer, 2017):

$$\rho_{XY}(k) = \frac{\sum_t (X_t - \bar{X})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_t (X_t - \bar{X})^2 \sum_t (Y_{t-k} - \bar{Y})^2}}$$

Donde:

- $\rho_{XY}(k)$: Correlación cruzada con desfase k ,
- X_t : Valores de la serie X en el tiempo t ,
- Y_{t+k} : Valores de la serie Y desplazada k pasos en el tiempo (positivo o negativo),

- \bar{X} : Media de la serie X ,
- \bar{Y} : Media de la serie Y ,
- t : índice de tiempo,
- k : Desfase o lag.

8. Resultados.

8.1 Punto *in situ*

Se realizó un análisis de series de tiempo con datos de TSM y profundidad del mar obtenidos del sensor HOBO Onset U20 instalado *in situ* entre el 26 de noviembre de 2021 y 14 de enero de 2024 (Figura 3). Los resultados mostraron un aumento significativo en la TSM durante octubre de 2023, alcanzando picos de 30.9°C, mientras que en febrero de 2022 se registró la TSM más baja con 26.31°C.

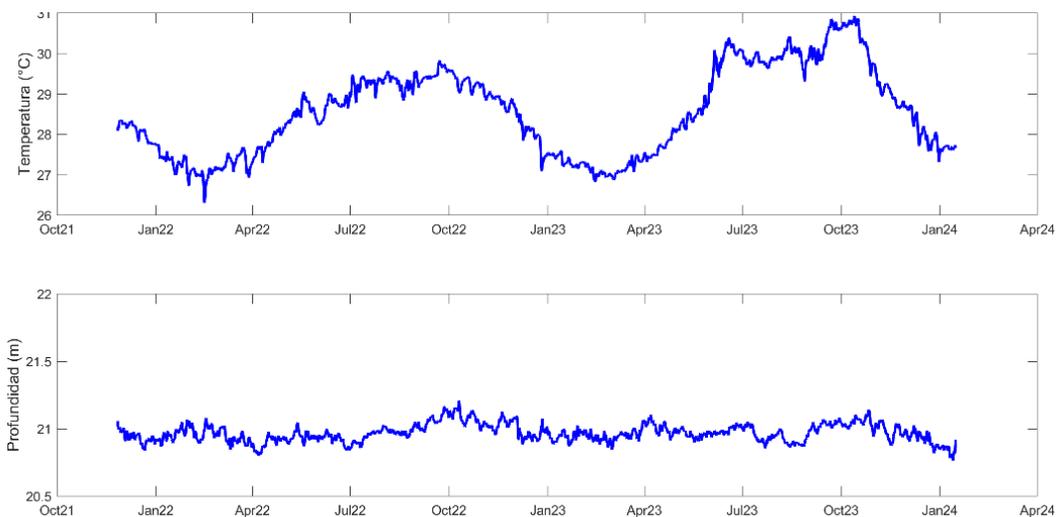


Figura 3- TSM y profundidad obtenida del HOBO Onset U20: las temperaturas más altas se registraron entre mayo y noviembre, la intensidad máxima ocurrió en octubre, y las temperaturas más bajas entre enero a abril.

Adicionalmente, los registros satelitales de la ERDDAP para Xcalak (México) revelaron temperaturas similares donde la TSM promedio más alta detectada por satélite fue de 29.7°C en todo el período (2021-2023) (Figura 4).

Estos datos se asociaron a eventos significativos de blanqueamiento coralino durante este período. El primer evento ocurrió el 26 de septiembre de 2022, con un índice de DHW 5.6 °C-semanas (clasificado como Advertencia de blanqueamiento, según la métrica BAA de la CRW), mientras que el segundo se registró el 21 de octubre de 2023, con un DHW de 21.3°C- semanas (correspondiente a alerta nivel 2) (Figura 4).

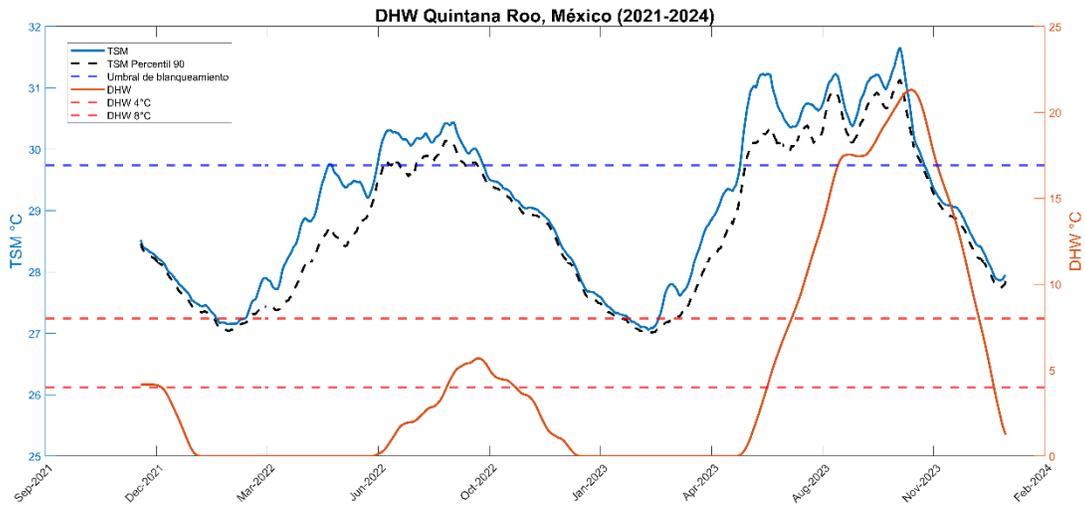
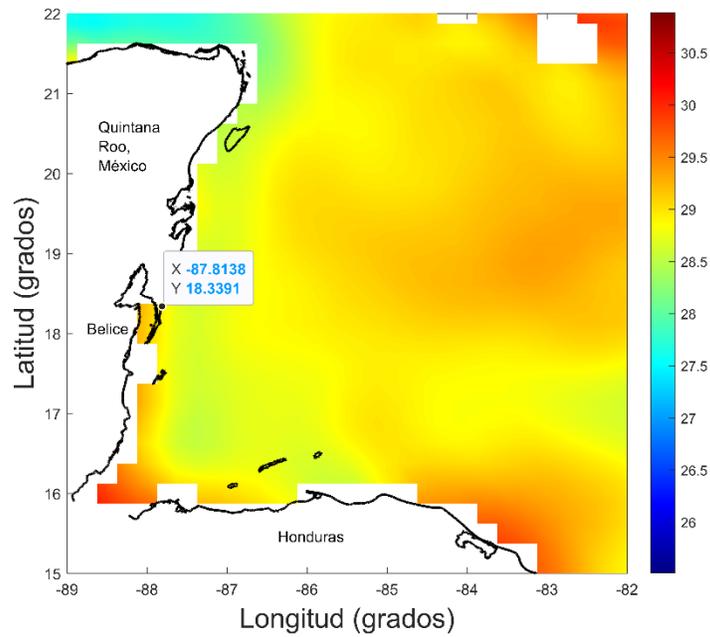


Figura 4- Mapa térmico del punto in situ del período 2021-2023, donde la temperatura promedio alcanzó 29.7. Se relacionó esta alza con DHW de la CRW del mismo período donde coincidieron con los picos de TSM altos, con 31.6°C el 11 de octubre de 2023 y un evento de blanqueamiento nivel 2 con valores que sobrepasaron los 8°C-semanas.

8.2 MHW

Para la detección de eventos MHW, se analizó una serie temporal de TSM correspondiente al periodo de 1982-2023 (obtenida de la ERDDAP) utilizando el *toolbox*

de Zhao & Marin (2019) en MATLAB. Este proceso se obtuvo una gráfica espectral de línea de eventos, así como una tabla con métricas de duración, intensidad y frecuencia. Estos resultados se compararon con los registros disponibles en la base de datos de *Marine Heatwaves* (<https://www.marineheatwaves.org/tracker.html>), lo que permitió validar y contabilizar la totalidad de los eventos de cada punto remoto del SAM, con ello contestar la primera pregunta de investigación.

Durante el período analizado, se identificaron un total de 119 eventos de MHW en Quintana Roo (México) (Figura 5), 120 eventos en Belice (Figura 6) y 121 eventos en Honduras (Figura 7), con el año 2023 mostrando la mayor frecuencia de eventos extremos.

En la región de Quintana Roo (México), se detectó un evento significativo que persistió durante 245 días (4 de mayo a 3 de enero de 2024) (Figura 5), caracterizado por condiciones moderadas (68% de los días de duración). La intensidad acumulada de este evento alcanzó 294.18°C- días, con una intensidad promedio de 2.22°C sobre el umbral.

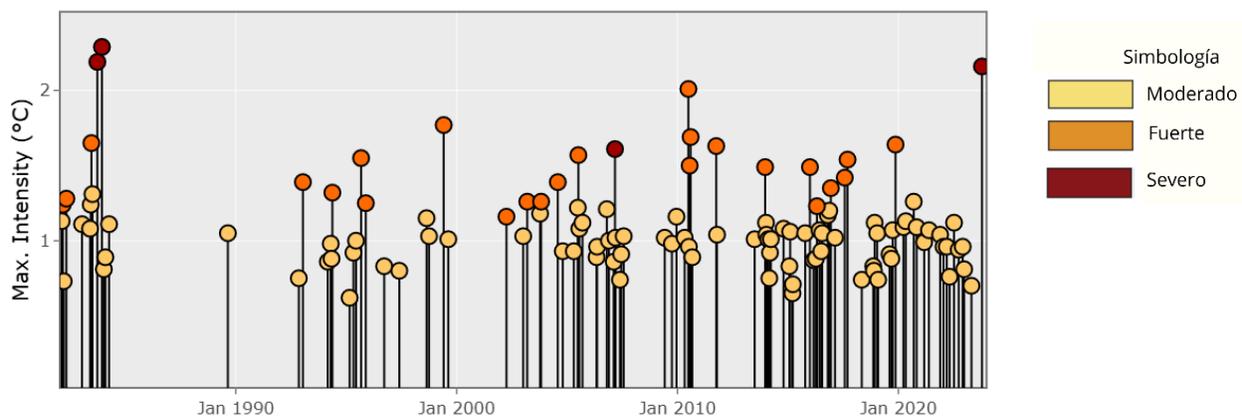


Figura 5- *Eventos de MHW detectadas en Quintana Roo (México) entre 1982-2023. Durante este período se registró tres eventos severos con intensidades máximas entre 2.19°C y 2.29°C.*

En Belice, el evento de MHW más prolongado duró 96 días, desde el 20 de mayo hasta 23 de agosto de 2023, caracterizado predominantemente por condiciones moderadas (70% del período). Este episodio registró una intensidad promedio de 1.257°C sobre el umbral, acumulando un estrés térmico total de 120.64°C-días (Figura 6).

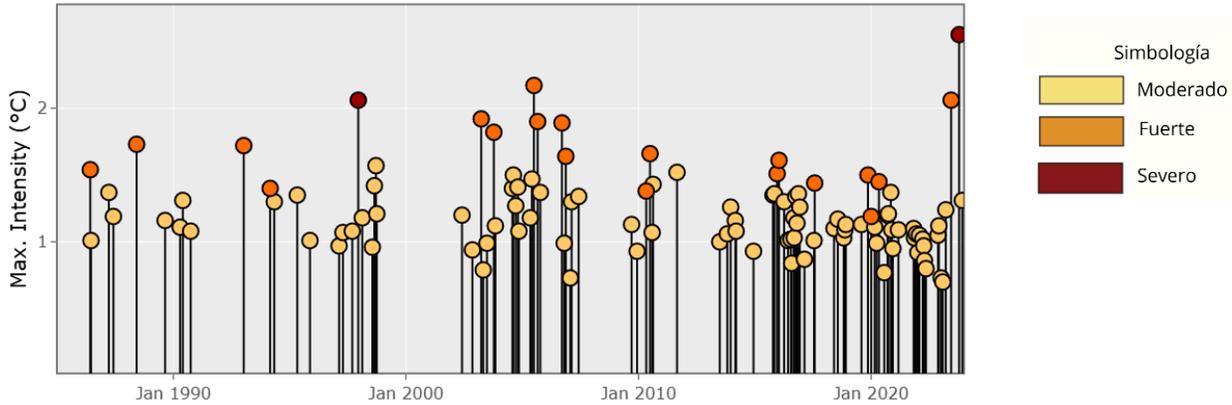


Figura 6- Eventos de MHW detectadas en Belice entre 1982-2023. Durante este período se registró dos eventos severos con intensidades máximas entre 2.06°C y 2.55°C.

En Honduras se detectó un evento relevante de 66 días, desde el 5 de septiembre hasta 9 de noviembre de 2023, caracterizado predominantemente por condiciones moderadas (80% del período). Este episodio registró una intensidad promedio de 1.3°C sobre el umbral, acumulando un estrés térmico total de 85.82°C-días (Figura 7).

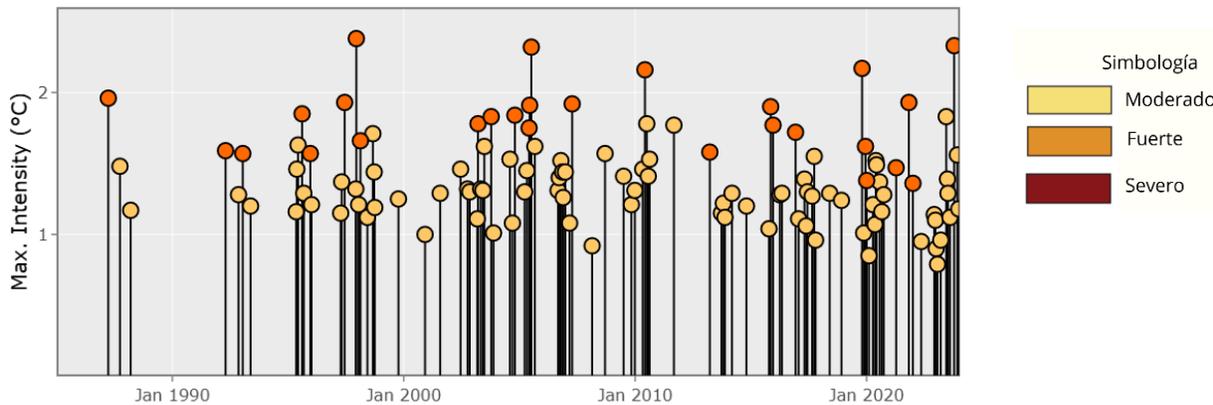


Figura 7- Eventos de MHW detectadas en Honduras entre 1982-2023. Durante este período se registró siete eventos nivel fuerte con intensidades máximas entre 2.02°C y 2.38°C.

8.3 DHW

8.3.1 Eventos de estrés térmico

Entre 1985 a 2023 se contabilizaron 48 eventos de blanqueamiento coralino en los tres sitios, de los cuales 15 ocurrieron en Quintana Roo (México), 15 en Belice y 18 en Honduras. Estos eventos rebasaron un rango de 4 a 21 DHW (Figura 8). Cabe destacar que los eventos de blanqueamiento comenzaron a presenciarse a partir de 1995 en los tres sitios, con alerta nivel 1 y se incrementó hasta llegar los 21 DHW con alerta nivel 2 en 2023.

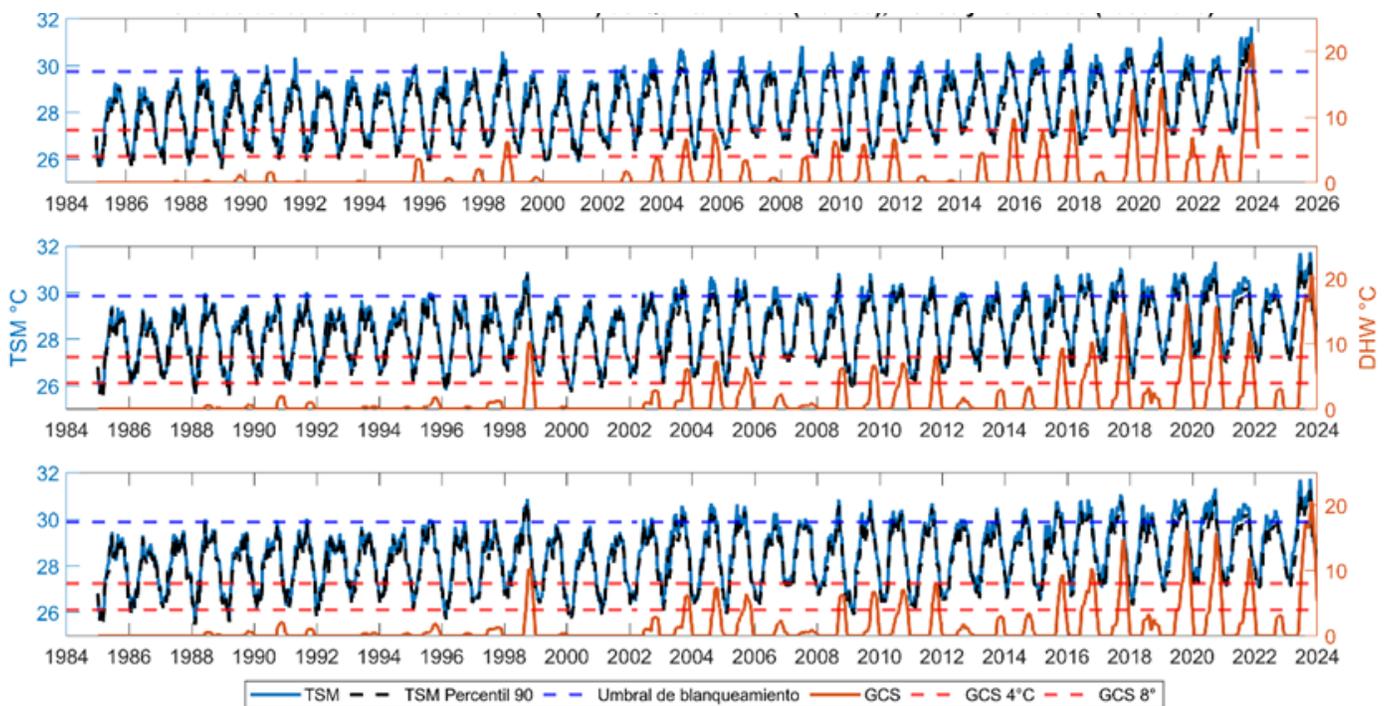


Figura 8- Serie temporal de TSM y DHW en México (Quintana Roo), Belice y Honduras durante el periodo de 1985- 2025. Las líneas punteadas azules indican los umbrales de blanqueamiento y las líneas negras representan las TSMA. El primer evento de blanqueamiento registrado ocurrió en 1998, cuando se superó las 4°C-semanas y las temperaturas comenzaron a intensificar a partir de 2016.

Para observar los cambios y detectar los eventos de estrés, se dividió la serie de tiempo por décadas (Figura 9). En Belice se observaron 7 eventos de estrés térmico que se prolongaron por más de 100 días, mientras que en Quintana Roo (México) tuvieron 5 eventos y Honduras con 3 eventos. El más largo tuvo una duración de 197 días (Belice) en 2023. Con una intensidad máxima promedio de 9.19°C.

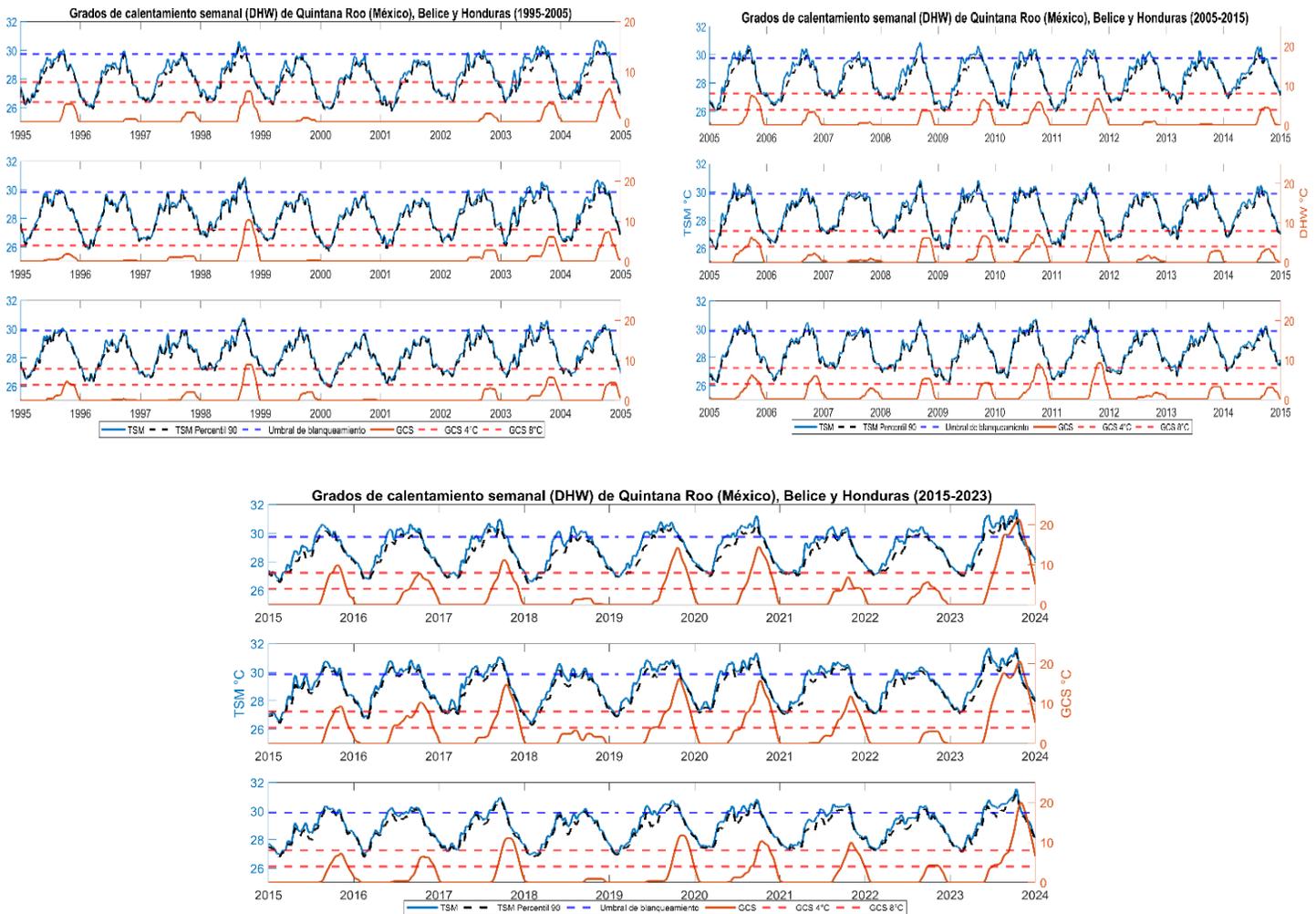


Figura 9- DHW y TSM en Quintana Roo (México), Belice y Honduras divididos por décadas. Los eventos de blanqueamiento fueron más frecuentes e intensos durante la década de 2015-2023 a comparación de las décadas de 1995-2005 y 2005-2015.

8.3.2 Alertas

Se registró además la frecuencia de las alertas de blanqueamiento en un período de 7 días (BAA- 7días Máx.) en cada uno de los puntos de estudio. La mayoría de los registros

mostraron valores cero, mientras los valores 1 (Advertencia de blanqueamiento) superó los 4,000 días acumulados en cada sitio del SAM, indicando que los sistemas coralinos han estado bajo estrés térmico recurrente pero no extremo (Tabla 5).

Tabla 5- Total de BAA- 7 días Máx. registradas en los tres sitios de estudio remoto del período 1985-2023.

Nivel de estrés	Quintana Roo	Belice	Honduras
Sin blanqueamiento (0)	8456	7914	8238
Valor 1	4132	4381	4206
Valor 2	949	1039	1135
Valor 3	422	509	452
Valor 4	285	401	213

Los valores 4 (Alerta nivel 2) y 3 (Alerta nivel 1) aparecieron por primera vez durante el primer de evento de blanqueamiento de 1998 en el área de estudio, intensificándose a partir de 2015, con Belice como la zona con mayor frecuencia de observaciones debido al calentamiento oceánico acelerado (Figura 10).

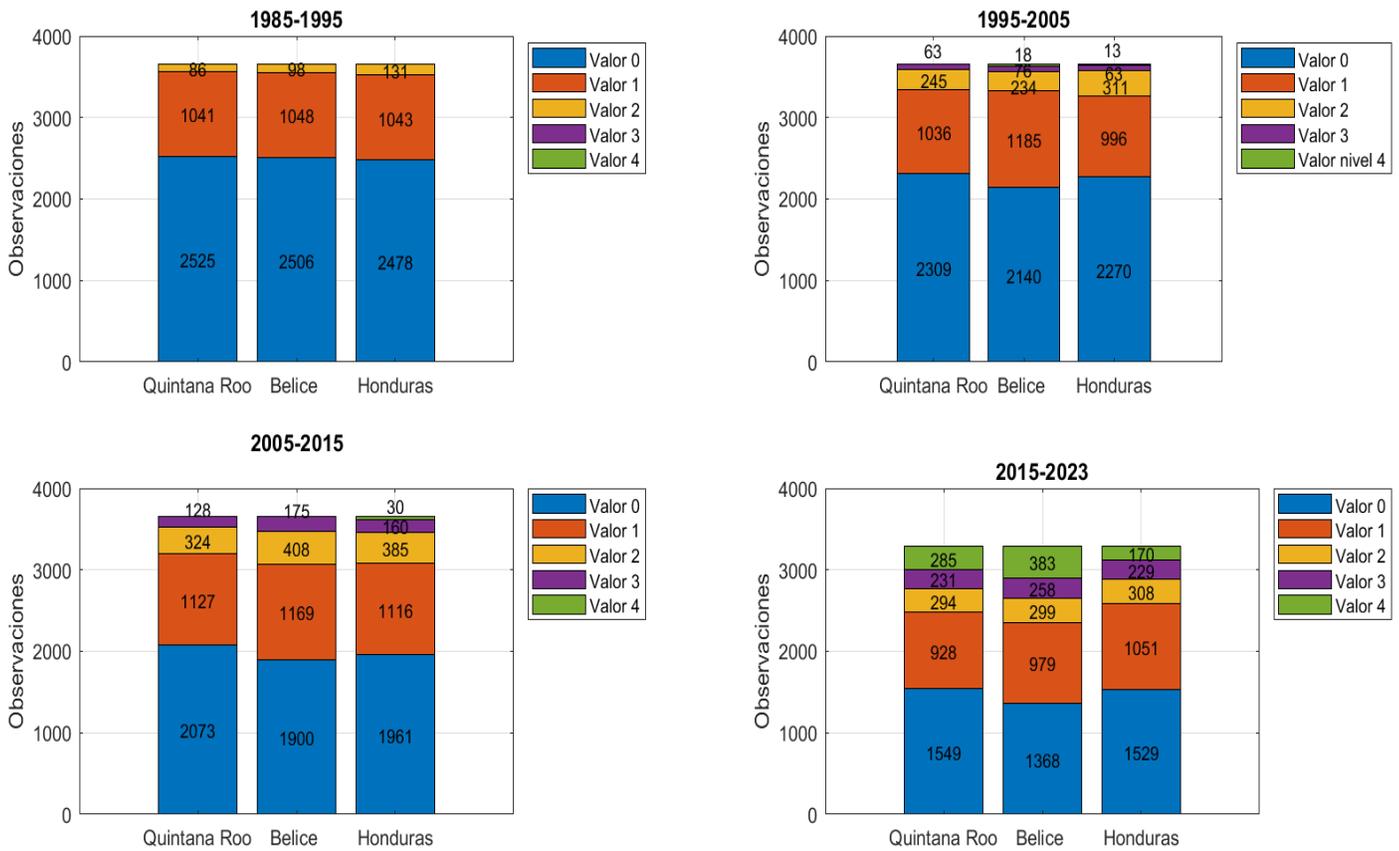


Figura 10- Total de BAA- 7 días Máx. registradas en los tres sitios de estudio divididas por décadas. Las alertas nivel 1 comenzaron a frecuentar durante la década de 1998 y las alertas nivel 2 durante la última década, en los tres sitios de estudio.

8.4 Relación MHW- DHW

Para establecer la relación entre ambas variables, se identificó el primer evento de estrés térmico, ocurrido en 1998 (Figura 11), y se tomó este año como punto de inicio para los eventos de MHW.

El blanqueamiento coralino dentro del SAM se manifestó cuando los valores de DHW sobrepasaron los 4°C-semanas durante el periodo de agosto-diciembre de 1998, mientras que las MHW se detectaron entre agosto-septiembre del mismo año, presentándose tres eventos en cada sitio del SAM con categoría moderada, prolongándose entre 29 a 32 días

Ambos casos tuvieron picos en años en 1998, 2005, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2023, revelando una clara correlación temporal entre los episodios de estrés térmico y las ondas de calor marina.

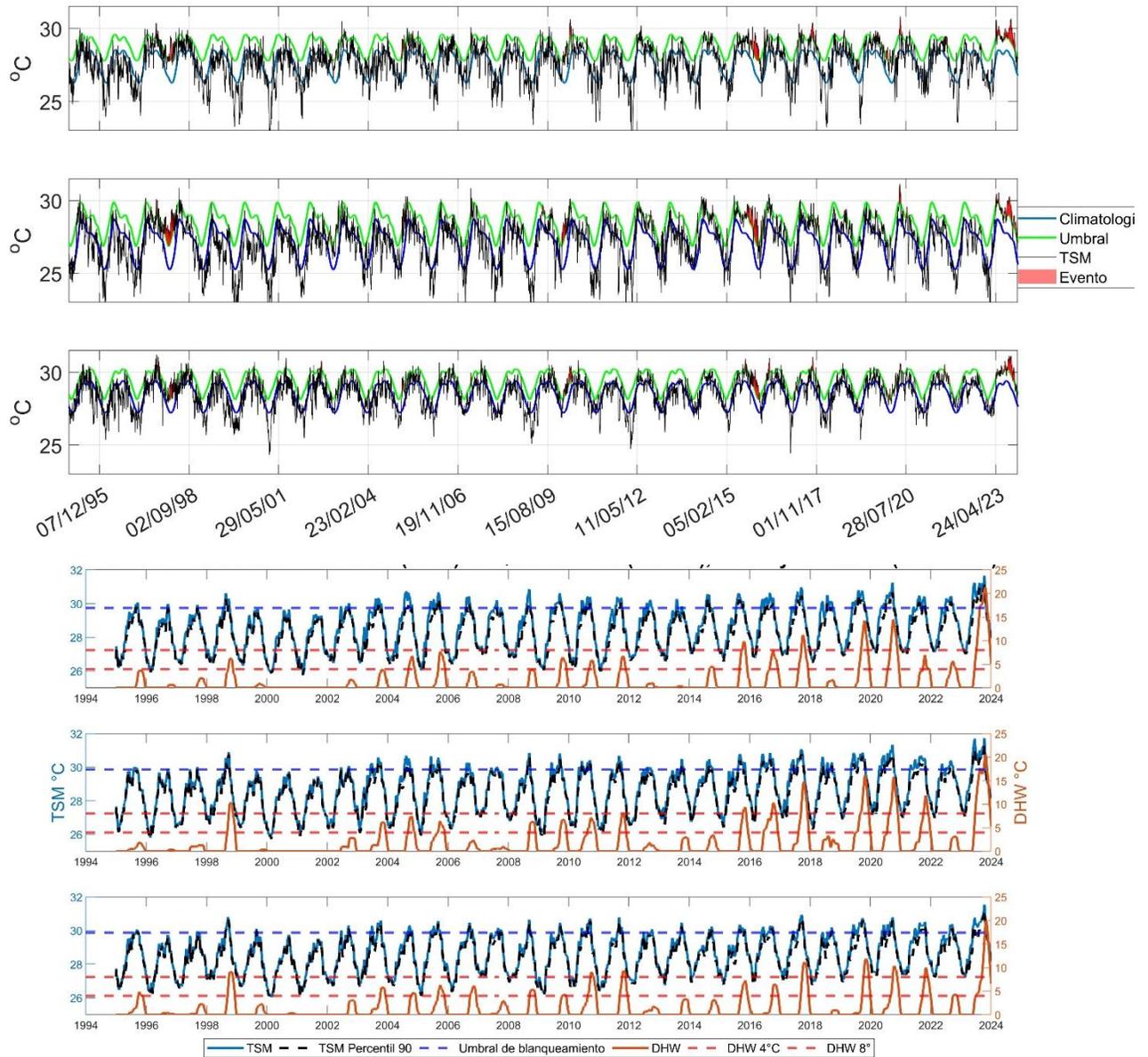


Figura 11- A) Gráfica de líneas de eventos de MHW en Quintana Roo (México), Belice y Honduras del período 1995- 2023. **B)** Series de tiempo de TSM y los DHW en Quintana Roo (México), Belice y Honduras durante el período 1995-2023. Ambas gráficas se pueden observar que el evento de MHW y DHW fueron intensas en 2023.

En los análisis de correlación de ambos fenómenos, se definió las MHW como variable independiente y el índice DHW como variable dependiente en la serie temporal.

En Quintana Roo (México), se obtuvo una correlación Pearson de $r= 0.57$ con una covarianza de 0.41. Al aplicar un análisis de correlación cruzada con desfases mediante la transformada de Hilbert, se alcanzó un valor de 0.73 o 73%, con un desfase de -4 días (Figura 12). Es notable que de los 119 eventos de MHW y 15 episodios de estrés térmico (DHW) identificados, solamente 7 eventos de DHW presentaron una relación directa con las ondas de calor marina, lo que demuestra que hay una causalidad significativa ($p < 0.05$).

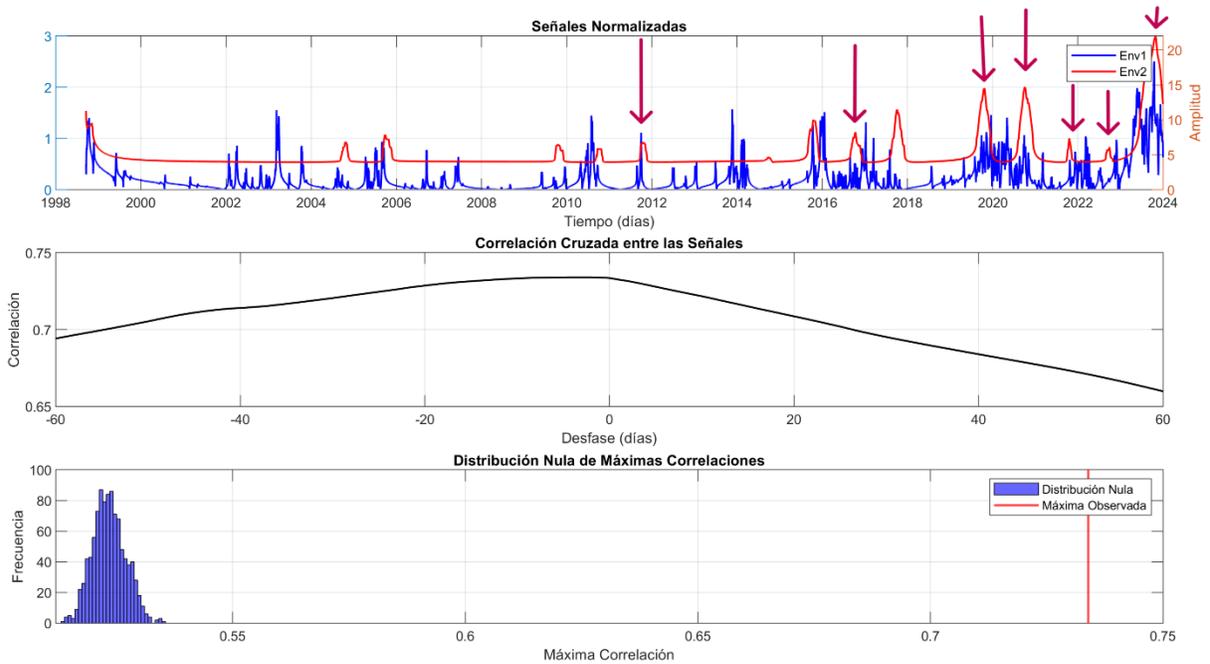


Figura 12- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Q. Roo, México. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.

En Belice, la correlación de Pearson mostró un valor de $r= 0.44$, mientras que la covarianza fue de 0.34. Por otro lado, la correlación cruzada con desfases aplicados a la transformada de Hilbert alcanzó un valor de 0.68 o 68%, con un desfase de -19 días (Figura 13). Sin embargo, de los 120 eventos de MHW y 15 episodios de estrés térmico (DHW) identificados, solamente solo 5 eventos de DHW coincidieron con eventos de MHW. Lo cual demuestra que hay una causalidad de $p < 0.05$ (significativo).

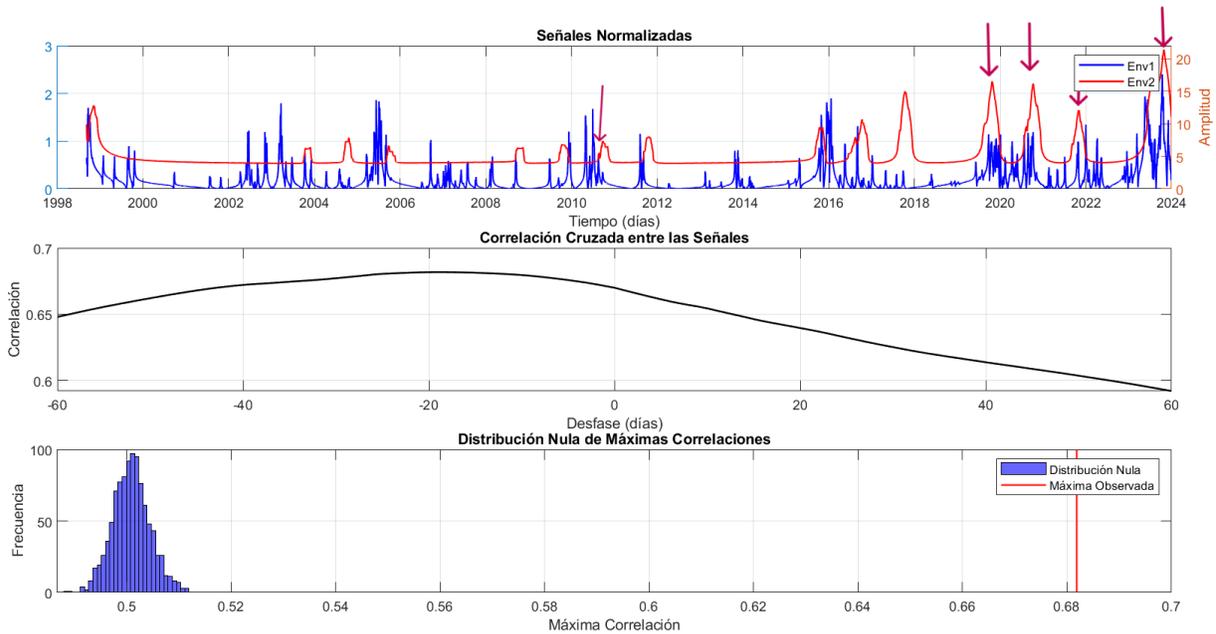


Figura 13- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Belice. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.

Finalmente, en Honduras, la correlación de Pearson alcanzó un valor de $r = 0.40$, con una covarianza de 0.22, mientras que la correlación cruzada con desfases aplicados a la transformada de Hilbert alcanzó 0.64 o 64%, con un desfase de -12 días (Figura 14). No obstante, de los 121 eventos de MHW y 18 episodios de estrés térmico (DHW) identificados, solamente 6 eventos de DHW coincidieron con eventos de MHW, lo que demuestra que hay una relación de causalidad significativa ($p < 0.05$).

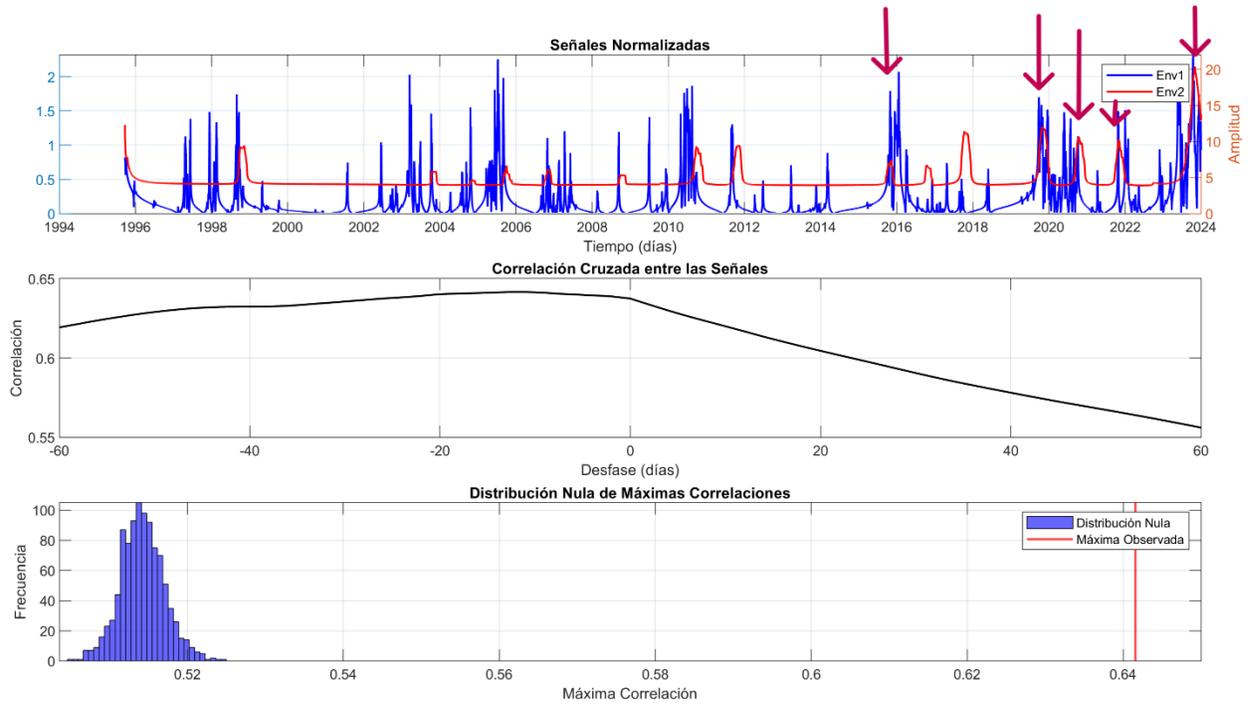


Figura 14- Correlación cruzada con desfases a la transformada de Hilbert de Honduras. La envolvente 1 corresponde a MHW mientras que la envolvente 2 son DHW. Las flechas en color fucsia indican los eventos que coinciden al mismo tiempo.

9. Discusión

En el sitio *in situ* ubicado en Xcalak (México) mostraron un aumento significativo en la TSM durante octubre de 2023, alcanzando picos de 30.9°C. Estos valores concuerdan con los registros satelitales del CRW para Quintana Roo (México), que reportaron 31.6°C el 11 de octubre de 2023, así como de la ERDDAP que alcanzaron 29.7°C para el mismo período.

En el SAM, entre 1998 a 2023, se detectaron un total 279 MHW, con una duración promedio anual de 13 a 18 días, una intensidad promedio anual de 2.62 °C y una frecuencia promedio entre 1.4 a 1.8 eventos anuales. Estos fenómenos inician en verano, intensificándose en otoño, aunque los últimos años han comenzado a manifestarse desde la primavera, evidenciando un patrón de inicio temprano y mayor duración.

En el mismo período se detectaron en total de 47 eventos de estrés térmico, siendo el más prolongado el de Belice en 2023 (197 días), con una intensidad máxima promedio de 9.19°C. El pico alto de este evento se presentó durante el otoño de igual forma en todos los sitios de estudio.

Los eventos de blanqueamiento más severos ocurrieron en los años 1995, 1998, 2005, 2010, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2023, destacando 2016, 2017 y 2023 donde superaron los 4°C-semanas de DHW. Según Muñoz-Castillo *et al.* (2024), el blanqueamiento coralino de 2016-2017 afectó el 50% de los arrecifes del SAM, con valores de DHW superiores a 7°C-semanas y expuestos a más de 15°C de calor acumulado en 28 días.

El Reporte del Arrecife Mesoamericano de 2024 (McField *et al.*, 2024) menciona que las zonas más impactadas por el blanqueamiento de coral fueron el Complejo de Barrera del Norte (Belice), Arrecife Glover (Belice) y los arrecifes de Guatemala, con un índice de Severidad de Blanqueamiento (ISB) mayores a 60%. En cambio, Costa este de Honduras, Cozumel (México) y Guanaja (Honduras) registraron menor afectación.

El informe también destaca que los brotes de enfermedades y los eventos de blanqueamientos ocurridos desde 2022 redujeron la cobertura coralina en todo el SAM

del 19% al 17% y con evidencia de mortalidad continua entre los corales formadores de arrecifes.

Ambos fenómenos (MHW y DHW) alcanzaron puntos máximos en años como 1998, 2010, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021 y 2023, revelando una clara correlación temporal. Sin embargo, análisis estadísticos de correlación mostraron que solo 18 casos (38% de los eventos de DHW) donde MHW causan blanqueamiento, mientras que el 62% no tuvo relación causal directa, lo que sugiere la influencia de otros factores ambientales o locales en la respuesta de los corales: la fase cálida del modo multidecadal Pacífico-Atlántico-Ártico (PAA) y la transición de los eventos consecutivos de La NIÑA (2020-2023) al evento de El NIÑO (2023-2024) (Huang *et al.*, 2024).

Estos hallazgos coinciden con Cetina-Heredia & Allende-Arandía, (2023) quienes determinaron que el 35% de los casos de blanqueamiento coincidieron con eventos de MHW, mientras que el 51% no tuvieron relación directa con el fenómeno, durante el período de 1982- 2021 en el Caribe Occidental.

Además, en el SAM se observó un aumento exponencial de alertas nivel 2 desde 1998, intensificándose hasta 2023 donde una ola de calor marina superó récords históricos, agravado por el fenómeno del Niño del 2023-2024 que incrementó la TSM a nivel global (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2023; Reimer *et al.*, 2024),

Según Bove *et al.* (2022), las TSM en el Caribe han aumentado a una tasa media de 0.17°C por década (1981 a 2019), y aunque la mayoría de las alertas se mantuvieron en nivel 1, se proyecta que el calentamiento oceánico alcance 1.5 °C entre 2030 y 2052, lo que podría reducir los arrecifes entre 70% y 90%, con pérdidas mayores al 99% a 2,0 °C (Yao & Wang, 2022).

10. Conclusión

En síntesis, este trabajo evidencia la creciente amenaza que representan las MHW y el estrés térmico para los ecosistemas coralinos del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM). Entre 1982 y 2023, se identificaron numerosos eventos de MHW en Quintana Roo (México), Belice y Honduras, con un aumento notable en su frecuencia e intensidad, particularmente en 2023. Destaca el caso de Quintana Roo (México), donde un episodio persistió durante 245 días con una intensidad acumulada de 294.18°C- días.

La TSM en el área *in situ* y los tres sitios remotos del SAM revelaron valores similares, alcanzando entre 29.7 °C a 31.6 °C en octubre de 2023, sobrepasando el umbral de blanqueamiento. Este incremento provocó en el alza de eventos de estrés térmico, los cuales se manifiestan cuando los valores de DHW superan las 4°C- semanas.

La variabilidad regional reveló diferencias claves: Belice mostró la mayor frecuencia de alertas de blanqueamiento (BAA-7 días Máx.) y el evento de DHW prolongado, con 197 días en 2023, mientras que Honduras registró el mayor número de eventos de estrés térmico (18 eventos en total). Por otro lado, Quintana Roo (México) obtuvo tres eventos prologados de MHW de nivel severo, con intensidades máximas entre 2.19°C y 2.29°C.

El análisis de correlación reveló una relación significativa ($p < 0.05$) entre las MHW y los eventos de blanqueamiento (DHW), aunque no todos los episodios de estrés térmico estuvieron directamente asociados a MHW. Se observó que los picos de blanqueamiento ocurrieron predominantemente después de una MHW, con desfases de hasta 19 días, lo que sugiere la influencia de otros factores ambientales como la influencia de El NIÑO.

No obstante, la recurrencia de estos fenómenos, junto con la disminución del 17% en la cobertura coralina informado en el Reporte del Arrecife Mesoamericano para 2024 clasificando este estado como “malo”. Está asociado a los múltiples eventos de blanqueamiento, especialmente alerta nivel 2 en 2023.

Estos resultados subrayan la vulnerabilidad del SAM ante el cambio climático y la urgencia de establecer medidas y estrategias que ayude a la conservación de este ecosistema, considerado el más crítico del planeta.

11. Bibliografía

- Acín Coello de Portugal, C. (2022). La Causalidad de Granger en el análisis y la previsión de series temporales clásicas, de intervalo y de historiograma. Aplicación de mercados financieros. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/62362>
- Alcolado, Pedro. (2004). Manual De Capacitación Para El Monitoreo Voluntario De Alerta Temprana En Arrecifes Coralinos.
- Arambucu Vizcarra, G., Ruíz Zárate, M. Á., Calderón Aguilera, L., Chávez Ortiz, E., Cupul Magaña, A., De Jesús -Navarrete, A., Carlos González Gándara, Andrés López Pérez, Pérez España, H., Reyes Bonilla, H., & Carricart Ganivet, J. P. (2008). La importancia de los arrecifes del coral en México. *ECOFRONTERAS*, 34, 3-5. <https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2452>
- Aranibar, G. R. (2017). Análisis de covarianza. *REVISTA VARIANZA*, 68-85.
- Ardisson, P.-L., May-Kú, M. A., Herrera-Dorantes, M. T., & Arellano-Guillermo, A. (2011). El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: Consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261-280.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- Berkelmans, R., De'ath, G., Kininmonth, S., & Skirving, W. J. (2004). A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: Spatial correlation, patterns, and predictions. *Coral Reefs*, 23(1), 74-83. <https://doi.org/10.1007/s00338-003-0353-y>
- Bodri, L., & Cermak, V. (2007). CHAPTER 3 - Ground Temperature Histories: Evidence of Changing Climate. En L. Bodri & V. Cermak (Eds.), *Borehole Climatology* (pp. 175-266). Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-008045320-0/50003-X>

- Bove, C. B., Mudge, L., & Bruno, J. F. (2021). One Hundred and Fifty Years of Warming on Caribbean Coral Reefs (p. 2021.05.12.443696). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2021.05.12.443696>
- Bove, C. B., Mudge, L., & Bruno, J. F. (2022). A century of warming on Caribbean reefs. *PLOS Climate*, 1(3), e0000002. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000002>
- Carballo, J. L., Bautista-Guerrero, E., Nava, H., & Cruz-Barraza, J. (2010). Cambio climático y ecosistemas costeros, bases fundamentales para la conservación de los arrecifes de coral del Pacífico Este. (pp. 183-193).
- Cetina-Heredia, P., & Allende-Arandía, M. E. (2023). Caribbean Marine Heatwaves, Marine Cold Spells, and Co-Occurrence of Bleaching Events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(10), e2023JC020147. <https://doi.org/10.1029/2023JC020147>
- Coffroth, M. A., Lasker, H. R., & Oliver, J. K. (1990). Coral Mortality Outside of the Eastern Pacific During 1982-1983: Relationship to El Niño. En P. W. Glynn (Ed.), *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 52, pp. 141-182). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70035-7](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70035-7)
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Donner, S. D., Knutson, T. R., & Oppenheimer, M. (2007). Model-based assessment of the role of human-induced climate change in the 2005 Caribbean coral bleaching event. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(13), 5483-5488. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610122104>
- Eakin, C. M., Sweatman, H. P. A., & Brainard, R. E. (2019). The 2014–2017 global-scale coral bleaching event: Insights and impacts. *Coral Reefs*, 38(4), 539-545. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01844-2>

- Fabricius, K. E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: Review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 50(2), 125-146. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.11.028>
- Feng, Y., Bethel, B. J., Dong, C., Zhao, H., Yao, Y., & Yu, Y. (2022). Marine heatwave events near Weizhou Island, Beibu Gulf in 2020 and their possible relations to coral bleaching. *Science of the Total Environment*, 823. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153414>
- Feng, Y.-T., Bethel, B. J., Tian, Y., Dong, C.-M., Liang, J., Yao, Y.-L., Yuan, J., Chen, Y., Chen, S.-J., & Yu, Y. (2023). Marine heatwaves in the Gulf of Mexico 1983–2021: Statistics, recent intensifications, and threats on coral reefs. *Advances in Climate Change Research*, 14(4), 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2023.08.006>
- Frölicher, T. L., Fischer, E. M., & Gruber, N. (2018). Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560(7718), 360-364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>
- Gallegos-Rojano, I. Z., Salazar, A., Martínez-Rodríguez, M. C., Gallegos-Rojano, I. Z., Salazar, A., & Martínez-Rodríguez, M. C. (2022). Sistema arrecifal mesoamericano: Daños por cambio climático y encallamientos. *Revista Tecnología en Marcha*, 35(1), 140-150. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5433>
- Gardner, T., Côté, I., Gill, J., Grant, A., & Watkinson, A. (2003). Long-term Regional-wide declining in Caribbean corals. *Science (New York, N.Y.)*, 301, 958-960. <https://doi.org/10.1126/science.1086050>
- Gierz, S., Ainsworth, T. D., & Leggat, W. (2020). Diverse symbiont bleaching responses are evident from 2-degree heating week bleaching conditions as thermal stress intensifies in coral. *Marine and Freshwater Research*, 71(9), 1149. <https://doi.org/10.1071/MF19220>

- Glynn, P. W. (1996). Coral reef bleaching: Facts, hypotheses and implications. *Global Change Biology*, 2(6), 495-509. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00063.x>
- Greer, L., Curran, H. A., Wirth, K., Humston, R., Johnson, G., McManus, L., Stefanic, C., Clark, T., Lescinsky, H., & Forman-Castillo, K. (2023). Coral Gardens Reef, Belize: An *Acropora* spp. refugium under threat in a warming world. *PLOS ONE*, 18(2), e0280852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280852>
- Guest, J. (2021). The Great Barrier Reef: How repeated marine heat waves are reshaping an iconic marine ecosystem. *Current Biology*, 31(23), R1530-R1532. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.10.066>
- Goreau, T.J. and R. Hayes, 1994. Coral Bleaching and Ocean "Hot Spots". *Ambio* 23:176-180.
- Hannah, L. (2010). *Climate Change Biology*. Academic Press.
- Henley, B. J., McGregor, H. V., King, A. D., Hoegh-Guldberg, O., Arzey, A. K., Karoly, D. J., Lough, J. M., DeCarlo, T. M., & Linsley, B. K. (2024). Highest ocean heat in four centuries places Great Barrier Reef in danger. *Nature*, 632(8024), 320-326. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07672-x>
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuyzen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*. <https://doi.org/10.1071/MF99078>
- Hoegh-Guldberg, O., Skirving, W., Dove, S. G., Spady, B. L., Norrie, A., Geiger, E. F., Liu, G., De La Cour, J. L., & Manzello, D. P. (2023). Coral reefs in peril in a record-breaking year. *Science (New York, N.Y.)*, 382(6676), 1238-1240. <https://doi.org/10.1126/science.adk4532>

- Huang, B., Yin, X., Carton, J. A., Chen, L., Graham, G., Hogan, P., Smith, T., & Zhang, H.-M. (2024). Record High Sea Surface Temperatures in 2023. *Geophysical Research Letters*, 51(14), e2024GL108369. <https://doi.org/10.1029/2024GL108369>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., Babcock, R. C., Beger, M., Bellwood, D. R., Berkelmans, R., Bridge, T. C., Butler, I. R., Byrne, M., Cantin, N. E., Comeau, S., Connolly, S. R., Cumming, G. S., Dalton, S. J., Diaz-Pulido, G., ... Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jacox, M. G., Alexander, M. A., Bograd, S. J., & Scott, J. D. (2020). Thermal displacement by marine heatwaves. *Nature*, 584(7819), Article 7819. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2534-z>
- Kayanne, H. (2017). Validation of degree heating weeks as a coral bleaching index in the northwestern Pacific. *Coral Reefs*, 36(1), 63-70. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1524-y>
- Lawman, A. E., Dee, S. G., DeLong, K. L., & Correa, A. M. S. (2022). Rates of Future Climate Change in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea: Implications for Coral Reef Ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(9), e2022JG006999. <https://doi.org/10.1029/2022JG006999>
- Liu, G., Eakin, C. M., Chen, M., Kumar, A., De La Cour, J. L., Heron, S. F., Geiger, E. F., Skirving, W. J., Tirak, K. V., & Strong, A. E. (2018). Predicting Heat Stress to Inform Reef Management: NOAA Coral Reef Watch's 4-Month Coral Bleaching Outlook. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00057>

- Matsuki, A., Kori, H., & Kobayashi, R. (2023). An extended Hilbert transform method for reconstructing the phase from an oscillatory signal. *Scientific Reports*, 13(1), 3535. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30405-5>
- Mayer, A. G., & Mayer, A. G. (1914). The effects of temperature upon tropical marine animals Washington Carnegie Inst. <https://eurekamag.com/research/023/864/023864078.php>
- Maynard, J. A., Anthony, K. R. N., Marshall, P. A., & Masiri, I. (2008). Major bleaching events can lead to increased thermal tolerance in corals. *Marine Biology*, 155(2), 173-182. <https://doi.org/10.1007/s00227-008-1015-y>
- McField, M., Soto, M., Craig, N., Giro, A., Drysdale, I., Guerrero, C., Rueda, M., Kramer, P., Canty, S., & Muñiz, I. (2024). Reporte de la Salud del Arrecife Mesoamericano 2024. Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org
- Montero, R. (2013). Variables no estacionarias y cointegración.
- Muñiz-Castillo, A. I., Rivera-Sosa, A., Chollett, I., Eakin, C. M., Andrade-Gómez, L., McField, M., & Arias-González, J. E. (2019). Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: A new regional delineation to enhance conservation. *Scientific Reports*, 9(1), 11013. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47307-0>
- O'Carroll, A. G., Armstrong, E. M., Beggs, H. M., Bouali, M., Casey, K. S., Corlett, G. K., Dash, P., Donlon, C. J., Gentemann, C. L., Høyer, J. L., Ignatov, A., Kabobah, K., Kachi, M., Kurihara, Y., Karagali, I., Maturi, E., Merchant, C. J., Marullo, S., Minnett, P. J., ... Wimmer, W. (2019). Observational Needs of Sea Surface Temperature. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00420>

- Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W., & Sen Gupta, A. (2021). Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13(1), 313-342. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>
- Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuisen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H. A., Straub, S. C., & Wernberg, T. (2018). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Pearce, A., Lenanton, R., Jackson, G., Moore, J., Feng, M., & Gaughan, D. (2011). The “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/1. 222.
- Reimer, J. D., Peixoto, R. S., Davies, S. W., Traylor-Knowles, N., Short, M. L., Cabral-Tena, R. A., Burt, J. A., Pessoa, I., Banaszak, A. T., Winters, R. S., Moore, T., Schoepf, V., Kaullysing, D., Calderon-Aguilera, L. E., Wörheide, G., Harding, S., Munbodhe, V., Mayfield, A., Ainsworth, T., ... Woolstra, C. R. (2024). The Fourth Global Coral Bleaching Event: Where do we go from here? *Coral Reefs*, 43(4), 1121-1125. <https://doi.org/10.1007/s00338-024-02504-w>
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., & Schlax, M. G. (2007). Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20(22), 5473-5496. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., Palacios-Cruz, L., Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: No toda correlación implica causalidad. *Revista alergia México*, 66(3), 354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Schneider, D. P., Deser, C., Fasullo, J., & Trenberth, K. E. (2013). Climate Data Guide Spurs Discovery and Understanding. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(13), 121-122. <https://doi.org/10.1002/2013EO130001>

- Sea Surface Temperature Anomaly. (2011, agosto 31). [Text.Article]. Earth Observatory; NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/AMSRE_SSTAn_M
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2017). Characteristics of Time Series. En R. H. Shumway & D. S. Stoffer (Eds.), *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples* (pp. 1-44). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8_1
- Skirving, W. J., Heron, S. F., Marsh, B. L., Liu, G., De La Cour, J. L., Geiger, E. F., & Eakin, C. M. (2019). The relentless march of mass coral bleaching: A global perspective of changing heat stress. *Coral Reefs*, 38(4), 547-557. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01799-4>
- Skirving, W., Marsh, B., De La Cour, J., Liu, G., Harris, A., Maturi, E., Geiger, E., & Eakin, C. M. (2020). CoralTemp and the Coral Reef Watch Coral Bleaching Heat Stress Product Suite Version 3.1. *Remote Sensing*, 12(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/rs12233856>
- Smith, K., Burrows, M., Hobday, A., King, N., Moore, P., Sen Gupta, A., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. (2023). Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 15. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437>
- Spalding, M., Burke, L., Wood, S. A., Ashpole, J., Hutchison, J., & Ermgassene, P. Z. (2017). Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *MARINE POLICY*, 82, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.014>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099-1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2014). Chapter 5—Time Series Analysis Methods. En R. E. Thomson & W. J. Emery (Eds.), *Data Analysis Methods in Physical Oceanography (Third Edition)* (pp. 425-591). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387782-6.00005-3>

- van Hooidonk, R., & Huber, M. (2009). Quantifying the quality of coral bleaching predictions. *Coral Reefs*, 28(3), 579-587. <https://doi.org/10.1007/s00338-009-0502-z>
- Wilkinson, C. R. (Ed.). (2000). *Status of coral reefs of the world*. 2.2000.
- Yao, Y., & Wang, C. (2022). Marine heatwaves and cold-spells in global coral reef zones. *Progress in Oceanography*, 209, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102920>
- Zhang, X., Zheng, F., Zhu, J., & Chen, X. (2022). Observed Frequent Occurrences of Marine Heatwaves in Most Ocean Regions during the Last Two Decades. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(9), 1579-1587. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1291-3>
- Zhao, Y., Chen, M., Chung, T. H., Chan, L. L., & Qiu, J.-W. (2023). The 2022 summer marine heatwaves and coral bleaching in China's Greater Bay Area. *Marine Environmental Research*, 189, 106044. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106044>
- Zhao, Z., & Marin, M. (2019). A MATLAB toolbox to detect and analyze marine heatwaves. *Journal of Open Source Software*, 4(33), 1124. <https://doi.org/10.21105/joss.01124>