



Sociedad Ambiente Marino, Inc.

Villa Nevárez 1130 Calle 3, San Juan, PR 00927-5133

PO Box 22158 San Juan PR 00931-2158

(939) 642-7264 • samprorg@sampr.org

<https://www.sampr.org>



Análisis de los riesgos de estrés térmico en los ecosistemas marinos
y de un blanqueamiento masivo de corales durante el 2024

Boletín Técnico Año 2 Núm. 1 – Abril 2024

Edwin A. Hernández Delgado
Sociedad Ambiente Marino

edwinhernandez@sampr.org

6 de mayo de 2024

Resumen

En Puerto Rico y en el resto del Caribe enfrentamos durante los primeros meses del 2024 otro evento sin precedente de calor marino como consecuencia del impacto del cambio climático.

*Aproximadamente 40% de las aguas alrededor de Puerto Rico se encuentran ya bajo una **alerta de nivel 1 de ola de calor marino moderado**, mientras un 60% se encuentra ya bajo una **alerta 2 de ola de calor marino significativo**, un evento sin precedentes históricos para finales de abril y comienzos de mayo.*

*Aproximadamente 70% de las aguas alrededor de Puerto Rico se encuentran ya bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales, otro evento sin precedentes históricos para finales de abril y comienzos de mayo.*

Durante el 2023 Puerto Rico y el resto del Caribe sufrieron una catástrofe ecológica sin precedentes debido al blanqueamiento masivo y mortandad de corales durante un evento récord del fenómeno de El Niño.

Durante el 2024 se está desarrollando rápidamente un evento de La Niña, en combinación con un calentamiento del mar sin precedentes. Se anticipa el desarrollo de otro evento masivo de blanqueamiento de corales potencialmente sin precedentes, con posibles consecuencias ecológicas y socioeconómicas adversas. Este sería el cuarto evento similar en Puerto Rico en los pasados seis años, lo que evidencia el incremento en el impacto del cambio climático.

Se anticipa que estas condiciones se desarrollarán gradualmente entre mayo y agosto y pueden prolongarse al menos hasta el mes de diciembre 2024, a la par con el desarrollo de condiciones de mayor humedad y mayor riesgo de impactos ciclónicos a través del Caribe como consecuencia de La Niña.

La Sociedad Ambiente Marino (SAM) alerta sobre la necesidad de tomar medidas urgentes para minimizar el impacto de este evento, especialmente en aquellas localidades impactadas por la degradación en la calidad de agua, la sedimentación, turbidez y por usos recreacionales excesivos.

Introducción

Puerto Rico, así como la zona del Caribe en general, continúan siendo afectados desde el año 2023 por un evento de calentamiento del mar sin precedentes históricos recientes. Por primera vez en la historia, se emitió en el 2023 una **vigilancia de blanqueamiento** de corales para Puerto Rico tan temprano como en el mes de mayo. Eventualmente, en junio se emitió un **aviso de blanqueamiento** de corales. A comienzos de agosto se emitió una **alerta 1 de blanqueamiento**, lo cual sugería la inminencia de un evento masivo de blanqueamiento. Sin embargo, antes de que se emitiera una **alerta 2 de blanqueamiento** durante el mes de septiembre. Esto resultó en un evento de blanqueamiento masivo de corales que a su vez causó una mortandad significativa e corales a través de toda la isla, pero principalmente en el suroeste del país. Ahora, durante los primeros cuatro meses del 2024 se ha sostenido una tendencia de calentamiento del mar sin precedentes a nivel global, lo que incluye el Caribe y la zona de Puerto Rico.

Este evento es una de las consecuencias del cambio climático y se magnificó durante el 2023 ante el fortalecimiento del fenómeno de El Niño. Sin embargo, durante el 2024 está ocurriendo un cambio significativo de menguar las condiciones de El Niño y cambiar hacia condiciones dominantes de La Niña. Esto presume también unas condiciones de calentamiento significativo del mar a través del Caribe, pero en esta ocasión, también se anticipa un incremento significativo en la probabilidad de precipitación pluvial y de eventos ciclónicos en el Atlántico Tropical y la zona del Caribe.

Análisis de los riesgos de estrés térmico en los ecosistemas marinos y de un blanqueamiento masivo de corales durante el 2024

Ante la preocupación generada por esta situación, la SAM ha publicado su volumen 2, número 1 del boletín técnico titulado: “**Análisis de los riesgos de estrés térmico en los ecosistemas marinos y de un blanqueamiento masivo de corales**”. Este resume cuáles son los impactos actuales de diversas variables climatológicas y oceanográficas en los ecosistemas marinos y costeros de Puerto Rico y el Caribe. A su vez, se desarrollan los primeros pronósticos sobre riesgos de calentamiento del mar y de blanqueamiento masivo de corales para la región, utilizando la mejor evidencia científica disponible.

Los ciclos de fluctuación entre los fenómenos de El Niño y La Niña son un fenómeno climático que ocurre en el Océano Pacífico tropical. Es parte de un patrón climático más grande conocido como la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés), que puede tener un impacto significativo en los patrones climáticos de todo el mundo, dependiendo del grado de teleconexiones con otros fenómenos climatológicos en el planeta. Durante el 2023 se desarrolló un evento de El Niño sumamente intenso, el cual fue responsable, en gran medida, de los eventos inusuales y récords de olas de calor marino, de blanqueamiento masivo y de mortandad de corales a través del Caribe y de otras regiones del planeta. Sin embargo, en el 2024 se está manifestando una transición rápida de condiciones de El Niño hacia condiciones de La Niña, lo cual puede añadir a los riesgos del Caribe una proliferación significativa en la generación de sistemas ciclónicos.

Este documento es una actualización de la evolución de esta condición y resume gran parte de la evidencia recopilada de las fuentes primarias de monitoreo de las condiciones

ambientales, atmosféricas y marinas en el planeta, procedente de diversas fuentes, que incluyen información derivada de satélites, boyas y otros sensores meteorológicos operados por agencias gubernamentales e instituciones académicas. Para cada imagen presentada se ofrece su referencia original, se resumen los datos más importantes y relevantes para el Caribe y Puerto Rico. Además, se proveen descripciones generales de cada indicador evaluado que ayudan en su interpretación. En este informe se provee, además, información documental sobre los riesgos del blanqueamiento de corales en diversas localidades de Puerto Rico.

Este documento no constituye una fuente oficial de información climatológica. Solo constituye nuestra interpretación técnica de la información oficial hecha pública por agencias como NOAA y otras fuentes similares. Se recomienda al público en general y al personal de las agencias gubernamentales reguladoras y manejadoras de recursos a utilizar este documento como una herramienta adicional útil para sus procesos de toma de decisiones, planificación y para sus respectivas acciones de manejo y respuesta ante la evolución de estas condiciones. Sin embargo, siempre deben hacer referencia a las fuentes oficiales de información, las cuales se citan a lo largo del documento. El valor de este documento también recae en proveer todas las referencias originales de fuentes de información útiles, actualizadas a diario, las cuales ayudan a la toma de decisiones informadas.

Nuestras interpretaciones de la información técnica se basan únicamente en la experiencia y conocimiento técnico de su autor. Cualquier pregunta técnica al respecto, pueden contactar directamente a su autor en la SAM a través de edwinhernandez@sampr.org.

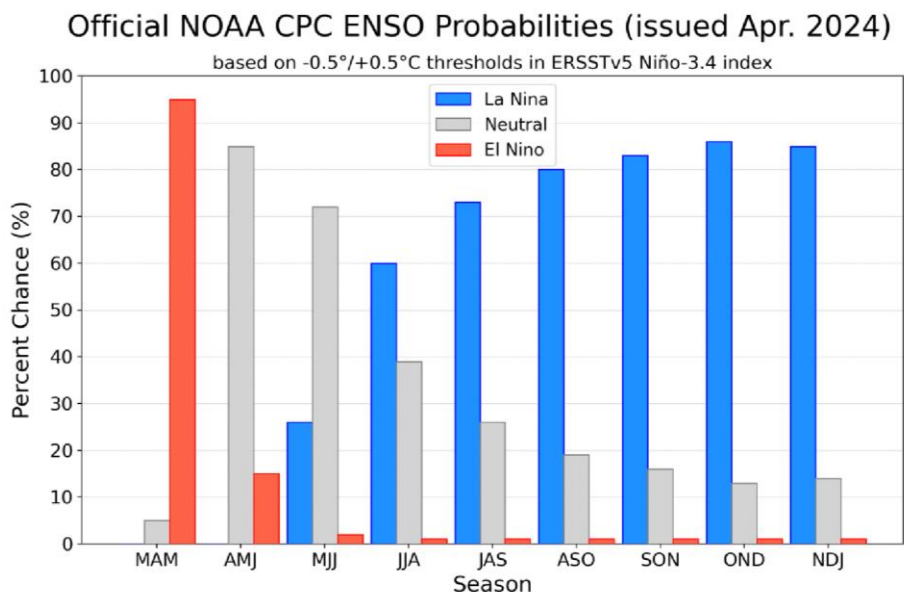


FIGURA 1. Pronóstico oficial del NOAA Climate Prediction Center sobre el desarrollo de las condiciones de El Niño y La Niña durante el 2024 en la zona El Niño 3.4. Fuente: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/figure07.gif (accedido: 24 de abril de 2024).

La actualización más reciente de la proyección oficial emitida por el Centro de Predicción Climática de NOAA durante el mes de abril de 2024 sugiere que durante los primeros cuatro meses del presente año se han caracterizado por el comienzo de una transición gradual de una condición dominada por El Niño hacia una condición de dominio por La Niña (Figura 1). La probabilidad de la evolución de El Niño con una anomalía térmica $>0.5^{\circ}\text{C}$ para el período desde marzo, abril y mayo (MAM) tenía una probabilidad aun de 95%, pero la de abril, mayo, junio (AMJ) cae abruptamente a una de solo 15%. A partir de ahí cae a menos de 2%. Sin embargo, la probabilidad de desarrollo de La Niña en el período de mayo, junio y julio (MJJ) sube a 15%, luego escala a 60% para junio, julio y agosto (JJA), y a 75% para julio, agosto y septiembre (JAS), continuando su aumento durante el resto del 2024.

Esta evolución de La Niña durante el 2024 presupone la evolución a través del Atlántico tropical, el Caribe y el Golfo de México de condiciones potencialmente conducentes a un aumento significativo en la actividad ciclónica, el cual en combinación con el aumento anormal de la temperatura del mar, puede crear condiciones estresantes adicionales en los corales. El riesgo mayor de impactos ciclónicos es mayor durante la presente temporada ciclónica para la zona noreste del Caribe, incluyendo a Puerto Rico.

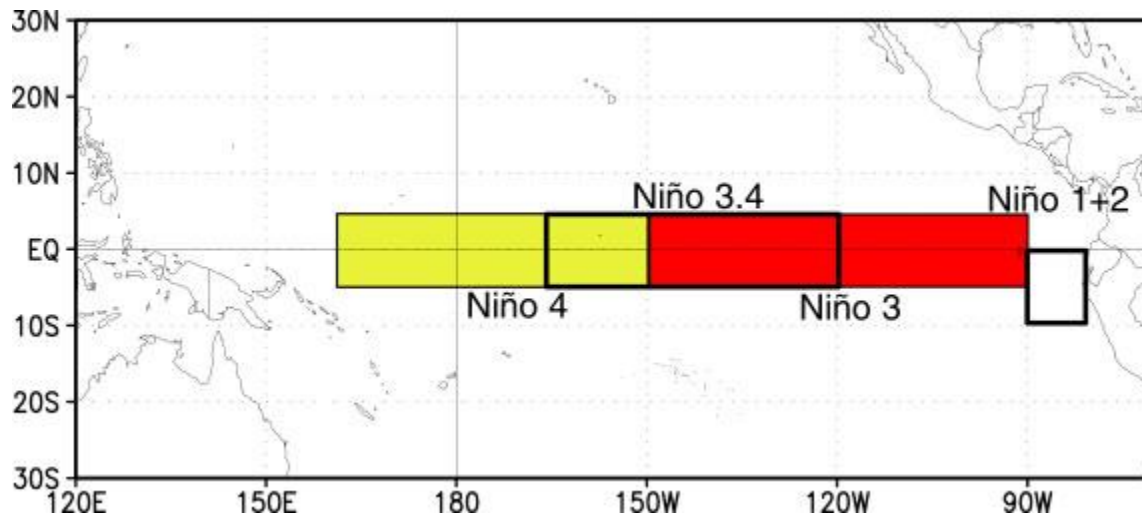


FIGURA 2. A) Mapa de la distribución espacial de las diversas zonas de desarrollo del fenómeno de El Niño a lo largo del Océano Pacífico tropical. Fuente: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml (accedido: 7 de mayo de 2023, 12:20 pm).

En la Figura 2 se observa el patrón de distribución geográfica de las diversas zonas a través de las cuales desarrolla el fenómeno de El Niño a través de las fluctuaciones de la llamada Circulación de Walker a lo largo del Océano Pacífico tropical. En estas zonas se monitorea la temperatura para desarrollar el Índice de la Oscilación de El Niño, el cual es un indicador de su estado de desarrollo. La Circulación de Walker es un patrón de circulación atmosférica a gran escala que juega un papel crucial en el desarrollo del fenómeno de El Niño. Es un sistema de vientos y presión atmosférica que circulan por la región del Pacífico tropical.

Usualmente, cuando el fenómeno de El Niño se comienza a desarrollar las primeras manifestaciones de aumentos en temperatura de la superficie del mar, así como en los patrones de circulación y de presión atmosférica ocurren en la llamada zona de El Niño 1+2, el oeste de América del Sur. Luego, esta se mueve hacia las zonas de El Niño 3 y el Niño 3.4. Finalmente, se extiende hasta la zona de El Niño 4, en un desplazamiento de las corrientes cálidas hacia el Pacífico tropical central y luego hacia el oeste.

Durante los eventos de El Niño, el agua cálida en el Océano Pacífico tropical central y oriental se expande hacia el este, hacia las Américas, provocando cambios en la circulación atmosférica y los patrones climáticos (llamado el Circulación de Walker). Estos cambios pueden resultar en sequías, inundaciones y otras condiciones climáticas extremas en diferentes regiones del mundo. Dichos patrones varían geográficamente y a través del tiempo, dependiendo de la época del año y de la intensidad de El Niño.

En el Caribe, El Niño puede generar condiciones más secas en algunas partes de la región, particularmente en las islas del Caribe oriental, donde se localiza Puerto Rico. Esto se debe a que el debilitamiento de los vientos alisios, que son los vientos predominantes del este en los trópicos, puede provocar una reducción de las precipitaciones en algunas zonas, aunque

dichas teleconexiones no siempre son homogéneas ni simétricas, lo que significa que puede tener mucha variabilidad. Dicha variabilidad en los efectos de las teleconexiones puede deberse a múltiples factores, incluyendo la estacionalidad y la intensidad o severidad de El Niño. Usualmente, mientras más fuerte es el evento, más fuerte suelen ser los efectos de las teleconexiones y las consecuencias.

La reducción de las precipitaciones ante eventos fuertes de El Niño puede dar lugar a condiciones de sequía, que pueden afectar a la agricultura, los recursos hídricos y otros sectores que dependen de la disponibilidad de agua. Las temperaturas más cálidas de la superficie del mar asociadas con El Niño también pueden afectar los ecosistemas marinos, provocando cambios en la pesca, efectos adversos en los arrecifes de coral y otros hábitats relacionados generalmente asociados al blanqueamiento de los corales.

Sin embargo, es importante señalar que los impactos de El Niño en el Caribe también pueden verse influenciados por otros factores, incluyendo diversas oscilaciones climatológicas, como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), que puede interactuar con El Niño para producir diferentes patrones climáticos en el Atlántico tropical y el Caribe. Por lo tanto, es fundamental monitorear y estudiar estos fenómenos climáticos para comprender mejor sus impactos combinados en el Caribe y otras regiones del mundo.

En la Figura 3 se observa el patrón de distribución de las diversas zonas de la llamada Circulación de Walker a lo largo del Océano Pacífico tropical. La Circulación de Walker es un patrón de circulación atmosférica a gran escala que juega un papel crucial en el desarrollo del fenómeno de La Niña y de El Niño. Es un sistema de vientos y presión atmosférica que circulan por la región del Pacífico tropical.

La circulación de Walker consta de dos ramas, los "vientos alisios" hacia el este y los "vientos alisios" hacia el oeste. Los vientos alisios soplan de este a oeste a través del Pacífico tropical, empujando las aguas superficiales cálidas hacia el Pacífico occidental. El agua tibia luego se acumula en el Pacífico occidental, creando un sistema de baja presión que atrae más aire húmedo y genera más lluvia. Los contraataques o la circulación en sentido contrario, también conocidos como la célula de Walker, soplan en dirección opuesta, de oeste a este, en la atmósfera superior. Estos vientos descienden sobre el Pacífico oriental, creando una alta presión y suprimiendo la convección de aguas cálidas y la lluvia.

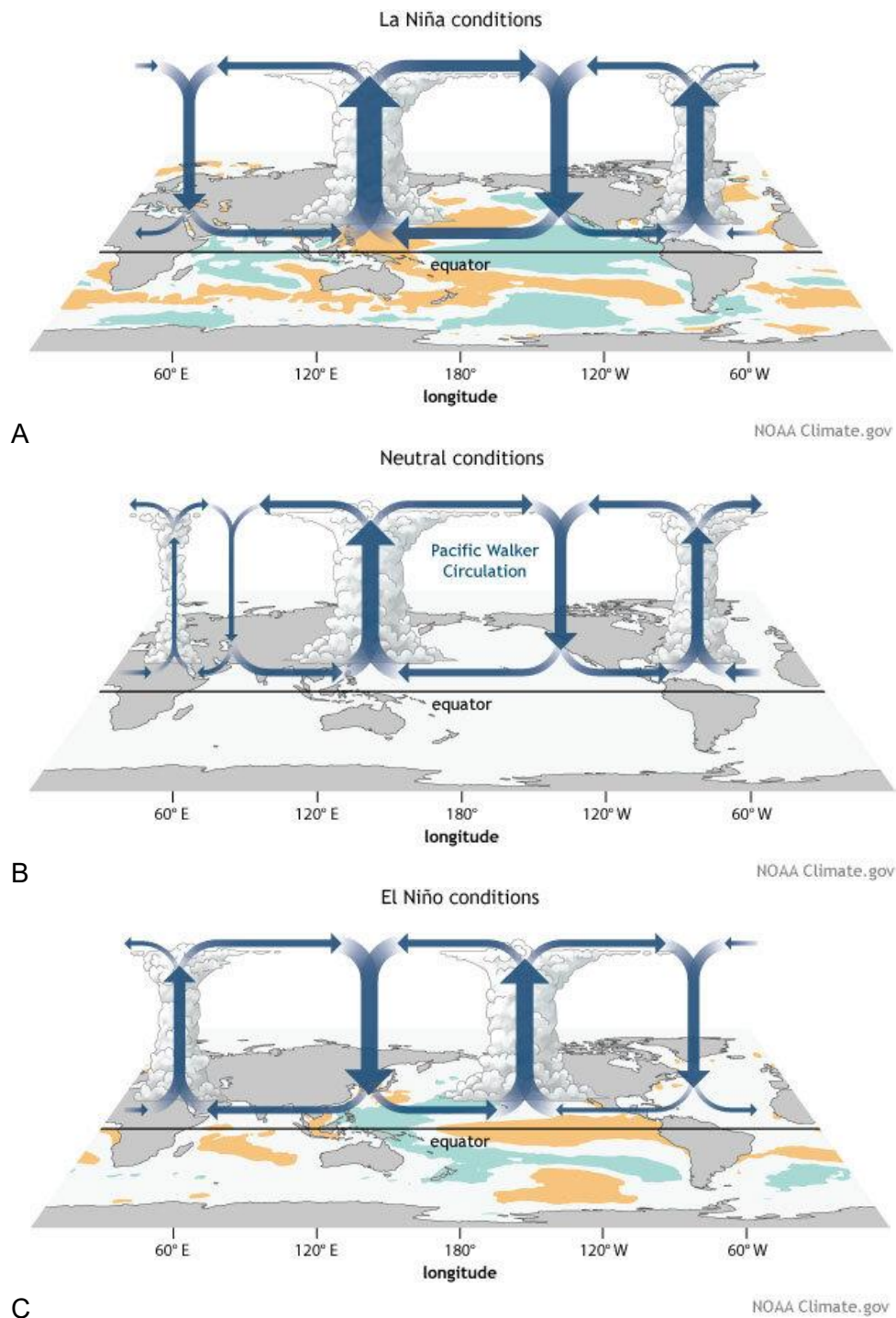


FIGURA 3. Patrones de variación de la Circulación Walker en el Océano Pacífico Tropical entre las condiciones: A) La Niña; B) Condiciones neutrales; y C) el desarrollo del fenómeno de la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO). Fuente: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/ens0/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy> (accedido: 7 de mayo de 2023, 12:30 pm).

La Figura 3a muestra la configuración espacial de la Circulación Walker durante la fase conocida como la Circulación de La Niña. La Niña es la contraparte de El Niño y representa la fase fría del patrón climático de la Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en el Océano Pacífico tropical. Durante los eventos de La Niña, los vientos alisios en el Océano Pacífico tropical se vuelven más fuertes y las corrientes oceánicas son más vigorosas, lo que conduce a un enfriamiento de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical oriental y central. Este es el tipo de condición que se está restableciendo rápidamente en el Pacífico tropical durante el 2024 luego del evento fuerte de El Niño del 2023 al 2024.

Las siguientes son algunas de las características de la circulación de La Niña:

Vientos alisios más fuertes: Los eventos de La Niña se asocian con vientos alisios más fuertes que soplan de este a oeste a través del Océano Pacífico tropical. Estos vientos empujan las aguas cálidas de la superficie hacia el Pacífico occidental, lo que provoca un afloramiento de agua fría en el Pacífico oriental. Esto provoca un enfriamiento de la temperatura de la superficie del mar en esa región.

Afloramiento de agua fría: Los vientos alisios más fuertes que ocurren durante los eventos de La Niña promueven el afloramiento de agua fría y rica en nutrientes desde las profundidades del océano, lo que puede tener impactos significativos en los ecosistemas marinos y la pesca, sobre todo en la costa oeste de América del Sur.

Presión atmosférica más baja: La presión atmosférica sobre el Pacífico occidental es más baja que el promedio durante los eventos de La Niña, mientras que la presión sobre el Pacífico oriental es más alta que el promedio. Esto conduce a cambios en los patrones de circulación atmosférica y las condiciones climáticas en todo el mundo. En el caso del Mar Caribe, las condiciones de La Niña tienden a favorecer mayor humedad, mayor precipitación pluvial, menor incidencia de vientos cortantes (“windshear”) del suroeste y mayor desarrollo ciclónico.

Aumento de las precipitaciones en algunas áreas: los eventos de La Niña pueden provocar un aumento de las precipitaciones en algunas regiones, como Indonesia, Australia y partes de América del Sur y el Caribe. Esto puede ocurrir en función de las diversas teleconexiones entre El Niño o La Niña y otras oscilaciones en diversas partes del mundo (Figuras 4a y 4b).

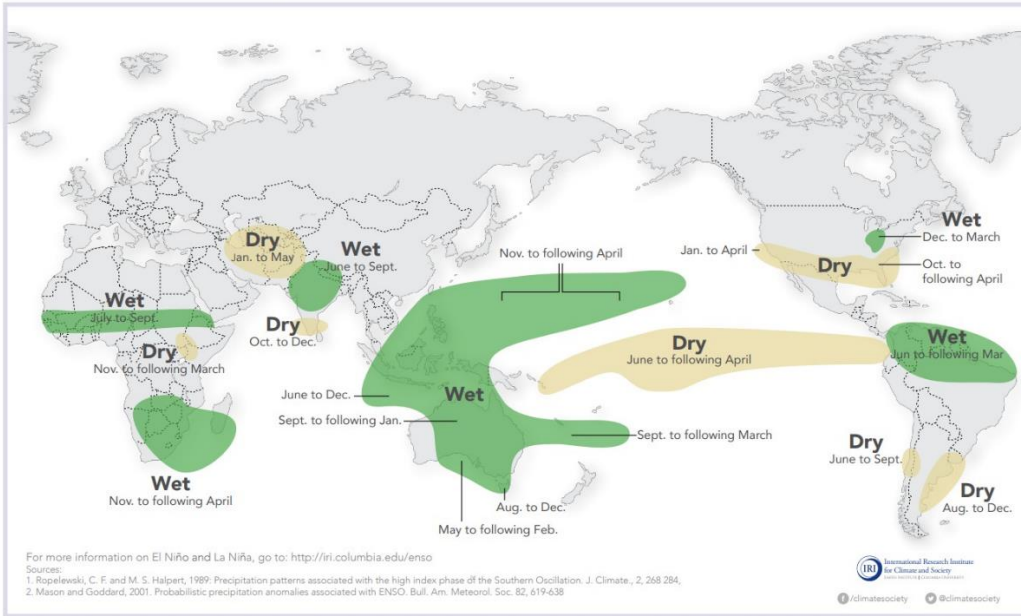
Aumento de la actividad de los huracanes en el Atlántico: Los eventos de La Niña también pueden influir en la actividad de los huracanes en el Atlántico al crear condiciones atmosféricas más favorables para la formación e intensificación de los huracanes debido al aumento general de la humedad en la región del Atlántico tropical y el Caribe (Figura 4a)

Comprender las características de la circulación de La Niña es importante para predecir y gestionar sus impactos en los patrones climáticos, los ecosistemas marinos y otros sectores que dependen de las condiciones climáticas, como la agricultura y los recursos hídricos.

La Figura 3b muestra la configuración de la Circulación Walker durante las condiciones neutrales de El Niño y La Niña. Cuando el patrón climático de ENSO se encuentra en una condición neutral, ni El Niño ni La Niña están presentes. Esto significa que las temperaturas de la superficie del mar en el Océano Pacífico tropical están cerca del promedio y las condiciones atmosféricas son relativamente estables a lo largo de todo el Pacífico tropical.

La Niña and Rainfall

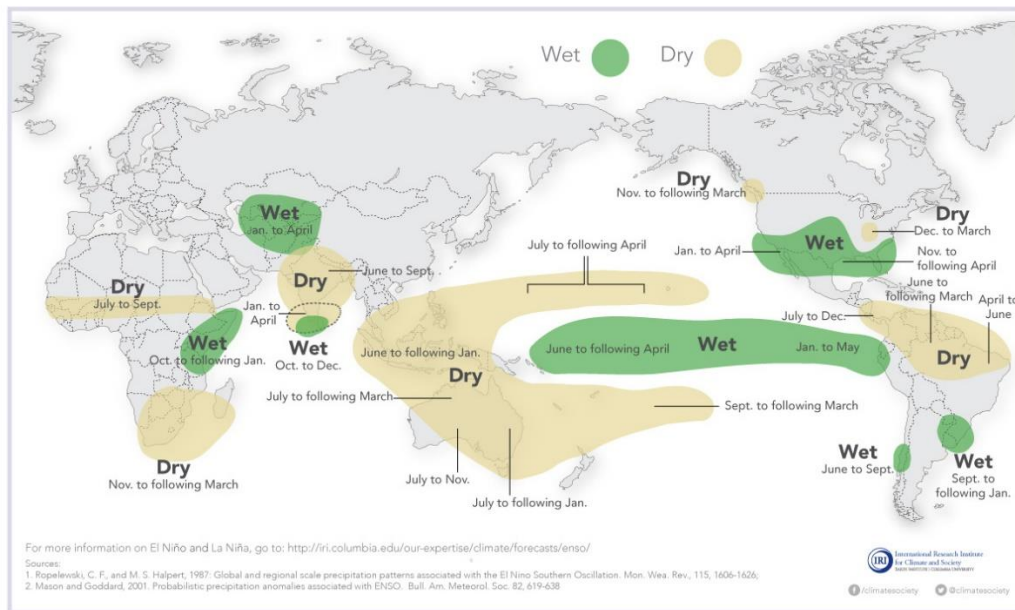
La Niña conditions in the tropical Pacific are known to shift rainfall patterns in many different parts of the world. Although they vary somewhat from one La Niña to the next, the strongest shifts remain fairly consistent in the regions and seasons shown on the map below.



A

El Niño and Rainfall

El Niño conditions in the tropical Pacific are known to shift rainfall patterns in many different parts of the world. Although they vary somewhat from one El Niño to the next, the strongest shifts remain fairly consistent in the regions and seasons shown on the map below.



B

FIGURA 4. Patrones generales de teleconexiones climatológicas a escalas globales de: A) La Niña; y B) El Niño. Fuente: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/how-enso-leads-cascade-global-impacts> (accedido: 9 de mayo de 2023; 12:35 am).

Algunos de los efectos de esta condición neutral incluyen los siguientes:

Patrones climáticos más predecibles: Durante una condición de ENSO neutral, los patrones climáticos tienden a ser más predecibles y menos extremos que durante los eventos de El Niño o La Niña. Esto puede ser beneficioso para los sectores que se ven afectados por la variabilidad climática, como la agricultura, la gestión del agua y la producción de energía. Igualmente, es beneficioso para los ecosistemas marinos, los cuales son particularmente vulnerables, por ejemplo, en la zona del Caribe a las altas temperaturas prolongadas que suelen registrarse durante El Niño.

Impactos neutrales en la temperatura global: El impacto general de una condición de ENSO neutral en las temperaturas globales es relativamente pequeño en comparación con los eventos de El Niño y La Niña. Sin embargo, todavía puede tener algunos impactos locales en los patrones de temperatura y precipitación en ciertas regiones.

Menor actividad de huracanes en el Atlántico: una condición ENSO neutral tiende a conducir a una menor actividad de huracanes en el Atlántico en comparación con los eventos de La Niña, ya que este último puede crear condiciones atmosféricas más favorables para la formación e intensificación de huracanes.

Impactos en los ecosistemas marinos: una condición ENSO neutral aún puede tener algunos impactos en los ecosistemas marinos de algunas regiones del planeta, como alterar los patrones de distribución y abundancia de algunas especies marinas. Sin embargo, los impactos son generalmente menos severos que durante los eventos de El Niño y La Niña.

La Figura 3c ilustra la configuración de la Circulación Walker durante las condiciones de desarrollo fuerte de El Niño. Un evento fuerte de El Niño es una fase particularmente intensa del patrón climático del ENSO, que se caracteriza por temperaturas de la superficie del mar más cálidas que el promedio en el Océano Pacífico tropical oriental y central. Durante los eventos fuertes de El Niño, la circulación de Walker se debilita o incluso se invierte (Figura 3c), lo que provoca una reducción de los vientos alisios y cambios en la presión atmosférica y los patrones de lluvia. Esto puede conducir a la acumulación de agua tibia en el Pacífico central y oriental, y cambios en los patrones climáticos en todo el mundo. Estas son algunas de las características clave de un El Niño fuerte:

Temperaturas oceánicas más cálidas: Las temperaturas oceánicas en el Océano Pacífico tropical oriental y central pueden estar hasta 2-3°C por encima del promedio durante un fuerte evento de El Niño, que puede tener un impacto significativo en los patrones climáticos globales. En ocasiones, algunas zonas dentro de la región de El Niño 1+2 han alcanzado a veces temperaturas de +4 a +6°C por encima del promedio, con impactos muy significativos.

Cambios en la circulación atmosférica: Durante un El Niño fuerte, los patrones de circulación atmosférica en todo el mundo se ven significativamente afectados, lo que lleva a cambios en los patrones de lluvia, temperatura y viento, aun cuando las relaciones entre El Niño y esas variaciones en los patrones climáticos no sea una lineal, ya que muchos otros factores regionales pueden afectar el clima. Pero, por ejemplo, partes de América del Sur, incluidos Perú y Ecuador, pueden experimentar fuertes lluvias e inundaciones durante El Niño, mientras que las regiones del sudeste asiático y el Caribe pueden experimentar condiciones de sequía. De nuevo, los patrones de teleconexiones globales de El Niño (Figura 4b) generalmente implican un clima cálido y seco en el Caribe y el norte de América del Sur, pero esto puede ser

variable en función de la estacionalidad, el grado de desarrollo e intensidad de El Niño y posibles factores geográficos locales.

Eventos climáticos extremos más frecuentes y severos: Los eventos fuertes de El Niño pueden aumentar la frecuencia y la gravedad de los eventos climáticos extremos, como inundaciones, sequías, huracanes e incendios forestales en diversas regiones del mundo.

Impactos en la agricultura y la seguridad alimentaria: Los impactos de El Niño en la agricultura y la seguridad alimentaria, incluyendo en la productividad de las pesquerías marinas, pueden ser igualmente significativos, ya que los cambios en los patrones climáticos pueden provocar malas cosechas, pérdidas de ganado y rendimientos reducidos en las pesquerías.

Cambios en los ecosistemas oceánicos: los eventos fuertes de El Niño pueden tener impactos significativos en los ecosistemas oceánicos, incluidos cambios en la distribución de algunas especies marinas, reducción de la productividad del plancton, en el rendimiento de las pesquerías y aumento de los eventos de blanqueamiento de corales.

Impactos en la temperatura global: Durante un El Niño fuerte, las temperaturas globales tienden a ser más altas que el promedio, ya que la liberación de calor del Océano Pacífico tropical puede conducir a un aumento temporal del calentamiento global. El patrón documentado de tendencias de aumentos en la temperatura del mar en el Pacífico tropical oriental y a través del Mar Caribe y el Atlántico tropical sugieren que estamos ante el desarrollo inequívoco de un evento fuerte de El Niño durante el resto del 2023, con consecuencias potencialmente significativas para la región del Caribe y Puerto Rico.

Comprender las características de un fuerte evento de El Niño es importante para predecir y gestionar sus impactos en varios sectores y regiones del mundo.

Evidencia documental de los patrones de calentamiento del mar

La Figura 5 ilustra la variación en los patrones espacio-temporales en las anomalías térmicas en las diversas zonas geográficas de El Niño a través del Pacífico tropical (ver Figura 2). Esta sugiere que la zona El Niño 1+2 ya evidencia claramente un cambio de anomalía térmica positiva a una negativa, característica del inicio de la transición gradual hacia condiciones de La Niña. En tanto, las zonas El Niño 3, 3.4, y 4 ya han comenzado a mostrar una disminución gradual en las anomalías térmicas positivas, lo que indica el final de las condiciones de El Niño y el inicio de la transición hacia condiciones de La Niña durante el 2024.

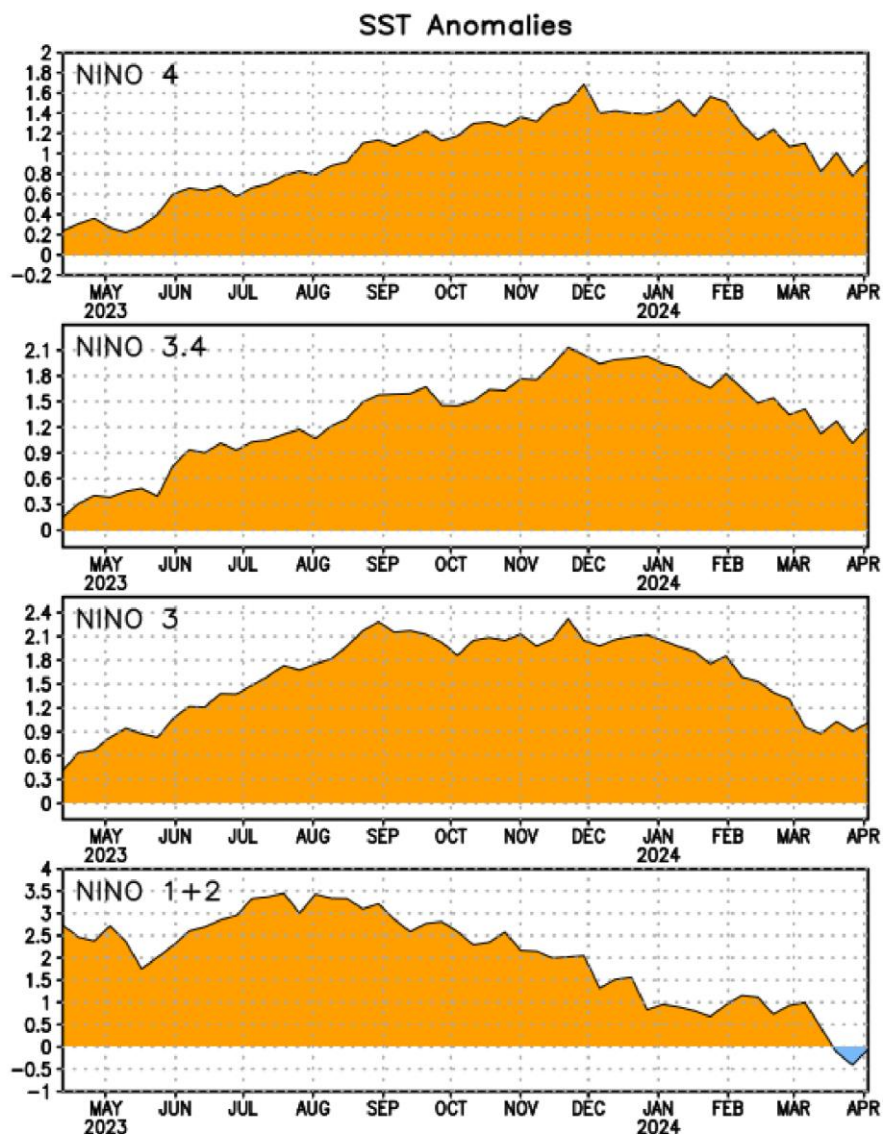


FIGURA 5. Series de tiempo de los promedios de área de las anomalías térmicas (°C) de las regiones de El Niño en el Océano (Pacífico). Las anomalías se calcularon contra la base histórica de datos de 1991-2020 utilizando los promedios semanales. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/figure02.gif (Accedido: 24 de abril de 2024).

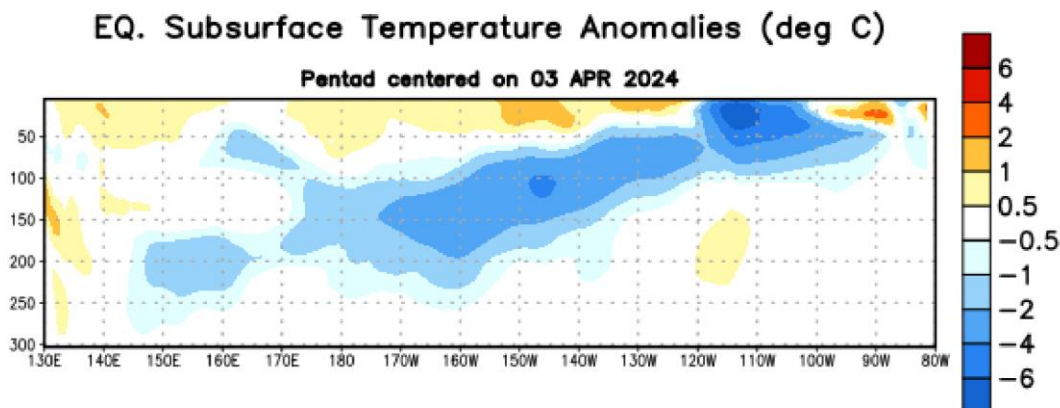


FIGURA 6. Anomalías térmicas ($^{\circ}\text{C}$) subsuperficiales (0-300 m) de las regiones de El Niño en el Océano Pacífico. Las anomalías se calcularon contra la base histórica de datos de 1991-2020 utilizando los promedios semanales https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/figure04.gif (Accedido: 24 de abril de 2024).

La Figura 6 ilustra las tendencias generalizadas de la reducción en la expansión espacial de las anomalías térmicas positivas subsuperficiales (0-300 m) a través del Pacífico tropical, típicas de las condiciones de El Niño, y el aumento gradual en las anomalías negativas, típicas de la transición hacia las condiciones de La Niña. Desde comienzos del mes de mayo de 2024 ya se observan anomalías térmicas negativas de -2 a -6°C en los primeros 100 m de profundidad en la zona El Niño 1+2. A lo largo de las zonas 3 y 3.4 ya se observan anomalías térmicas de -1 a -4°C entre los 50 y 250 m de profundidad. En la zona El Niño 4 también se aprecian ya anomalías de -1 a -2°C alrededor de los 50 a 100 m y luego entre 150 y 300 m.

La evidencia en tiempo real de los patrones de distribución de temperatura en el este al centro del Pacífico tropical muestra una reducción gradual significativa en la anomalía térmica del mar durante la primera parte de la primavera de 2024 frente a las costas de Perú, Ecuador y Colombia, el cual se extendió sobre 3,000 km al oeste de las Islas Galápagos (Figura 7). Esto ha resultado en una anomalía térmica en la superficie del mar de -1°C hasta aproximadamente -2.5°C , claramente indicando el desarrollo gradual de condiciones de La Niña en la zona. Las imágenes ilustran una expansión de la cuña de aguas frías hacia el oeste a través del Pacífico tropical.

Un análisis similar de los patrones en tiempo real de las temperaturas del mar evidencia, sin embargo, una anomalía térmica positiva generalizada a través del Caribe entre $+1^{\circ}\text{C}$ y $+2.3^{\circ}\text{C}$, tan temprano como el final del mes de abril (Figura 8). En la zona alrededor de Puerto Rico, dicha anomalía promedia aproximadamente $+1.7^{\circ}\text{C}$ a comienzos de mayo. Esto coloca la temperatura del mar alrededor de Puerto Rico tan temprano como la primera semana de mayo en prácticamente más de $+1^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura máxima anual esperada a finales de septiembre, lo que constituye ya un **punto caliente (hot spot)**, por su nombre en inglés), lo que se explica más adelante. El alcanzar la temperatura del **punto caliente** implica ya la emisión automática de una **vigilancia de blanqueamiento de corales** para partes de Puerto Rico. Nunca en la historia se han observado dichas condiciones desde finales del mes de abril y comienzos de mayo. Inclusive, supera dichas condiciones en el 2023 que se establecieron

desde el 10 de mayo de 2023. Esto pone a la zona noreste y este del Caribe, inclusive Puerto Rico, en un riesgo significativo de blanqueamiento de corales durante los meses de verano de 2024.

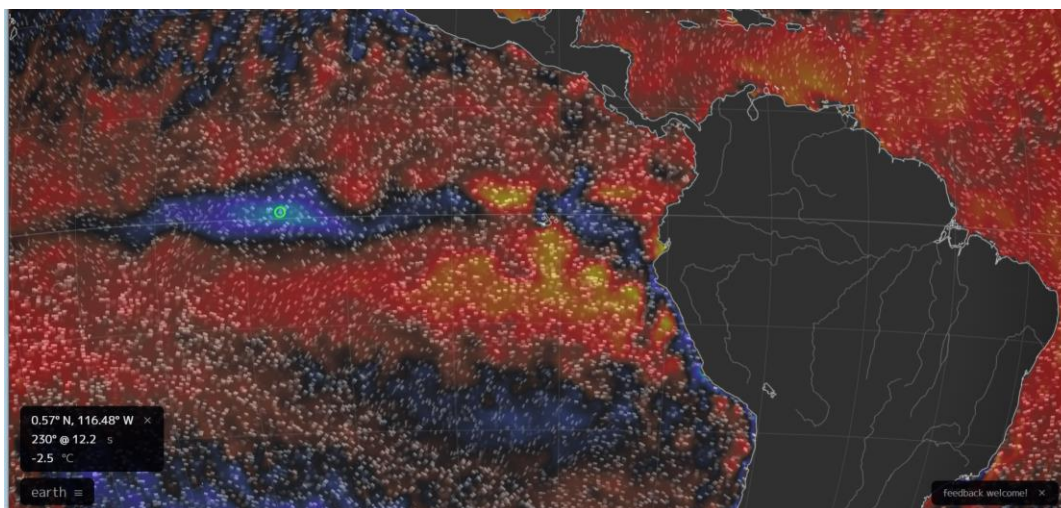


FIGURA 7. Imagen en tiempo real de las anomalías térmicas de la superficie del mar en zona este del Pacífico tropical, en la costa oeste de Sur América. Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/ocean/primary/waves/overlay=sea_surface_temp_anomaly/orthographic=-91.89,-4.38,894/loc=-83.649,-2.865 (accedido: 3 de mayo de 2024).

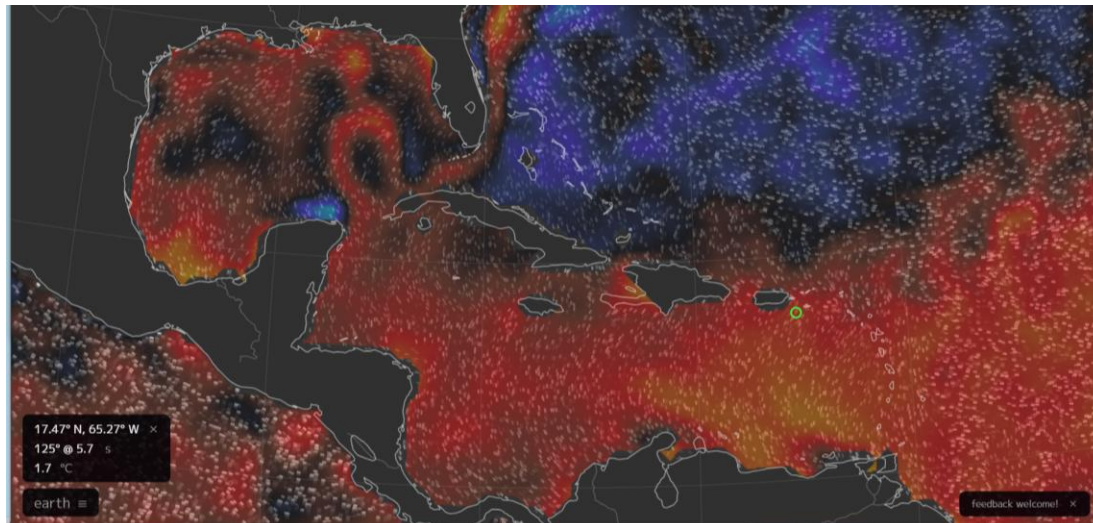


FIGURA 8. Imagen en tiempo real de las anomalías térmicas de la superficie del mar en zona del Caribe. Fuente: https://earth.nullschool.net/#current/ocean/primary/waves/overlay=sea_surface_temp_anomaly/orthographic=-76.54,19.90,1797/loc=-65.389,18.208 (accedido: 3 de mayo de 2024).

En la primera semana de mayo de 2024 ya se evidencian las tendencias aceleradas y altamente preocupantes de incrementos en las temperaturas en la región del Pacífico tropical del este, justo al oeste de Centro América, con temperaturas de 29 a 31°C (Figura 9). También el Caribe centroamericano evidencia temperaturas muy elevadas para la época, entre 28 y 29°C.

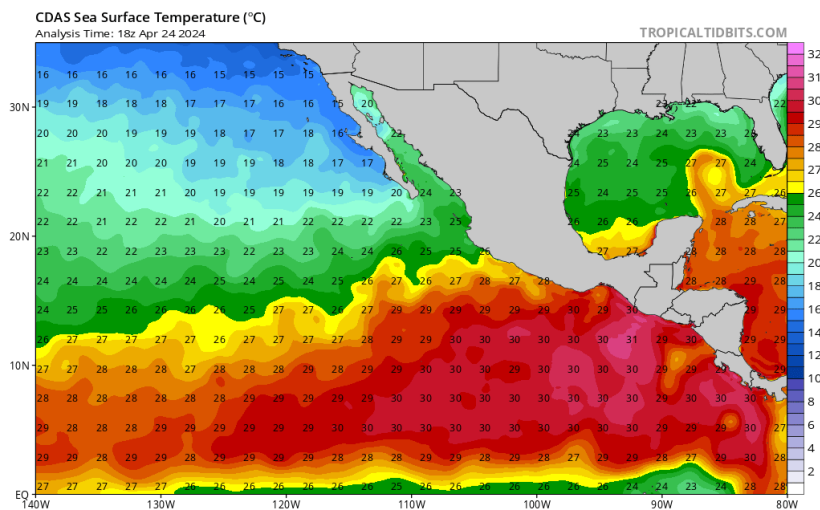


FIGURA 9. Patrones de distribución de temperaturas superficiales del mar en el este del Pacífico tropical. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/cdas-sflux_sst_epac_1.png (accedido: 24 de abril de 2024).

De la misma forma, se observa a comienzos de mayo de 2024 un incremento en las tendencias de las anomalías térmicas positivas en la región del Pacífico tropical del este, justo al oeste de Centro América, a la vez en el Caribe centroamericano (Figura 10).

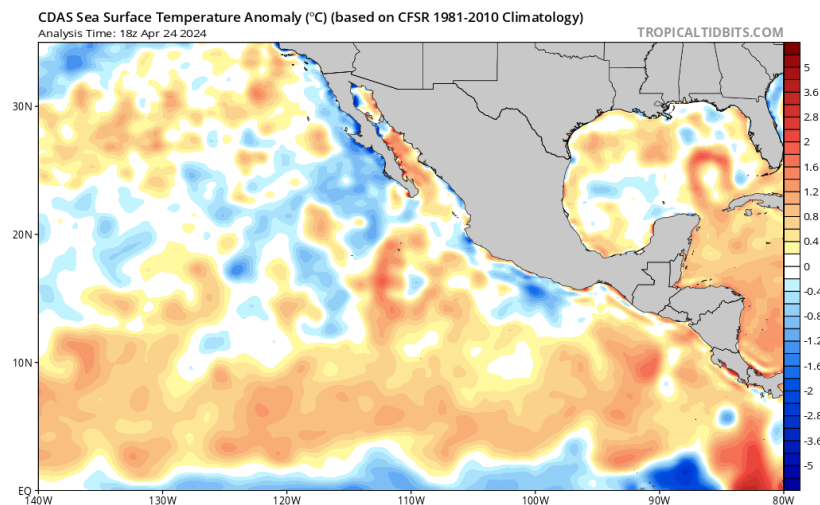


FIGURA 10. Patrones de distribución de las anomalías térmicas en la superficie del mar en el este del Pacífico tropical. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/cdas-sflux_ssta_epac_1.png (accedido: 24 de abril de 2024).

El patrón de calentamiento rápido se ha extendido a través de todo el Caribe y parte del Atlántico tropical, donde las temperaturas de comienzos de mayo de 2024 ya alcanzan 28 a 29°C (Figura 11), evidenciando nuevamente un patrón de calentamiento anormalmente rápido el establecimiento acelerado de condiciones de calor estresante para los arrecifes de coral de toda la región tan temprano como en el comienzo del mes de mayo. Esto incluye las aguas alrededor de Puerto Rico, pero en esta etapa principalmente afectando el este, sur y suroeste de la isla.

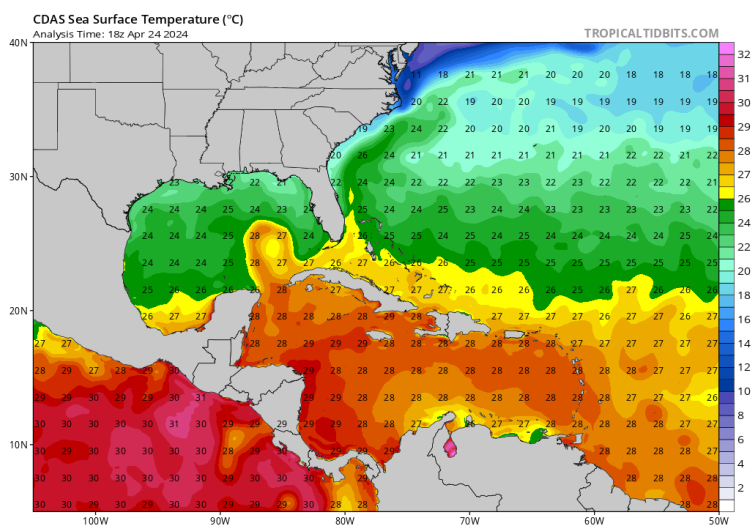


FIGURA 11. Patrones de distribución de temperaturas superficiales del mar a través del Mar Caribe. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/cdas-sflux_sst_watl_1.png (accedido: 24 de abril de 2024).

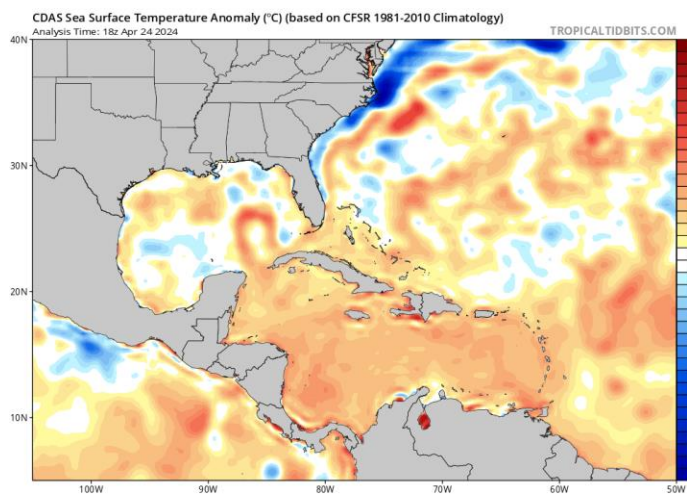


FIGURA 12. Patrones de distribución de las anomalías térmicas en la superficie del mar a través del Mar Caribe. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/cdas-sflux_ssta_watl_1.png (accedido: 24 de abril de 2024).

Estas condiciones se corroboran en la Figura 12, la cual evidencia anomalías térmicas positivas de +1 a +2.5°C a través del Caribe. Una anomalía térmica se refiere a un aumento o disminución en la temperatura del mar referente al promedio de la temperatura de cada zona particular en un momento dado, en este caso, relativo al promedio de la temperatura típico de comienzos del mes de mayo de cada año.

Evidencia documental de una ola de calor marino

Una ola de calor marino es un período prolongado de temperaturas del agua inusualmente cálidas en una región oceánica específica. Es un fenómeno natural que puede ocurrir como resultado de varios factores, como los cambios en la circulación del viento y las condiciones atmosféricas, en la circulación de las corrientes oceánicas, y debido a la influencia de patrones climáticos como El Niño. Las olas de calor marinas pueden tener impactos significativos en los ecosistemas marinos, incluidos los siguientes:

Cambios en la distribución de algunas especies: las olas de calor marinas pueden hacer que algunas especies marinas cambien su distribución a aguas más frías, lo que puede afectar su supervivencia, reproducción e interacciones con otras especies.

Blanqueamiento de los corales: las altas temperaturas del agua durante períodos prolongados pueden provocar el blanqueamiento de los corales, un fenómeno en el que los corales expulsan las algas simbióticas que les proporcionan su color vibrante, sus nutrientes, le ayudan en su calcificación y les proporcionan parte del oxígeno que respiran. El blanqueamiento de corales puede tener graves consecuencias para los arrecifes de coral y los diversos ecosistemas que dependen de ellos, afectando adversamente nuestra economía.

Floraciones de algas nocivas: las olas de calor marinas también pueden promover el crecimiento de floraciones de algas nocivas (“harmful algal blooms”, o HABs, por sus siglas en inglés) y de cianobacterias, que pueden producir toxinas o acabar con el oxígeno disuelto en el agua que pueden dañar la vida marina y afectar a los seres humanos que consumen mariscos contaminados.

Cambios en la productividad de los océanos: las olas de calor marinas pueden afectar la productividad de los océanos al reducir la cantidad de nutrientes disponibles y el oxígeno disuelto para los organismos marinos, lo que puede afectar las redes alimentarias y la pesca.

Impactos económicos: las olas de calor marinas pueden tener impactos económicos significativos en las industrias que dependen de los ecosistemas marinos saludables, como la pesca, el turismo y la recreación.

Los impactos de las olas de calor marino pueden variar según su intensidad, duración y ubicación. Es fundamental monitorear y estudiar las olas de calor marinas para comprender mejor sus impactos en los ecosistemas marinos y los servicios que brindan a las comunidades humanas. Es preocupante que, en toda la región norte del Caribe, incluyendo a Puerto Rico, nos enfrentamos actualmente a una ola significativa de calor marina, sin haber estado preparados para estudiar su posible impacto. Aún estamos a tiempo para tratar de comprender mejor sus consecuencias a corto, mediano y largo plazo.

La Figura 13 muestra la extensión espacial de la ola de calor marino (“marine heatwave”) a comienzos de mayo 2024 casi de forma ininterrumpida a través de todo el Caribe, incluyendo a Puerto Rico, y a través de todo el Atlántico tropical, hasta África, y luego hacia el norte hasta las Islas Canarias, y hacia el hemisferio sur hacia Brasil y todo el Atlántico sur hasta África.

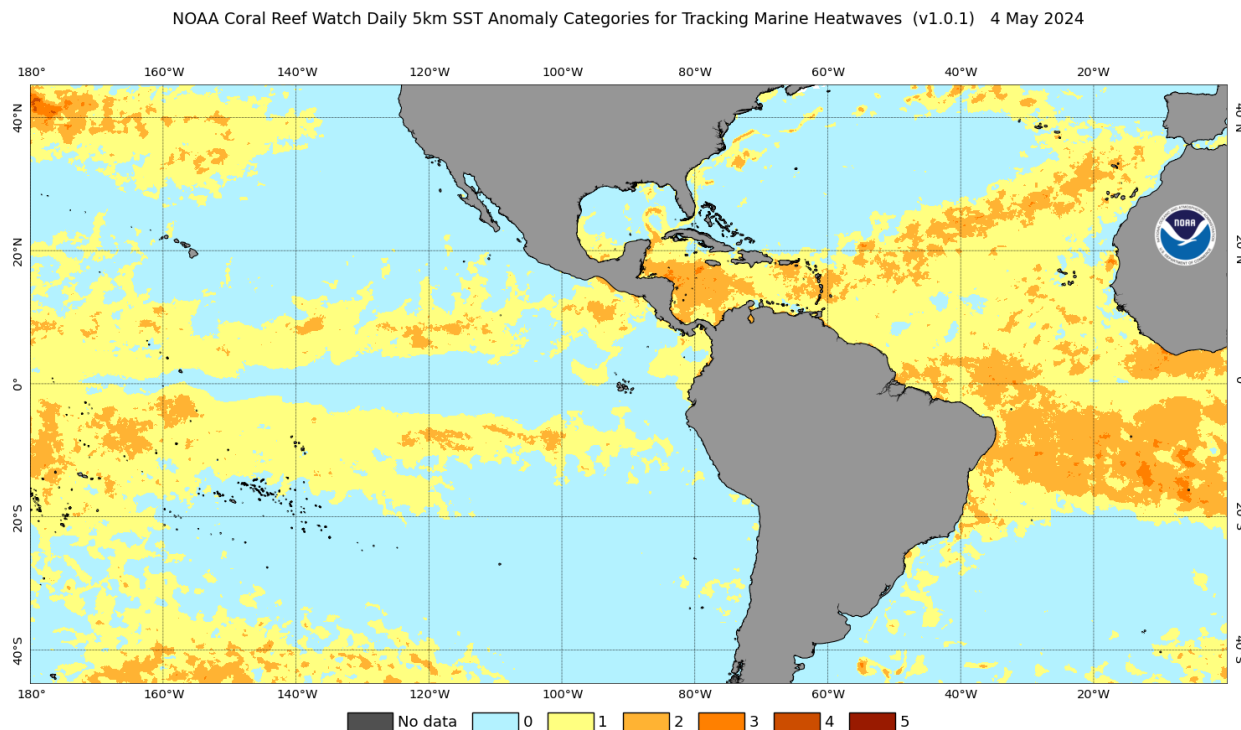


FIGURA 13. Clasificación actual del NOAA Coral Reef Watch Program de la ola de calor marino atravesando la zona del Océano Atlántico. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/marine_heatwave/v1.0.1/daily/png/noaa-crw_mhw_v1.0.1_category_west_current.png (accedido: 4 de mayo de 2024).

La Figura 14 muestra un detalle del nivel de alerta de la ola de calor marino a través del de todo el Caribe desde finales de abril y comienzos de mayo de 2024. Esta muestra que gran parte de la zona del Caribe al comienzo del mes de mayo ya se encuentra bajo una alerta de nivel 2 (significativa), con algunas zonas menores bajo una alerta de nivel 3 (severa). Aproximadamente 40% de las aguas alrededor de Puerto Rico se encuentran a comienzos de mayo bajo una **alerta de nivel 1 de ola de calor marino moderado**, pero un 60%, principalmente el sureste de la isla y la gran parte del Canal de la Mona se encuentran bajo **una alerta 2 de ola de calor marino significativo**, un evento sin precedentes históricos para esta época.

La Figura 15 ilustra en mayor detalle la amplitud y cobertura de la ola de calor marino alrededor de Puerto Rico durante comienzos del mes de mayo de 2024. Esta imagen confirma que aproximadamente 40% de las aguas alrededor de Puerto Rico se encuentran ya bajo una **alerta de nivel 1 de ola de calor marino moderado** y que un 60% se encuentra ya bajo una **alerta 2 de ola de calor marino significativo**, un evento sin precedentes históricos para finales de abril y comienzos de mayo. Esto ha acelerado la expansión espacial y la magnitud

del evento de calentamiento regional en una fecha sin precedentes históricos, contribuyendo a aumentar el riesgo térmico para los corales en Puerto Rico.

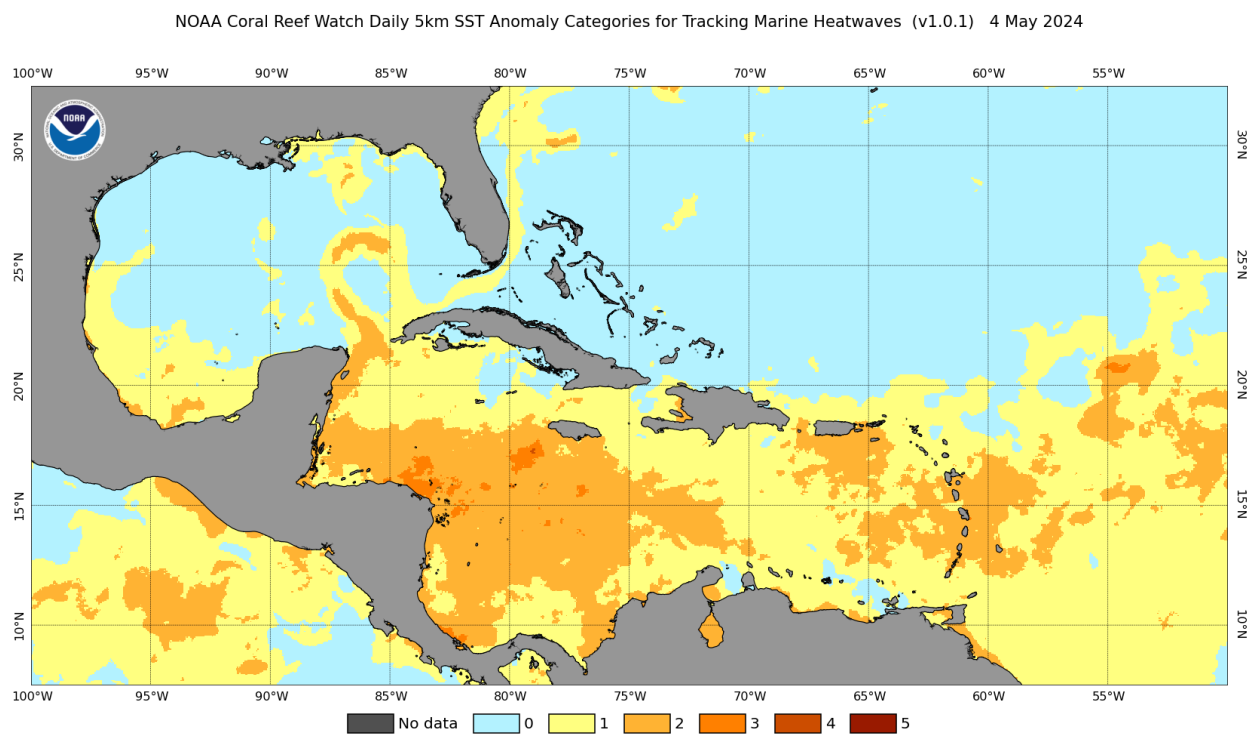


FIGURA 14. Clasificación actual del NOAA Coral Reef Watch Program de la ola de calor marino atravesando la zona del Caribe. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/marine_heatwave/v1.0.1/daily/png/noaa-crw_mhw_v1.0.1_category_caribbean_current.png (accedido: 1 de mayo de 2024).

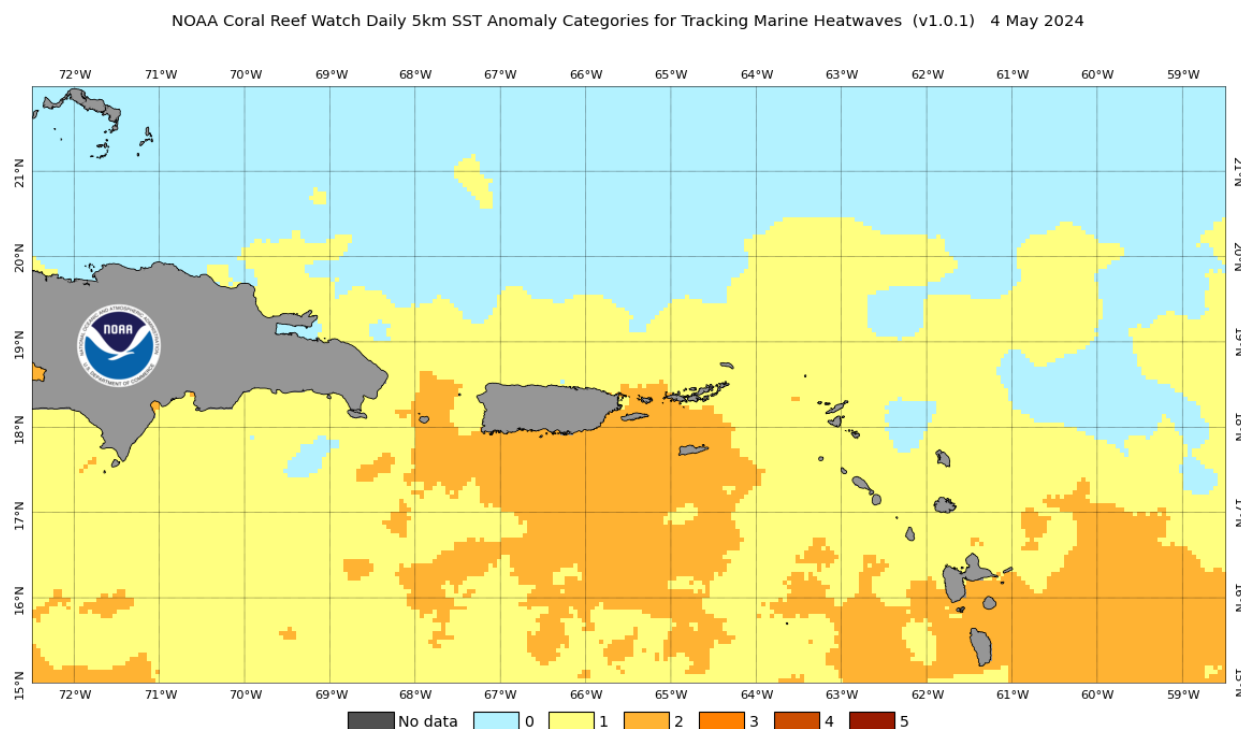


FIGURA 15. Clasificación actual del NOAA Coral Reef Watch Program de la ola de calor marino atravesando la zona de Puerto Rico. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/marine_heatwave/v1.0.1/daily/png/noaa-crw_mhw_v1.0.1_category_prusvi_current.png (accedido: 1 de mayo de 2024).

El índice del Sistema de Asimilación de Datos Climáticos o el “Climate Data Assimilation System” (CDAS, por sus siglas en inglés para la región de El Niño 1+2 en la zona justo al oeste de América del Sur para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia de reducción en la anomalía térmica positiva, desde +1.3°C hasta -0.9°C, alcanzando +0.164°C a comienzos de mayo (Figura 16). Esto evidencia la desaparición gradual del fenómeno de El Niño y la transición hacia el fenómeno de La Niña.

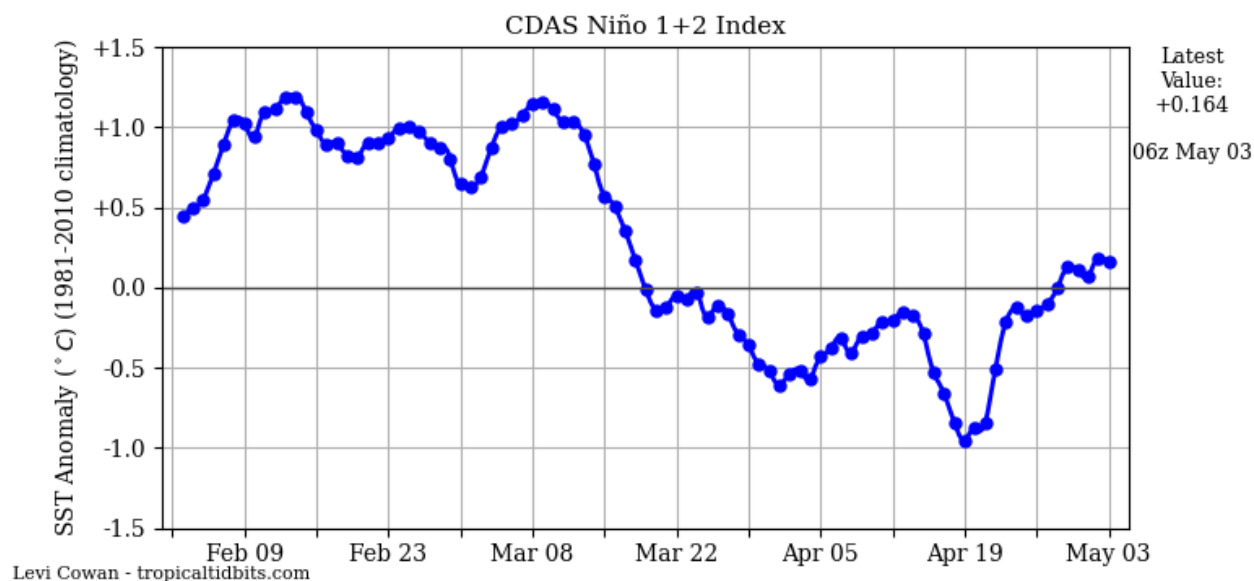


FIGURA 16. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en las regiones 1 y 2 de El Niño a través del Océano Pacífico en la circulación Walker. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/nino12.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

El índice CDAS es una medida comúnmente utilizada de la fuerza del patrón climático de la circulación del ENSO. Se calcula con base en las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 del Océano Pacífico tropical (ver Figura 2), que es un área ubicada entre los 120°W y 170°W de longitud y los 5°N y 5°S de latitud en medio del Océano Pacífico tropical. El índice CDAS se deriva de un análisis de datos atmosféricos y oceánicos globales, incluidas mediciones satelitales, boyas oceánicas y otras fuentes de datos de observación. Se calcula tomando el promedio de las anomalías térmicas en la región Niño 3.4 durante un período de tres meses y comparándolo con la anomalía promedio a largo plazo para el mismo período.

El índice CDAS se aplica en la actualidad a muchas otras zonas de los océanos tropicales del planeta bajo el mismo principio. Cuando las anomalías térmicas en la región de interés superan en más de +0.5°C el promedio a largo plazo durante al menos cinco períodos consecutivos de tres meses, se considera que está ocurriendo un evento de El Niño. La fuerza del evento El Niño está determinada por la magnitud y duración de las anomalías térmicas en la región de interés. En el caso de la Figura 16, evidencian el cambio gradual de El Niño hacia condiciones de La Niña.

El índice CDAS se utiliza ampliamente por meteorólogos, climatólogos y otros investigadores para monitorear y predecir los impactos de los eventos de El Niño en los patrones climáticos globales y la variabilidad climática. Es uno de varios índices utilizados para rastrear las condiciones de ENSO y se considera una medida confiable y precisa de la actividad de El Niño.

El índice CDAS para la región de El Niño 3 en la zona justo al oeste de las Islas Galápagos hacia el centro del Pacífico tropical para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha

mostrado una tendencia similar de reducción gradual de la anomalía positiva de la temperatura del mar, típica de las condiciones de El Niño, transicionando hacia condiciones de La Niña con anomalías negativas (Figura 17). En este caso, en la primera semana de mayo de 2024 se ha documentado una anomalía de -0.058°C .

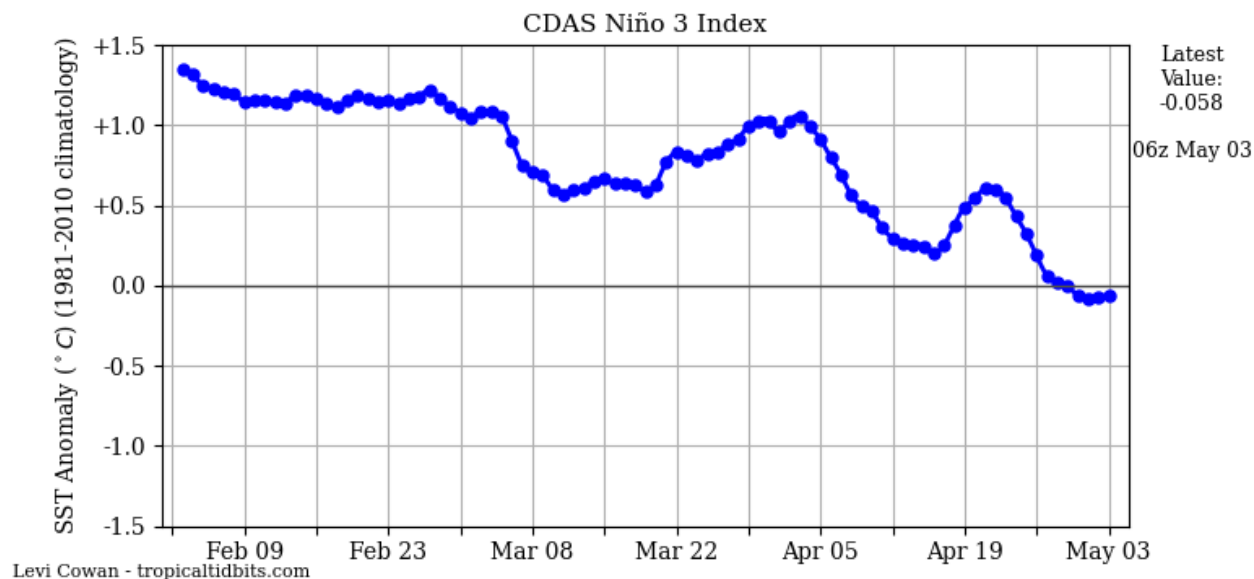


FIGURA 17. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región 3 de El Niño a través del Océano Pacífico en la circulación Walker. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/nino3.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

El índice CDAS para la región de El Niño 4 en la zona del centro del Pacífico tropical para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia similar de reducción gradual de la anomalía positiva de la temperatura del mar, típica de las condiciones de El Niño, transicionando hacia condiciones de La Niña (Figura 18). En este caso, en la primera semana de mayo de 2024 se ha documentado una anomalía de $+0.742^{\circ}\text{C}$, mostrando un descenso gradual hacia condiciones de La Niña.

Sin embargo, de forma interesante, el índice CDAS evidencia para la región del Caribe para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia de incremento en la anomalía térmica positiva, desde $+0.80^{\circ}\text{C}$ hasta $+1.002^{\circ}\text{C}$ en la primera semana de mayo (Figura 19). Esto evidencia que en el Caribe se están manifestando condiciones de calentamiento significativo aun tan temprano como la primera semana de mayo de 2024.

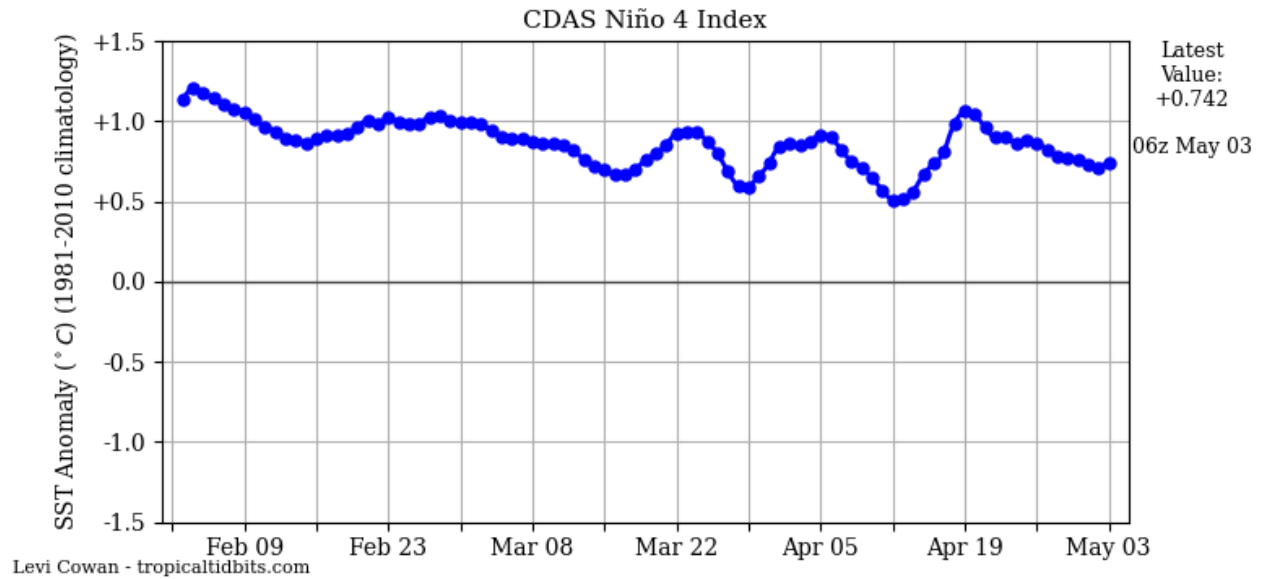


FIGURA 18. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región 4 de El Niño a través del Océano Pacífico en la circulación Walker. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/nino4.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

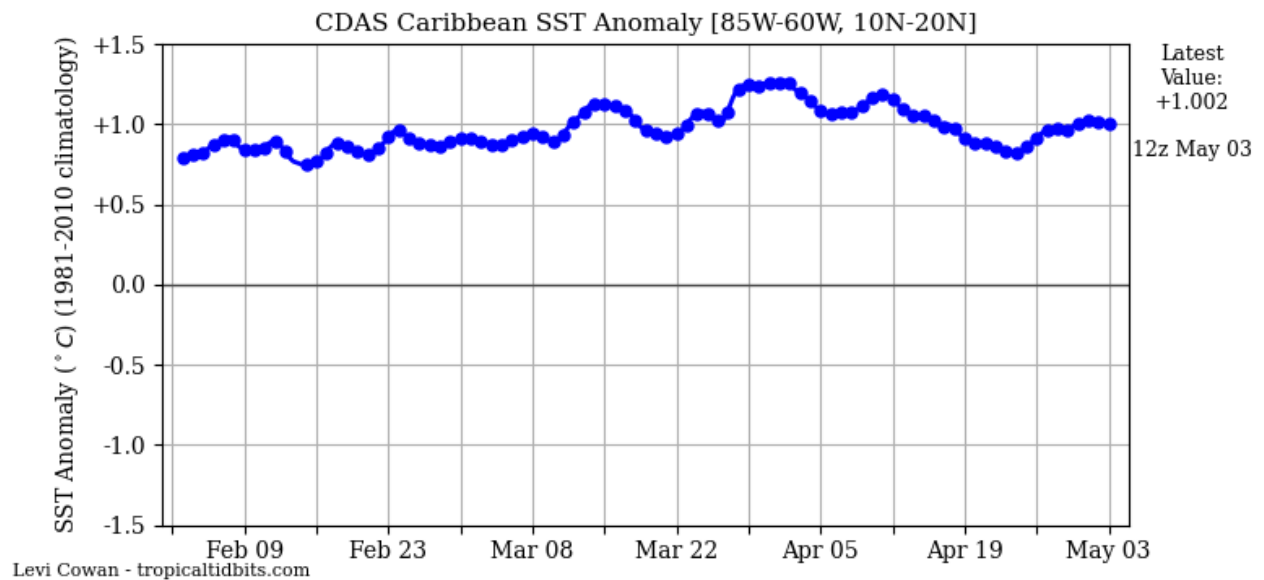


FIGURA 19. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región del Mar Caribe. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/carssta.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

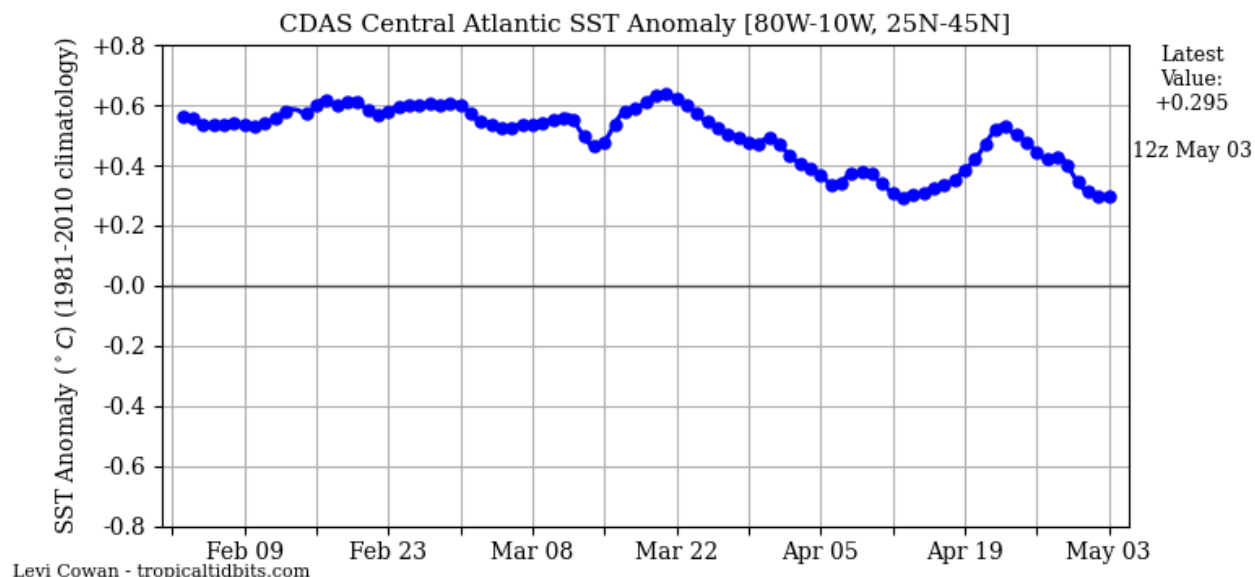


FIGURA 20. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región de las latitudes medias del Atlántico norte. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/catssta.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

El índice CDAS para la región de las latitudes medias del Océano Atlántico para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia de poco cambio en la anomalía térmica positiva de alrededor +0.55°C a +0.295°C al comienzo de mayo de 2024 (Figura 20). Esto sugiere igualmente señales sostenidas de temperatura del mar anormalmente alta a través del Atlántico medio.

El índice CDAS para la región del Océano Atlántico tropical del este para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia de incremento en la anomalía térmica desde +0.3°C hasta +1.10°C en septiembre, y de +0.99°C aun en octubre (Figura 22). El patrón ha sido particularmente más notable para el medio del verano. Esto sugiere igualmente señales de incremento en la temperatura del mar a través del Atlántico tropical del este asociada al desarrollo gradual del fenómeno de El Niño.

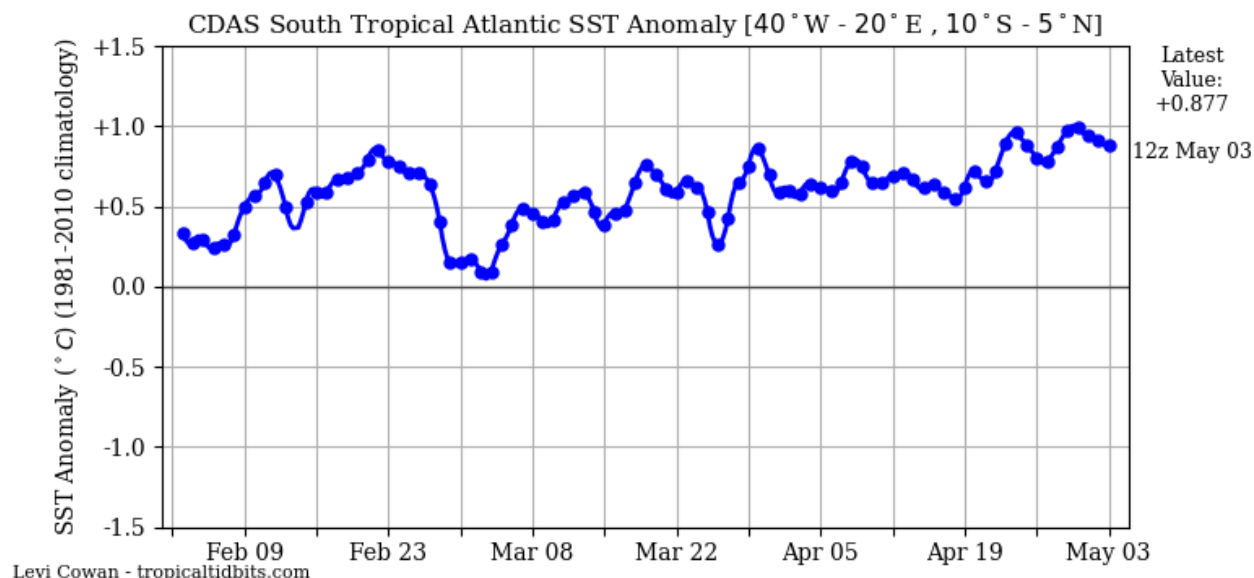


FIGURA 21. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región del Atlántico tropical del este. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/eatssta.png> (accedido: 3 de mayo de 2024).

El índice CDAS para la región del Océano Atlántico tropical del este para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia muy leve de reducción en la anomalía térmica positiva desde +1.2°C hasta +0.757°C aun a comienzos de mayo de 2024 (Figura 21). Igualmente, la región del Océano Atlántico tropical del sur para el período de tres meses de enero a abril de 2024 ha mostrado una tendencia de aumento en la anomalía térmica desde +0.4°C hasta +0.877°C para la primera semana de mayo (Figura 22). Eso evidencia una anomalía térmica positiva significativa para dicha zona en comparación al promedio de esta época.

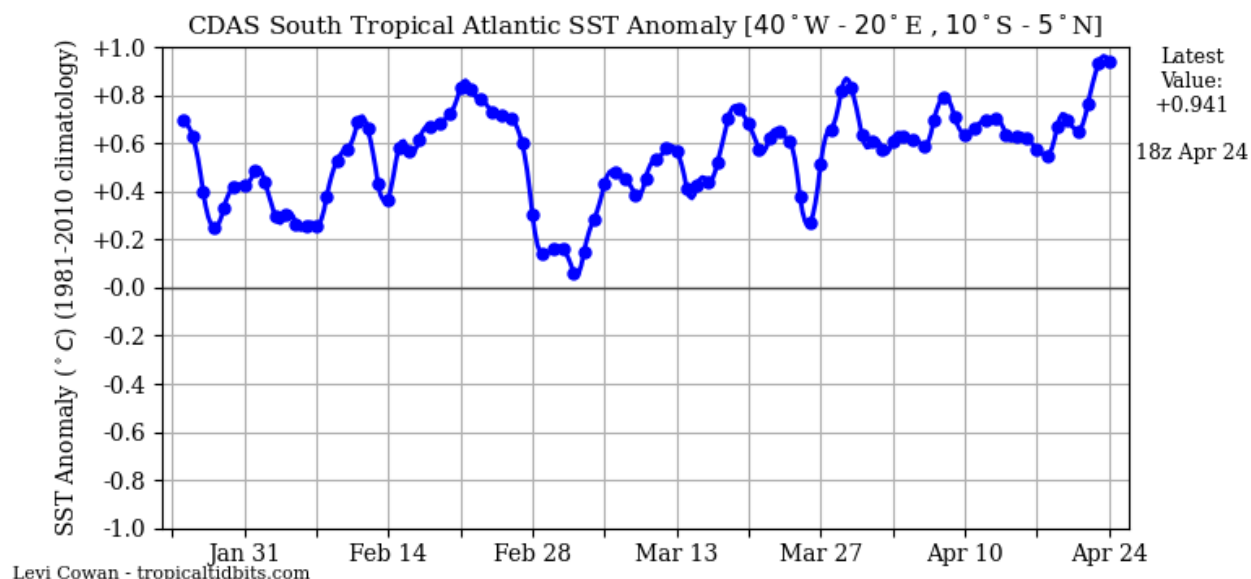


FIGURA 22. Patrones de variación reciente en la anomalía térmica del mar en la región del Atlántico tropical del sur. Fuente: <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/ocean/satslsta.png> (accedido: 24 de abril de 2024).

El índice CDAS para la región del Océano Atlántico tropical del sur para el período de tres meses de mayo a agosto de 2023 ha mostrado una tendencia de transición en la anomalía térmica desde +0.6°C hasta -0.45°C en agosto, posiblemente, como consecuencia efímera del efecto de varias tormentas y huracanes. Luego en septiembre fluctuó entre -0.30 y +0.35°C, alcanzando todavía en octubre +0.19°C (Figura 23). Esta zona del planeta es la única en nuestro análisis que sugiere una tendencia leve hacia condiciones neutrales de El Niño.

Evidencia documental de los riesgos de blanqueamiento de corales para Puerto Rico y el Caribe

El registro de la temperatura superficial del mar en la boya de monitoreo de Puerto Rico, localizada en el Canal de La Mona, evidencia también la tendencia de incremento sostenido de temperatura por encima del promedio de la época durante la primera semana de mayo de 2024 (Figura 23). Al presente, muestra una temperatura promedio de 28.88°C, con una anomalía térmica de +1.93°C. Esta temperatura ya excede por +0.27°C la temperatura máxima mensual anual (MMM, o maximum monthly mean) para Puerto Rico (28.61°C). Esto ya constituye una temperatura que marca el desarrollo de condiciones de **vigilancia de blanqueamiento** de corales para Puerto Rico (= 0°C < Hot spot <= 1°C). Para que se emita una **vigilancia** se debe exceder la temperatura MMM por 1°C o menos. De alcanzarse 1°C o más por encima del MMM, entonces se alcanza el **punto caliente (Hot Spot)** y automáticamente se emite un **aviso de blanqueamiento** y comenzarían a contarse las semanas consecutivas de calor estresante de blanqueamiento (**Degree Heating Weeks, DHWs**). Los detalles se explican más adelante (ver Tabla 2).

Igualmente, la boya de las Islas Vírgenes Americanas, la cual es más representativa de las condiciones al este de Puerto Rico, ya muestra una temperatura promedio de 28.99°C, con una anomalía térmica de +1.95°C (Figura 24). Esta temperatura ya excede por +0.56°C la temperatura máxima mensual anual (28.43°C), está estableciendo récords para esta época del año, y ya se emitió una **vigilancia de blanqueamiento** por primera vez en la historia desde la última semana de abril de 2024.

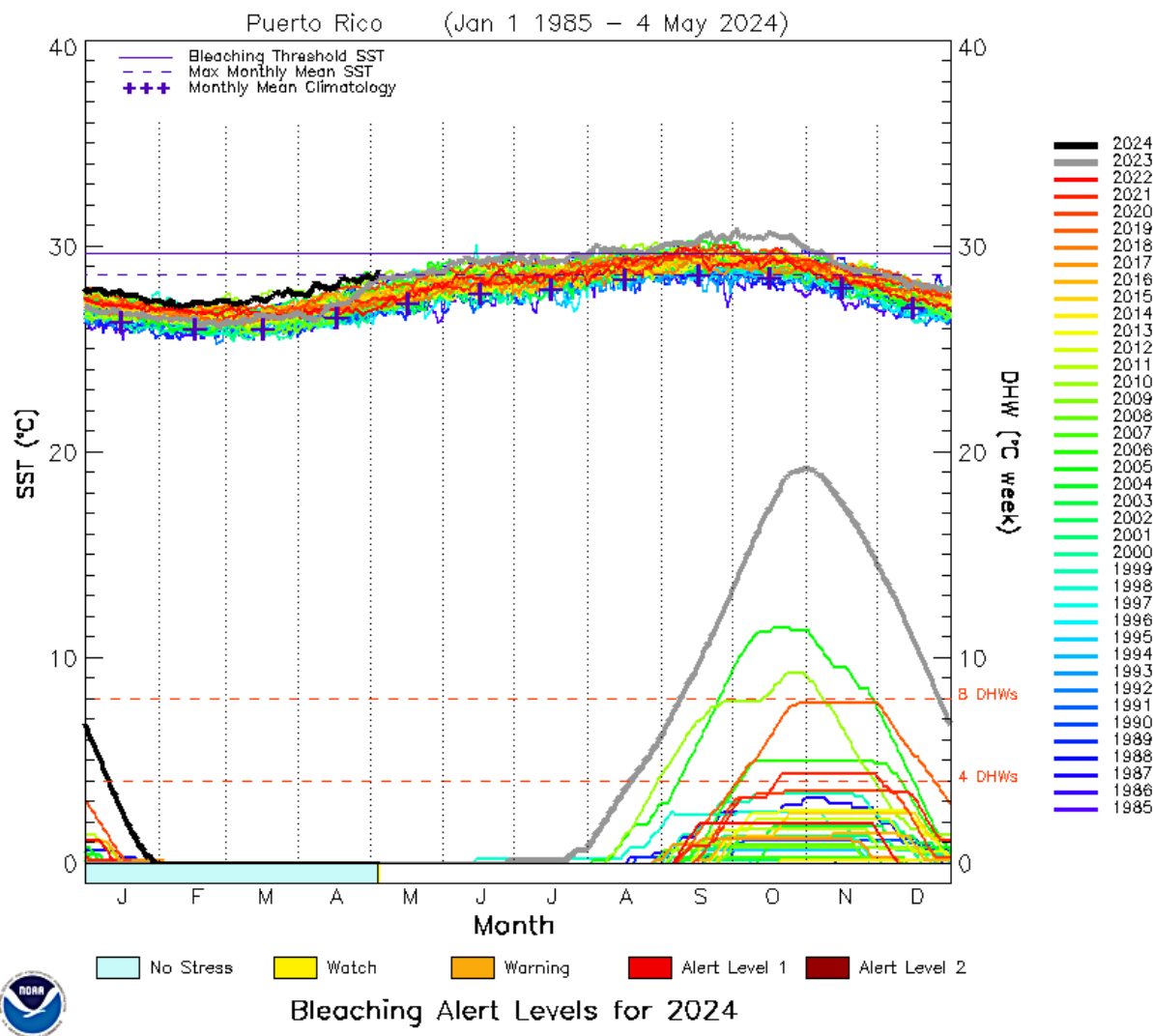


FIGURA 23. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en Puerto Rico. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/timeseries/caribbean.php#puerto_rico (accedido: 5 de mayo de 2024).

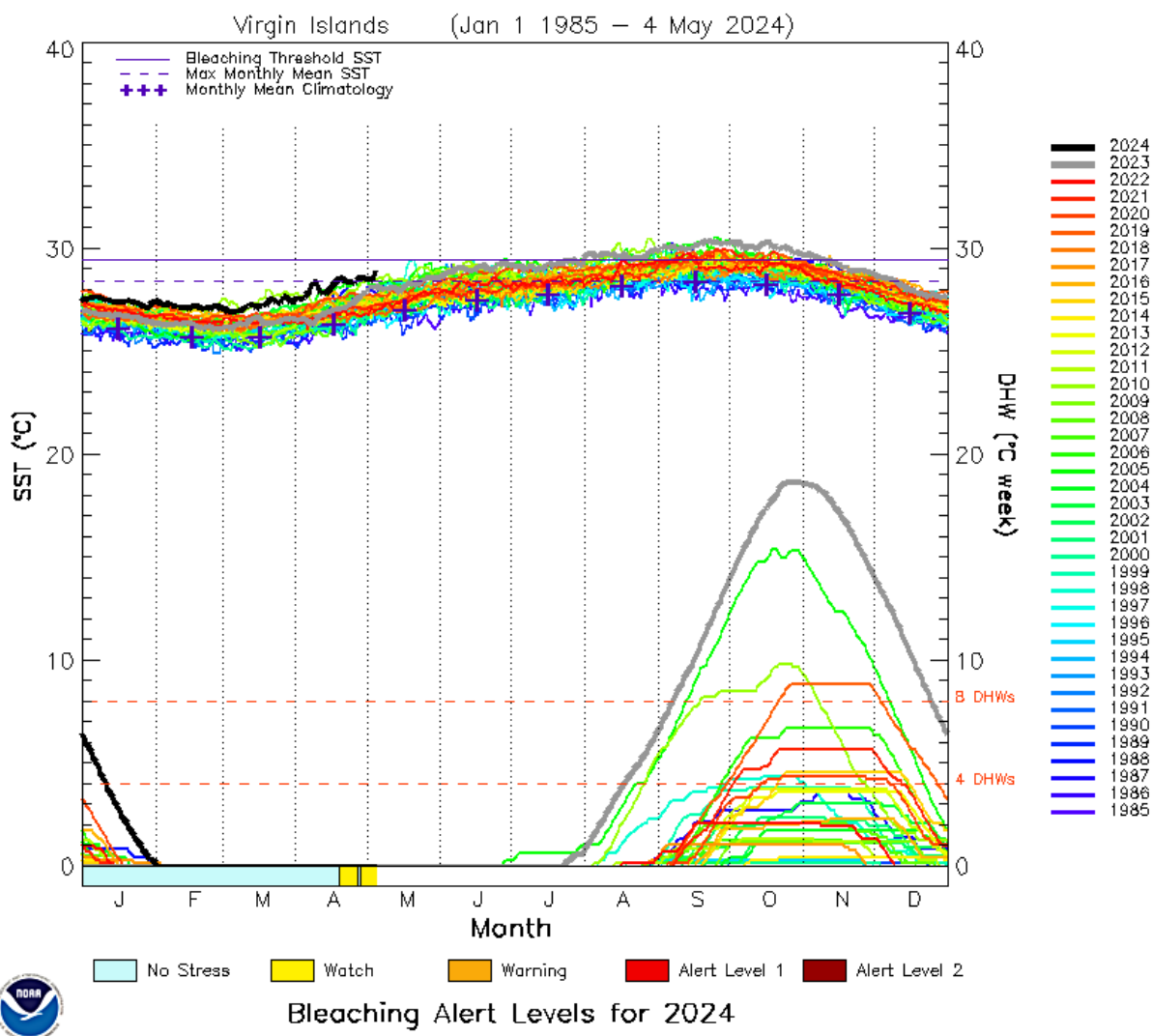


FIGURA 24. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en las Islas Vírgenes Estadounidenses. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/timeseries/caribbean.php#virgin_islands (accedido: 5 de mayo de 2024).

La Figura 25 ilustra la localización de las nuevas estaciones virtuales de monitoreo de temperatura del mar en Puerto Rico establecidas por el NOAA Coral Reef Watch Program (CRWP) durante el 2023. Estas permiten un análisis mucho más fino y detallado de diversas localidades arrecifales representativas en Puerto Rico, permitiendo medir la variabilidad regional. Ya durante la primera semana de mayo, todas las estaciones virtuales de Puerto Rico muestran condiciones estresantes de temperatura para los arrecifes con una anomalía térmica promedio de $+1.38^{\circ}\text{C}$, con un valor mínimo de $+1.04^{\circ}\text{C}$ en Vega Baja y uno máximo de $+1.88^{\circ}\text{C}$ en Culebra (Tabla 1). De paso, 6 de las 13 estaciones virtuales en Puerto Rico (46%) ya se encuentran desde finales de abril y comienzos de mayo bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales.

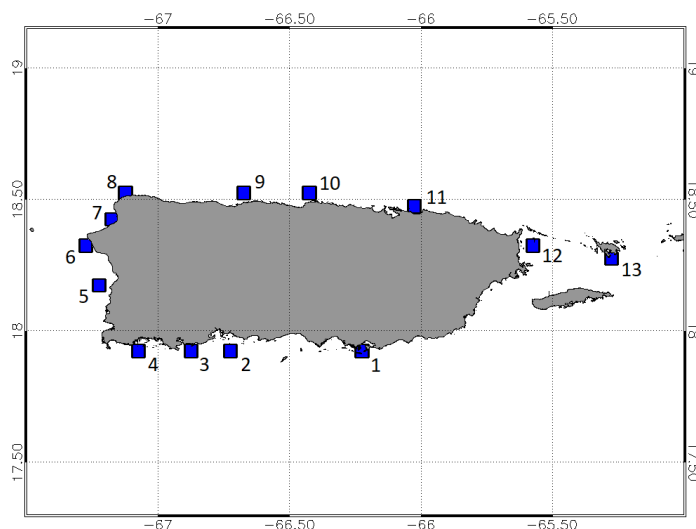


FIGURA 25. A) Estaciones virtuales del NOAA Coral Reef Watch Program en Puerto Rico del nuevo producto experimental de para el monitoreo de la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en estaciones selectas; https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php?fbclid=IwAR3pxz6NA-cAKtSUWOT5Q4Yr6JIMxZ6zNBzGF1TiSaCkOGdyanZWMMbZK4k

Las Figuras 26 a la 38 ilustran los datos específicos de cada una de las localidades de las nuevas estaciones virtuales. Cada gráfica ilustra las variaciones diarias promedio de temperatura desde el año 1985 para cada localidad. También se ilustra la variación en la acumulación de DHWs anual, evidenciando que la isla experimentó durante el 2023 un récord sin precedentes en la acumulación de calor estresante, llegando a una clasificación sin precedente de **alerta 3** de blanqueamiento, lo que se explica más adelante. En la mayoría los casos ilustrados en esta secuencia de figuras, menos en la costa norte de Puerto Rico, las condiciones actuales de temperatura del mar constituyen una condición de calentamiento sin precedente para el inicio de un mes de mayo. En el caso de la costa norte, aun así, las condiciones observadas se asemejan bastante a las condiciones del 2023 para esta misma época.

TABLA 1. Resumen de las temperaturas superficiales del mar, anomalía térmica y condición de riesgos de blanqueamiento de corales en Puerto Rico*.

Localidad	Temp. °C	Temp. A °C	MMM °C	MMM-A °C	Clasificación
Salinas	28.84	+1.83	28.63	+0.21	Vigilancia
Guayanilla	28.87	+1.76	28.69	+0.18	Vigilancia
Guánica	28.83	+1.70	28.73	+0.10	Vigilancia
La Parguera	28.91	+1.73	28.79	+0.12	Vigilancia
Cabo Rojo	28.67	+1.32	28.88	-0.21	No estrés
Rincón	28.65	+1.38	28.81	-0.16	No estrés
Aguadilla	28.51	+1.35	28.74	-0.23	No estrés
Isabela	28.42	+1.36	28.69	-0.27	No estrés
Arecibo	28.03	+1.13	28.56	-0.53	No estrés
Vega Baja	27.86	+1.04	28.54	-0.68	No estrés
San Juan	27.76	+1.05	28.52	-0.76	No estrés
Fajardo	28.56	+1.73	28.55	+0.01	Vigilancia
Culebra	28.69	+1.88	28.44	+0.25	Vigilancia
Promedio	28.51	+1.38	28.66	-0.15	

*A= anomalía; MMM= monthly maximum mean (temperatura promedio mensual máxima= máxima anual).

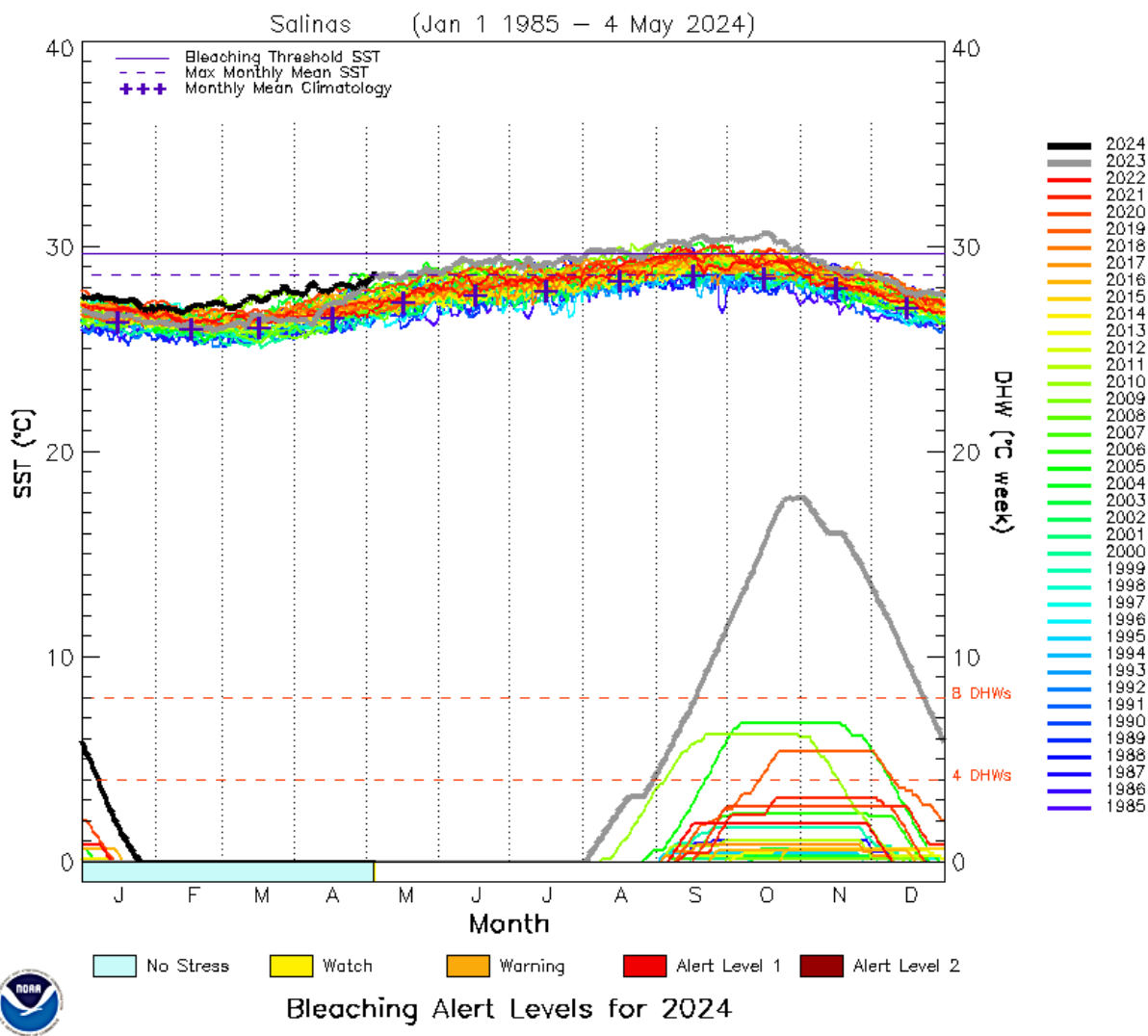


FIGURA 26. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Salinas (accedido el 5 de mayo de 2024). https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Salinas

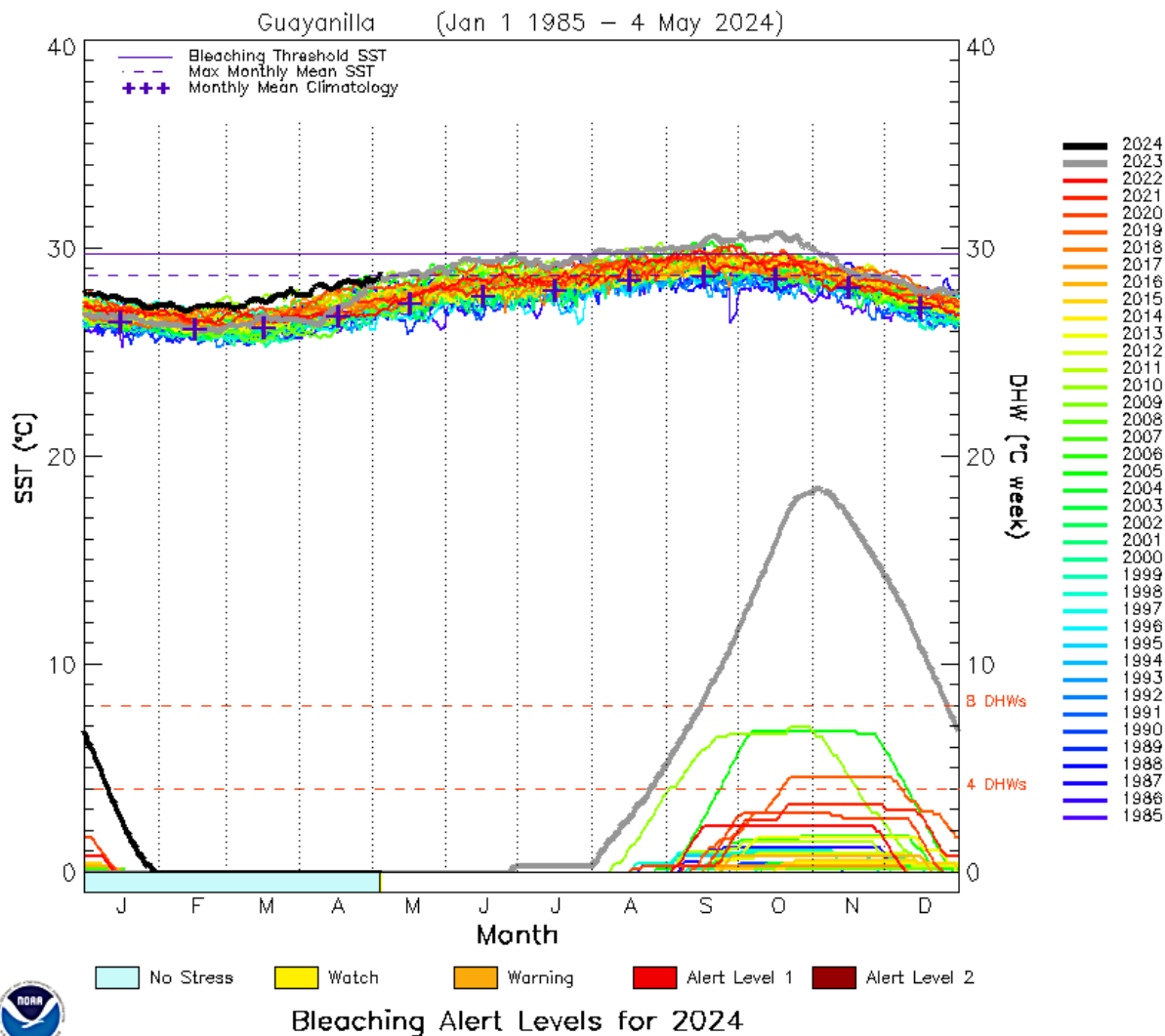


FIGURA 27. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Guayanilla (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Guayanilla

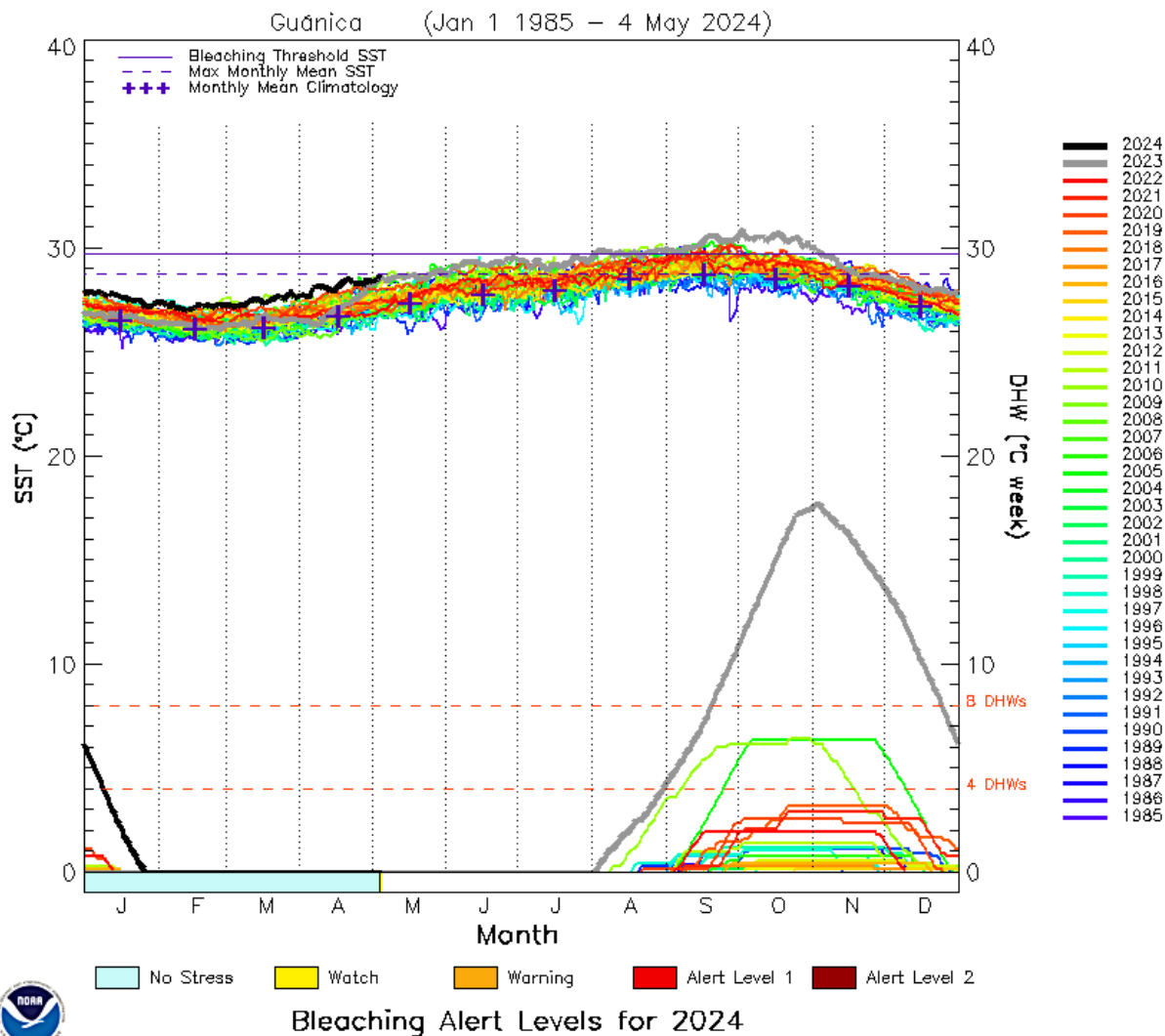


FIGURA 28. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Guánica (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Guanica

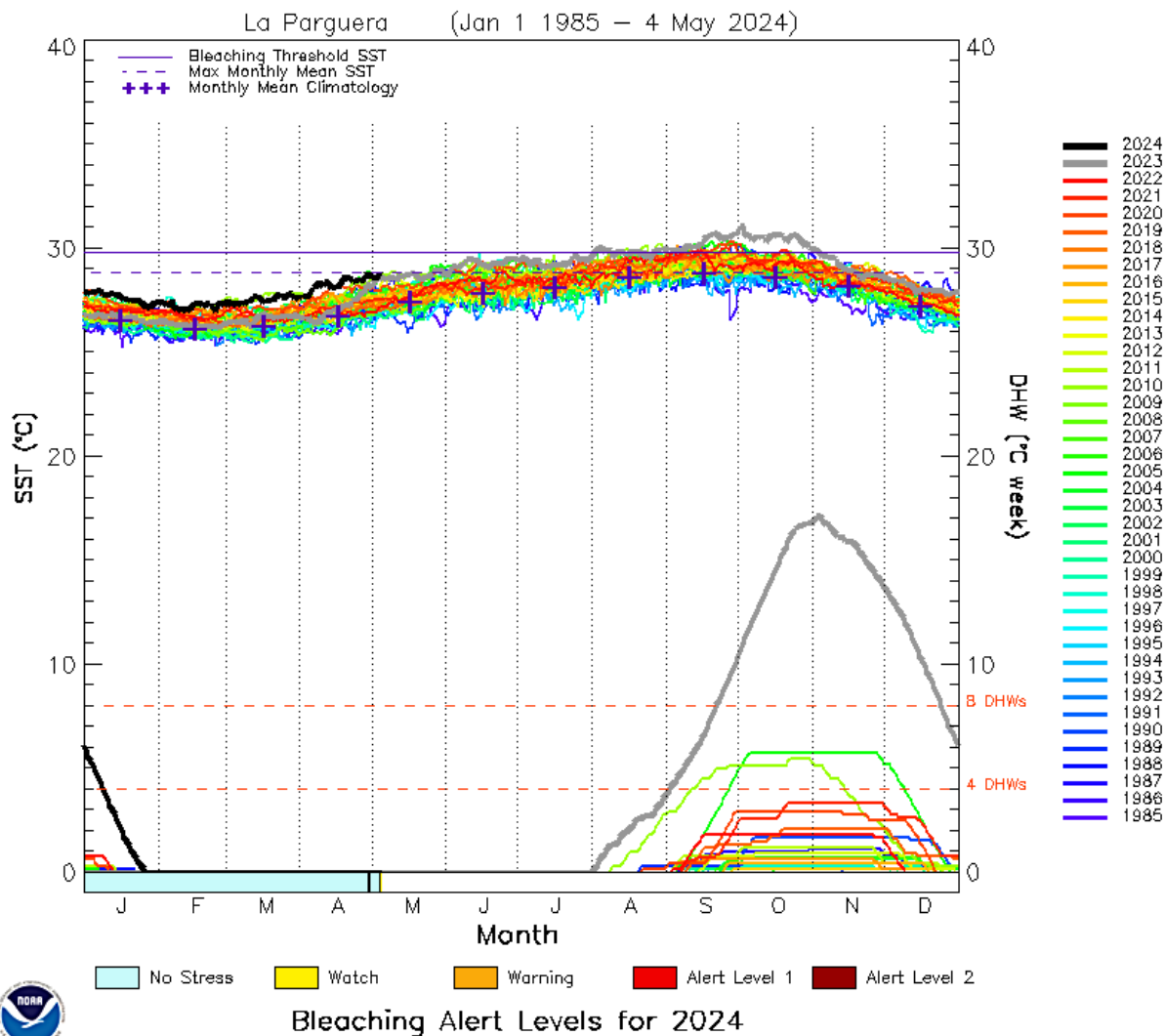


FIGURA 29. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de La Parguera (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#LaParguera

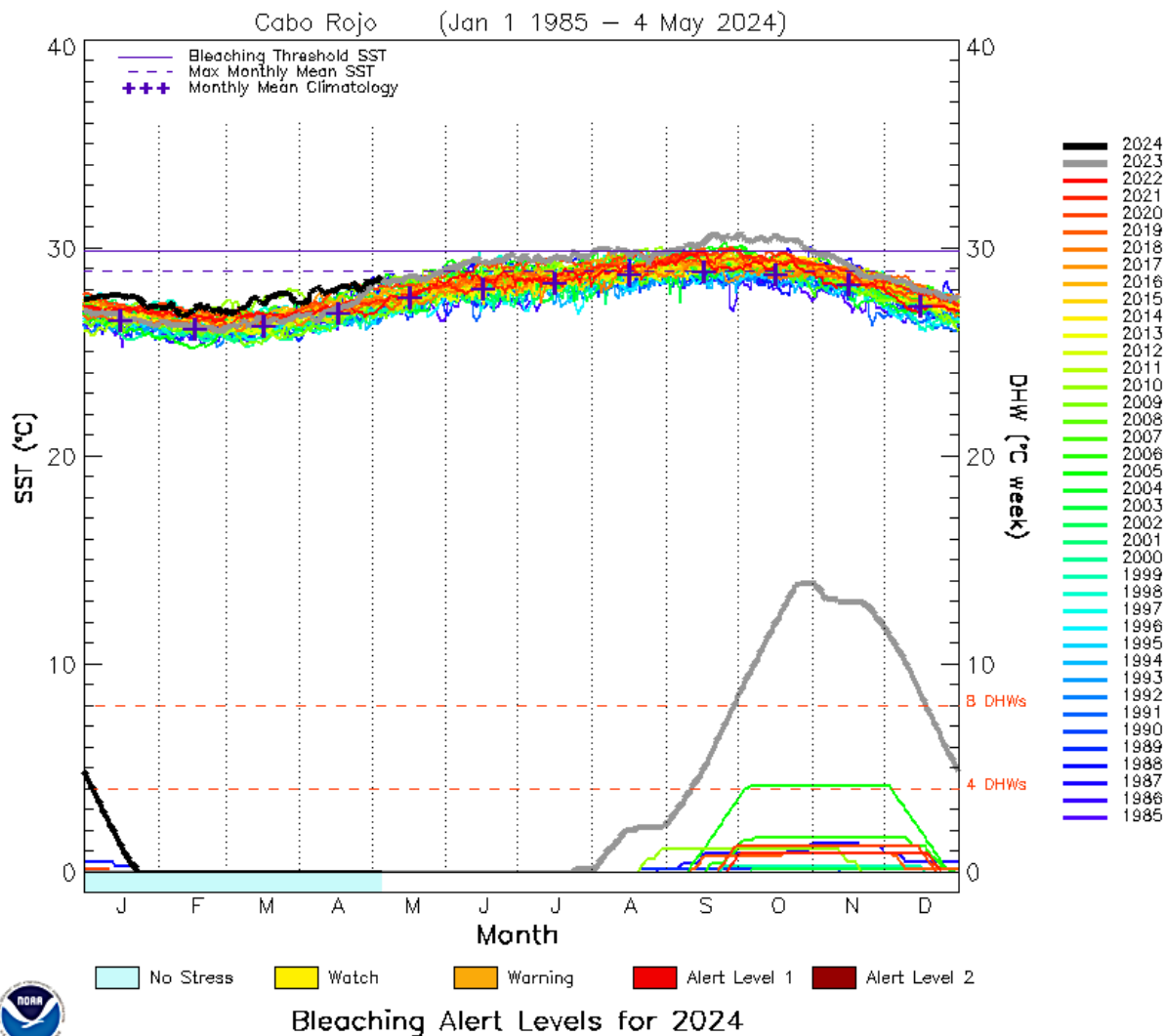


FIGURA 30. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Cabo Rojo (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#CaboRojo

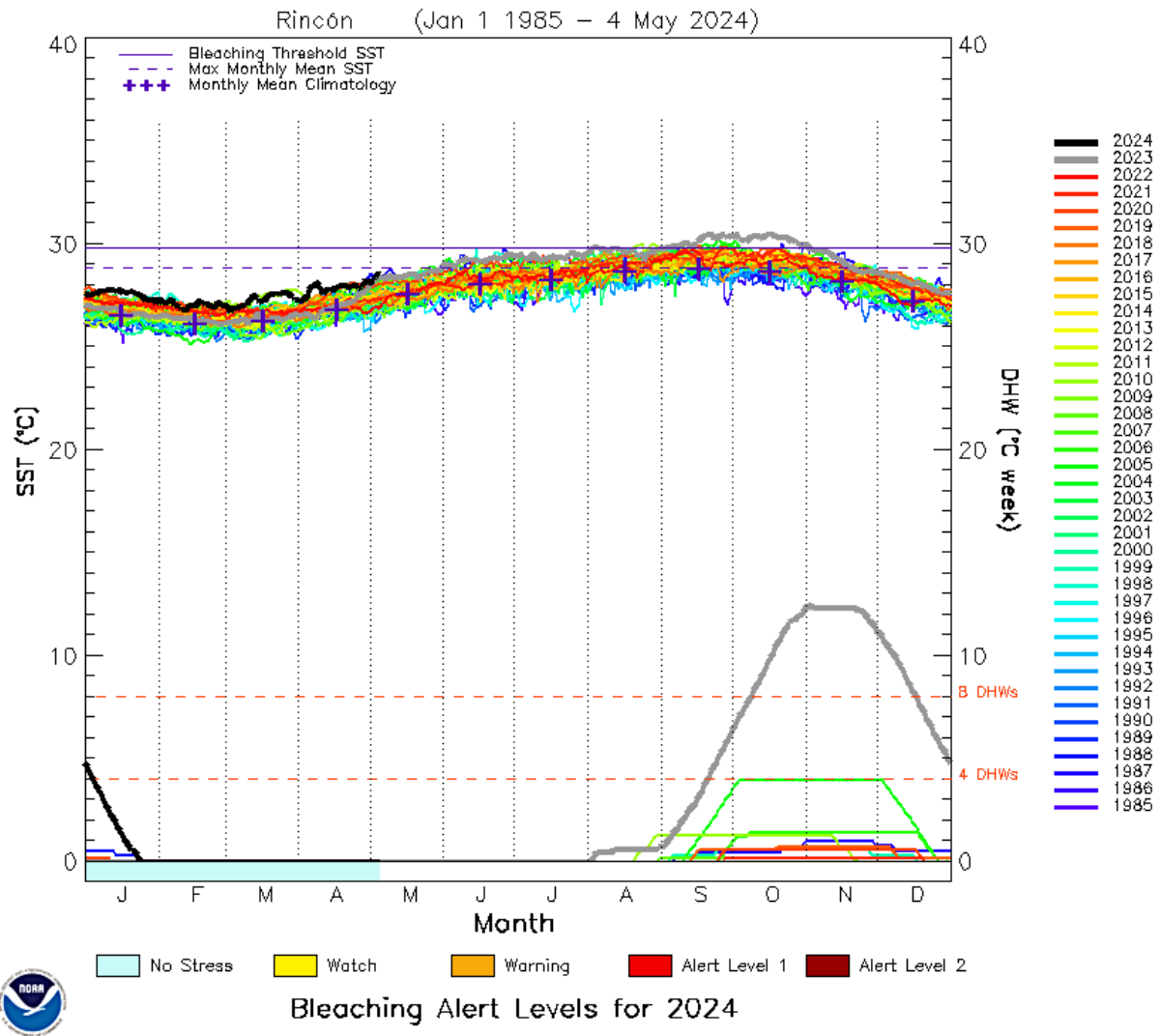


FIGURA 31. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Rincón (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Rincon

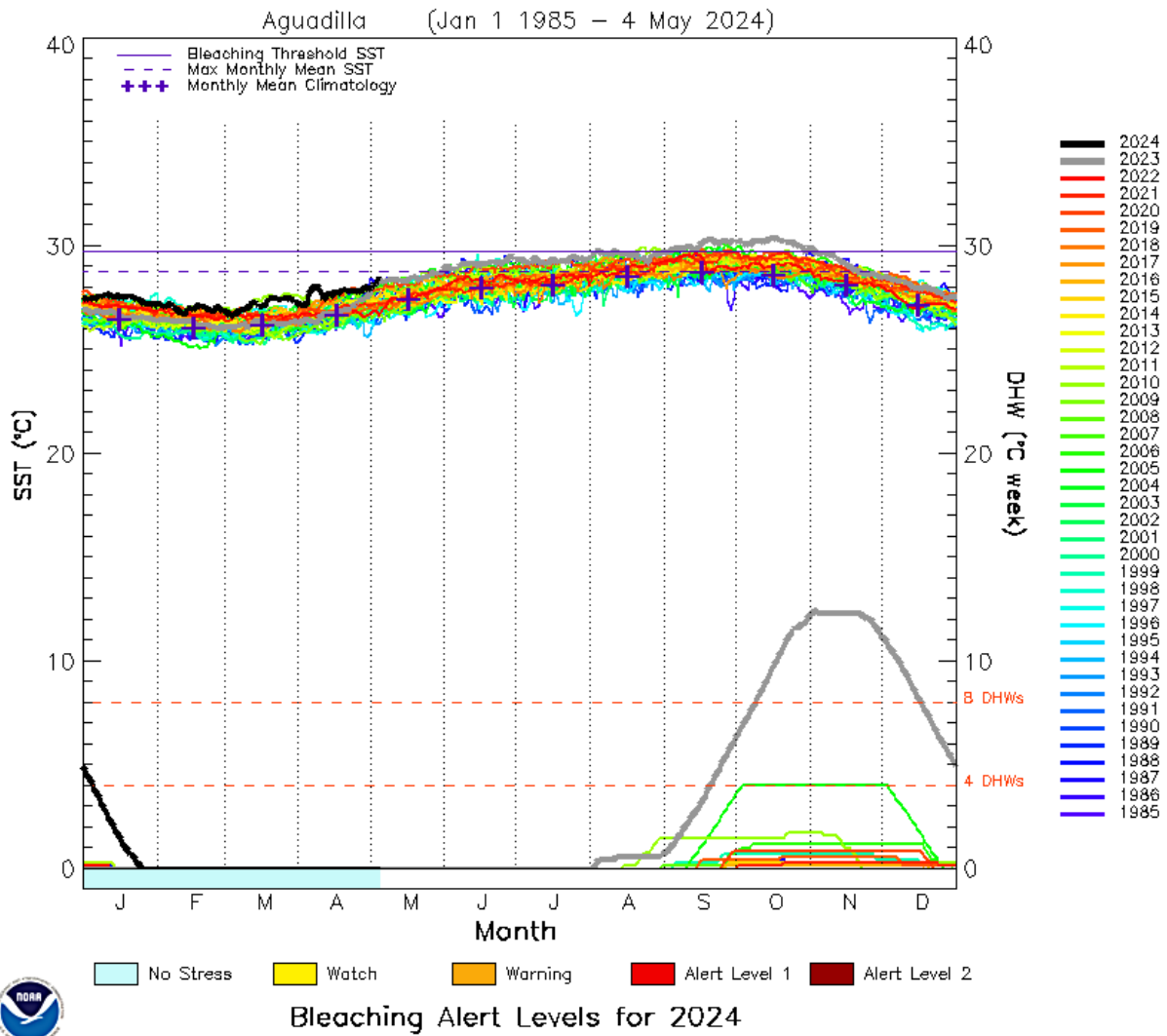


FIGURA 32. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Aguadilla (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Aguadilla

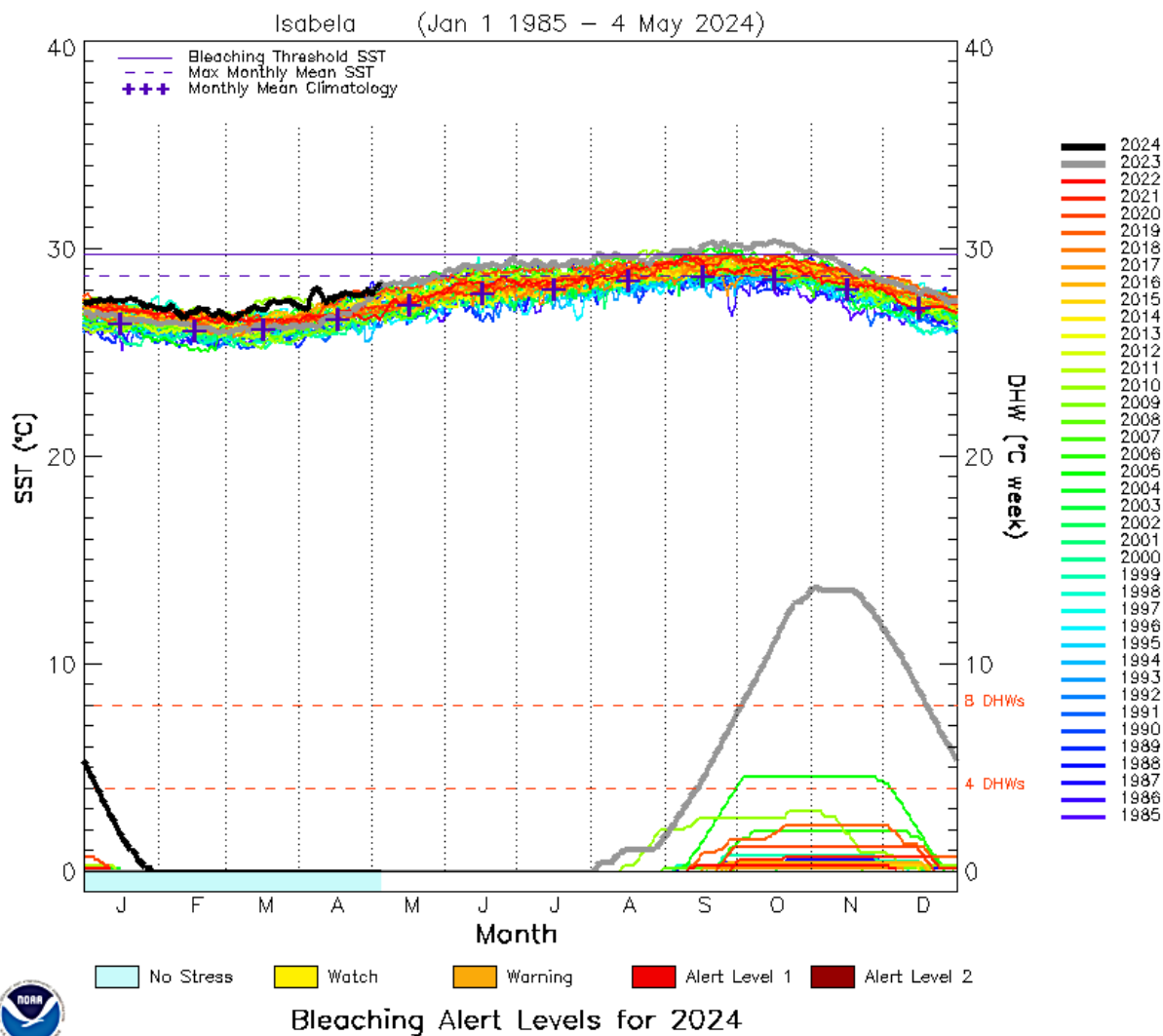


FIGURA 33. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Isabela (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Isabela

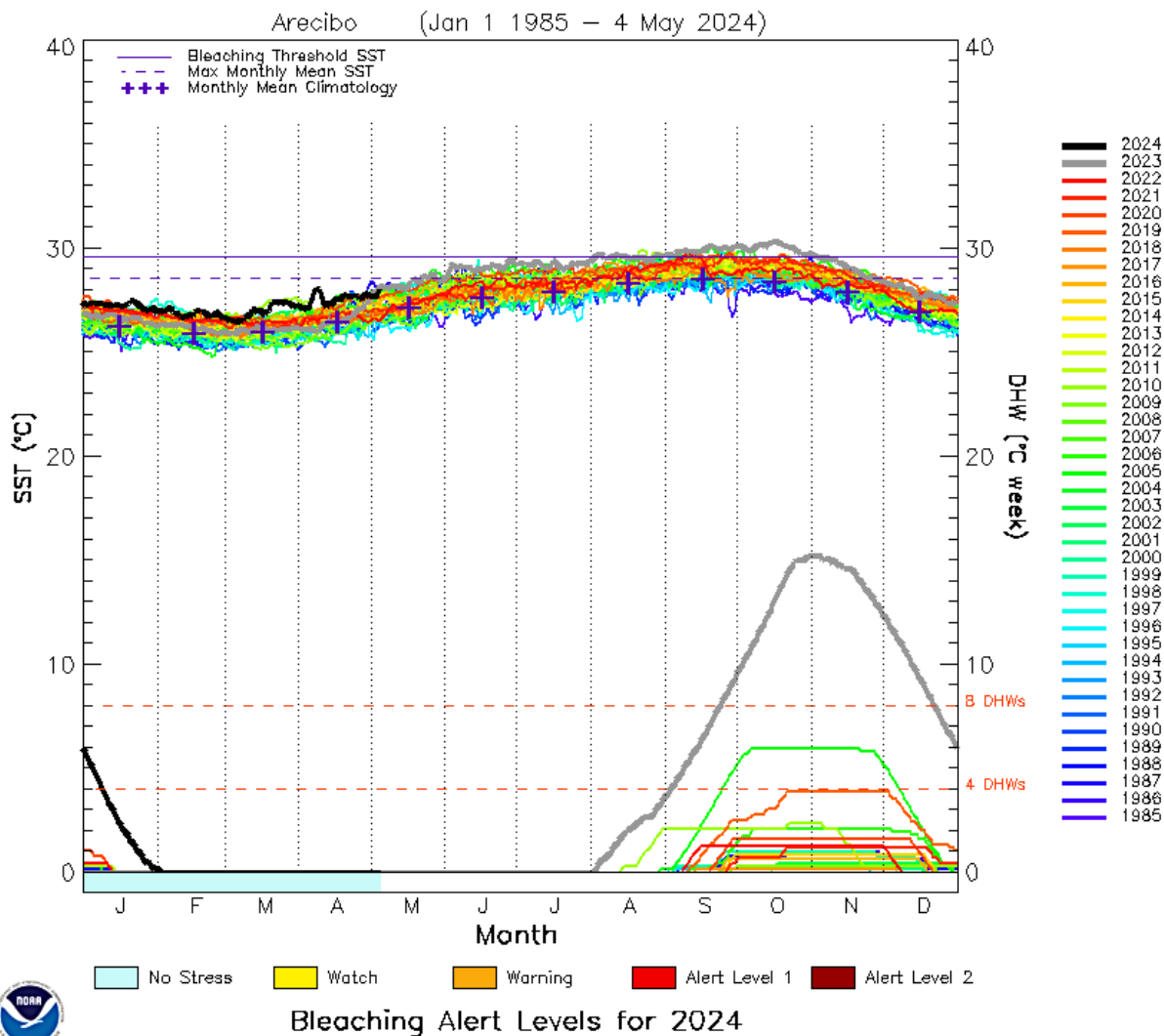


FIGURA 34. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Isabela (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Arecibo

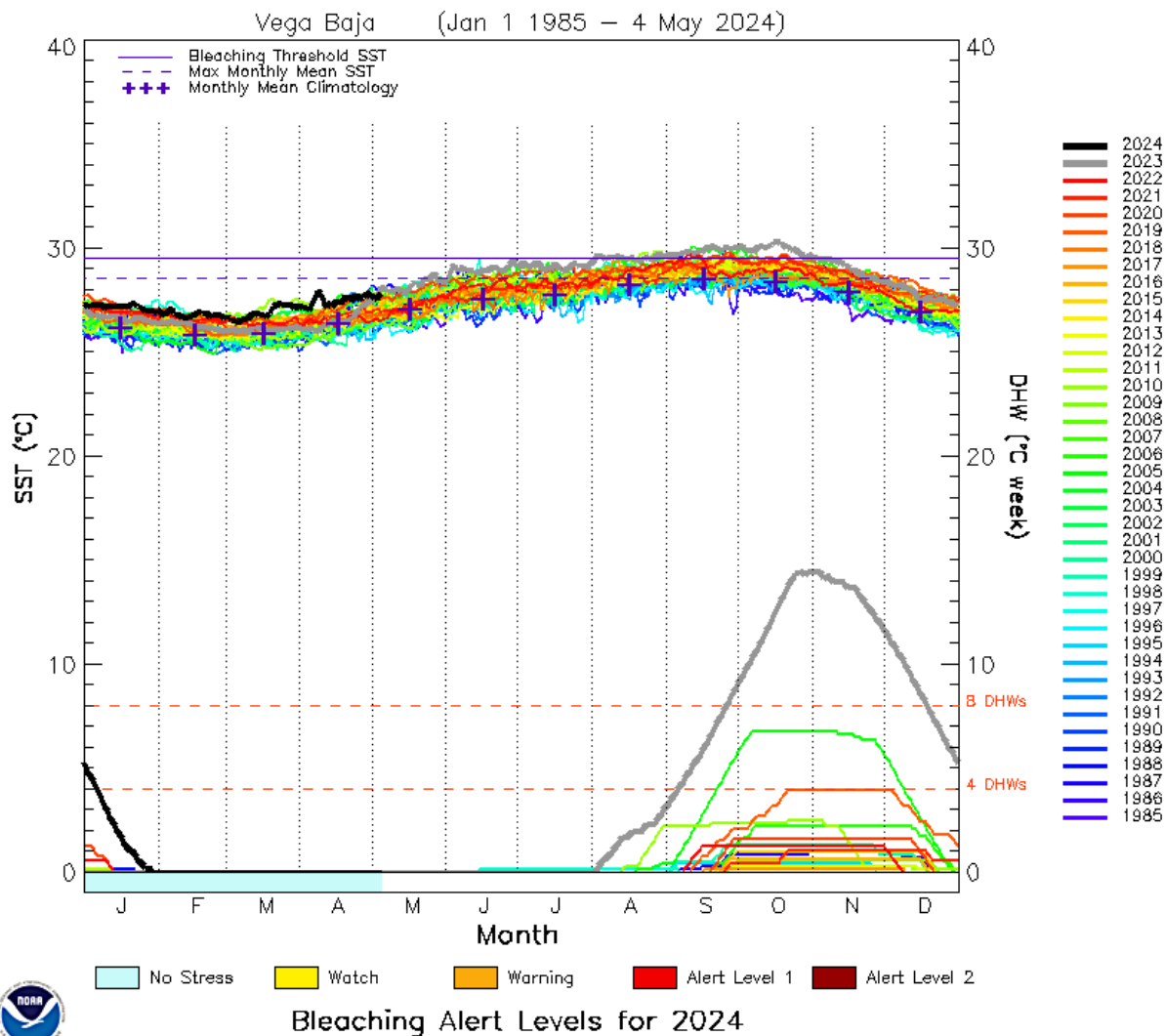


FIGURA 35. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Vega Baja (accedido el 5 de mayo de 2024)
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#VegaBaja

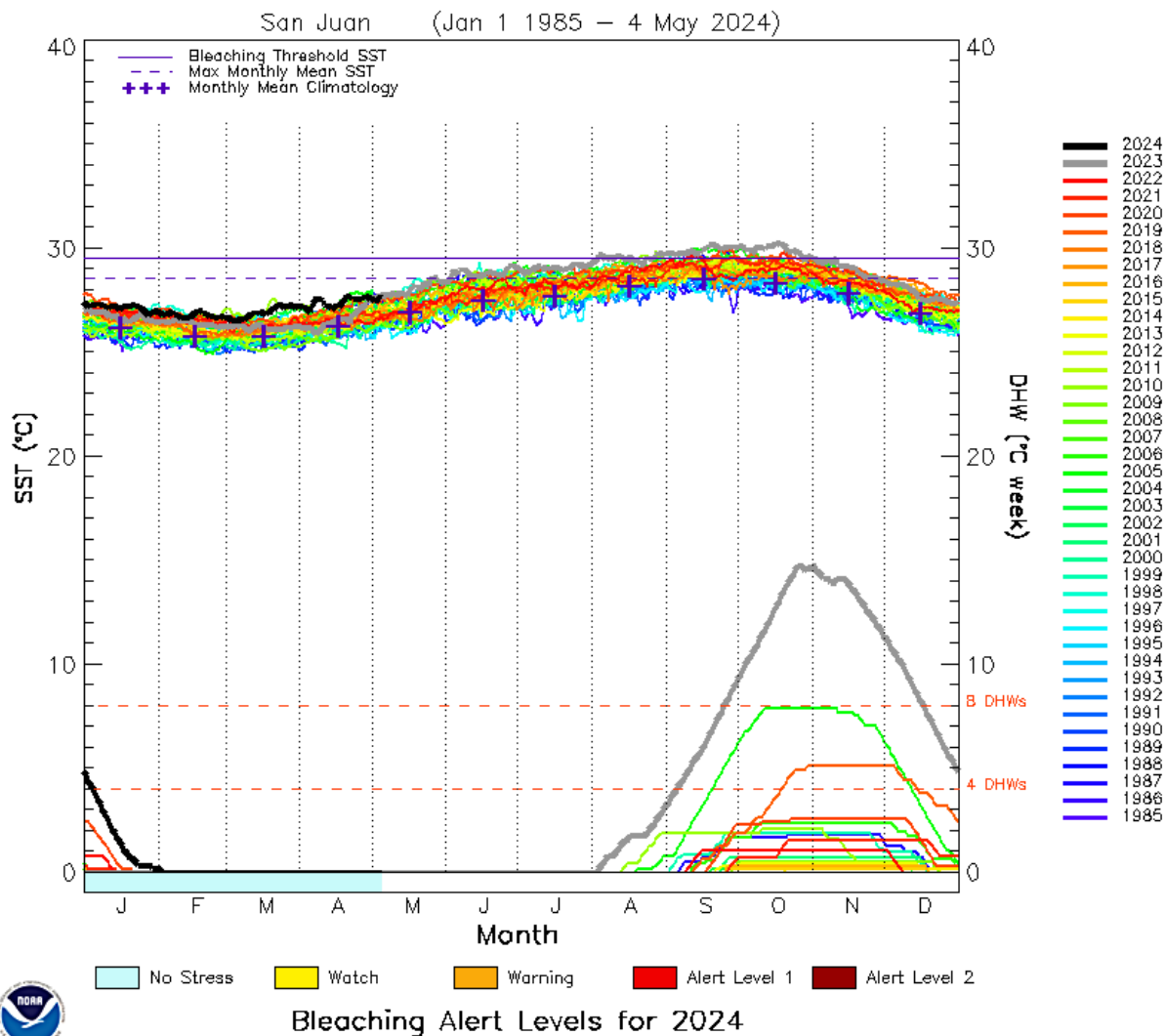


FIGURA 36. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de San Juan (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#SanJuan

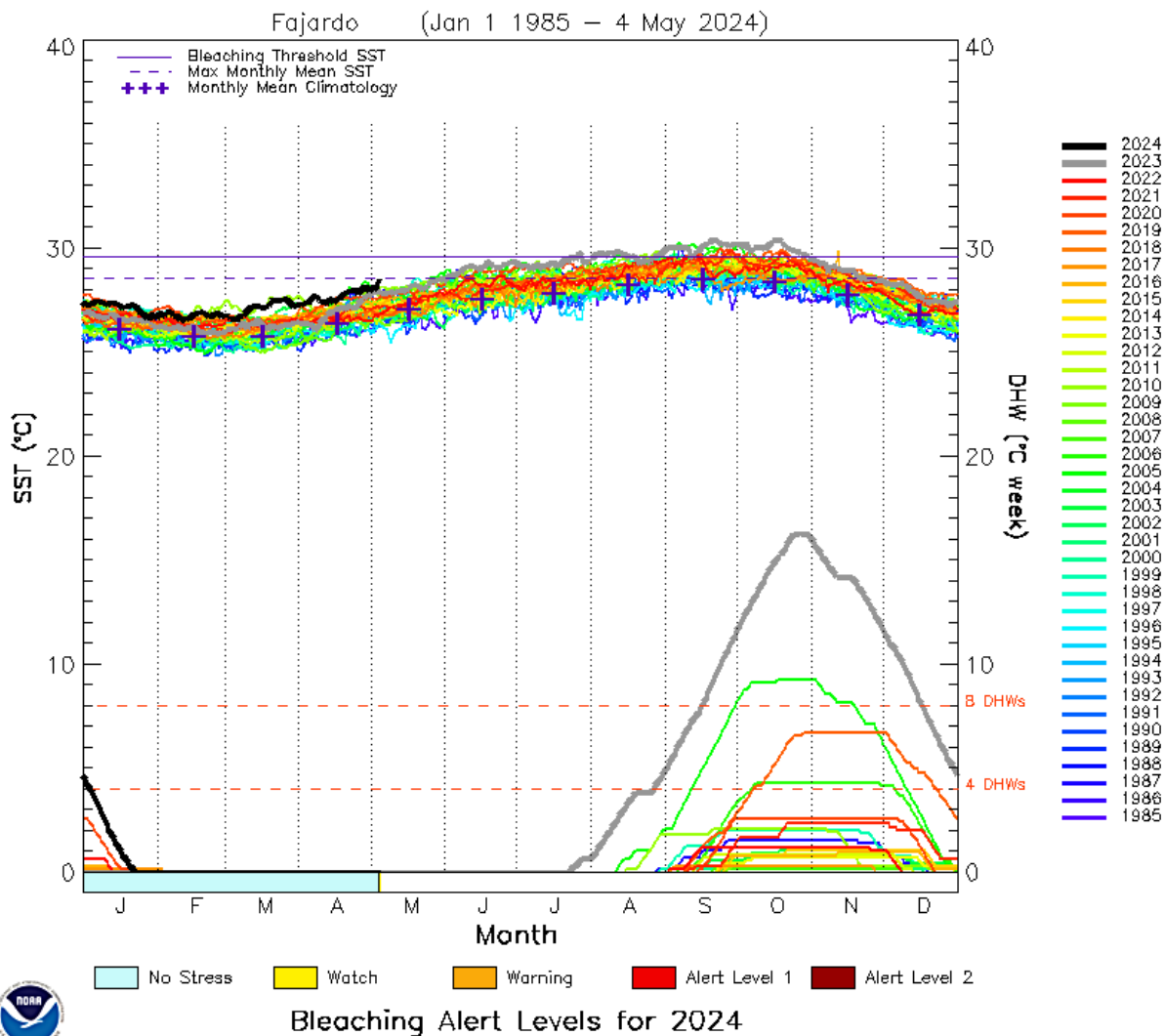


FIGURA 37. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de Fajardo (accedido el 5 de mayo de 2024)
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Fajardo

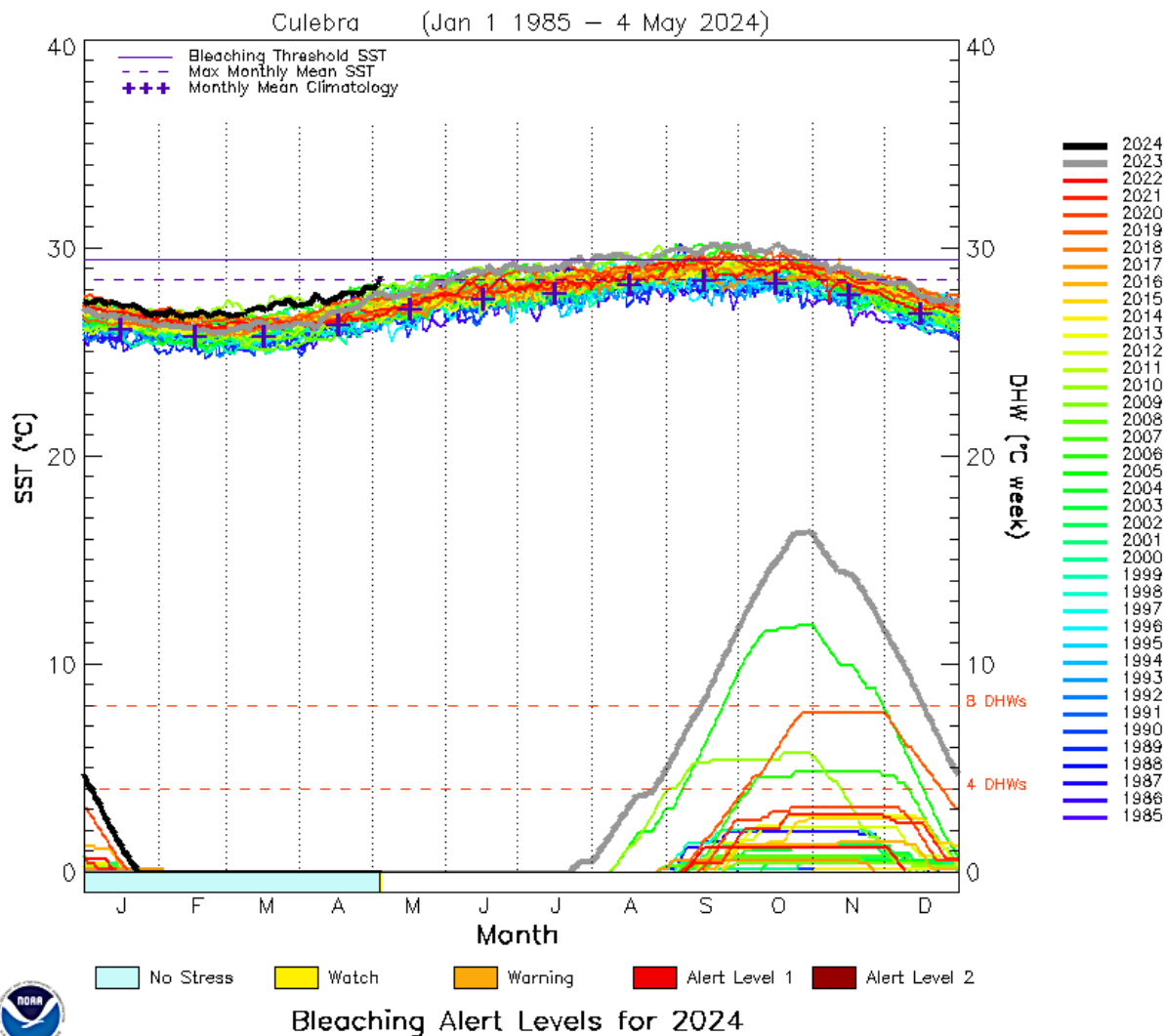


FIGURA 38. Variación anual en la temperatura promedio diaria del mar (1985-2024) y en la acumulación de semanas consecutivas de calor o “degree heating weeks” (DHWs) en la costa de la Isla de Culebra (accedido el 5 de mayo de 2024).
https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs_single_pixel_exp/puerto_rico.php#Culebra

¿Cuáles son las definiciones de las categorías de alertas de blanqueamiento de corales?

El CRWP de NOAA define los diversos niveles de estrés térmico en los océanos en función de los riesgos de blanqueamiento de los corales (Tabla 2). Estos riesgos se definen en función de la elevación de las temperaturas del mar en base a la temperatura media máxima anual establecida para cada región o localidad (en el caso de las estaciones virtuales puntuales) a través de al menos 30 años de información climatológica. Dicha media máxima anual se conoce en inglés como el “maximum monthly mean” o MMM, por sus siglas en inglés. Cuando la temperatura del mar alcanza el MMM o excede por menos de +1°C automáticamente se declara una **vigilancia de blanqueamiento** de corales. Cuando la temperatura del mar alcanza o excede la máxima anual (MMM) por 1°C o más se le conoce como “hot spot” o punto caliente. Por definición, el “Hot Spot”= la diferencia entre la temperatura medida en el mar en determinado momento y la media máxima anual (MMM) y que la exceda por +1°C o más.

TABLA 2. Definiciones de los diversos niveles de estrés térmico en los océanos, según desarrollado por el NOAA Coral Reef Watch Program.

Nivel de estrés	Definición	Efecto
No estrés	Hot spot $\leq 0^{\circ}\text{C}$	Ninguno
Vigilancia de blanqueamiento	$0^{\circ}\text{C} < \text{Hot spot} \leq 1^{\circ}\text{C}$	Ninguno
Aviso de blanqueamiento	$1^{\circ}\text{C} \leq \text{Hot Spot}$ y $0 < \text{DHW} < 4$	Posible blanqueamiento
Alerta 1 de blanqueamiento	$1^{\circ}\text{C} \leq \text{Hot Spot}$ and $4 \leq \text{DHW} < 8$	Blanqueamiento significativo probable
Alerta 2 de blanqueamiento	$1^{\circ}\text{C} \leq \text{Hot Spot}$ and $8 \leq \text{DHW} < 12$	Blanqueamiento severo y mortandad significativa
Alerta 3 de blanqueamiento	$1^{\circ}\text{C} \leq \text{Hot Spot}$ and $12 \leq \text{DHW} < 16$	Blanqueamiento muy severo, prolongado y mortandad muy significativa
Alerta 4 de blanqueamiento	$1^{\circ}\text{C} \leq \text{Hot Spot}$ and $16 \leq \text{DHW} < 20$	Blanqueamiento muy severo, prolongado y mortandad catastrófica

*Fuente: <https://www.coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/methodology.php#dhw> Las categorías de **alerta 3** y **alerta 4** son categorías experimentales desarrolladas por NOAA CRWP durante el blanqueamiento de corales sin precedentes históricos ocurrido durante el 2023.

En la actualidad, NOAA estima el MMM de las aguas de Puerto Rico y esta zona del Caribe es de aproximadamente 28.6°C. Por ende, la temperatura del “Hot Spot” en nuestra región es 29.6°C. Cuando la temperatura medida del mar alcanza el MMM y se mantiene entre 0°C y +1°C por arriba del este se emite una **vigilancia de blanqueamiento** de corales. Esto significa que la temperatura oceánica está acercándose al llamado punto caliente o “Hot Spot”. Ese es el nivel de alerta actual para las aguas de Puerto Rico a comienzos de mayo de 2024. Esto no tiene ningún efecto inmediato sobre los corales, pero presupone que el nivel de estrés por calor ya ha aumentado significativamente y se proyecta que debe continuar incrementando en las próximas 12 semanas al menos.

Esto sugiere la necesidad urgente de tomar medidas de precaución para minimizar o evitar el impacto de otros posibles factores ambientales humanos en las costas. Y en el caso de los proyectos de restauración y de conservación de corales deben tomarse precauciones prácticas para minimizar el impacto combinado de la temperatura alta y de la luz solar sobre los corales.

Cuando las temperaturas alcanzan el MMM + 1°C o más entonces se emite un **aviso de blanqueamiento** de corales y se comienza a contabilizar las semanas consecutivas de temperaturas estresantes para los corales, conocidas como “Degree Heating Weeks” (DHWs, por sus siglas en inglés). El **aviso de blanqueamiento** se mantiene mientras DHWs se mantengan entre 0 y 4 semanas. Estas condiciones pueden resultar en un blanqueamiento de corales inminente, usualmente moderado, afectando inicialmente a las especies más vulnerables y a los arrecifes en las aguas más someras.

Cuando las temperaturas alcanzan el MMM + 1°C o más, en combinación con una acumulación de DHWs de 4 a 8 semanas, entonces se emite una **alerta 1 de blanqueamiento** de corales. Estas condiciones pueden resultar en un blanqueamiento significativo y extenso de corales, afectando a numerosas especies y arrecifes a diversas profundidades. Cuando las temperaturas alcanzan el MMM + 1°C o más, en combinación con una acumulación de DHWs de 8 a 12 semanas, entonces se emite una **alerta 2 de blanqueamiento** de corales. Estas condiciones pueden resultar en un blanqueamiento severo y en una mortandad significativa de corales.

Sin embargo, durante el 2023 se desarrolló a través de muchas partes del mundo, pero con particular efecto en el Caribe, un evento de blanqueamiento de corales tan severo y sin precedentes históricos, que la NOAA tuvo que modificar la clasificación de alertas de blanqueamiento de corales para poder documentar con mayor precisión y diferenciar el tipo de impactos observados en los arrecifes de coral. Para ello, cuando las temperaturas alcanzan el MMM + 1°C o más, en combinación con una acumulación de DHWs de 12 a 16 semanas se emite una **alerta 3 de blanqueamiento** de corales. Estas condiciones pueden resultar en un blanqueamiento muy severo, prolongado y en una mortandad significativa de corales. Cuando las temperaturas alcanzan el MMM + 1°C o más, en combinación con una acumulación de DHWs de 16 a 20 semanas se emite una **alerta 4 de blanqueamiento** de corales. Estas condiciones pueden resultar en un blanqueamiento muy severo, prolongado y en una mortandad catastrófica de corales.

*Haber alcanzado tan temprano en el año una **vigilancia de blanqueamiento de corales en Puerto Rico**, debido a la extensión de **alertas 1 y 2 de olas de calor marino** implica la necesidad urgente de monitorear la evolución de dichas condiciones y sus consecuencias ecológicas. Además, implica la necesidad de implantar medidas urgentes de manejo para minimizar cualesquiera otros posibles factores ambientales humanos sobre los arrecifes de coral.*

Proyecciones regionales de blanqueamiento de corales (mayo a agosto 2024)

La Figura 39 ilustra la proyección que hace la primera semana de mayo de 2024 el CRWP de NOAA sobre los riesgos de blanqueamiento de corales para Puerto Rico durante el 2024. Estos muestran que ya la cerca de un 70% de las costas de Puerto Rico se encuentran bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales que comenzó desde la última semana de abril,

lo que *constituye un récord* para la isla, pero que se ha acentuado para comienzos de mayo. Las zonas ya afectadas se localizan a lo largo de toda la plataforma este, incluyendo a las islas de Vieques y Culebra, y a lo largo de toda la costa sur y la esquina suroeste de Puerto Rico. También hay puntos ya afectados alrededor de las islas de Mona, Monito y Desecheo, en el Canal de La Mona.

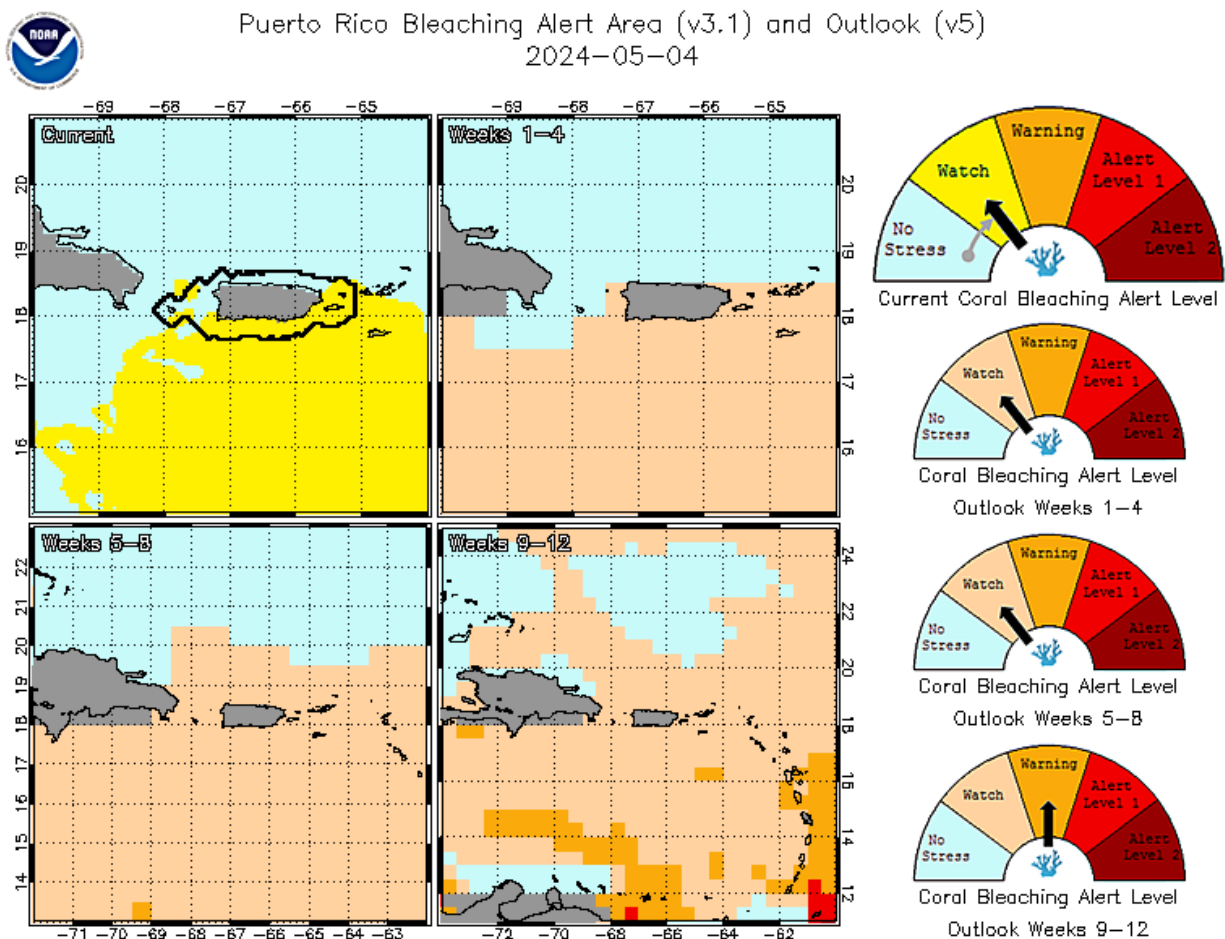


FIGURA 39. Proyecciones potenciales de las alertas de blanqueamiento para Puerto Rico para los meses de mayo a julio de 2024. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/gauges/puerto_rico.php (Accesado: 5 de mayo de 2024).

El modelo de CRWP proyecta que en 1-4 semanas (finales de mayo de 2024) básicamente todos los arrecifes al este, sur y oeste estarán bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales. También proyecta que entre 5 a 8 semanas (finales de junio de 2024) el 100% de los arrecifes de coral se encontrarán bajo **vigilancia de blanqueamiento**. Pero para las semanas 9-12 (finales de julio de 2024) el estrés aumentará gradualmente, con el este del Caribe entrando potencialmente a un **aviso de blanqueamiento** de corales. CRWP no anticipa que ese sea el escenario aun en Puerto Rico.

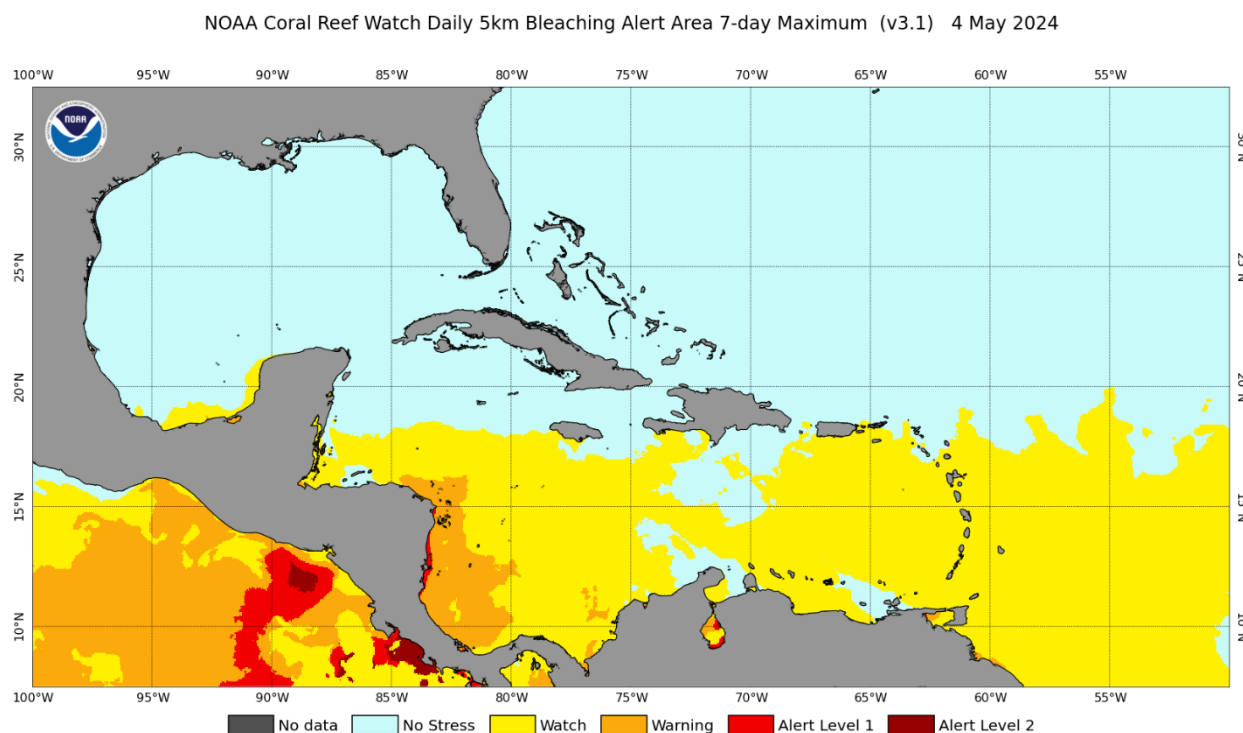


FIGURA 40. Areas bajo alertas de blanqueamiento de corales en el Caribe, basado en el NOAA Coral Reef Watch Program. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/5km/v3.1_op/daily/png/ct5km_baa-max-7d_v3.1_caribbean_current.png (accedido: 4 de mayo de 2024).

Las tendencias de cambios en las temperaturas superficiales del mar a través del Caribe evidencian ya desde finales de abril y comienzos de mayo de 2024 que la gran parte de la cuenca del Caribe se encuentra ya bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales (Figura 40). Esto incluye aproximadamente un 70% de las costas de Puerto Rico, menos la costa norte. También incluye casi la totalidad de las Antillas Menores, las Antillas Holandesas, las costas de Venezuela, Colombia y toda América Central. De paso, en esta zona ya existen áreas con nuevos récords de temperatura para esta época del año, donde no solo existe ya un **aviso de blanqueamiento** de corales para Costa Rica y partes de Nicaragua y Honduras, si no que en gran parte de la costa de Honduras ya se ha emitido una **alerta 1 de blanqueamiento** desde finales de abril, lo que por primera vez ocurre en el Caribe en esta época del año.

La Figura 41 evidencia la distribución de condiciones donde los puntos calientes o “hot spots” de temperatura en el mar ya se han alcanzado. Cuando se alcanza un “hot spot” entre 0 y +1°C por encima del máximo anual (MMM) es cuando se emite una **vigilancia de blanqueamiento** de corales. Gran parte del Caribe ya ha alcanzado el punto caliente de 0 a +1°C, incluyendo aproximadamente el 70% de las costas de Puerto Rico, sobre todo toda la plataforma este, incluyendo a Vieques y Culebra, toda la costa sur y partes de la costa oeste y el Canal de la Mona. Pero frente a América Central ya se ha alcanzado el punto caliente de +1 a +2°C, y particularmente en la costa de Nicaragua el punto caliente oscila entre +1.5 y +2.5°C.

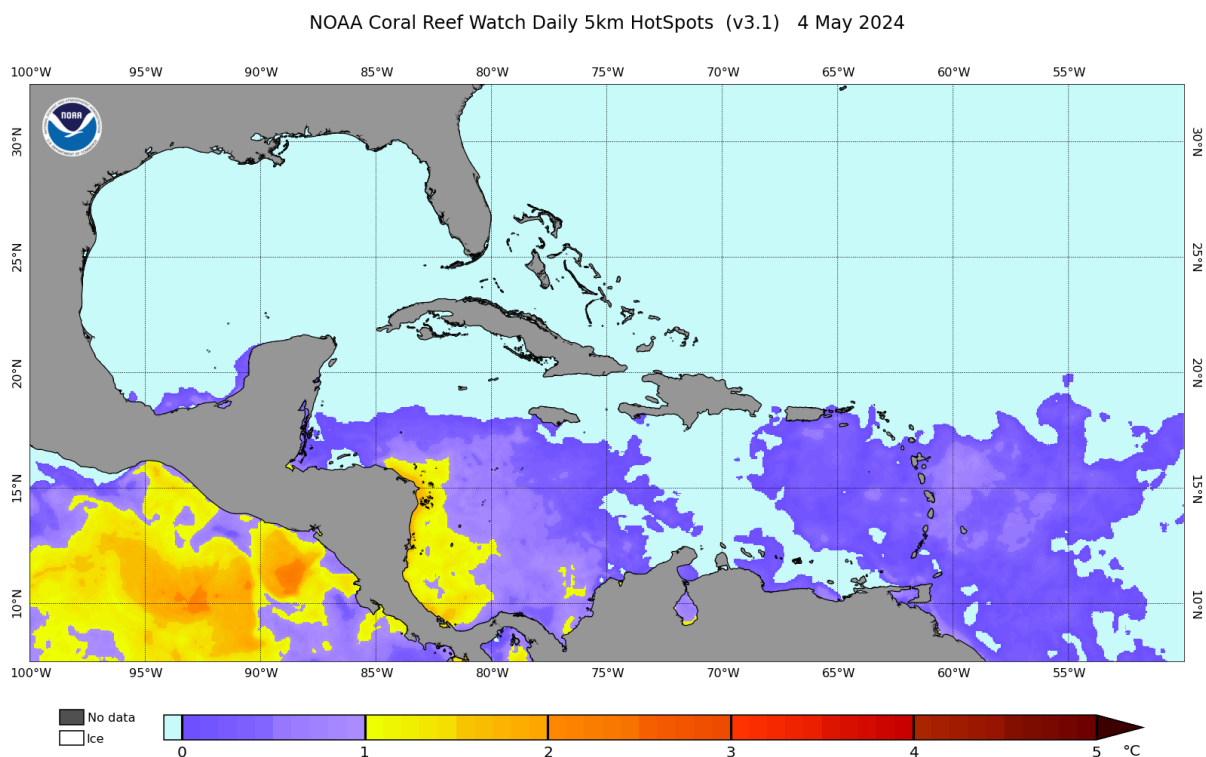


FIGURA 41. Áreas bajo alertas de puntos calientes (“hot spots”) conducentes al blanqueamiento de corales en el Caribe basado en el NOAA Coral Reef Watch Program. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/5km/v3.1_op/daily/png/ct5km_hs_v3.1_caribbean_current.png (accedido: 4 de mayo de 2024).

La Figura 42 ilustra la acumulación de las semanas consecutivas con calor o “degree heating weeks” (DHWs, por sus siglas en inglés) por encima del punto caliente o “hot spot”. A comienzos de mayo aún no se observan DHWs acumulados en la mayoría del Caribe, ni alrededor de Puerto Rico porque es muy temprano en el año. Sin embargo, en las costas caribeñas de América Central se observa un récord sin precedentes de acumulación de DHWs desde finales del mes de abril y comienzos del mes de mayo. La mayoría de esa zona suroeste del Caribe tiene al menos 1 DHW, pero hay tramos de la costa de Nicaragua que ya acumulan de 2 a 4 DHWs lo que presume un riesgo de blanqueamiento ya inminente, con zonas ya bajo **aviso de blanqueamiento**, pero con una probabilidad muy alta de que antes de finalizar el mes de mayo de 2024 se emita una **alerta 1 de blanqueamiento**.

Los DHWs son una medida de la cantidad de calor acumulado en la capa superior del océano a lo largo del tiempo. Se calcula tomando la temperatura media semanal de la superficie del mar y restando una temperatura de referencia, normalmente la temperatura media de la superficie del mar durante un período de 30 años, o la máxima anual (MMM). Si la temperatura medida está por encima de la temperatura de referencia, la diferencia se considera una “anomalía positiva” y se multiplica por el número de semanas para obtener los grados de calentamiento por semana. Si la temperatura medida está por debajo de la temperatura de referencia, la diferencia se considera una “anomalía negativa” y no se cuenta.

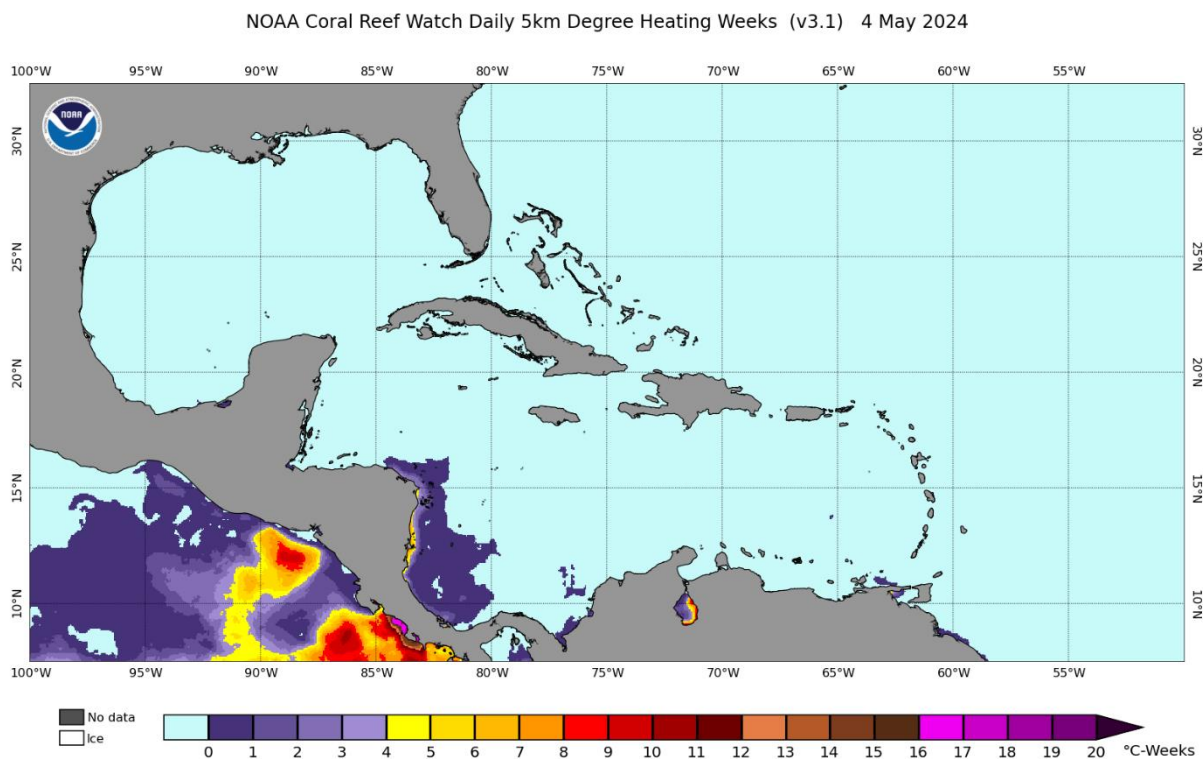


FIGURA 42. Áreas bajo alertas de acumulación de semanas consecutivas de calor (“degree heating weeks”, o DHWs, por sus siglas en inglés) conducentes al blanqueamiento de corales, basado en el NOAA Coral Reef Watch Program (a. octubre 2023; b. mayo 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/5km/v3.1_op/daily/png/ct5km_dhw_v3.1_caribbean_current.png (accedido: 18 de octubre de 2023; 2 de mayo de 2024).

Una acumulación de 4 DHWs puede resultar en un blanqueamiento parcial de algunas especies de corales. Una acumulación de 8 DHWs puede resultar en un blanqueamiento masivo de corales, mientras que una acumulación de 12 o más DHWs puede resultar en un evento significativo de mortalidad para muchos corales. Bajo las clasificaciones nuevas del CRWP, una acumulación por arriba de 12 o de 16 semanas podría resultar en una mortandad severa a catastrófica de corales.

El DHW se utiliza como una herramienta para monitorear y predecir el potencial de desarrollo de eventos de blanqueamiento de corales. Los arrecifes de coral son sensibles a los cambios en la temperatura del océano, por ejemplo, durante eventos de El Niño, y la exposición prolongada a altas temperaturas y a la irradiación solar puede hacer que el coral expulse las algas simbióticas que les proporcionan nutrientes y les dan su color, lo que provoca la decoloración y, potencialmente, la muerte del coral, de ser un evento muy prolongado. Cuanto mayor sea la acumulación de DHWs, mayor será la probabilidad de blanqueamiento de corales.

El DHW generalmente se informa como una medida acumulativa durante un período de tiempo, como un mes o una temporada. Un DHW de 4 semanas se considera el umbral para el potencial de blanqueamiento significativo de corales. Cualquier acumulación mayor puede tener efectos devastadores en los arrecifes de coral. El DHW se utiliza junto con otras medidas, como las anomalías de la temperatura de la superficie del mar y los patrones de las corrientes

oceánicas, para proporcionar una imagen completa del potencial de eventos de blanqueamiento de corales.

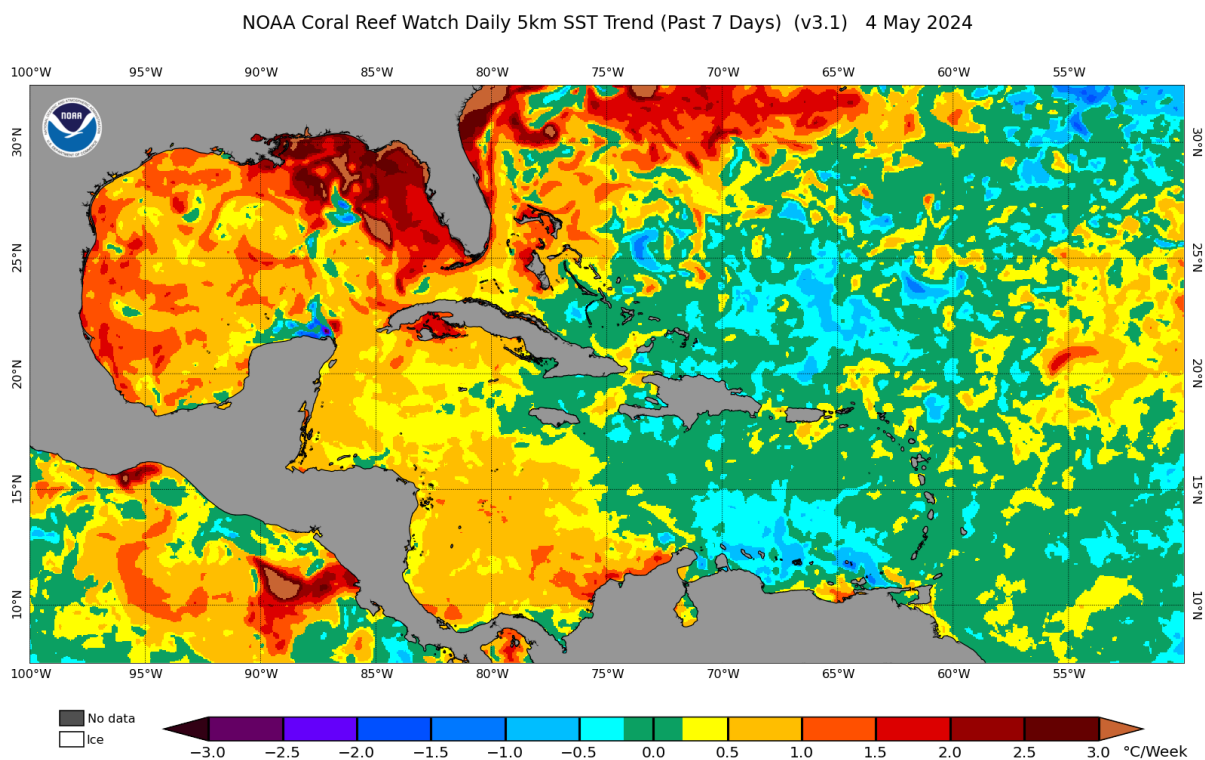


FIGURA 43. Tendencias durante los pasados 7 días de cambios en las temperaturas del mar en el noreste del Caribe conducentes a un incremento en el riesgo de blanqueamiento de corales en el Caribe, basado en el NOAA Coral Reef Watch Program. Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/data_current/5km/v3.1_op/daily/png/ct5km_sst-trend-7d_v3.1_caribbean_current.png (accedido: 4 de mayo de 2024).

Los patrones descritos previamente asociados al impacto de la ola de calor marino se evidencian también en la Figura 43. La misma muestra la tendencia del Golfo de México y de toda la mitad oeste del Caribe de incremento acelerado de temperatura superficial del mar durante la pasada semana. La temperatura del mar en la mitad oeste del Caribe ha aumentado por un factor de +0.5 a +1°C durante la pasada semana. Pero la zona del Golfo de México lo ha hecho de +1 a +3°C, lo que es un aumento muy destacable. La zona de Puerto Rico, a pesar de los efectos recientes del viento fuerte y de las marejadas leves recibidas esta semana, su temperatura ha aumentado en muchas zonas de +0.5 a +1°C.

2024 Apr 23 NOAA 90% Probability Coral Bleaching Heat Stress for May–Aug 2024
Experimental, v5.0, CFSv2-based, 28 to 112 Ensemble Members

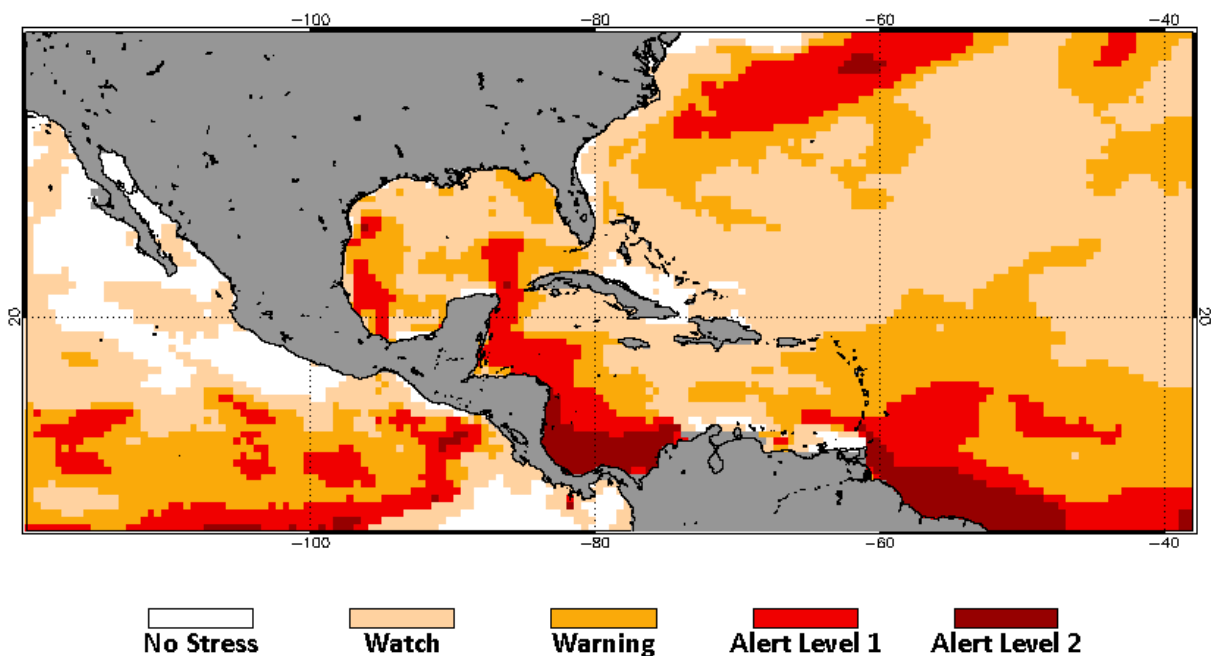


FIGURA 44. Proyección de probabilidad de 90% o mayor de estrés térmico conducente al blanqueamiento de los corales en el Caribe para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_outlook-4mon_v5_90pct_caribbean.gif

La Figura 44 ilustra que el CRWP de NOAA proyecta un 90% de probabilidad de que entre el período de mayo a agosto de 2024 la mitad sureste de Puerto Rico deberá encontrarse bajo **aviso de blanqueamiento**, mientras que la mitad noroeste aun se mantendrá bajo **vigilancia de blanqueamiento**. Sin embargo, se proyecta que grandes extensiones del suroeste y del sureste del Caribe se puedan encontrar ya bajo **alertas 1 o 2 de blanqueamiento**. Estas proyecciones sugieren impactos adversos significativos tempranos en el verano para la mitad sur y el oeste del Caribe antes que el norte del Caribe.

2024 Apr 23 NOAA 60% Probability Coral Bleaching Heat Stress for May–Aug 2024
Experimental, v5.0, CFSv2–based, 28 to 112 Ensemble Members

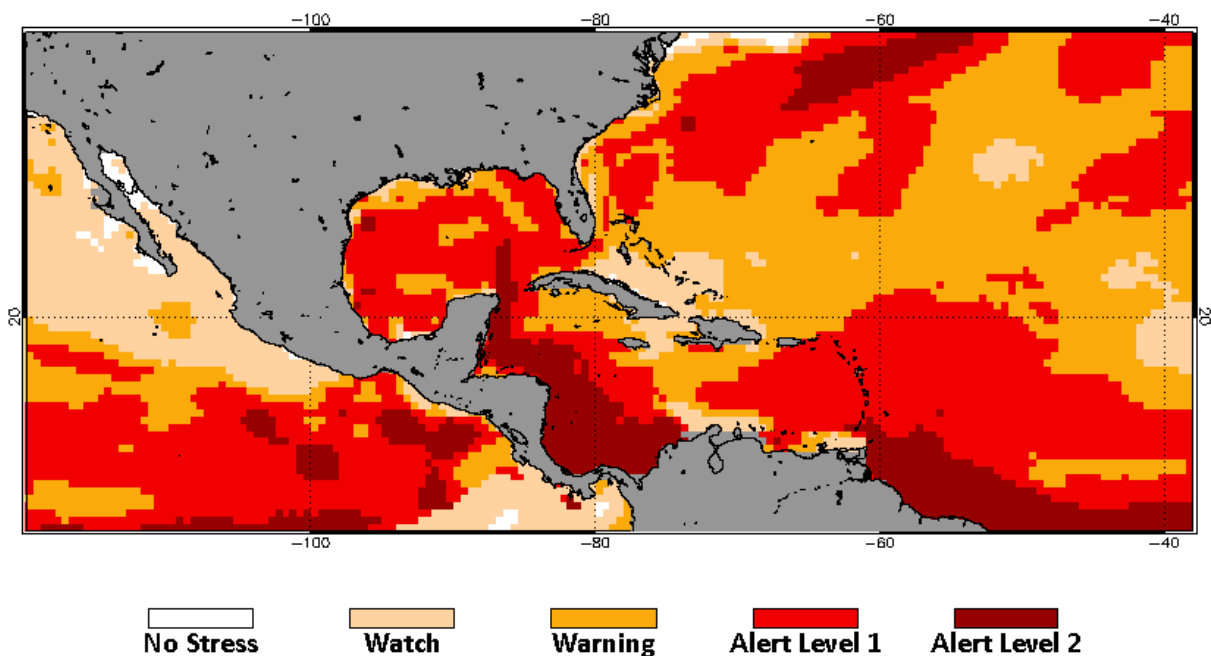


FIGURA 45. Proyección de probabilidad de 60% o mayor de estrés térmico conducente al blanqueamiento de los corales en el Caribe para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_outlook-4mon_v5_60pct_caribbean.gif

CRWP también proyecta que existe un 60% de probabilidad de que la mitad sureste de la isla se encuentre bajo una **alerta 1 de blanqueamiento** durante el mismo período, mientras que la otra mitad al menos se encontrará bajo un **aviso de blanqueamiento** (Figura 45). Este escenario también sugiere un 60% de probabilidad de que gran parte del Caribe se encuentre bajo una **alerta 1 de blanqueamiento**, mientras que casi todo el suroeste, sur y sureste del Caribe se encuentre bajo una **alerta 2 de blanqueamiento**.

2024 Apr 23 NOAA Coral Bleaching Heat Stress Probabilities (Alert 2) for May–Aug
Experimental, v5.0, CFSv2–based, 28 to 112 Ensemble Members

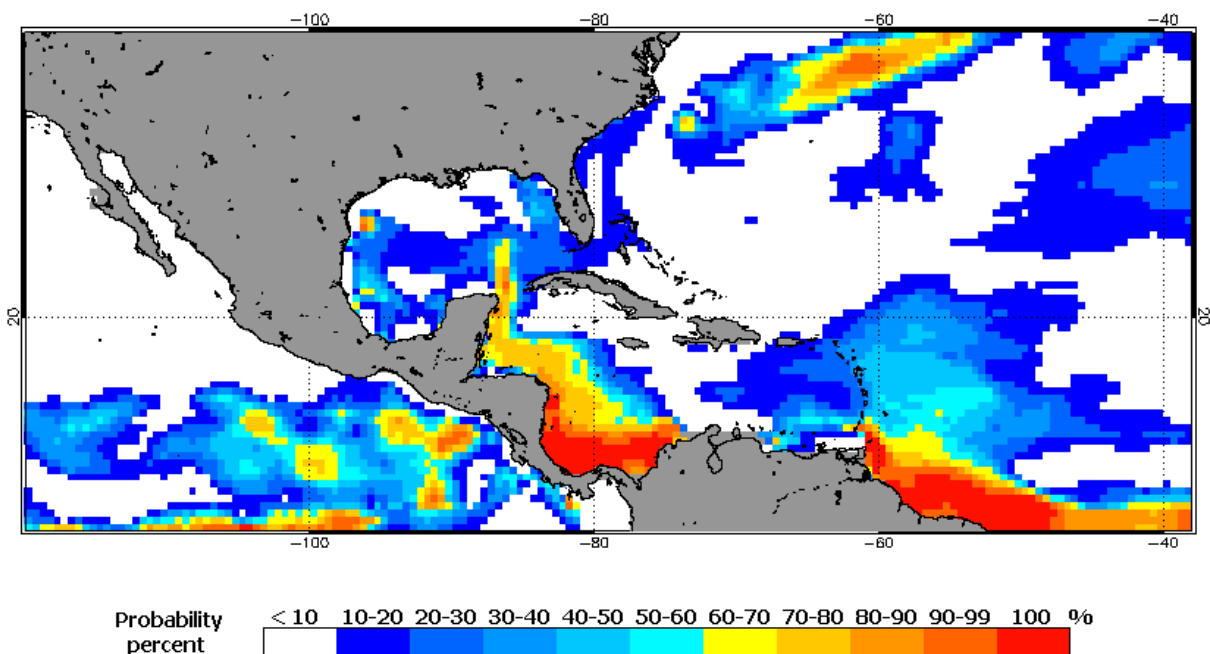


FIGURA 46. Proyección de probabilidad de emisión de una alerta de nivel 2 de blanqueamiento inminente de los corales en el Caribe para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_prob-4mon_v5_alertlevel2_caribbean.gif

La tendencia de calentamiento del mar observada durante la primavera del 2024 sugiere que la probabilidad de una emisión de **alerta 2 de blanqueamiento** durante el período de mayo a agosto ya alcanza un 10-20% para Puerto Rico y de 0 a 20% para gran parte del norte del Caribe (Figura 46). Pero la misma ya alcanza de 20 a 60% para las Antillas Menores, y de 90 a 100% para las costas de Brasil, partes de Colombia y toda América Central.

2024 Apr 23 NOAA Coral Bleaching Heat Stress Probabilities (Alert 1 & 2) for May–Aug
Experimental, v5.0, CFSv2–based, 28 to 112 Ensemble Members

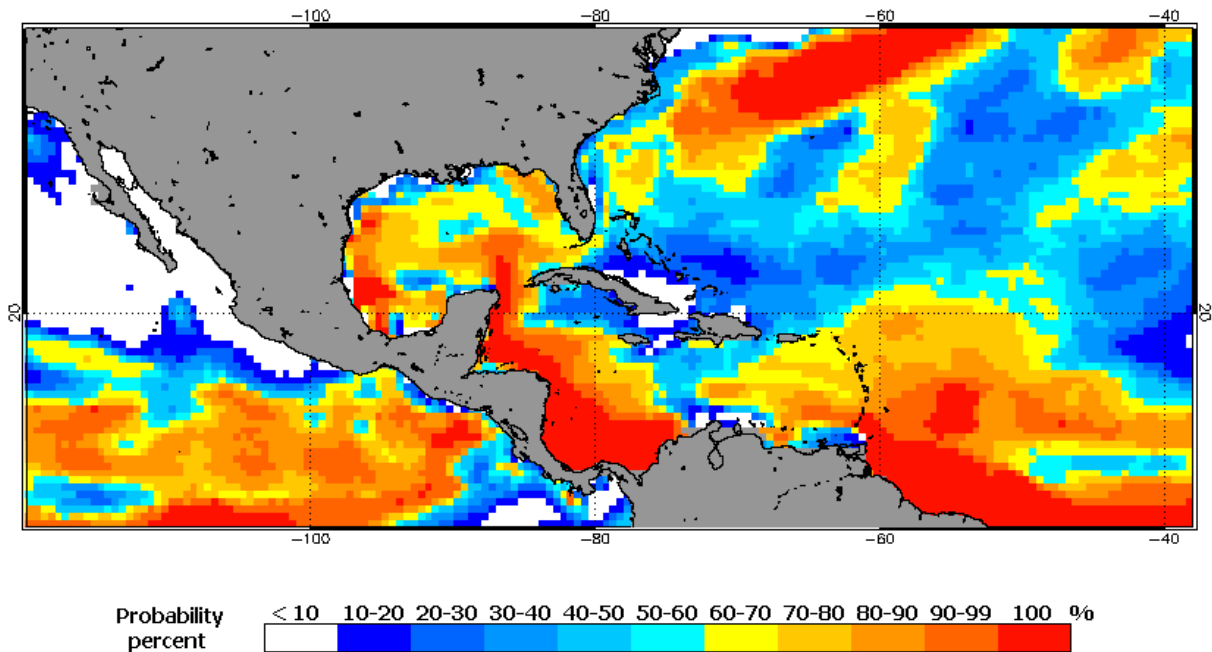


FIGURA 47. Proyección de probabilidad de emisión de una alerta de nivel 1 o 2 de blanqueamiento inminente de los corales en el Caribe para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_prob-4mon_v5_alertlevel1_caribbean.gif

Igualmente, se proyecta que la probabilidad de una emisión de **alerta 1 o 2 de blanqueamiento** durante el período de mayo a agosto ya alcanza un 40-70% para Puerto Rico y de 0 a 40% para gran parte del norte del Caribe (Figura 47). Pero la misma ya alcanza de 70 a 100% para las Antillas Menores, de 30 a 70% en Venezuela, y básicamente 100% para las costas de Brasil, partes de Colombia y toda América Central.

2024 Apr 23 NOAA Coral Bleaching Heat Stress Probabilities (Warning & Higher) for May–Aug
Experimental, v5.0, CFSv2–based, 28 to 112 Ensemble Members

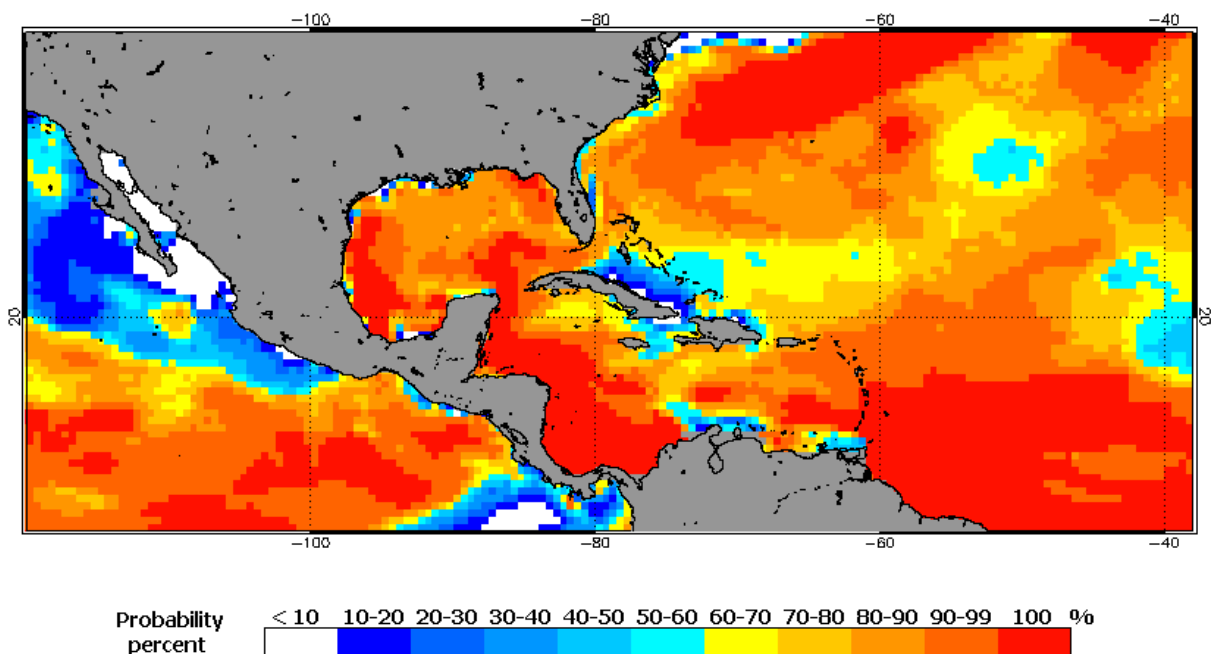


FIGURA 48. Proyección de probabilidad de emisión de al menos un aviso o mayor de blanqueamiento inminente de los corales en el Caribe para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_prob-4mon_v5_warning_caribbean.gif

En la Figura 48 se proyecta que la probabilidad de una emisión de un **aviso de blanqueamiento** o mayor durante el período de mayo a agosto ya alcanza un 80-99% para Puerto Rico y de 10 a 90% para gran parte del norte del Caribe. Pero la misma ya alcanza de 90 a 100% para las Antillas Menores, de 30 a 80% en Venezuela, y 100% para las costas de Brasil, partes de Colombia y toda América Central.

2024 Apr 23 NOAA Coral Bleaching Heat Stress Probabilities (Watch & Higher) for May–Aug
Experimental, v5.0, CFSv2–based, 28 to 112 Ensemble Members

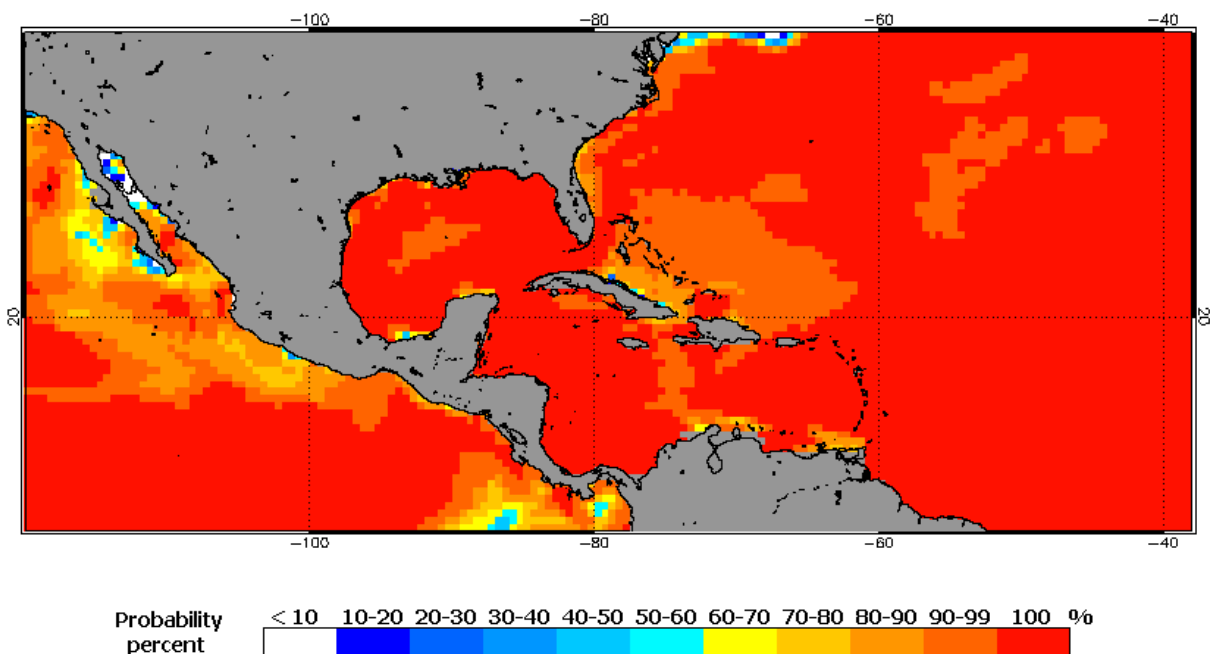


FIGURA 49. Proyección de probabilidad de emisión de al menos una vigilancia o mayor de blanqueamiento inminente de los corales en el Caribe (para el período de mayo a agosto de 2024 (accedido: 28 de abril de 2024). Fuente: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleachingoutlook_cfs/current_image/cur_cfsv2_prob-4mon_v5_watch_caribbean.gif

En la Figura 49 se proyecta que la probabilidad de una emisión de un **aviso de una vigilancia de blanqueamiento** o mayor durante el período de mayo a agosto ya alcanza un 100% para Puerto Rico y de 90 a 100% para gran parte del norte del Caribe. La misma ya alcanza 100% para el resto del Caribe. De paso, ya se ha corroborado que partes de las costas de Puerto Rico y casi la totalidad de las Antillas Menores y gran parte del sur y el suroeste del Caribe se encuentran ya al menos bajo una **vigilancia de blanqueamiento**, con numerosas zonas ya bajo **aviso de blanqueamiento**.

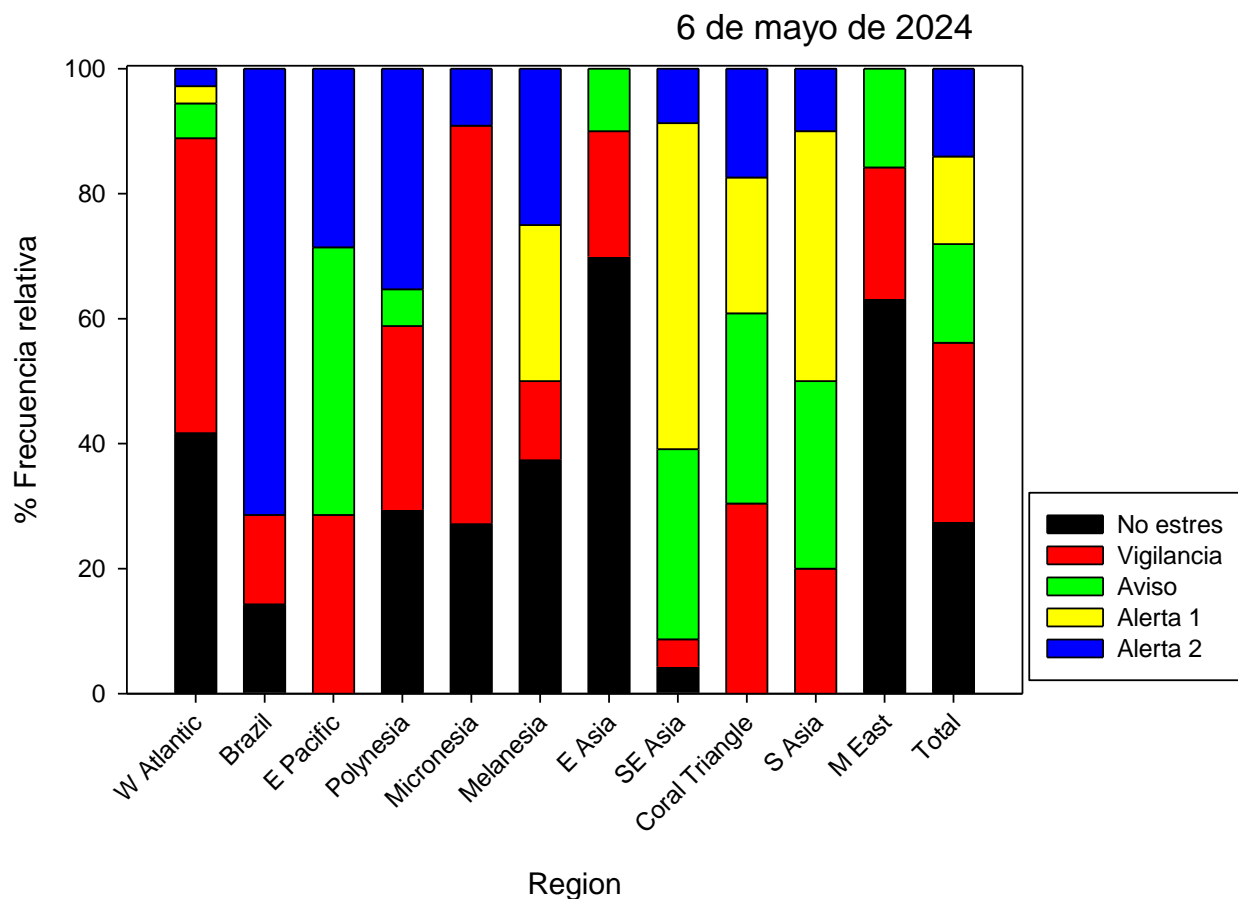


FIGURA 50. Clasificación de riesgos de blanqueamiento de corales a través de 11 regiones del planeta (N=171 estaciones de monitoreo de temperatura del agua. Fuente: <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php> (accedido: 6 de mayo de 2024).

La Figura 50 resume los riesgos de blanqueamiento de corales durante la primera semana de mayo de 2024 para un total de 171 localidades a través de 11 regiones biogeográficas a escala global. Este análisis ya refleja que al presente existen solo 27.5% de las estaciones de monitoreo de temperatura del mar del planeta que no tienen ningún tipo de estrés térmico, pero que 72.5% tienen algún grado de estrés. De estas últimas, 28.7% se encuentran bajo una **vigilancia de blanqueamiento**, 15.8% están bajo **aviso de blanqueamiento**, 14% bajo **alerta 1 de blanqueamiento** y otro 14% bajo **alerta 2 de blanqueamiento**. Para la región del oeste del Atlántico, todavía 41.7% no tienen estrés térmico, pero 47.2% ya está bajo **vigilancia de blanqueamiento** (incluyendo a Puerto Rico), 5.6% está bajo **aviso de blanqueamiento**, 2.8% está bajo **alerta 1 de blanqueamiento**, y 2.8% bajo **alerta 2**.

Extensión batimétrica de las capas de aguas cálidas en el Atlántico tropical y el Caribe

La Figura 51 ilustra la extensión espacial y batimétrica (profundidad) a través del Caribe y del Atlántico tropical del contenido de calor acumulado en el océano, medido en kilojulios por cm^{-2} . Gran parte del Océano Atlántico apenas evidencia contenidos de calor menores a 25 kJ cm^{-2} . Sin embargo, la zona del Caribe ya muestra contenidos de calor entre 60 y $>115 \text{ kJ cm}^{-2}$ apenas tan temprano como comienzos del mes de mayo de 2024. Igualmente se aprecia en la costa norte de Brasil presenta contenidos de calor entre 90 y $>115 \text{ kJ cm}^{-2}$, y la zona entre Jamaica y América Central entre 90 y $>120 \text{ kJ cm}^{-2}$. La zona de convergencia intertropical frente a las costas de Africa ya muestra contenidos de calor entre 70 y 100 kJ cm^{-2} . Alrededor de Puerto Rico esto promedia aun de 60 a 70 kJ cm^{-2} . Esta acumulación de calor ocurre anualmente durante cada verano. Sin embargo, en esta ocasión el proceso ha comenzado más temprano y rápido, evidenciando las tendencias de calentamiento observadas durante la primavera del 2024. Esto pone de manifiesto el potencial riesgo de aumento en la formación de ciclones en la cuenca del Atlántico durante el 2024.

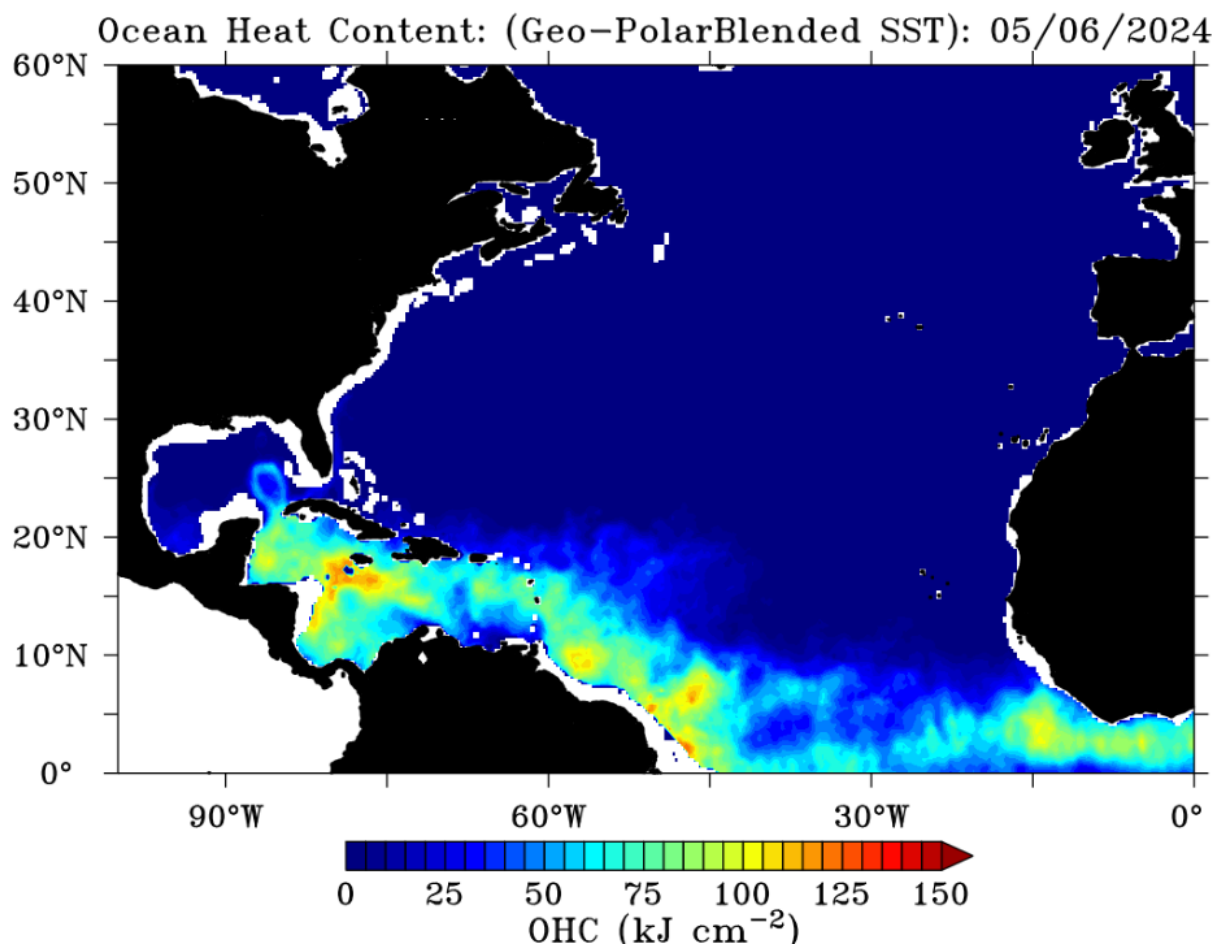


FIGURA 51. Extensión espacial del contenido de calor del océano (a. mayo, b. julio, c. agosto).
Fuente: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/ohc/> (accedido: 6 de mayo de 2024).

El aumento del contenido de calor del océano se refiere a la acumulación de energía térmica en el océano a lo largo del tiempo. Esto ocurre cuando el océano absorbe más energía del sol debido a factores como el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y los cambios en las corrientes oceánicas. El proceso también puede acelerarse durante eventos como el fenómeno de El Niño, tal y como el observado entre 2023 y 2024. Cuando el océano absorbe más energía térmica, puede tener impactos significativos en el medio ambiente y el sistema climático. Aquí están algunos ejemplos:

Aumento del nivel del mar: a medida que el océano se calienta, el agua se expande y el nivel del mar aumenta. Esto puede conducir a inundaciones y erosión costeras en algunas localidades bajas, lo que puede tener impactos significativos en las comunidades costeras.

Cambios en las corrientes oceánicas: el aumento del contenido de calor del océano también puede afectar las corrientes oceánicas, que desempeñan un papel clave en la regulación del clima global. Los cambios en las corrientes oceánicas pueden alterar los patrones climáticos y, en algunos casos, dar lugar a la formación de fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes y ciclones.

Impactos en los ecosistemas marinos: el aumento en el contenido de calor del océano también puede tener impactos significativos en los ecosistemas marinos, incluidos los arrecifes de coral y otras especies marinas sensibles. Por ejemplo, el aumento de la temperatura del océano puede provocar el blanqueamiento de los corales, lo que a largo plazo puede tener un impacto significativo en la biodiversidad marina.

Ciclos de retroalimentación: el aumento en el contenido de calor del océano también puede dar lugar a ciclos de retroalimentación positivos, en los que el aumento de la temperatura de los océanos puede conducir a un mayor calentamiento de la atmósfera y los océanos.

Por lo tanto, monitorear y comprender los cambios en el contenido de calor del océano es importante para predecir y gestionar los impactos del cambio climático en el medio ambiente y los sistemas humanos.

La Figura 52 ilustra las variaciones en la extensión espacial de la profundidad de la capa mixta del agua del mar a través del Mar Caribe y del Atlántico tropical. A través del Caribe, la capa mixta alcanzó durante la primera semana de mayo entre 45 y 60 metros (m) de profundidad, mientras que al sureste de Jaimaica alcanzó entre 60 y 70 m. A través del Atlántico tropical alcanza ya a comienzos de mayo de 2024 entre 45 y 90 m, mientras que alrededor de Puerto Rico aun alcanza entre 30 y 40 m. Usualmente, con el calentamiento típico del verano la profundidad de la capa mixta siempre aumenta en el trópico. Sin embargo, en esta ocasión dicha profundidad ha aumentado gradualmente más temprano en el año en algunas zonas de la región, evidenciando la extensión gradual del patrón de calentamiento superficial en el mar.

La profundidad de la capa mixta del océano es la profundidad de la capa superior del océano donde las propiedades del agua, como la temperatura, la salinidad y la densidad, están bien mezcladas por la turbulencia natural superficial y otros procesos físicos. Es la capa del océano donde la mezcla vertical del agua es suficiente aun para crear una uniformidad de propiedades, y normalmente se define como la profundidad donde la temperatura desciende en cierta cantidad (normalmente 0.5°C) desde la temperatura de la superficie del mar.

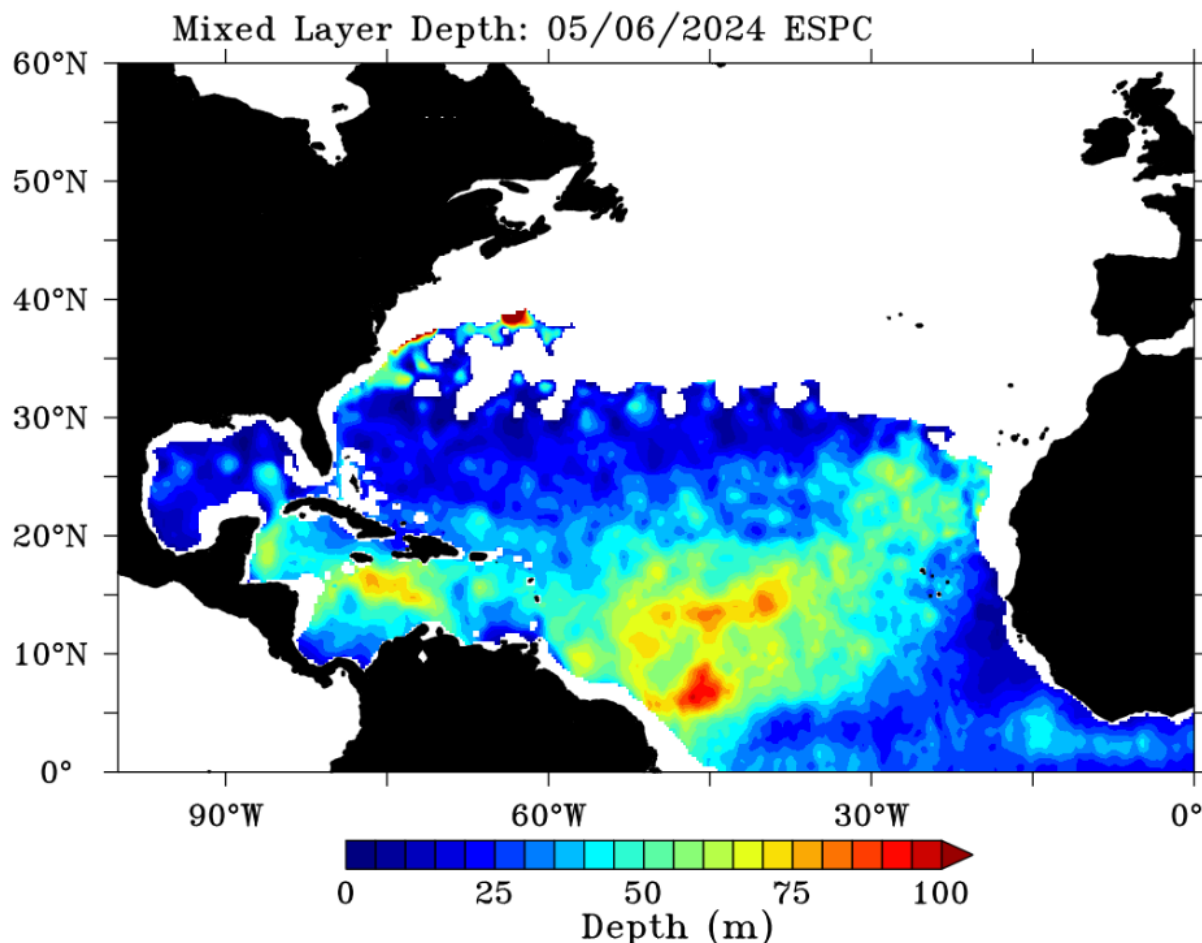


FIGURA 52. Variación en la extensión espacial de la profundidad de la capa mixta del océano. Fuente: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/ohc/> (accedido: 3 de mayo de 2024).

La profundidad de la capa mixta varía según factores como la estación del año, la latitud, las condiciones del viento y las olas, y la cantidad de radiación solar que absorbe el océano. En general, la capa de mezcla es menos profunda en los trópicos y más profunda en las latitudes más altas, donde el forzamiento atmosférico es más fuerte. Pero de ocurrir cualquier fenómeno inusual asociado al calentamiento del mar, entonces, el mar puede absorber más calor con mayor rapidez, resultando en un hundimiento de la capa mixta.

La profundidad de la capa mixta es un parámetro importante para comprender y modelar la dinámica oceánica y la variabilidad climática. Afecta el intercambio de calor, dióxido de carbono y otros gases entre la atmósfera y el océano, y juega un papel clave en la regulación de la temperatura de la superficie del mar y los patrones de circulación oceánica. Por lo tanto, los cambios en la profundidad de la capa mixta pueden tener impactos significativos en los ecosistemas marinos, los patrones climáticos y el clima global.

La Figura 53 muestra la extensión espacial de la profundidad de la isoterma oceánica de 26°C a comienzos del mes de mayo de 2024. El centro y el oeste del Caribe promedia de 80 a 130 metros (m), con algunas zonas, como los alrededores de Puerto Rico con 60 a 80 m.

Partes del Atlántico tropical, sobre todo al noreste de Brasil ya evidencian profundidades de la isoterma de 80 a 115 m. Estos valores se consideran muy elevados para la época del año.

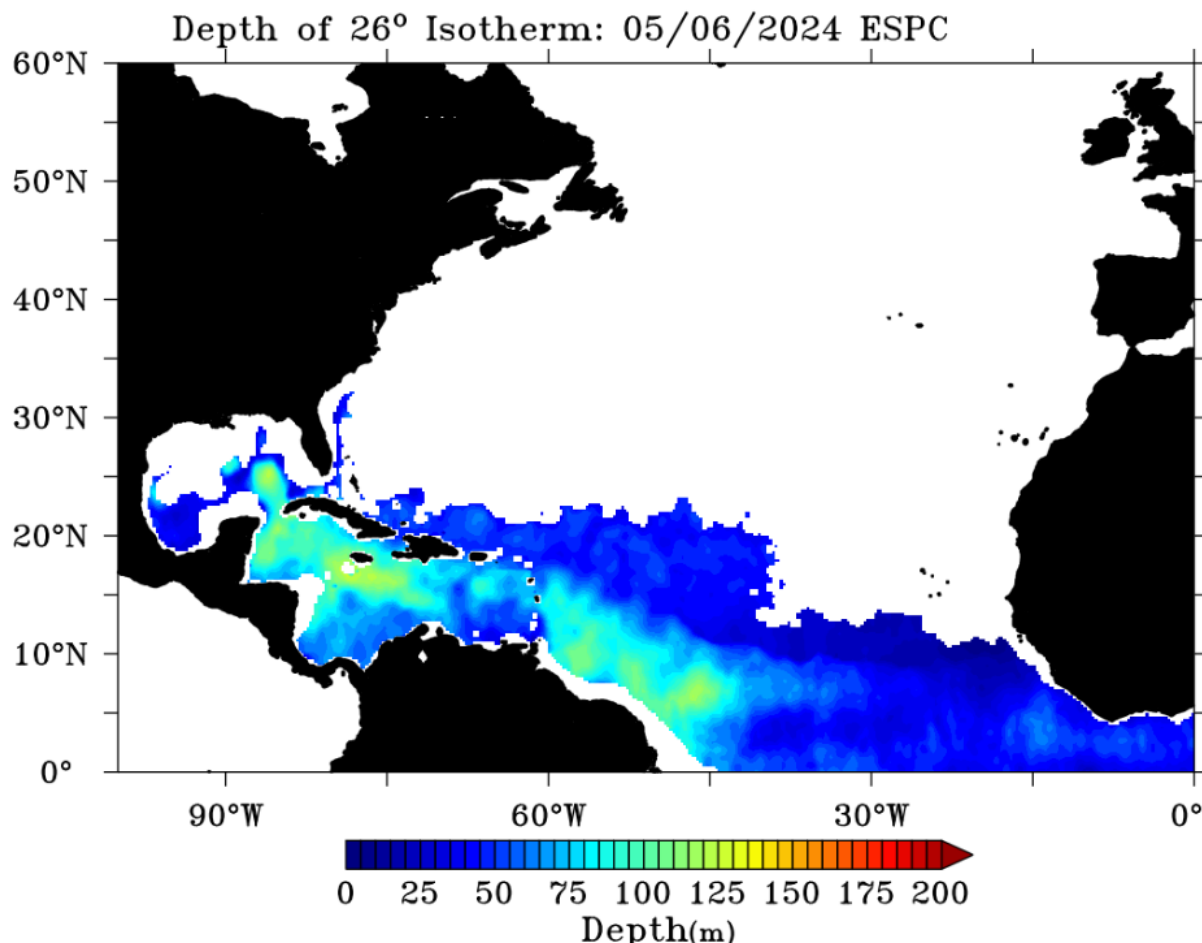


FIGURA 53. Variación en la extensión espacial de la profundidad de la isoterma oceánica de 26°C. Fuente: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/ohc/> (accedido: 3 de mayo de 2024).

La isoterma oceánica de 26°C se refiere al límite de los océanos tropicales donde la temperatura de la superficie del mar es igual o superior a 26°C (78.8°F). Esta isoterma se usa a menudo como umbral para identificar áreas donde las condiciones son favorables para la formación e intensificación de los huracanes.

La isoterma oceánica de 26°C es importante porque los ciclones tropicales requieren aguas oceánicas cálidas para formarse y fortalecerse. El agua cálida del océano proporciona la energía que impulsa la tormenta, y cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre la superficie del océano y la atmósfera superior, más fuerte puede volverse la tormenta. Se considera que el umbral de 26°C es la temperatura mínima necesaria para que se forme un ciclón tropical, aunque también son importantes otros factores, como la inestabilidad atmosférica y la baja cizalladura del viento, lo que también se conoce como vientos cortantes (“windshear”). Al ocurrir un calentamiento acelerado y sostenido de la

atmósfera, el océano comienza a absorber mayor calor, causando que se extienda a mayor profundidad la isoterma de 26°C. Esto usualmente ocurre ya para el verano tardío en la temporada ciclónica del Atlántico (agosto a octubre). El calentamiento anormal de la superficie del mar puede contribuir a que la isoterma de 26°C alcance profundidades mayores más temprano en el año, tal y como se pudo observar durante el 2023 y ahora nuevamente tan temprano como en mayo de 2024.

La isoterma de 26°C se usa a menudo junto con otros datos oceanográficos y meteorológicos para ayudar a predecir la probabilidad de formación de ciclones tropicales y rastrear sus movimientos. También se utiliza en estudios climáticos para monitorear cambios en las temperaturas del océano e identificar áreas donde las condiciones climáticas pueden volverse más favorables para la formación de ciclones tropicales.

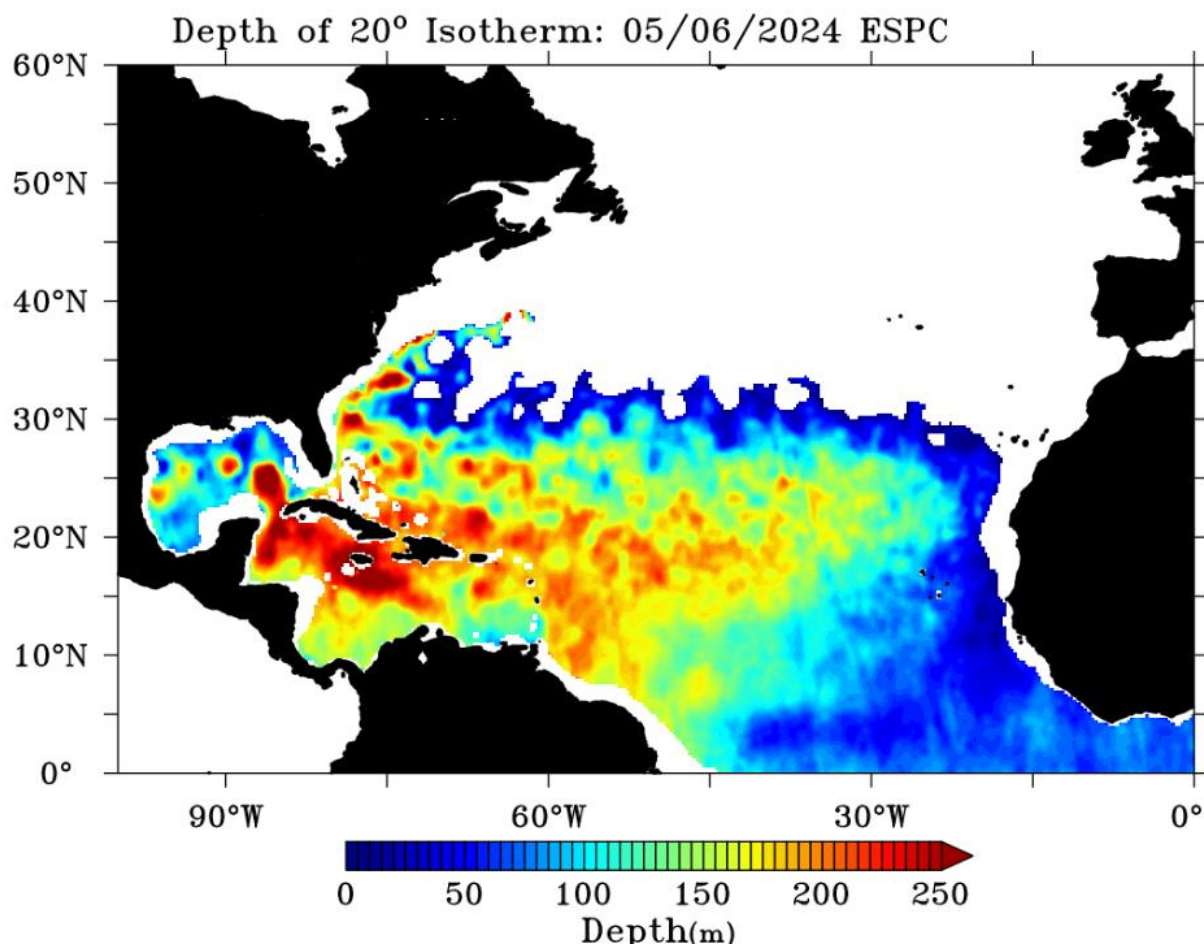


FIGURA 54. Variación en la extensión espacial de la profundidad de la isoterma oceánica de 20°C. Fuente: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/ohc/> (accedido: 3 de mayo de 2024).

La Figura 54 muestra la extensión espacial de la profundidad de la isoterma oceánica de 20°C. A través del norte del Caribe promedia de 130 a 200 metros (m), con algunas zonas alcanzando 250 m o más. Alrededor de Puerto Rico a comienzos de mayo de 2024 ya fluctuaba entre unos 180 a 220 m, un patrón sin precedentes. A través del Atlántico tropical dicha

isoterma alcanza de 120 a 200 m. Esto evidencia la extensión geográfica y batimétrica de las olas de calor marino que ya han impactado el Atlántico tropical y el Caribe durante la primavera del 2024.

La isoterma oceánica de 20°C se refiere al límite en los océanos donde la temperatura de la superficie del mar es igual o superior a 20°C (68°F). Esta isoterma se utiliza a menudo como umbral para identificar los límites de las masas de agua cálida en verano y fría en invierno en los océanos.

En los océanos Atlántico Norte y Pacífico Norte, la isoterma de 20°C se usa típicamente para delinear el límite entre los giros subtropical y subpolar. Los giros subtropicales son regiones del océano caracterizadas por altas temperaturas en la superficie del mar, bajas concentraciones de nutrientes y baja productividad biológica, mientras que los giros subpolares son regiones del océano caracterizadas por bajas temperaturas en la superficie del mar, altas concentraciones de nutrientes y alta productividad biológica. En el Océano Austral, la isoterma de 20°C se utiliza para separar la Corriente Circumpolar Antártica de las aguas más cálidas del norte. Esta corriente juega un papel crucial en la regulación de la circulación oceánica global y el clima.

En general, la isoterma oceánica de 20°C es una herramienta importante para que los oceanógrafos y científicos del clima estudien la distribución del calor, los nutrientes y la productividad biológica en los océanos. Una expansión muy profunda de la isoterma oceánica de 20°C puede tener implicaciones muy importantes en el intercambio de gases y nutrientes de las diversas capas oceánicas, también en el afloramiento de nutrientes y de oxígeno disuelto hacia la superficie. Los cambios en la ubicación o la fuerza de esta isoterma pueden tener impactos significativos en los ecosistemas marinos y el clima global, incluyendo la generación de huracanes, cambios en la productividad del plancton, en el rendimiento de la pesca y en los patrones de blanqueamiento de los corales. Fenómenos como El Niño pueden magnificar dichos efectos.

La naturaleza sin precedentes de extensión geográfica y de profundidad de la capa mixta y de las isotermas de 26°C y de 20°C para esta época del año, aun en plena primavera, sugieren varios fenómenos. El ensanchamiento de la capa mixta y de ambas isotermas, como consecuencia del calentamiento del mar, puede tener varias consecuencias importantes:

1. *Cambios en los patrones climáticos:* El calentamiento del mar puede alterar los patrones climáticos regionales y globales al afectar la circulación atmosférica y los sistemas climáticos. Con la evolución rápida de las condiciones de La Niña durante el 2024, esto puede tener como consecuencia a nivel del Atlántico tropical y del Caribe un aumento sustancial en la generación de ciclones tropicales.
2. *Impacto en la vida marina:* El aumento de la temperatura del agua y el ensanchamiento de la capa mixta pueden afectar a la vida marina, incluyendo la distribución y migración de especies, la reproducción y la disponibilidad de alimentos. Esto también puede contribuir a alterar las dinámicas de nutrientes, particulado orgánico, detrito, concentración de oxígeno disuelto, la composición de los microbiomas, la productividad primaria y otras características oceanográfica vitales para el sostenimiento de los ecosistemas.

3. *Cambio en la productividad biológica*: El calentamiento del mar puede afectar la productividad biológica al cambiar las condiciones físicas y químicas del agua, lo que a su vez puede tener efectos en cascada en las redes alimentarias marinas, en la productividad de las pesquerías y por ende en la seguridad alimentaria de numerosas regiones del planeta.
4. *Incremento del nivel del mar*: El calentamiento del mar también puede contribuir al aumento del nivel del mar debido a la expansión térmica del agua, en combinación con el derretimiento de los glaciares y casquetes polares.
5. *Impacto en la atmósfera*: Los cambios en la temperatura y la circulación del agua pueden tener efectos en la atmósfera, incluyendo la modificación de la humedad y la formación de nubes, lo que a su vez puede influir en el clima terrestre.
6. *Aumento en las tasas de evaporación del agua*: El aumento en la temperatura del mar se traduce en mayor energía potencial. Esto tiene como consecuencia un aumento en las tasas de evaporación de agua, contribuyendo a aumentar significativamente la humedad atmosférica y aumentando los riesgos de precipitaciones pluviales, en ocasiones, extrema. Esto también puede contribuir a potenciales aumentos en los riesgos de formación de sistemas tropicales de circulación ciclónica.
7. *Aumento en las tasas de intensificación ciclónica*: La presencia de capas amplias de aguas cálidas en los océanos también, en el caso de la formación de ciclones tropicales, contribuyen en muchas ocasiones a aumentar las tasas de evaporación y a la transferencia de energía potencial del mar hacia la atmósfera. Esto contribuye a aumentar en muchas ocasiones las tasas de intensificación de las tormentas tropicales, lo que resulta en la formación de huracanes intensos. En algunas ocasiones esto causa incrementos significativos (>100 kt vientos) en períodos de 24 horas o menos.

En resumen, el ensanchamiento de la capa mixta y de la isoterma de 26°C como resultado del calentamiento del mar puede tener consecuencias significativas adversas sobre los ecosistemas marinos, la productividad primaria de los océanos, sus patrones de circulación, el clima y el medio ambiente en general.

Evidencia del desarrollo del fenómeno de La Niña y las consecuencias para el Caribe

Un análisis detallado de las proyecciones a largo plazo del climata para el resto del 2024 a través del Atlántico tropical y la región del Caribe utilizando el modelo CanSIPS y las anomalías de precipitación acumulada sugieren en las Figuras 55-62 que la región general del Caribe estará experimentando una transición rápida hacia condiciones típicas del fenómeno de La Niña. Esto implica un entorno con una anomalía positiva significativa de precipitación pluvial para la región entre los meses de mayo a diciembre de 2024. Particularmente, la parte noreste, central y oeste del Caribe son las que mayormente se verán afectadas, y en mucho menor grado el noroeste del Caribe (Cuba) y el Golfo de México. Esto, en combinación con las tendencias récord de temperaturas elevadas en la zona, y la amplitud y profundidad que la

capa mixta del mar y las isotermas de aguas cálidas ya han ido alcanzando tan temprano como el mes de mayo sugiere un riesgo en incremento de impactos ciclónicos para toda la zona del Caribe durante la temporada ciclónica del 2024.

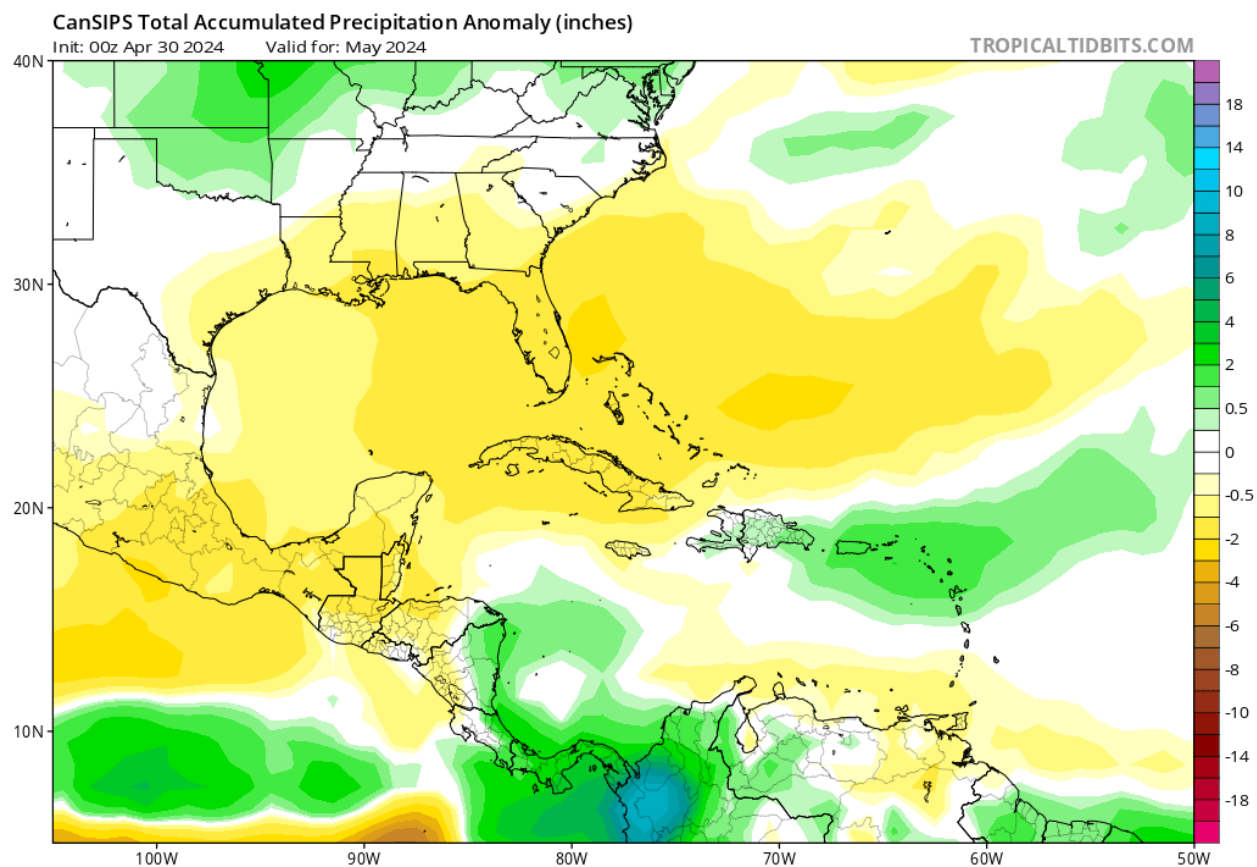


FIGURA 55. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: mayo 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_mnth&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

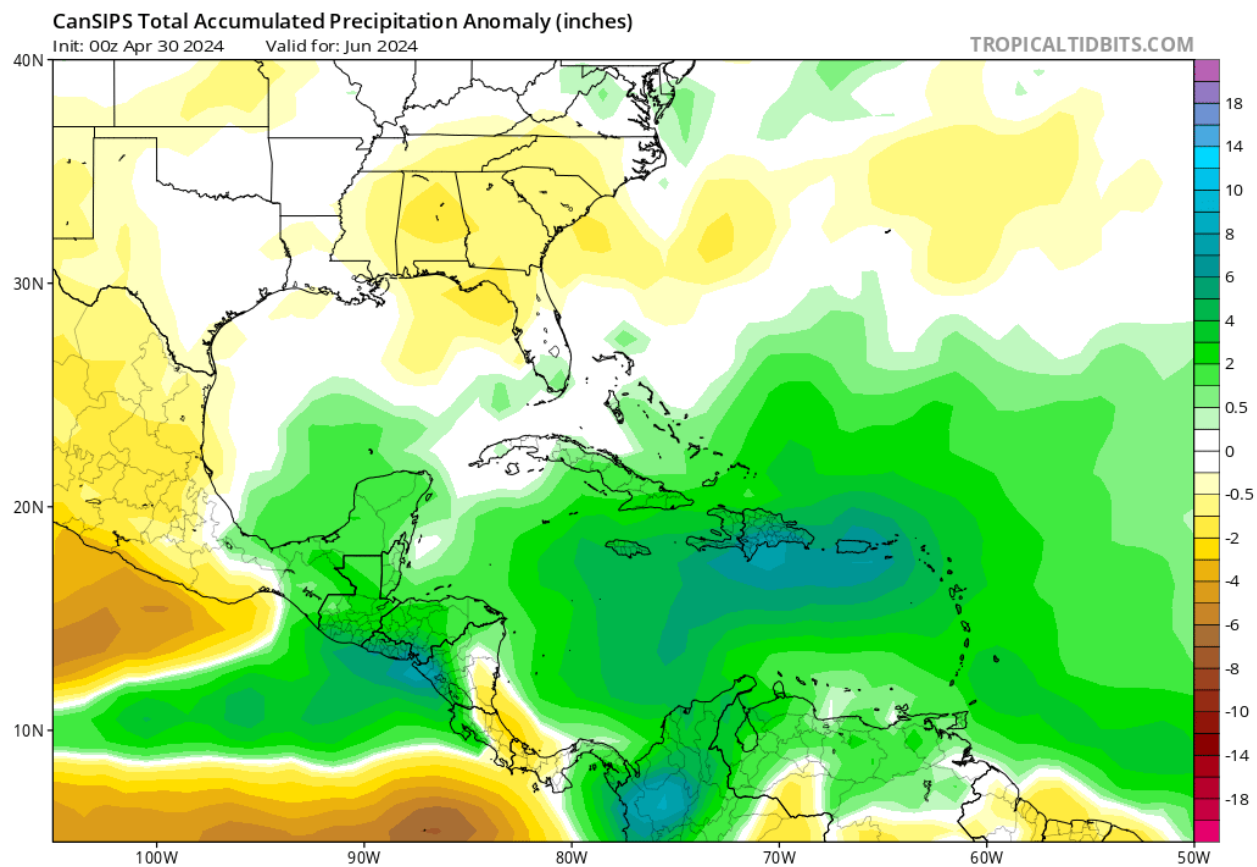


FIGURA 56. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: junio 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

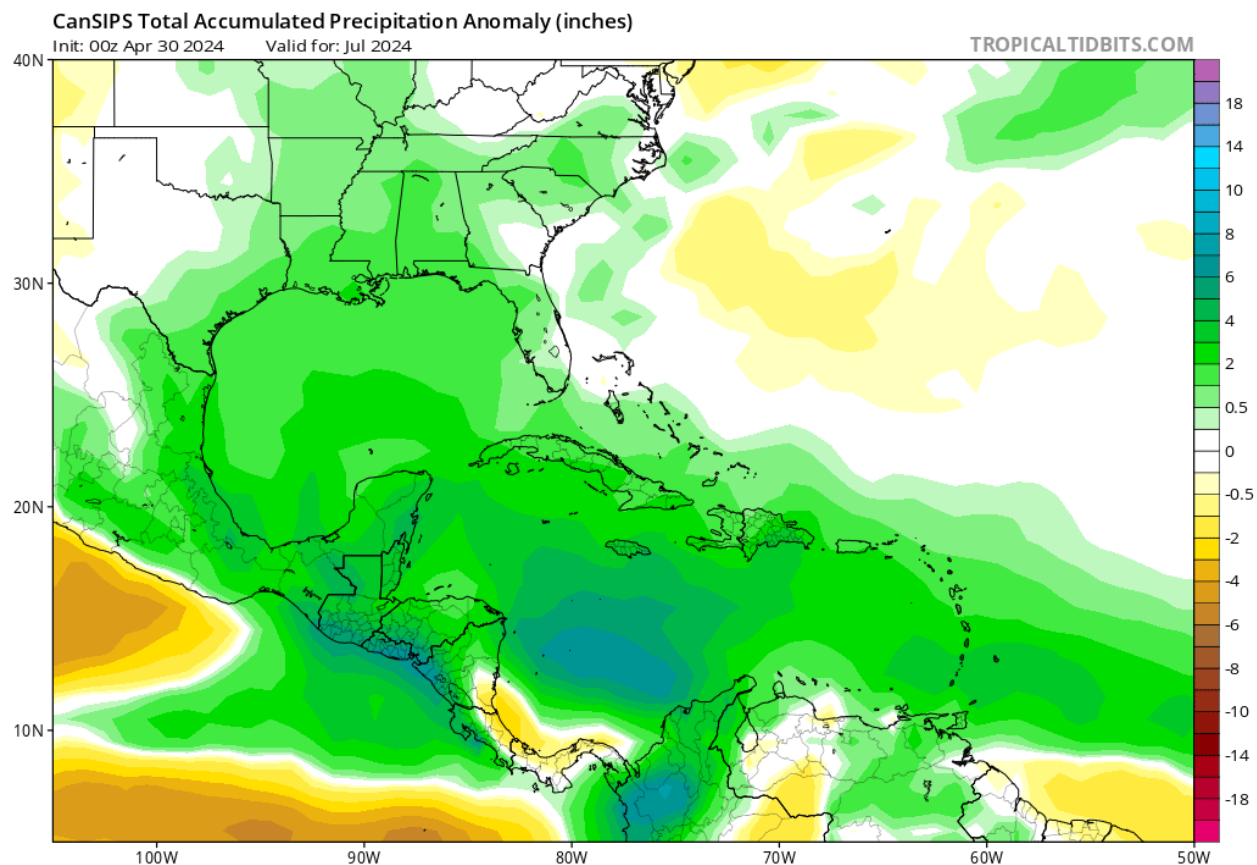


FIGURA 57. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: julio 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

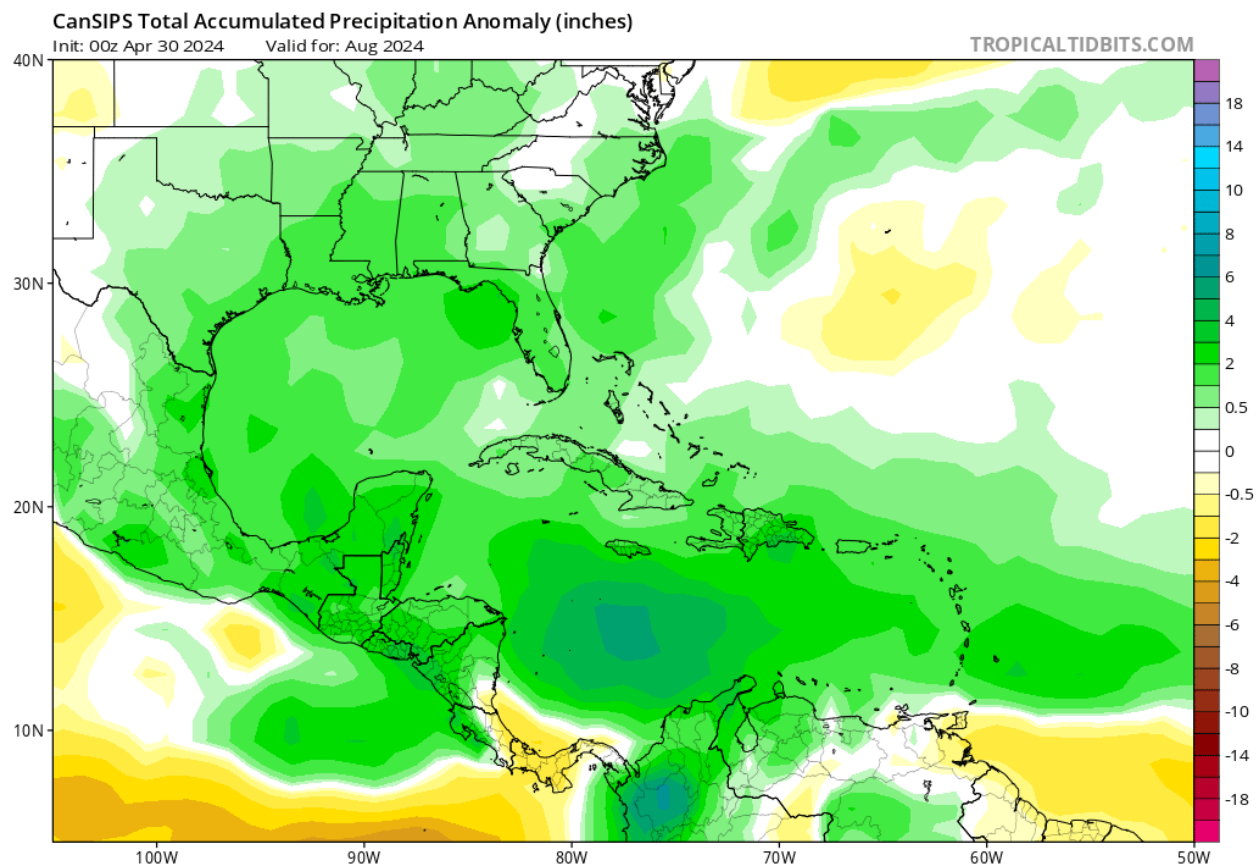


FIGURA 58. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: agosto 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

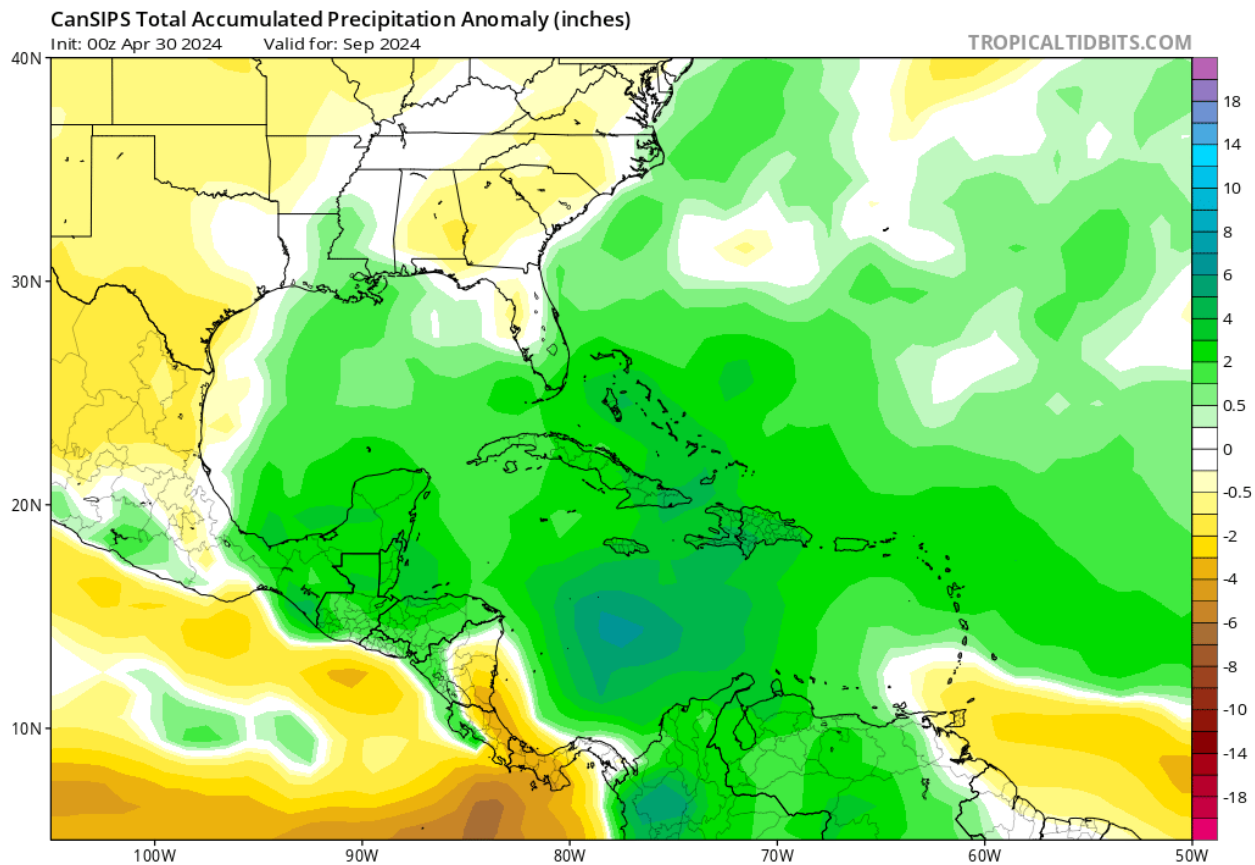


FIGURA 59. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: septiembre 2024.

Fuente:

https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

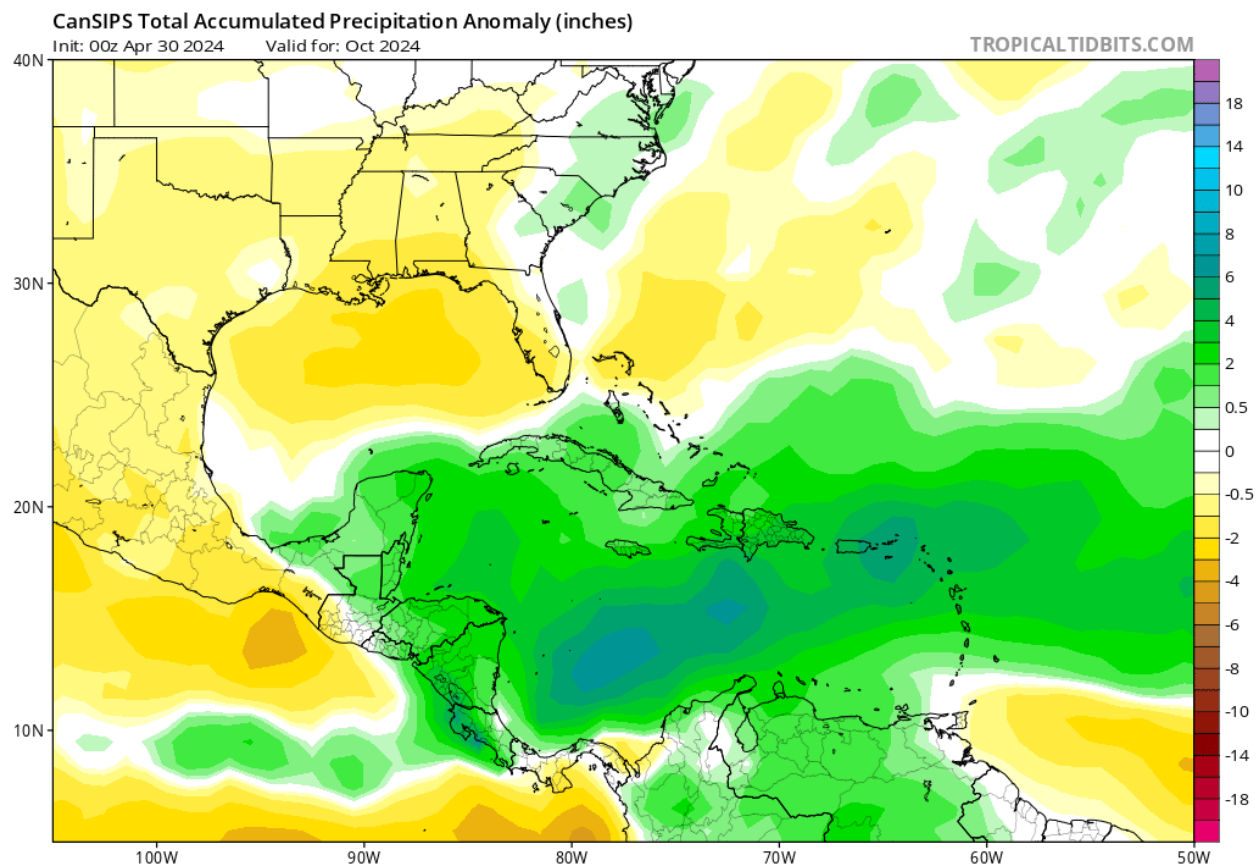


FIGURA 60. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: octubre 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

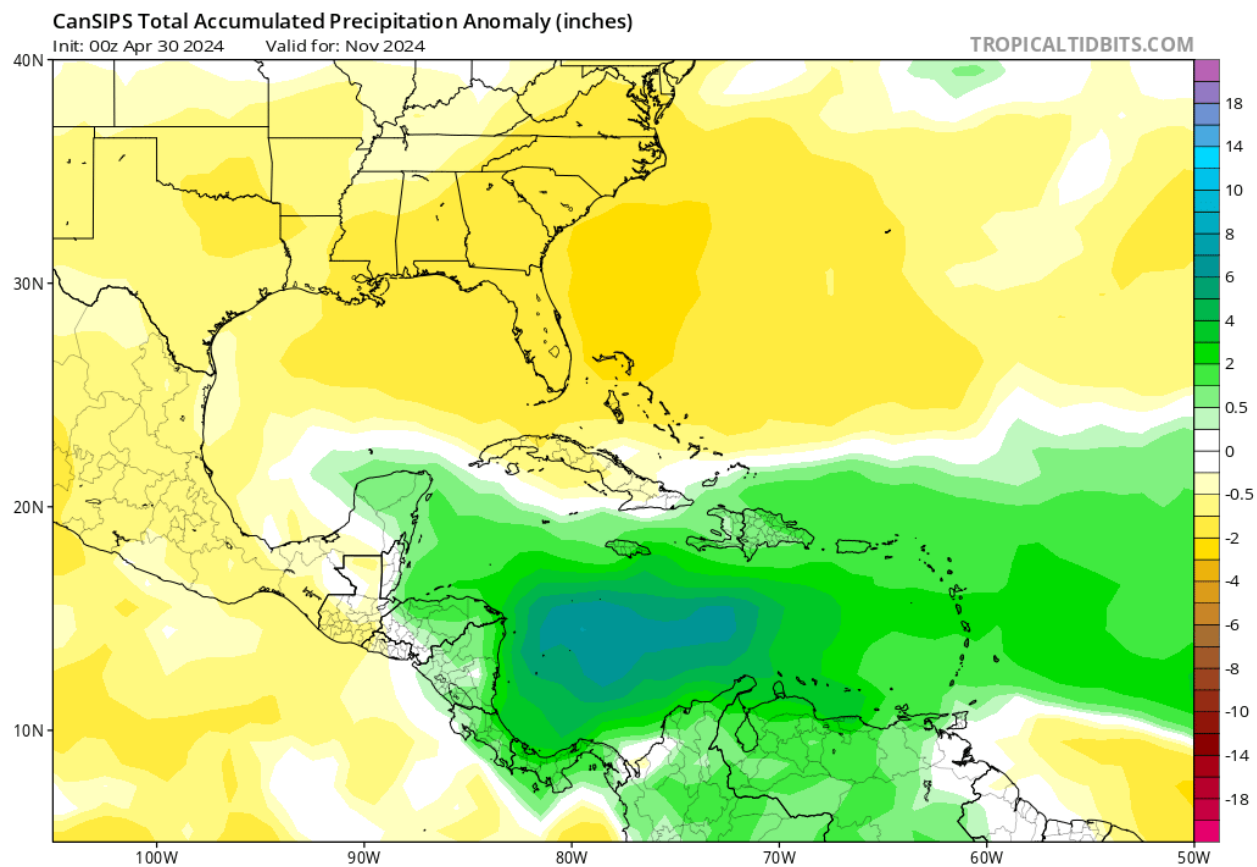


FIGURA 61. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: noviembre 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

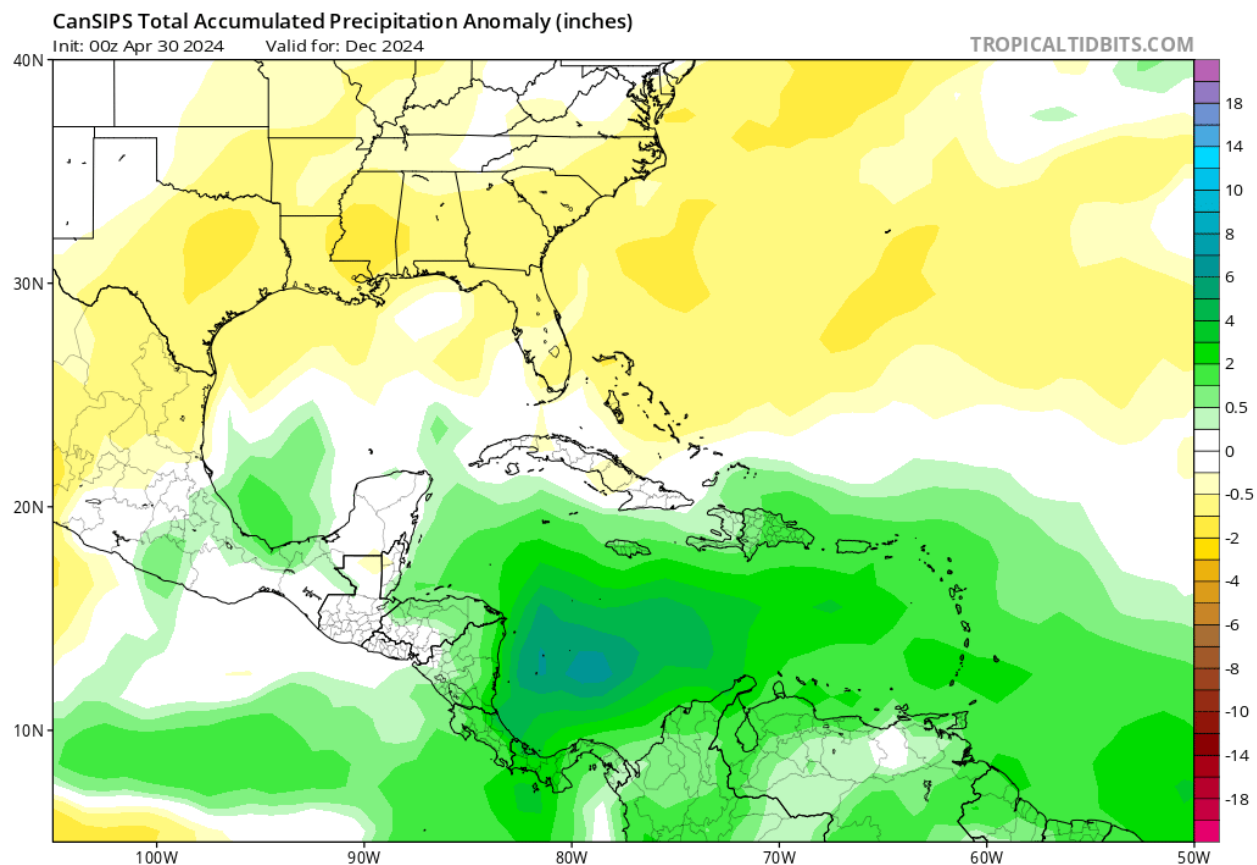


FIGURA 62. Proyección de la anomalía de precipitación acumulada: diciembre 2024. Fuente: https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/?model=cansips®ion=watl&pkg=apcpna_month&runtime=2024050100&fh=0 (fecha de la corrida del modelo CanSIPS: 30 de abril de 2024).

Síntesis y proyecciones de la temperatura del mar para la zona del Caribe y Puerto Rico para los meses mayo a agosto de 2024

En Puerto Rico y el este del Caribe enfrentamos una ola de calor marino que se extiende ya desde los meses de marzo y abril. La región también se encuentra en una transición rápida y evidente de condiciones de El Niño hacia condiciones de La Niña. Esto implica un incremento significativo en las condiciones de riesgo de otro evento de blanqueamiento masivo de carácter regional en el Caribe, posiblemente similar al de 2023. Esta sería la primera vez en la historia en que el Caribe enfrentaría dos eventos de blanqueamiento masivo de corales en años consecutivos. En el caso de Puerto Rico, sin embargo sería el cuarto evento en los últimos seis años, lo que sería un eventos sin precedentes en la región.

De acuerdo al Coral Reef Watch Program de NOAA, Puerto Rico se encuentra ya desde finales de abril a comienzos de mayo de 2024 bajo **una alerta 1 (moderada) y una alerta 2 (significativa)** de ola de calor marino. A la vez, ya la Isla, al igual que gran parte del Caribe, se encuentra bajo una **vigilancia de blanqueamiento** de corales debido al aumento prolongado en las temperaturas del mar. Ante dicho escenario, la *Sociedad Ambiente Marino* (SAM) vuelve a alertar sobre los riesgos inminentes de emisión de un **aviso de blanqueamiento** de corales antes de agosto y ante la posibilidad de emisión de al menos una **alerta 1 de blanqueamiento** de corales durante el mes de agosto de 2024. Resulta urgente la necesidad de acelerar los pasos para tomar medidas para enfrentar el riesgo de otra catástrofe ecológica similar a la del 2023 y que se encuentra nuevamente en ciernes en el 2024.

Se anticipa que en los próximos tres meses entrando al verano debe ir gradualmente incrementando el riesgo de las condiciones conducentes al blanqueamiento de corales a la par que incrementa el riesgo de formación ciclónica para la región.

El evento de blanqueamiento masivo de corales del 2023 alcanzó los nefastos precedentes establecidos en el blanqueamiento masivo del 2005, resultando nuevamente en mortandades masivas de corales y en la pérdida de resiliencia de la costa en Puerto Rico y en otras localidades del Caribe. Los riesgos de otro evento similar durante el 2024 van en aumento y apuntan hacia la recurrencia de otro evento de proporciones sin precedentes. Esto amerita con carácter de urgencia tomar medidas de precaución para minimizar inmediatamente o evitar el impacto de otros posibles factores ambientales humanos en las costas. Este es también el momento de revisar e implementar los protocolos de acción por parte del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) y sus colaboradores para atender esta situación.

El blanqueamiento de los corales ocurre cuando estos expulsan a sus algas simbióticas debido al estrés fisiológico que les causa el aumento prolongado en la temperatura del agua. Bajo esas condiciones pierden sus algas simbióticas que les dan su color y quedan con el color blanco de su esqueleto de carbonato de calcio. Bajo esas condiciones el coral no recibe del alga nutrientes, ni carbono para su calcificación, ni oxígeno para suplementar su respiración, aumentando su riesgo de mortalidad significativamente, sobre todo durante eventos prolongados (ej. mayores de 8 a 12 semanas). Esto puede tener graves consecuencias socio-económicas en Puerto Rico y en muchos países al potencialmente afectarse la pesca, la actividad turística y recreacional y la capacidad natural de los arrecifes sostener la biodiversidad, generar productos de valor biomédico y farmacológico, y al perderse su protección de las costas contra la erosión, lo que pone en riesgo la vida y la infraestructura.

Se recomienda al DRNA implementar inmediatamente sus planes de contingencia para sorpresas ecológicas en los arrecifes de coral ante el impacto severo del blanqueamiento masivo de los corales. Igualmente, es importante revisar y garantizar la implementación de todos los planes de manejo de las reservas naturales, y los planes de control de calidad de agua y prevención de la contaminación. Así mismo, es crítico la implementación más apropiada posible de los planes de control de erosión y sedimentación para reducir este tipo de potenciales fuentes de estrés ambiental en la costa.

Esto debe ir acompañado de acciones remediadoras inmediatas de parte de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) para minimizar los salideros de agua, así como las descargas ilegales de aguas usadas a los cuerpos de agua y a la costa. Además, es importante que durante la operación de embarcaciones recreacionales se minimicen aquellas acciones que puedan causar estrés en los arrecifes de coral y ecosistemas asociados, como la navegación a alta velocidad en aguas llanas (y su consecuente resuspensión sedimentaria), el anclaje sobre arrecifes de coral y comunidades de hierbas marinas, y el vertido de desperdicios líquidos y sólidos en el mar. Es muy probable también que se requiera regular algunas actividades recreacionales (ej. buceo, snorkeling) en algunas localidades críticas impactadas durante el blanqueamiento.

El blanqueamiento de corales es un fenómeno preocupante que se ha vuelto más frecuente y severo debido al cambio climático y otros factores ambientales. El año 2023 ya tuvimos un evento catastrófico en Puerto Rico y el Caribe, que coincidió con el desarrollo intenso de El Niño. Ahora nos enfrentamos ante la evolución rápida de un evento de La Niña que se anticipa sea intenso, el cual va a coincidir con un aumento en el riesgo de otro evento masivo de blanqueamiento de corales. La respuesta de la isla ante la severidad de este evento de blanqueamiento de corales implica tomar medidas inmediatas de emergencia, así como a largo plazo para mitigar y adaptarse a los impactos del blanqueamiento asociado al cambio climático.

Aquí hay algunas acciones clave que en Puerto Rico debemos considerar:

Monitoreo y seguimiento: Fortalecer y ampliar el Programa de Monitoreo de los Arrecifes de Coral que implementa el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales junto a sus colaboradores. Debe darse seguimiento a múltiples arrecifes de coral en los próximos meses para detectar la distribución espacial, severidad y consecuencias a corto, mediano y largo plazo del blanqueamiento masivo de corales. Esto implica llevar a cabo investigaciones científicas, utilizar tecnologías de monitoreo remoto y capacitar a especialistas locales (ej. ciudadanos científicos, estudiantes, miembros de organizaciones no gubernamentales) para colaborar en evaluar la salud de los corales.

Protección de áreas marinas de interés y reservas naturales: Establecer y ampliar las áreas marinas protegidas (AMP) que incluyan hábitats de coral saludables o aumentar la vigilancia y protección de las AMPs ya existentes, o en su defecto, proveerla en donde no existe desde hace mucho tiempo, como en la Reserva Natural Canal Luis Peña, en la Isla de Culebra. Estas áreas brindan protección adicional a los arrecifes de coral y ayudan a preservar la biodiversidad marina en general. Además, se debe implementar y hacer cumplir regulaciones para prevenir la pesca destructiva, el uso de técnicas de pesca no sostenibles, la navegación y el anclaje inapropiado, y la contaminación.

Gestión de la calidad del agua: Se debe implementar una moratoria inmediata en la deforestación de terrenos adyacentes a la costa, terrenos susceptibles a erosión, humedales,

playas, etc. Además, se requiere implementar medidas para mejorar y mantener la calidad del agua en los ecosistemas de arrecifes de coral y en otros ecosistemas asociados. Esto puede incluir la reducción de la contaminación proveniente de fuentes terrestres, como la agricultura intensiva y el uso de fertilizantes, las escorrentías urbanas, las descargas ilegales de aguas usadas crudas, así como el control de la erosión costera.

Sensibilización y educación: Se requiere llevar a cabo campañas inmediatas de sensibilización pública para informar a la población sobre la importancia de los arrecifes de coral, los impactos del cambio climático, los riesgos y consecuencias de este evento de blanqueamiento, y las acciones individuales que se pueden tomar para proteger los ecosistemas marinos. También es importante educar a las comunidades locales y a los sectores turísticos sobre las prácticas sostenibles de la navegación, el buceo y el “snorkeling” para minimizar el daño a los corales.

Restauración de arrecifes de coral: Se requiere apoyar inmediatamente el desarrollo de programas de restauración de arrecifes de coral como los que lleva a cabo desde el año 2003 la Sociedad Ambiente Marino (<https://sampr.org>) para ayudar a recuperar los arrecifes impactados por el blanqueamiento, las enfermedades de corales y los huracanes, entre otros factores. Esto puede incluir técnicas como la cría de corales en viveros y su posterior trasplante a áreas degradadas. También es sumamente necesario la protección de los corales en los viveros submarinos mediante la utilización de sistemas de cortinas filtrantes de la luz solar para crear sombras y minimizar el impacto del calentamiento del mar, reduciendo el riesgo de blanqueamiento de los corales.

Mitigación del cambio climático: A largo plazo, es vital reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la adopción de fuentes de energía renovable. Esto implica implementar políticas y medidas que fomenten la eficiencia energética, la conservación de energía y la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Cooperación internacional: A largo plazo, también resulta fundamental desarrollar iniciativas de trabajar en colaboración con otros países, organizaciones internacionales y científicos para intercambiar información, compartir mejores prácticas y abordar el blanqueamiento de corales a nivel regional y global. Esto incluye participar en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París sobre el cambio climático, entre otros similares.

Es importante destacar que estas medidas no solo deben ser implementadas por los gobiernos, sino que también requieren la participación y colaboración de la sociedad civil, el sector privado (ej. Industria hotelera, turística, servicios, otros sectores industriales), la academia, las organizaciones no gubernamentales y las comunidades locales. La protección de los corales y los ecosistemas marinos es vital para la recuperación económica de Puerto Rico y es responsabilidad de todos y no solo del gobierno. Por ello es muy importante que se tomen todas las medidas posibles para minimizar cualquier otro factor ambiental local que pueda poner en riesgo a los corales ante la eventualidad de un posible evento significativo de blanqueamiento durante los próximos meses.

La *Sociedad Ambiente Marino* emitirá mensualmente durante los próximos meses una actualización del estado de los océanos alrededor de Puerto Rico y el Caribe, con una actualización de la evolución del fenómeno de La Niña y otras condiciones naturales asociadas, con recomendaciones específicas sobre medidas de manejo y mitigación de impactos.

Por el momento, se exhorta a la comunidad a mantenerse atentos a los boletines oficiales de NOAA, así como a la actualización de esta información a través del portal de la *Sociedad Ambiente Marino* (<https://sampr.org>) y de sus redes sociales a través de Facebook (*Sociedad Ambiente Marino*) e Instagram.