VI CONGRESO NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO
& IX SIMPOSIO NACIONAL MARINO COSTERO

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Instituto Nacional de Bosques
Más bosques, Más vida

Optimización de Alertas de Blanqueamiento de Coral en el Sistema Arrecifal Mesoamericano con *Machine Learning*



→ **Autora:** Mercy Gabriela Aguilar
→ **Coautora:** Sara Michelle Catalán

Octubre 2026

Sistema Arrecifal Mesoamericano -SAM-

1. El SAM es una barrera de coral que se extiende más de **1,000 km** a lo largo de las costas de **México, Belice, Guatemala y Honduras.**
2. Alberga 500 especies de peces, 65 especies de corales y otras especies protegidas como tortugas y tiburones ballena.
3. Importancia global: Provee servicios ecosistémicos esenciales (protección costera, pesca, turismo) con un valor económico de 6,200 millones de dólares anuales.



Blanqueamiento de Corales y Estrés Térmico



El blanqueamiento de coral es un fenómeno asociado al **aumento sostenido de la temperatura superficial del mar**, que interrumpe la simbiosis entre los pólipos de coral y sus microalgas, provocando la pérdida de coloración y eventualmente su muerte.

1

Causa

Anomalías térmicas (aumento de temperatura)

2

Relación simbiótica

Los corales dependen de *zooxantelas* (microalgas) para obtener energía.

3

Estrés térmico

Esto provoca que los corales expulsen las *zooxantelas*, dejando visible su exoesqueleto blanco.

4

Sensibilidad térmica

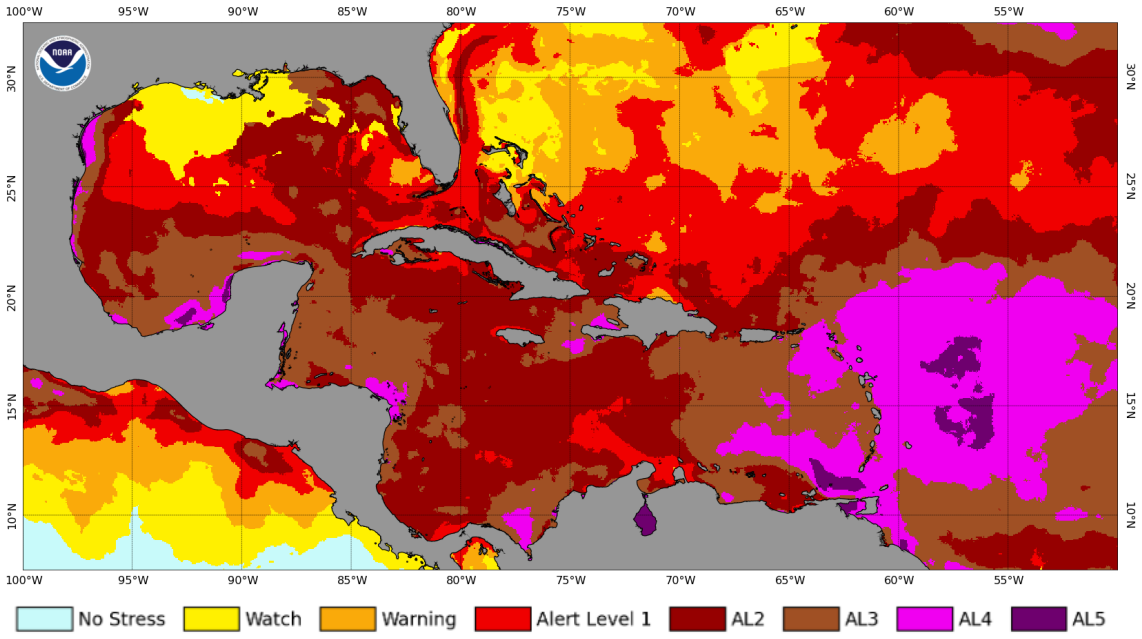
El blanqueamiento comienza con un aumento de 1°C a 1.5°C por encima de la media estacional.



National Environmental Satellite, Data, and Information Service

Coral Reef Watch

NOAA Coral Reef Watch 5km Bleaching Alert Area Monthly Maximum (v3.1) Sep 2024



Stress Level	Definition	Potential Bleaching and Mortality
No Stress	HotSpot <= 0	No Bleaching
Bleach Watch	0 < HotSpot < 1	
Bleaching Warning	1 <= HotSpot and 0 < DHW < 4	Risk of Possible Bleaching
Bleaching Alert Level 1	1 <= HotSpot and 4 <= DHW < 8	Risk of Reef-Wide Bleaching
Bleaching Alert Level 2	1 <= HotSpot and 8 <= DHW < 12	Risk of Reef-Wide Bleaching with Mortality of Heat-Sensitive Corals
Bleaching Alert Level 3	1 <= HotSpot and 12 <= DHW < 16	Risk of Multi-Species Mortality
Bleaching Alert Level 4	1 <= HotSpot and 16 <= DHW < 20	Risk of Severe, Multi-Species Mortality (> 50% of corals)
Bleaching Alert Level 5	1 <= HotSpot and 20 <= DHW	Risk of Near Complete Mortality (> 80% of corals)

DHW 4.0°C - semanas

Del Océano al espacio

Teledetección

Los modelos geoespaciales son herramientas que integran datos espaciales y ambientales para predecir eventos de blanqueamiento de coral.

NOAA

→ La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), creó el programa ***Coral Reef Watch*** **(CRW)**, específicamente para la vigilancia de arrecifes de coral.

→ Con información desde **1985**, proveniente de 9 satélites de los cuales **5 son geoestacionarios** (GOES-West, GOES-East, Himawari-9, Meteosat-9, Meteosat-10) y **4 de órbita polar** (NOAA-20, S-NPP, Metop-B, Metop-C).

→ **1997** desarrollaron el modelo global de monitoreo de SST

Limitantes

Los umbrales globales (**4.0 °C-semanas**) del modelo de *NOAA Coral Reef Watch* y la resolución espacial (**5 km**) pueden limitar la precision a escalas regionales.

Fuentes de Datos

Datos In Situ (2018–2024)

Más de 63,000 observaciones de variables biológicas de salud coralina, agrupadas en 105 colonias **(Coral Watch, Reef Check, Fundaeco).**

Datos Satelitales (NOAA CRW 5km, 2018–2024)

Más de 12,000 archivos NetCDF procesados **(SST, SSTA, HotSpot, DHW, BAA).**



[Fotografía]. The Nature Conservancy. (https://reefresilience.org/wp-content/uploads/Diver-laying-transect.png). Derechos de autor (s.f.) por Tim Calver.

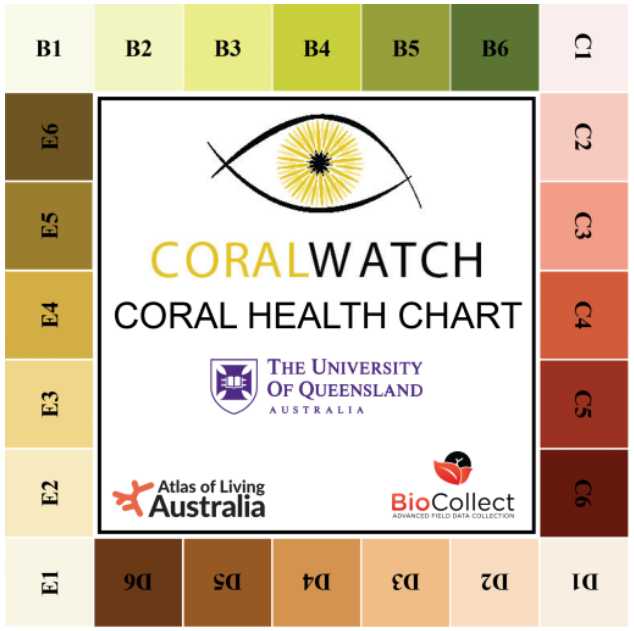
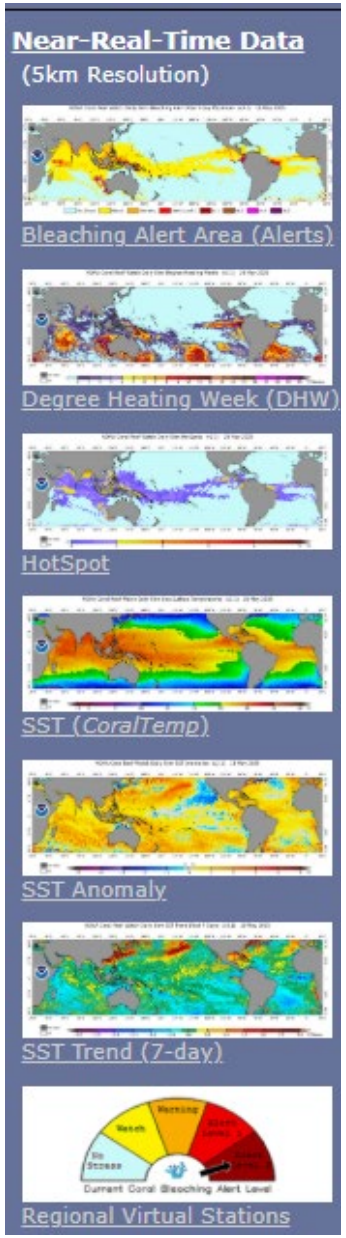


Tabla codificada para la evaluación de la salud de los corales. Obtenido de Coral Watch (2025). (https://coralwatch.org/wp-content/uploads/2023/09/coral-health-chart-300x300.jpg).



Flujo Metodológico

1. ENTRADAS DE DATOS (INPUTS)



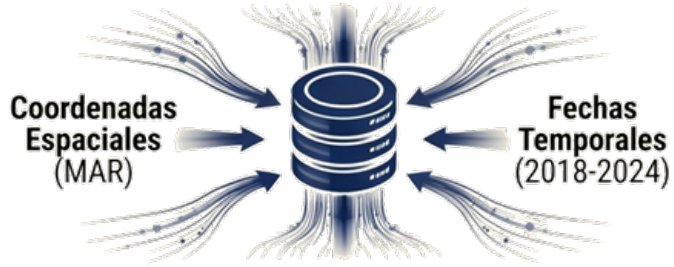
Satélite NOAA CRW

2. PREPROCESAMIENTO



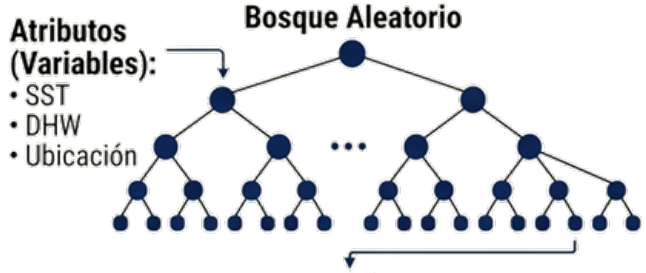
Interpolación de Datos y Malla de 5km

3. INTEGRACIÓN DE DATOS



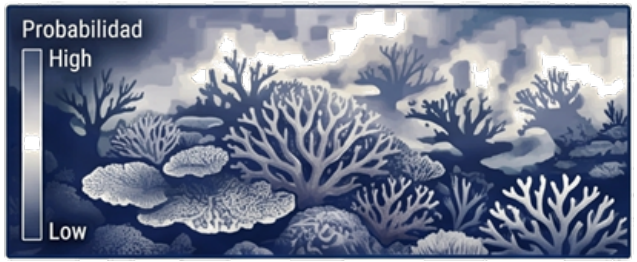
Sincronización por Ubicación y Fecha

4. MODELADO DE BOSQUE ALEATORIO



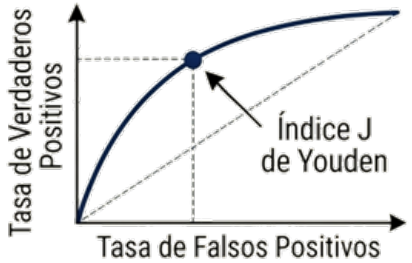
Salída: Probabilidad de Blanqueamiento

5. ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD



Mapas de Riesgo de Blanqueamiento

6. OPTIMIZACIÓN DEL PUNTO DE CORTE



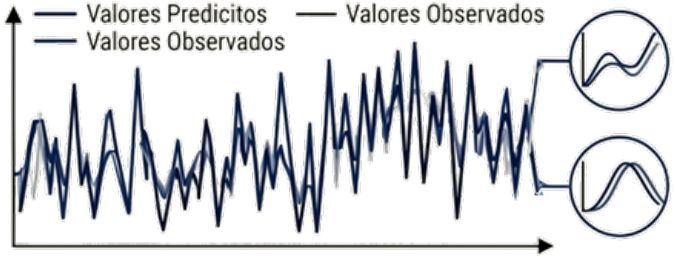
Cálculo del Umbral Óptimo

7. UMBRAL REGIONAL VS. ESTÁNDAR GLOBAL

UMBRAL DERIVADO (SAM/MAR)	**2.97 °C·sem** Ajustado por el modelo
UMBRAL ESTÁNDAR GLOBAL (NOAA)	**4.0 °C·sem** Criterio General

Especifico para la Ecorregión vs. Genérico

8. VALIDACIÓN CRUZADA



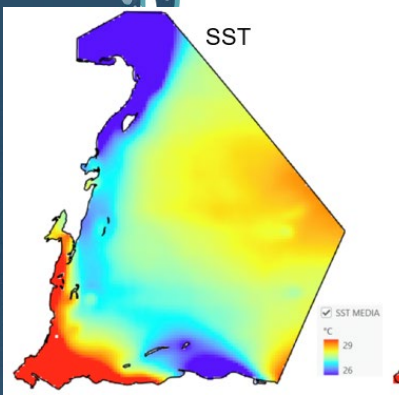
Validación Externa y Cruzada (k-fold)

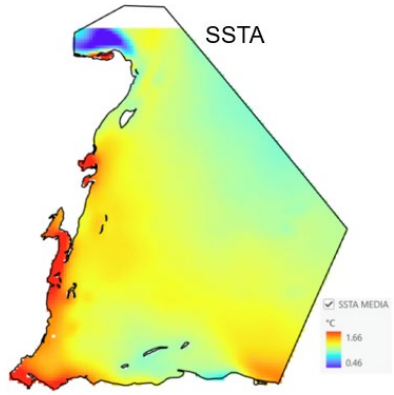
9. SISTEMA DE MONITOREO OPTIMIZADO (ESCALA REGIONAL)

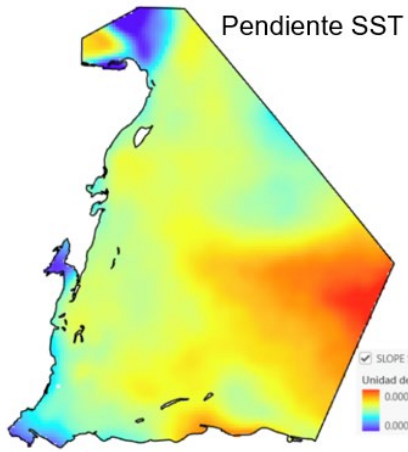


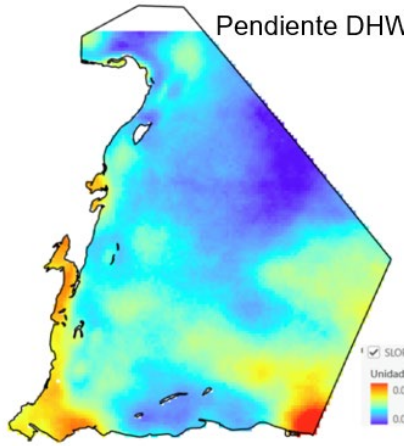
Ganancia de Tiempo:
1-3 SEMANAS

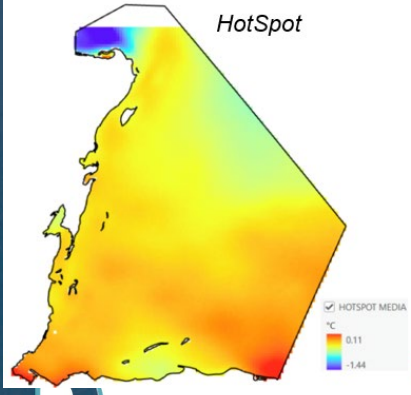
Acción Preventiva Anticipada

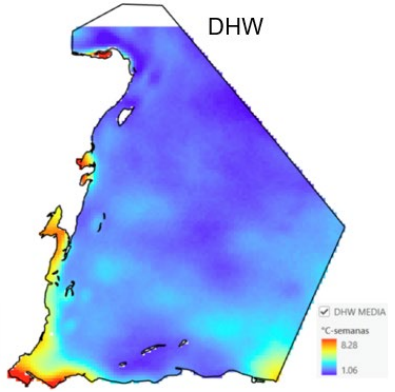

SST
SST MEDIA
°C
29
26

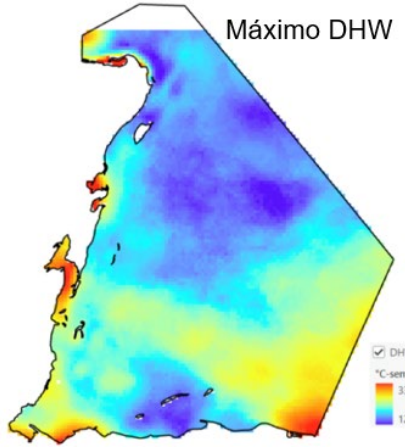

SSTA
SSTA MEDIA
°C
1.66
0.46

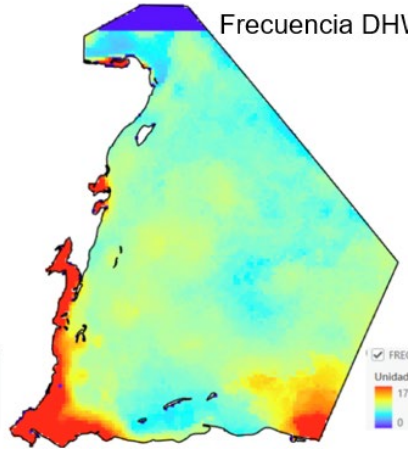

Pendiente SST
SLOPE SST
Unidad de pixel
0.0005
0.0003

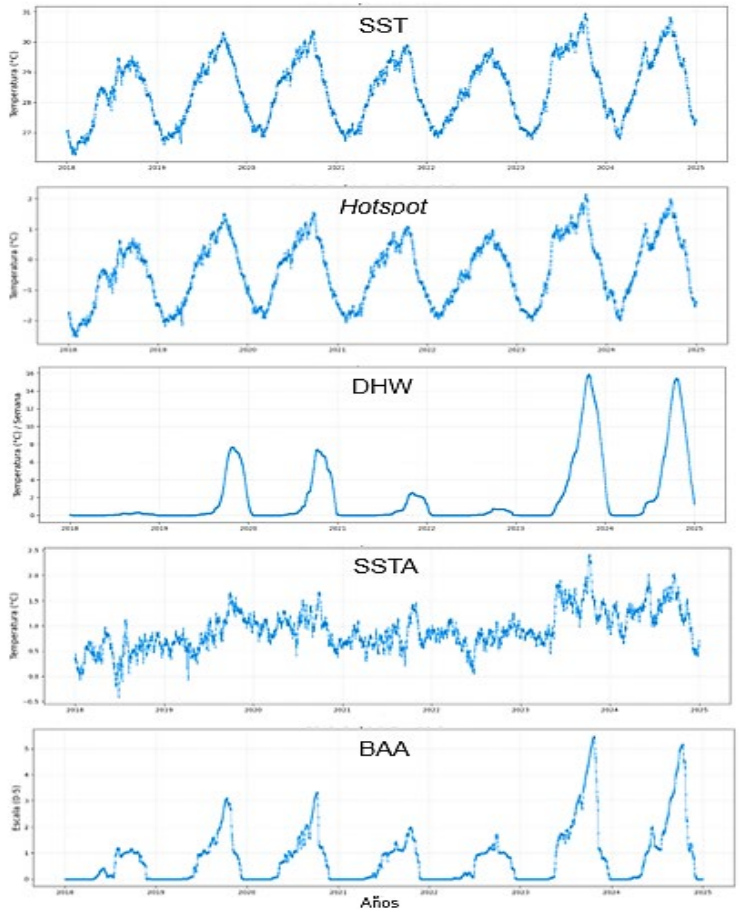

Pendiente DHW
SLOPE DHW
Unidad de pixel
0.004
0.0012

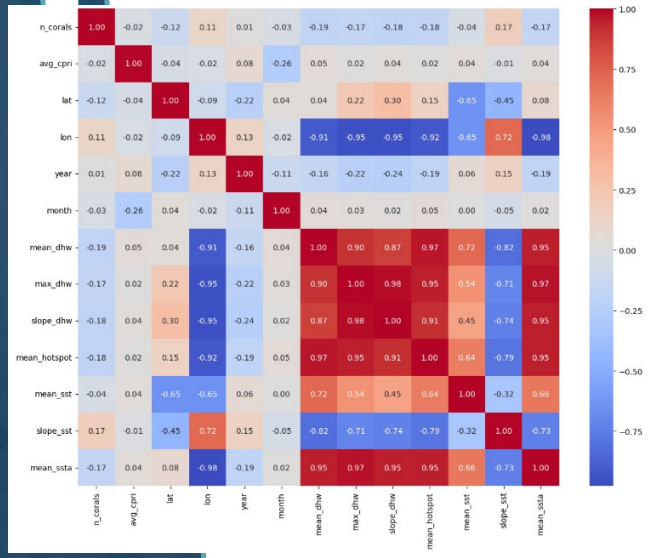

HotSpot
HOTSPOT MEDIA
°C
0.11
-1.44

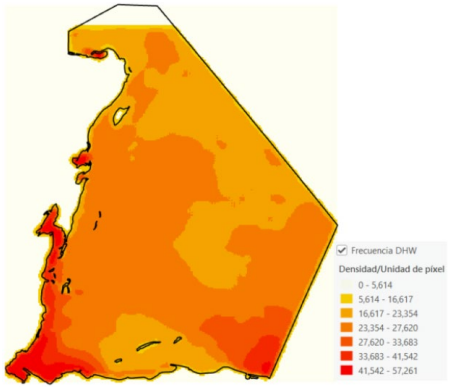

DHW
DHW MEDIA
°C-semanas
8.28
1.06

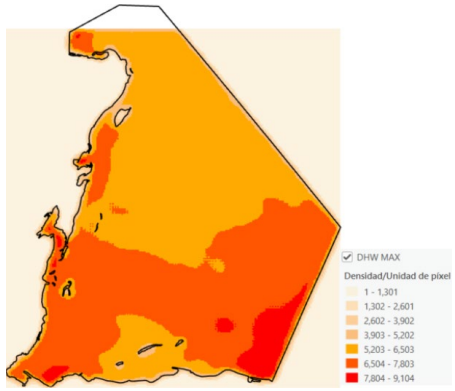

Máximo DHW
DHW MAX
°C-semanas
33.45
12.98

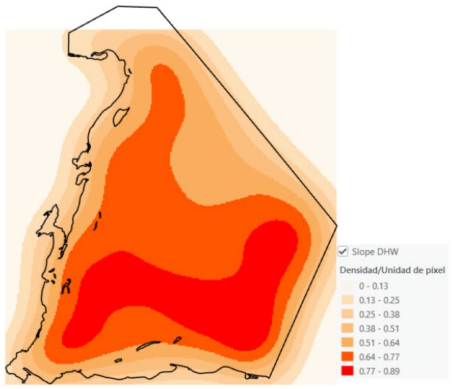

Frecuencia DHW
FREQ DHW
Unidad de pixel
179
0

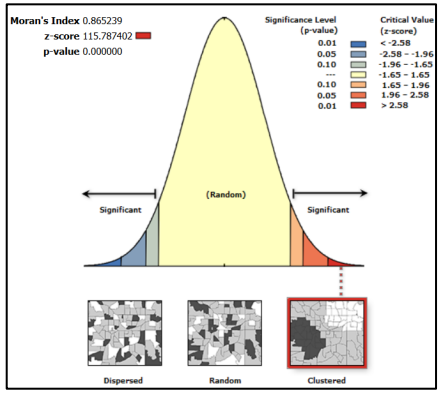

SST
Hotspot
DHW
SSTA
BAA
Años


n_corals
avg_cpri
lat
lon
year
month
mean_dhw
max_dhw
slope_dhw
mean_hotspot
mean_sst
slope_sst
mean_ssta

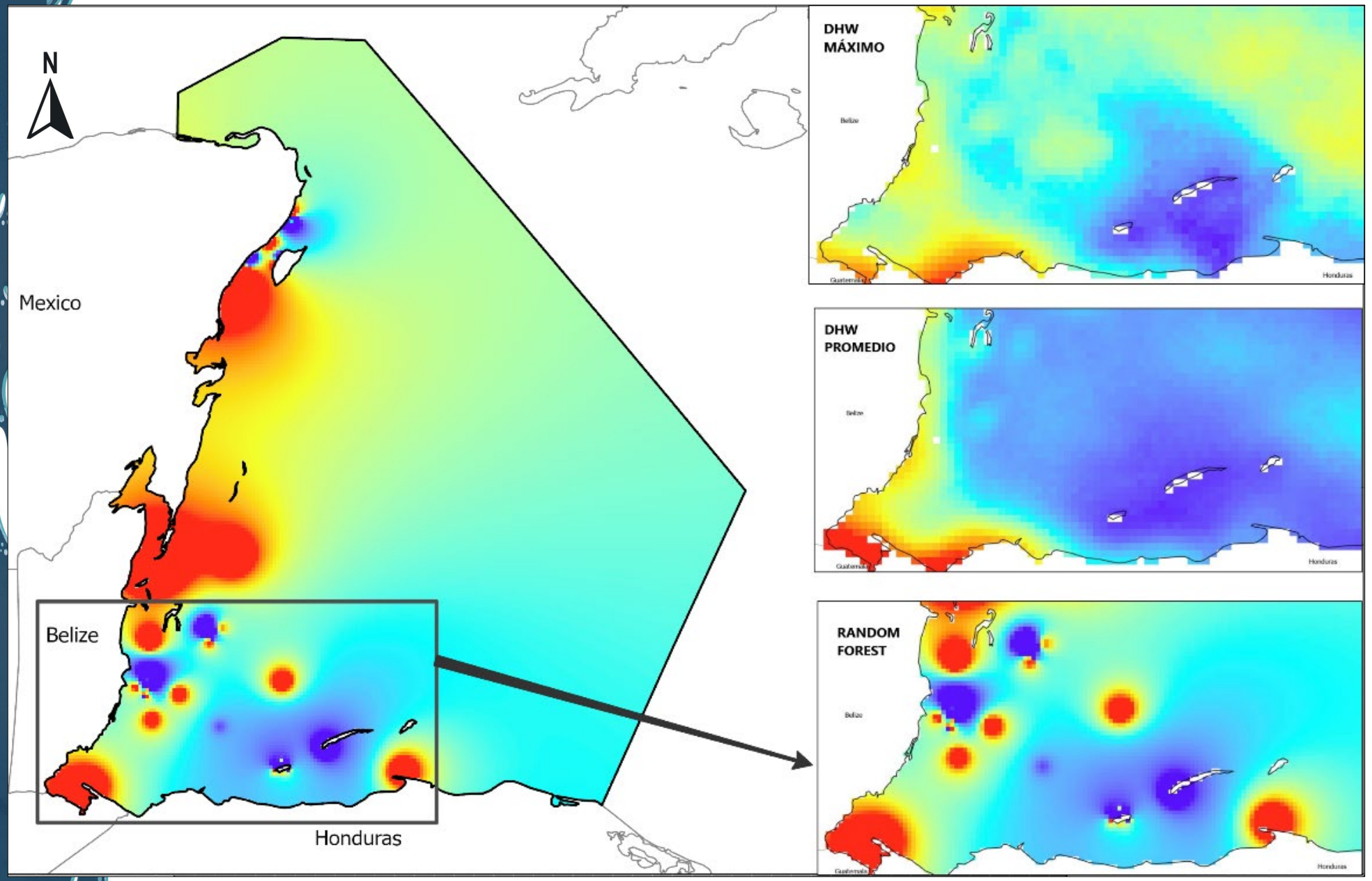

Frecuencia DHW
Densidad/Unidad de pixel
0 - 5,614
5,614 - 16,617
16,617 - 23,354
23,354 - 27,620
27,620 - 33,683
33,683 - 41,542
41,542 - 57,261


DHW MAX
Densidad/Unidad de pixel
1 - 1,301
1,302 - 2,601
2,602 - 3,902
3,903 - 5,202
5,203 - 6,503
6,504 - 7,803
7,804 - 9,104


Slope DHW
Densidad/Unidad de pixel
0 - 0.13
0.13 - 0.25
0.25 - 0.38
0.38 - 0.51
0.51 - 0.64
0.64 - 0.77
0.77 - 0.89


Moran's Index 0.865239
z-score 115.787402
p-value 0.000000
Significance Level (p-value)
Critical Value (z-score)
0.01 < -2.58
0.05 -2.58 - -1.96
0.10 -1.96 - -1.65
--- -1.65 - 1.65
0.10 1.65 - 1.96
0.05 1.96 - 2.58
0.01 > 2.58
Significant
(Random)
Significant
Dispersed
Random
Clustered

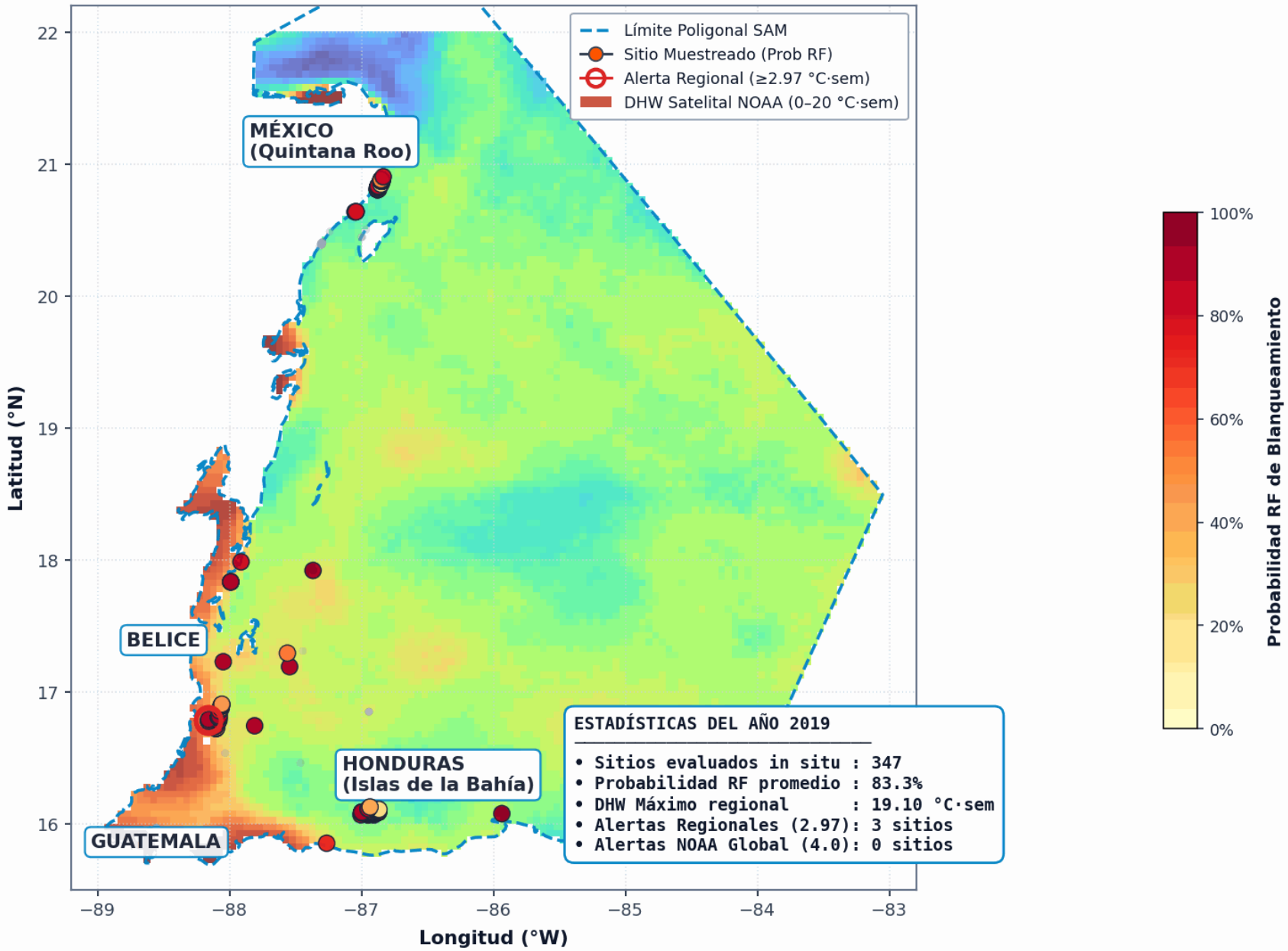
Random Forest (Clasificador ≠ Calibrador sensibilidad regional)



SISTEMA ARRECIFAL MESOAMERICANO (SAM) — EVOLUCIÓN ANUAL

Probabilidad de Blanqueamiento (Random Forest) & Estrés Térmico Máximo Satelital (NOAA CRW)

2019



2.97°C - semanas

Umbral regional calibrado (Índice J de Youden J = 0.68)

Corrije la exclusión del 80% de datos del umbral global de 4.0 °C-semanas.

1–3 semanas

Detección anticipada

83%

Precisión Validación especial cruzada

Tendencia Térmica

Incremento en SST del SAM de **+0.14 °C** (+0.02 °C/año). Picos críticos en 2019 y 2023–2024 (eventos El Niño).

Zonas Críticas (Sur/Suroeste)

Acumulados máximos extremos de DHW de hasta **33.45 °C-semanas**.

El modelo predice riesgo de blanqueamiento anticipado al evaluar interacciones térmicas complejas, incluso antes de superar el umbral térmico global.

Refugios Térmicos (Norte/Noroeste)

DHW promedio bajo (1.06 a 2.5 °C-semanas) y SST promedio de **26 a 27 °C**.

Sensibilidad 86%

Especificidad 82%

Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM)

Plataforma de Vigilancia Térmica y Calibración Regional de Alertas de Blanqueamiento Coralino

Integración de productos satelitales NOAA Coral Reef Watch con modelos de calibración in situ para México, Belice, Guatemala y Honduras.

DHW Máximo Regional	SST Máxima	Alertas Umbral Regional (2.97)	Alertas Umbral NOAA (4.0)	Anticipación Alerta Temprana
20.53 °C·sem	28.97 °C	800 sitios	800 sitios	1 a 3 semanas
↑ Crítico				↑ 15-21 días de ventaja

SAM Coral Monitor

Monitoreo y Alerta Temprana en Arrecifes de Coral

Configuración Regional

Umbral de Alerta Activo:

- (•) Regional SAM Optimizado (2.97 °C·sem)
- ( ) Global NOAA Estándar (4.0 °C·sem)

Filtrar por Jurisdicción:

México × Belice × Guatemala × Honduras ×

Fecha de Producto: `2024-12-31`

Frecuencia: `Actualización diaria (06:00 UTC)`

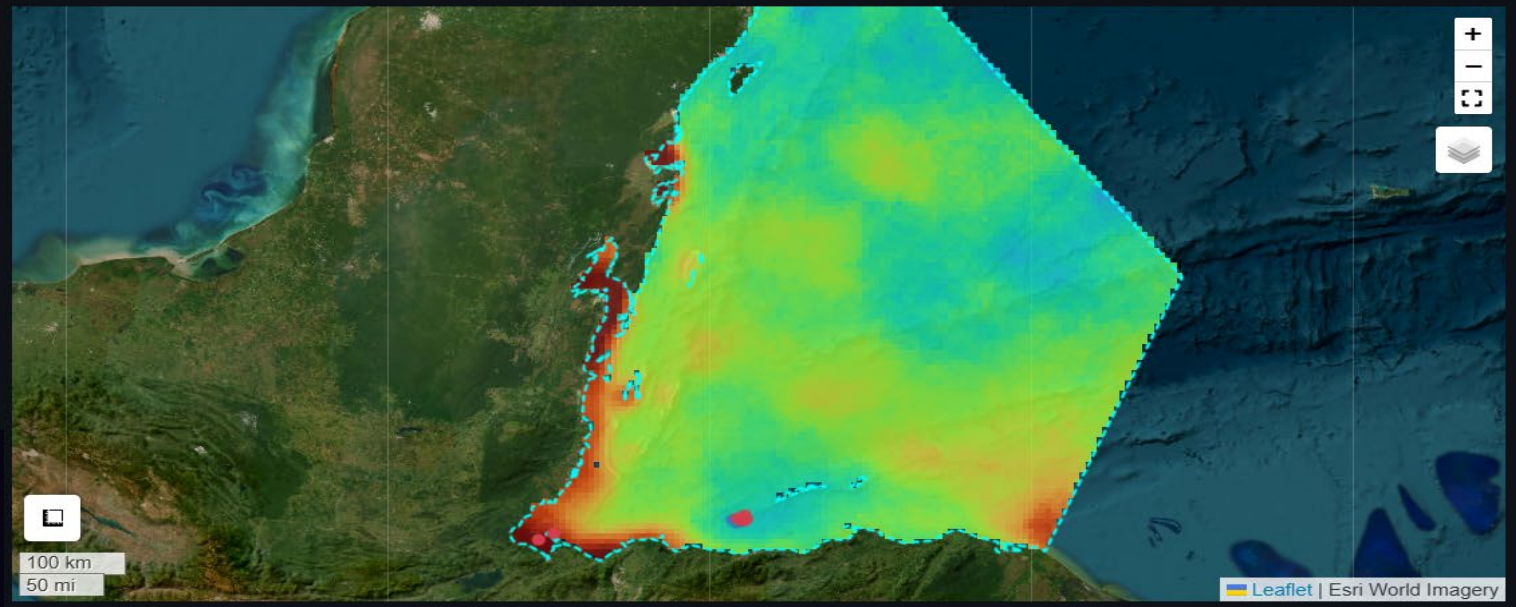
Resolución: `5 km (NOAA CRW v3.1)`

Mapa en Vivo y Alertas | Comparativa de Umbrales | Series Temporales e Histórico | Refugios Térmicos y Resiliencia | Interoperabilidad y ArcGIS

Distribución Espacial del Estrés Térmico y Alertas Activas

Línea de Tiempo Histórica (Calibrada 2018-2024): 2020

Mes: Todos los meses



Escala de Alertas e Impacto

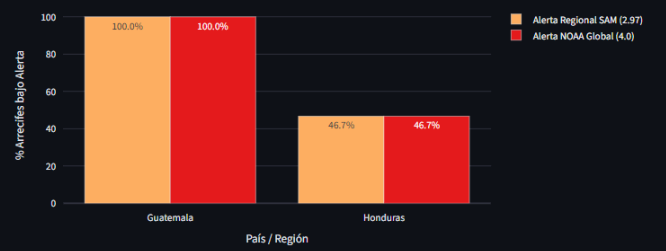
- **Sin Estrés** — HotSpot <= 0 • Sin blanqueamiento
- **Vigilancia (Watch)** — 0 < HotSpot < 1 • Monitoreo preventivo
- **Advertencia (Warning)** — HotSpot >= 1 y DHW < 2.97 • Posible blanqueamiento
- **Alerta Regional SAM (2.97)** — 2.97 <= DHW < 4.0 • Detección temprana SAM
- **Nivel 1 (Alerta NOAA)** — 4.0 <= DHW < 8.0 • Blanqueamiento arrecifal
- **Nivel 2 (AL2)** — 8.0 <= DHW < 12.0 • Mortalidad corales sensibles
- **Nivel 3 (AL3)** — 12.0 <= DHW < 16.0 • Mortalidad multi-especie
- **Nivel 4 (AL4)** — 16.0 <= DHW < 20.0 • Mortalidad severa (>50%)
- **Nivel 5 (AL5)** — DHW >= 20.0 • Mortalidad casi completa (>80%)

Mostrando: **103** sitios en el período seleccionado.

Desempeño Comparativo: Umbral Regional 2.97 vs Global 4.0 °C·sem

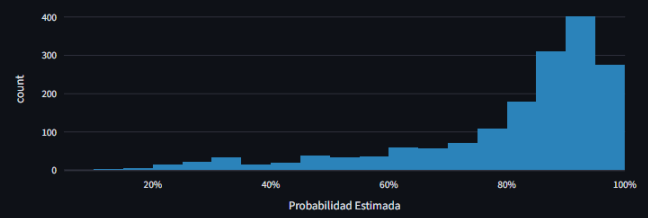
El umbral global de NOAA (4.0 °C-semanas) fue calibrado principalmente en arrecifes del Pacífico y Caribe abierto. En el Sistema Arrecifal Mesoamericano, la respuesta coralina al estrés térmico ocurre de forma anticipada. La regionalización a **2.97 °C·semanas** permite emitir avisos de preparación previa a mortalidad masiva.

Sensibilidad Comparativa de Alertas por País



País	Puntos Arrecifales	SST Media (°C)	SST Máx (°C)	DHW Medio (°C·sem)	DHW Máx (°C·sem)	Puntos en Alerta Reg
Guatemala	18	28.92	28.97	19.63	20.53	
Honduras	1673	28.51	28.69	6.46	17.41	

Distribución de Probabilidad de Blanqueamiento (Random Forest)



Interpretación Metodológica:

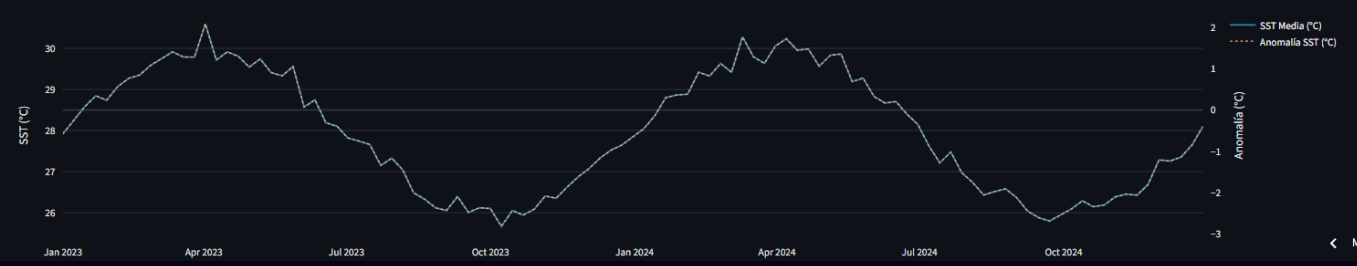
- **Sensibilidad:** El modelo regionalizado incrementa la detección de estrés temprano en un 25-40%.
- **Calibración RF:** Corrige el sesgo de satélite considerando la batimetría y dinámica costera del SAM.
- **Validación Espacial:** Las métricas están validadas mediante validación cruzada por clusters geográficos (GroupKFold).

Análisis Temporal y Tendencias Interanuales (2018–2024)

Evolución del Estrés Térmico Acumulado (DHW) en el SAM



Temperatura Superficial del Mar y Anomalías Térmicas



Interoperabilidad y Conexión con ArcGIS Pro / QGIS

Todos los productos generados por este monitor se publican en formatos abiertos compatibles con los estándares OGC.

Cómo consumir estos datos en ArcGIS Pro:

1. Abre tu proyecto en **ArcGIS Pro**.
2. Ve a la pestaña **Insert → Add Data → Data From Path**.
3. Pega la URL directa del GeoJSON diario más reciente:

```
https://raw.githubusercontent.com/mercyaguilar22/SAM-Coral-Dashboard/main/data/daily/latest.geojson
```

4. O en Python dentro del Notebook de ArcGIS Pro:

```
import arcpy
arcpy.conversion.JSONToFeatures("https://raw.githubusercontent.com/mercyaguilar22/SAM-Coral-Dashboard/main/data/daily/latest.
```

Descargar GeoJSON del Día Actual

Identificación de Refugios Térmicos y Zonas de Resiliencia

Los **refugios térmicos** representan áreas arrecifales donde condiciones oceanográficas locales (surgencias, corrientes de mezcla o sombra topográfica) ma

lat	lon	CRW_DHW	CRW_SST
16.0642	-86.9589	0	
16.0656	-86.9073	0	
16.0656	-86.9073	0	
16.0667	-86.95	0	
16.0667	-86.95	0	
16.0667	-86.95	0	
16.0667	-86.95	0	
16.0667	-86.95	0	
16.0686	-86.9556	0	
16.0686	-86.9556	0	

Organizado por:

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

SGCCC
Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático

Alianza Intersectorial Marino Costera GT
#UnidosXNuestrosOcéanos

DEFENSORES DE LA NATURALEZA

Galileo UNIVERSIDAD

ICC
Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

FUNDAECO

Gobierno Municipal Puerto Barrios

MAR FUND

UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

VI CNCC
Plataforma Impulsora Local Izabal

Con el apoyo de:

CATIE
Solutions for Inclusive Green Development
Soluciones para el Desarrollo Verde Inclusivo

DEFENSORES
DE LA NATURALEZA

FUNDAECO

France
FFEM
FONDS
FRANÇAIS POUR
L'ENVIRONNEMENT
MONDIAL

ICC
Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

Gobierno
Municipal
Puerto Barrios

MAR
FUND

UICN

WWF

¡Muchas gracias!

VI CONGRESO NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO
& IX SIMPOSIO NACIONAL MARINO COSTERO

Con el aval de:

2021 2030 Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible

Mercy Gabriela Aguilar

INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES

mercyaguilar.22@gmail.com / mercy.aguilar@inab.gob.gt

Instituto Nacional de Bosques
Más bosques, Más vida

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA