

El calentamiento global y su relación con el impacto en la pesquería en el Golfo de Nicoya, Costa Rica.

Global warming and its relationship with the impact on the fishery in the Gulf of Nicoya, Costa Rica

Omar Lizano Rodríguez ¹

¹ Profesor pensionado de la Universidad de Costa Rica, consultor en Oceanografía Física
Correo: omaglizano@gmail.com

Recibido: 26.09.18

Aprobado: 20.01.19

DOI:10.15517/isucr.v20i41.38837

Resumen

Se demuestra que tanto en el exterior, como en el interior del Golfo de Nicoya la temperatura superficial del mar está aumentando. También está aumentando el nivel del mar, la velocidad de los vientos, la evaporación, la transferencia de calor sensible, la energía del oleaje y la erosión costera. Las series de mayor resolución espacial que se estudiaron dentro del golfo, indican que la salinidad está aumentando y que la clorofila y oxígeno disuelto disminuyen. Todas estas variaciones son coherentes dentro de un marco de calentamiento global, con el cual se establecerá una mayor estratificación en la columna de agua, menor transferencia de nutrientes a las aguas superficiales, lo cual generará un desplazamiento de especies, y posible invasión de otras. El aumento del nivel del mar y el aumento en la energía del oleaje, indica que habrá más erosión costera, pérdida de hábitats marinos, desplazamiento de poblaciones costeras, salinización de pozos, etc. Los resultados en general obtenidos en este estudio, demuestran un impacto visible del calentamiento global en el Golfo de Nicoya y una proyección de pérdida de productividad en las aguas que ya están, o van a tener, consecuencias para las pesquerías de las zonas.

Palabras clave: calentamiento global; pesquerías; Golfo de Nicoya; aumento del nivel del mar; series de tiempo.

Abstract:

It is shown that both in the exterior and in the interior of the Gulf of Nicoya the sea surface temperature is increasing. Sea level, wind speed, evaporation, sensitive heat transfer, wave energy and coastal erosion are also increasing. The series of higher spatial resolution studied in the gulf indicate that salinity is increasing and that chlorophyll and dissolved oxygen decrease. All these variations are coherence within a framework of global warming. There will be greater stratification in the water column, and this implies a lower transfer of nutrients in to the surface waters. The variation in some oceanic variables implies a displacement of

species, and possible invasion of others. The rise in sea level and the increase in wave energy indicate that there will be more coastal erosion, loss of marine habitats, displacement of coastal populations, salinization of wells, etc. The overall results obtained in this study, show a visible impact of global warming in the Gulf of Nicoya, and a projection of lost productivity in waters that are already, or will have, consequences for the fisheries of the zones.

Key words: global warming; fisheries; Gulf of Nicoya; sea level rise; time series.

INTRODUCCIÓN

Tal y como ocurre en otros sectores productivos, se espera que la producción de pescado comestible, sufra los efectos debido al cambio climático (Anadón *et al.*, 2009, 149; Frost *et al.*, 2012,333). El cambio climático global, que implica el incremento de la temperatura media del planeta, lo que ha sido ampliamente documentado (IPCC, 2013, 5, 7, 9, 11), conlleva a una serie de otras alteraciones potencialmente dañinas para la pesca y la acuicultura, tales como: cambios en la salinidad del agua, acidificación, aumento en el nivel del mar, cambios en la concentración de oxígeno, incremento en la severidad y frecuencia de tormentas marinas, cambios en los patrones de circulación de corrientes marinas, cambios en los patrones de lluvia, cambios en los caudales de ríos, cambios en los flujos biogeoquímicos (Frost *et al.*, 2012, 333). Para evaluar el impacto del calentamiento global en la productividad del Golfo de Nicoya, se estudian las siguientes variables que tienen relación con el mismo.

Temperatura: El incremento de la temperatura tendrá un efecto directo en el desplazamiento de los límites geográficos de muchas especies (Southward y Boalch, 1994, 101; Southward *et al.*, 1995, 127). La velocidad del cambio podría acelerarse o retardarse de acuerdo al efecto que sobre las corrientes o la estacionalidad tengan los cambios en la atmósfera. Si se dan modificaciones sustanciales en la distribución estacional de las isotermas (líneas de igual temperatura), se podrían afectar las rutas migratorias y secundariamente la pesquería. Pero también habría una tendencia a la proliferación de especies subtropicales, convirtiendo en vulnerables a especies de nuestras costas. Estos cambios en la distribución de especies afectan no sólo a la aparición de especies de afinidad subtropical, sino también a un incremento del riesgo de invasión por especies exóticas de origen subtropical introducidas de forma accidental (Anadon *et al.*, 2009, 149). Asimismo, el aumento de las temperaturas también afectará a los procesos fisiológicos de los peces, dando lugar a efectos tanto positivos

como negativos sobre las pesquerías y los sistemas de acuicultura (OLDEPESCA, 2009, 66, 78).

Salinidad: Se espera que debido al efecto combinado de los cambios de temperatura y de salinidad resultantes del calentamiento global, se reduzca la densidad de la capa superficial del océano, aumente la estratificación vertical y se registren modificaciones en la mezcla de la columna de agua. Es probable que a consecuencia del incremento de la estratificación vertical y de la estabilidad de la columna de agua en los océanos, se reduzca la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (zona alumbrada) y que, por lo tanto, en un mundo que se ha recalentado, la producción primaria y secundaria disminuya (FAO, 2008, 21).

Clorofila: Las observaciones globales por satélite documentan baja clorofila (relacionada con las microalgas) en las grandes corrientes giratorias de los océanos y una relación inversa entre las anomalías en la temperatura de la superficie del mar y las concentraciones de clorofila del fitoplancton (Behrenfeld *et al.*, 2006, 752). La temperatura del agua influencia directamente el crecimiento del fitoplancton y su razón metabólica. La producción aumenta con el aumento de la temperatura, hasta alcanzar un máximo específico para cada especie, después del cual las tasas disminuyen rápidamente (Henson *et al.*, 2010, 621).

Oxígeno disuelto: Como consecuencia del calentamiento global, se cree que el océano se volverá menos oxigenado debido a una menor solubilidad del oxígeno en agua más caliente y un aumento en la estratificación oceánica en la capa superficial (Anadón, 2009, 149). Mayores afectaciones se podrían dar por ejemplo, durante un Fenómeno de El Niño. En este caso, la temperatura puede llegar a valores extremos lo que conllevaría a valores muy bajos de oxígeno disuelto que podrían ser letales para las especies y/o afectar su crecimiento (FAO, 2011, 4, 17).

Nivel del mar: El aumento del nivel del mar contribuye a aumentar los impactos en las zonas costeras, incluyendo la erosión, inundación de zonas someras, aumentar los daños por tormentas, modificación de los estuarios y de los hábitats, modificación de los niveles freáticos e intrusión salina en los cauces fluviales y aguas subterráneas. En combinación con cambios en el clima marítimo, la erosión, la inundación, tanto la temporal como la permanente, y la afección a las obras marítimas y la explotación de los puertos, son

consecuencias directas de los cambios en las dinámicas costeras. Entre otros elementos, los lugares de desembarque para productos pesqueros, embarcaciones y sistemas de cultivos marinos, así como la infraestructura en la línea de costa en las aguas costeras, se podrán ver afectados por cambios tanto en las condiciones medias (ej. temperatura) como en las extremas (ej. oleaje y nivel del mar en tormentas). Estos problemas, en concreto, tienen un carácter global y, sin duda, se están siendo acrecentados por el efecto del cambio climático (Anadón et al., 2009, 149). El reciente estudio AR5 del IPCC (2013, 5, 7, 9, 11), actualizó los escenarios de los informes anteriores. Escenarios similares tienen Cazenave y Lovel (2010, 165) y Dickson *et al.* (2007). Ellos coinciden en un probable escenario extremo de 0,40m de aumento del nivel del mar para el 2050 y en 1,20m para el 2100.

Precipitación: Dado que las descargas de los ríos responden a cambios en los regímenes de precipitación, el cambio climático puede afectar, en última instancia, el flujo y la calidad del agua dulce que son insumos para los hábitats marinos y costeros (Osborn *et al.*, 2000, 347; Roessig *et al.*, 2004, 8; Graham y Harrod, 2009, 1145). También se habla de un refrescamiento (disminuyendo la salinidad) del Océano Pacífico debido a un incremento de la actividad del ciclo hidrológico (Bindoff *et al.*, 2007). Tal y como se describe en el estudio de Lizano (2016, 143; 2008, 36), el Pacífico Tropical Este posee el menor mínimo de salinidad de los océanos tropicales, influencia que puede alcanzar los 95°W, incluyendo los mares de Costa Rica, mínimo que parece estar refrescándose (menos salino).

Viento: Variaciones en la circulación atmosférica repercuten en las corrientes marinas y éstas pueden modificar el transporte y supervivencia de los estadios larvarios y juveniles. A mayor escala pueden introducir cambios en la cadena trófica. Indirectamente, los cambios climáticos también afectan a los sistemas marinos. La producción marina, primaria y secundaria, puede verse afectada y con ello los alimentos disponibles para las larvas de peces, lo que determinará el grado de éxito del reclutamiento, y a mediano plazo el tamaño de las poblaciones (Anadón, 2009, 156; GLOBEC, 2003, 2, 16; ICES 2003, 34).

Oleaje: Siempre existe la probabilidad de tener varios fenómenos océano-atmosféricos superpuestos (Lizano y Salas, 2001, 175; Lizano y Lizano, 2010, 215, 277). Así, por ejemplo, las inundaciones en la costa pueden ser una combinación entre el nivel del mar, las sobreelevaciones debidas al efecto del viento y de la presión atmosférica, y la contribución del oleaje. Igualmente, en los problemas de erosión, la contribución entre el

nivel del mar y los cambios en el oleaje generan distintos problemas erosivos, en muchos casos combinados, y exacerbados por la acción humana en la costa (FAO, 2008, 144; Lizano, 2013, 8). Al mismo tiempo, cambios sostenidos en el tiempo en las condiciones de oleaje pueden provocar cambios en el balance sedimentario y erosión costera. El estudio de Wang *et al.* (2014, 1, 5, 6) realizó proyecciones estadísticas de los cambios en las alturas de las olas oceánicas utilizando la información sobre la presión atmosférica superficial del mar de los modelos climáticos globales CMIP5 (Modelo de Intercomparación Compartida Modelo 5) para el siglo XXI. Los resultados muestran aumentos significativos de la altura de las olas en los trópicos, especialmente en el Pacífico Tropical Este.

Estudios en el Golfo de Nicoya: Chaves y Birkicht (1996, 41, 45) concluyeron que la principal fuente de nitrógeno y fósforo en el Golfo es el Agua Sub-superficial Ecuatorial (ESW, por sus siglas en inglés), que es mezclada en la columna de agua por los vientos y la turbulencia e importada al Golfo por advección accionada por el viento. La turbidez y el oxígeno disuelto en la parte interna del Golfo parecen estar fuertemente asociados a las descargas de agua dulce y materia orgánica del Río Tempisque. Esta alta turbidez coincide con una disminución estacional del oxígeno disuelto. Esta disminución es probablemente causada por la oxidación de la materia orgánica en el sistema por el Río Tempisque, cuya descarga puede elevar las concentraciones de sólidos suspendidos a 800 mg/l en la parte interna durante la temporada de lluvias (Kress *et al.*, 2002, 51). Se encuentra también que las concentraciones de oxígeno disuelto tienden a ser débilmente anti-correlacionadas con concentraciones de clorofila, tendencia también observada por Kress *et al.* (2002, 60) in 1995-1996. Tal anti-correlación puede sugerir que el consumo de oxígeno durante la descomposición sub-superficial de la materia orgánica excede el oxígeno producido por fotosíntesis y liberado por mezcla con la atmósfera (Palter *et al.*, 2007, 427). En los trópicos, durante los períodos de alta descarga de los ríos, la oxidación de material orgánico fino en las aguas de un estuario, comúnmente lleva a la sub-saturación de oxígeno (Eyre y Balls, 1999, 317). La estratificación vertical de la salinidad también juega un papel en la reducción de la concentración de oxígeno del Golfo de Nicoya, ya que la entrada de agua dulce puede reducir el intercambio de gas con las aguas de fondo (Palter *et al.*, 2007, 432). El Golfo de Nicoya es un ecosistema que ha sido sobre-explotado. Esta sobre-pesca ha provocado una reducción de la población reproductora, lo que tiende a generar fallos en el reclutamiento. El

uso de artes de pesca que no permiten un primer desove en las especies y el excesivo esfuerzo de pesca trae consigo la reducción de las tallas de los especímenes. La pesca desmedida de los consumidores primarios (anchoas, sardinas, camarones) deja sin alimento a los depredadores (corvinas, robalos, pargo mancha, barracuda, jureles y otros), los cuales tendrán que emigrar en busca de otras zonas de alimentación. Si se aprecia, en el fondo son las mismas consecuencias que nos espera con el cambio climático. Conforme este fenómeno se vaya incrementando, la presión sobre los recursos del golfo será el doble (BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se consultaron bases de datos (descripción en Apéndice A) sobre precipitación, salinidad superficial del mar, temperatura superficial del mar, nivel del mar, clorofila, presión atmosférica en superficie, velocidad del viento, altura de ola y otras variables océano-atmosféricas, que pueden ser pertinentes para evaluar las condiciones ambientales en esta región. Los datos fueron filtrados desde distribuciones globales para ubicar la mejor posición en aquellas coordenadas (Cuadro 1), que según su resolución, fuesen las más cercanas al Golfo de Nicoya, como muestra la Fig. 1 siguiente:

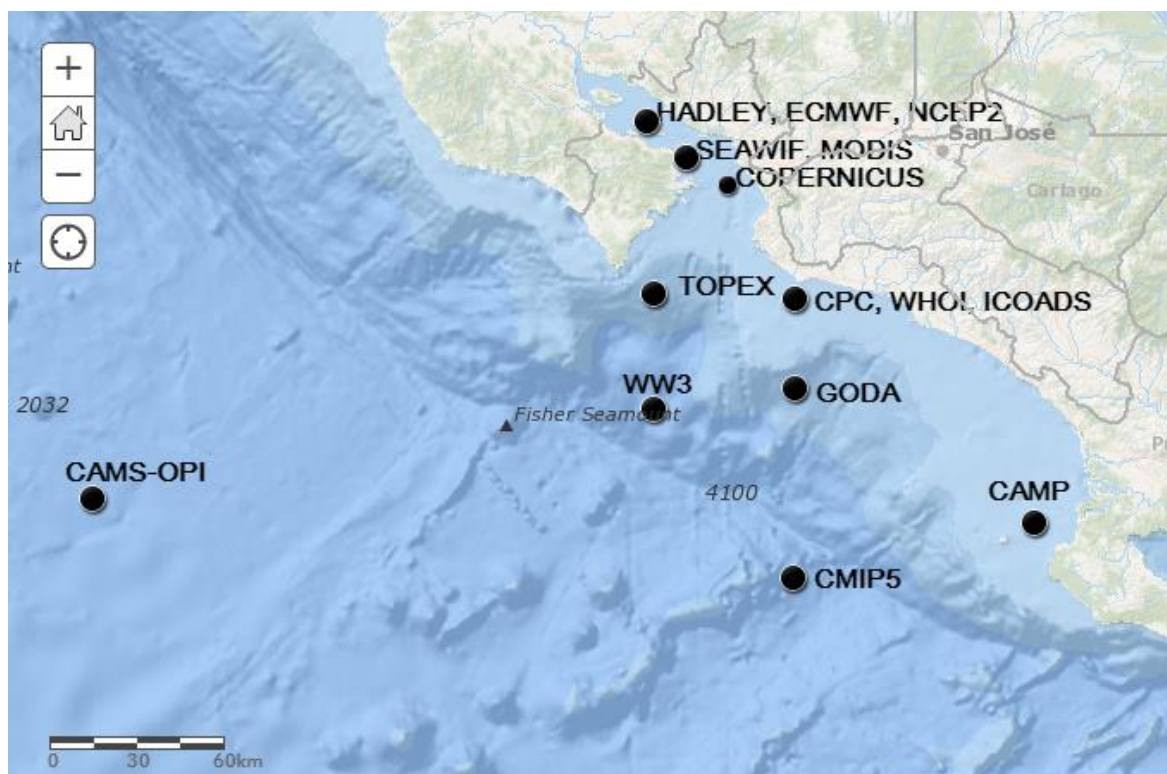


Fig. 1. Posiciones centrales de las rejillas de los modelos numéricos de donde se extrajeron las series analizadas en este trabajo (ver identificación de nombres en Apéndice A).

Estas variables son resultados de modelos numéricos, observaciones y mediciones en tierra y en el océano, boyas oceánicas, satélites, derivadores lagrangeanos (derivan con las corrientes), etc. (ver detalle en Apéndice A). La mayoría de los datos que existen son representativos de la parte externa del Golfo que, como debe inferirse, tienen relación con la productividad de las aguas y con la pesca.

A las series se le han calculado sus estadísticas más importantes: promedios, máximos y mínimos, y lo que es más importante para este trabajo: la tendencia (pendiente de la recta) de esas series. Para esto último se evaluó la robustez de esas tendencias mediante regresión lineal (mínimos cuadrados) utilizando la distribución t ($> \pm 1.645$, para una significancia del 95% para series con más de 100 valores (Blank, 1980, 268)). El programa MyStat fue usado para analizar la regresión lineal de las series.

RESULTADOS.

Análisis de las series océano-meteorológicas.

El resultado del análisis estadístico de las series de las variables estudiadas, se muestra en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Estadísticas de las variables océano-meteorológicas.

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv St	t-student
Temperatura del mar HADLEY (°)	28.06	22.97	34.26	1.19	8.344
Temperatura del mar ECMWF (°)	27.95	25.04	30.75	1.01	12.328
Temperatura del mar WHOI (°)	28.19	25.89	30.5	0.82	5.717
Temperatura potencial del mar GODA (°)	301.19	298.09	303.53	0.86	1.435
Temperatura del mar COPERNICUS (°)	30.40	25.17	34.17	1.49	9.400
Salinidad HADLEY (psu)	33.68	30.53	34.83	0.49	-3.672
Salinidad del mar GODA (Kg/Kg)	0.03218	0.02849	0.03411	0.001	-8.947
Salinidad del mar ECMWF (psu)	31.61	27.69	34.09	1.03	-1.440
Salinidad del mar COPERNICUS (psu)	31.50	25.00	34.33	1.48	3.860
Oxígeno disuelto COPERNICUS (mg/m**3)	207.06	197.15	219.58	3.76	0.641
Fitoplancton CMIP5 (mol m-2 s-1)	0.69	0.54	0.89	0.05	3.096
Concentración de clorofila SEAWIF (mg/m**3)	7.33	0.13	57.75	6.38	-0.008
Concentración de clorofila MODIS (mg/m**3)	10.16	1.43	44.23	7.25	-1.419
Concentración de clorofila COPERNICUS (mg/m**3)	207.06	197.16	219.58	3.76	-0.736
Nivel del mar ECMWF (m)	0.33	0.16	0.68	0.07	0.614
Anomalía del nivel del mar TOPEX (m)	0.35	-17.25	21.91	7.89	-1.129
Precipitación CPC (0.1x mm/día)	75.14	0	258.76	49.16	-0.694
Precipitación CAMS-OPI y OLR (mm/día)	7.02	0.62	16.30	3.98	-9.561
Precipitación CAMP (mm/día)	6.61	0.5	17.81	4.19	-2.080
Presión atmosférica ICOADS (mb)	1010.34	1005.47	1017.50	1.39	1.095
Presión atmosférica NCEP2 (Pasc)	101090.81	100868.0	101324.0	69.23	-2.159
Velocidad del viento ICOADS (m/seg)	4.61	2.04	7.70	1.46	7.201
Velocidad del viento NCEP2 (m/seg)	3.78	1.27	9.08	1.58	5.283
Velocidad del viento WHOI (m/seg)	3.09	1.66	8.06	0.93	18.300
Altura de ola ($H_{1/3}$) WW3 (m)	1.36	0.19	3.67	0.37	19.587
Período de ola WW3 (seg)	12.92	2.58	23.58	2.64	54.016
Humedad relativa ICOADS (%)	81.47	58.10	100.00	6.19	0.957
Razón de evaporación WHOI (cm/año)	101.55	46.60	345.80	39.17	13.784
Humedad específica WHOI (g/Kg)	17.72	15.23	19.66	0.79	1.508
Flujo de calor sensible WHOI (W/m/m)	13.50	6.30	27.60	3.22	5.855
Flujo de radiación neta de onda larga WHOI (W/m/m)	63.31	11.3	98.40	16.76	1.434

Temperatura Superficial del Mar (TSM): Todas las series tienen promedios similares, con mayor variabilidad en los valores (desv St) en la serie HADLEY, la cual también tiene el menor mínimo y el mayor máximo. La serie de Copernicus tiene el promedio más alto, y es la serie de mayor resolución espacial y más cercana a los sitios de interés.

Todas las series muestran máximos relativos de temperatura asociados al fenómeno El Niño, como por ejemplo en los años 81-82 y 97-98, con la máxima lectura de 34,26°C (serie HADLEY, Cuadro 1). Es importante recordar que este set de datos HADLEY se basa en observaciones en el océano.

Todas las series muestran una tendencia positiva, y solo la serie GODA, no es robusta significativamente. Estos resultados refuerzan la evidencia de que la TSM está aumentando frente a esta región y dentro del Golfo.

Salinidad: Los promedios de las series de salinidad son similares (31,6 a 33,7 psu), reflejando en sus mínimos (27,7 a 30,51 psu) la influencia de las descargas de agua dulce del Golfo de Nicoya, valores que también son reportados por Peterson (1958) y Brenes *et al.* (2001). El menor valor lo muestra la serie de Copernicus, posiblemente por estar más cerca de la desembocadura del Grande de Tárcoles (Fig. 1).

Casi todas las series muestran una tendencia negativa, siendo las series de HADLEY y GODA, que muestran estadísticos robustos.

La serie de mayor resolución espacial de Copernicus, y dentro del Golfo, muestra una tendencia positiva y estadísticamente robusta.

Clorofila: La serie más larga estudiada (CMIP5) que calcula la producción primaria de carbono orgánico (todo tipo de fitoplancton), muestra una tendencia positiva y robusta estadísticamente (Cuadro 1), pero su resolución es de 1°C, y además, el nodo (Fig. 1) está mucho más alejada del Golfo.

Las series del satélite SEAWIF y el MODIS, que tiene alta resolución espacial y representa la región al interior del golfo, muestran una tendencia negativa, pero no son robustas estadísticamente (Cuadro 1), ... aunque la serie MODIS, se aproxima a eso.

El estudio adicional con la serie Copernicus de alta resolución espacial y en la parte externa del Golfo, también es negativa, pero tampoco es robusta estadísticamente.

Nivel del mar: En el análisis de las series de tiempo del nivel del mar, una indica que existe una tendencia positiva (ECMWF), y la otra negativa (TOPEX). Ninguna de las series es estadísticamente robusta, por lo que no se puede inferir ningún escenario de cambio de estos datos.

Sin embargo, un estudio más local sobre los datos del mareógrafo de Puntarenas, muestra una tendencia positiva y estadísticamente robusta ($t = 9,14$, al 95% de significancia), como se muestra en la Figura 2.

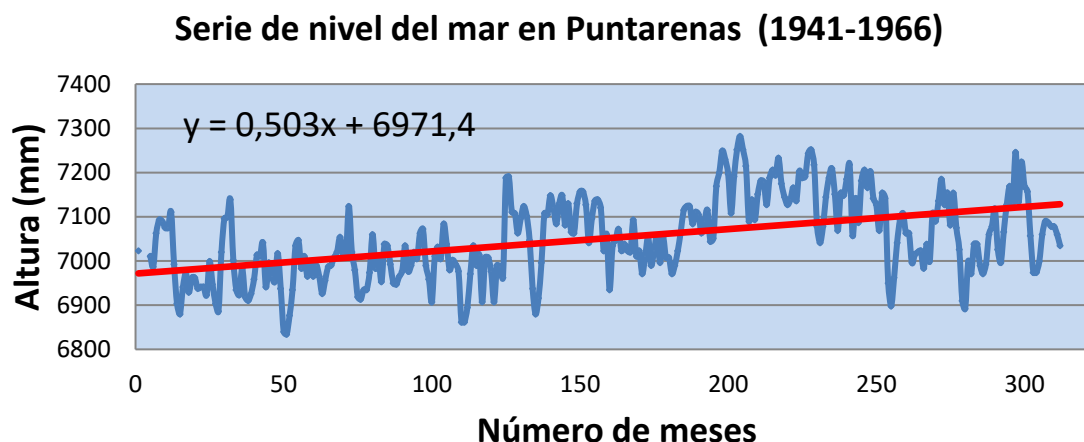


Figura 2. Variación del nivel del mar en la punta de Puntarenas y su línea de tendencia.

Para asegurar de que esta tendencia es real, se hizo un análisis adicional con la serie del mareógrafo de Balboa en Panamá, una serie que fue administrada por los norteamericanos por mucho tiempo y que siguió en funcionamiento una vez se hizo el traspaso del canal de los norteamericanos a los panameños. Esta serie tiene un estadístico t (al 95% de significancia) de 14,343.

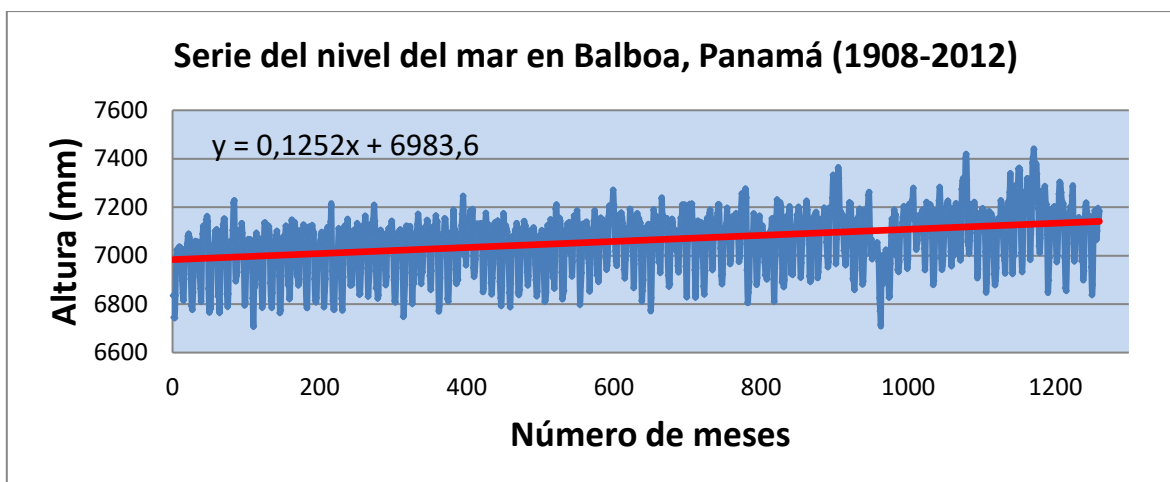


Figura 3. Variación del nivel del mar en Balboa, Panamá, y su línea de tendencia.

Precipitación: El Cuadro 1 muestra que las series de precipitación estudiadas tienen promedios similares, siendo la serie más larga y de mayor resolución espacial (CPC), la que tiene mayor desviación estándar.

Todas estas series muestran una tendencia negativa. Son robustas estadísticamente las series más cortas (CAMS_OPI, OLR y CMAP). La serie más larga CPC, muestra una tendencia positiva, pero no es robusta estadísticamente.

Viento: Todas las series estudiadas muestran una tendencia positiva y estadísticamente robustas, por lo que se puede asegurar que el viento está aumentando frente a la región del Golfo de Nicoya.

Particularmente la serie WHOI, muestra una tendencia positiva muy marcada a partir del año 2002, como muestra la siguiente Fig. 4.

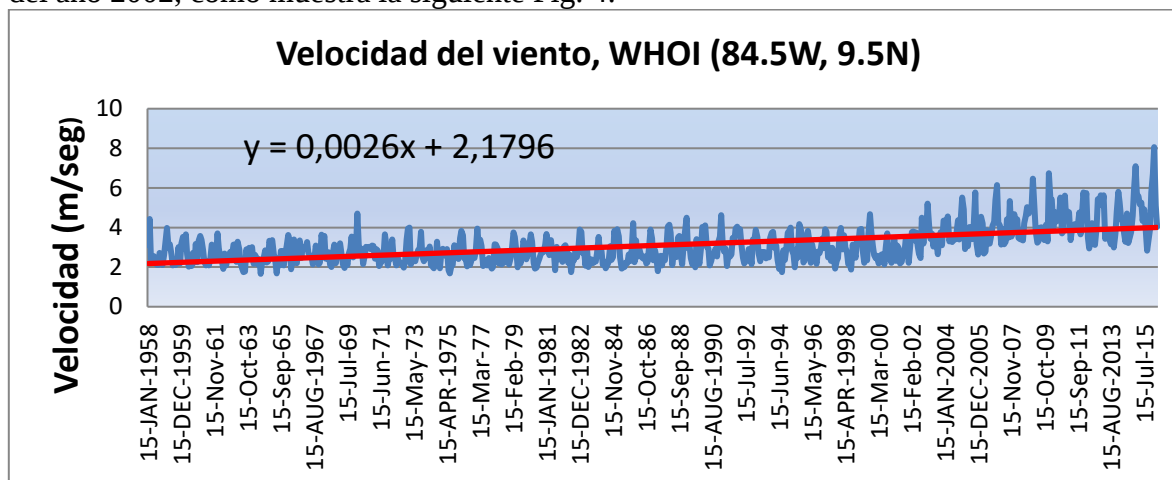


Fig. 4. Variación de la velocidad del viento y su línea de tendencia.

Oleaje: La serie de la altura y período de la ola también muestra una tendencia positiva y robustez estadísticamente.

La serie de períodos de olas muestra un cambio significativo en los períodos de las olas aproximadamente a partir del 2010, con menos períodos cortos y más largos de las olas. Esto significa más energía de oleaje desde tormentas remotas (marejadas de fondo).

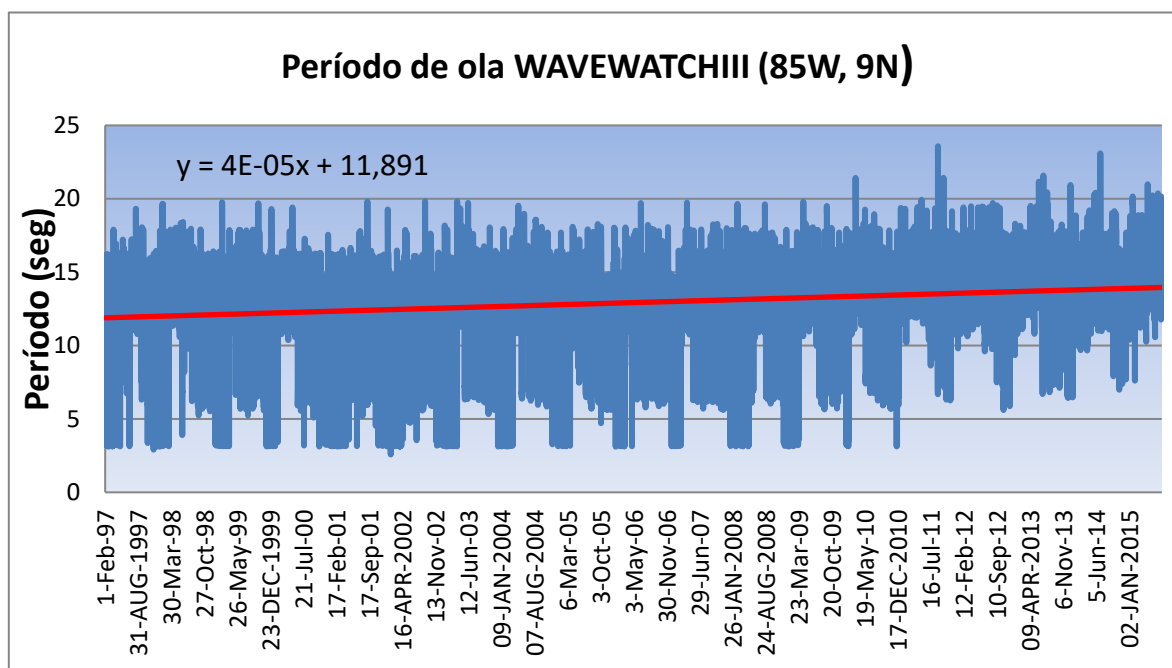


Fig. 5. Variación del período de ola y su línea de tendencia.

Otras variables oceanográficas: Las variables adicionales estudiadas, que pueden servir para explicar algunos procesos que se están dando en la región, y/o para plantear escenarios futuros, como: humedad relativa, razón de evaporación, flujo de calor sensible, flujo de radiación neta de onda larga, muestran tendencias positivas frente al Golfo de Nicoya. De ellas, las series de la razón de evaporación (WHOI) y el flujo de calor sensible son estadísticamente robustas. Las tendencias de estas variables son coherentes con un aumento de temperatura superficial del océano en la zona.

Discusión.

Desde los estudios de Brenes y Saborío (1994, 87) se señala que en Costa Rica, tanto en la vertiente del Caribe como en la vertiente del Pacífico, hay una tendencia negativa de precipitación en al menos el 75% del Territorio Nacional. Estudios más recientes, de mayor resolución espacial con estaciones en tierra (Hidalgo *et al.*, 2016), indican que efectivamente, en regiones adyacentes al Golfo de Nicoya, hay una tendencia negativa de precipitación. Además, el informe del IPCC (2001, 704) señala que en sector del Pacífico de Costa Rica habrá una disminución en la precipitación del 25% para el 2100 (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=524>). Esto demuestra que los análisis particulares que se han hecho para este trabajo para posiciones oceánicas, también son consistentes con estudios más formales y precisos en tierra. Este mismo estudio de Hidalgo *et al.* (2016), muestra que la tendencia de la precipitación es positiva en regiones al este de Panamá y sobre Colombia. Esto genera más estratificación vertical en las aguas del Golfo (exterior e interior) lo cual provoca menor capacidad de mezcla en la columna de agua. Esto conlleva a un menor transporte de nutrientes desde capas sub-superficiales, y desde afloramiento locales (Brenes *et al.*, 2003, 1127), o desde las mismas aguas sub-superficiales que penetran el Golfo y que son una de las mayores fuentes de nutrimentos en el Golfo (Palter *et al.*, 2007, 427).

En la comunidad científica existe el consenso de que el planeta se calentará entre 1,1°C y hasta 3-4°C, en el próximo siglo (IPCC, 2013, 21, 23). Esto tendrá mayores repercusiones en las pesquerías del mundo entero, y por supuesto que en el Golfo de Nicoya, donde se prevén desplazamientos o migraciones de especies, desde o hacia al Golfo, aguas menos oxigenadas y menos productivas en general.

Un dato interesante es que la salinidad en el mar frente al Golfo tiene una tendencia a la disminución (GODA, Apéndice A, Cuadro A-1). Una relación curiosa, pues debería ser inversa: a menor precipitación en la región de Guanacaste, mayor salinidad, como sucede en el interior del Golfo. Es posible que la salinidad esté reflejando una condición de transporte de corrientes desde el mínimo superficial más bajo de los océanos tropicales (Lizano, 2016), ubicado frente al Pacífico Colombiano. Como se sabe, la precipitación al sur de Costa Rica, Panamá y Colombia tiene un escenario de aumento (Hidalgo et al., 2016). Pero además, se ha probado que el Pacífico Tropical Este tiene un refrescamiento de las aguas superficiales por un aumento de la actividad de ciclo hidrológico (FAO, 2012, 18), que estaría apoyando la tesis de disminución de salinidad al frente del Golfo de Nicoya.

Sólo se tuvo variables propiamente frente a la región de Paquera-Tambor de concentración de clorofila y, aunque las series no son robustas estadísticamente, ambas tienen tendencia a la disminución. Esto podría estar indicando ya, una estratificación por temperatura en esta región.

También está aumentando la velocidad del viento, la altura y el período de las olas. Esto generará más erosión en las playas del Golfo, pérdida de hábitats marinos, y un impacto en las comunidades costeras.

En resumen, se demuestra que tanto en el exterior, como en el interior del Golfo de Nicoya la temperatura superficial del mar está aumentando. También está aumentando el nivel del mar, la velocidad de los vientos, la evaporación, la transferencia de calor sensible, la energía del oleaje y la erosión costera. Los estudios de alta resolución espacial en tierra, demuestran que la precipitación está disminuyendo en la región de Guanacaste. Las series de mayor resolución espacial (Copernicus) que se estudiaron en el Golfo, indican que la temperatura y la salinidad aumentan, que la clorofila y oxígeno disuelto disminuyen. Todo estas variaciones son coherentes, y es lo esperado en un marco de calentamiento global (Anadón et al., 2001, 149, 154, 155, 156; FAO, 2008, 2, 3, 19; OLDEPESCA, 2009, 66, 78). Algunas de estas variables están ligadas íntimamente a la productividad actual (Southward y Boalch 1994, 101, Southward *et al.* 1995, 127) y futura de las aguas de las aguas del Golfo de Nicoya, y son una clara indicación de lo que está sucediendo en la región (BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013, 14, 15, 16; Moreno y Alfaro, 2018, 18), y que permiten extrapolar hacia escenarios futuros. Habrá mayor estratificación en las aguas, y esto implica una menor

transferencia de nutrientes en la columna de agua (FAO, 2008, 21). La variación en algunas variables oceánicas, implica un desplazamiento de especies, y posible invasión de otras (Anadón *et al.*, 2009, 156). El aumento del nivel del mar y el aumento en la energía del oleaje, indica que habrá más erosión costera, pérdida de hábitats marinos, desplazamiento de poblaciones costeras, salinización de pozos, etc., (Anadón *et al.*, 2009, 158, 164; BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013; Frost *et al.*, 2012, 333). Los resultados en general obtenidos en este estudio, demuestran un impacto visible del calentamiento global en el Golfo de Nicoya, y una proyección de pérdida de productividad de las aguas que ya están, o van a tener, consecuencias para las pesquerías de las zonas (Chávez y Campos, 2014, 6, 7). Habrá que tomar medidas de adaptación, porque es un hecho que las circunstancias medio-ambientales en esta región, están, y van a seguir cambiando, por lo que es necesario mitigar los efectos de calentamiento global ya inmerso en nuestras costas (BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013, 16; Lizano, 2013, 8, 21, 22; Lizano, O. G. 2014, 24, 25; Corrales, 2014, 33).

REFERENCIAS

- Anadón, R. (2009). El Cambio Climático: Efectos en los ecosistemas marinos y en el sector pesquero. En: Cambio Climático Global. De Luis Calabuig, E. (ed.). Fundación MonteLeón. 54-67.
- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., Milligan, A. J., Falkowski, P. G., Letelier, R. M. y Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*. 444: 752–755.
- BIOMARCC-SINAC-GIZ. (2013). Evaluación de las pesquerías en la zona media y externa del Golfo de Nicoya, Costa Rica. San José-Costa Rica. 54 pags.
- Blank, L. (1980). Statistical Procedures for Engineering, Management and Science. McGraw-Hill, Nueva York. 649 pags.
- Brenes, C. L., Coen, J. E., Chelton, D. B., Enfield, D. B., León, S. y Ballesteros, D. (2003). Wind driven upwelling in the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *Int. J. Remote Sensing*. 24(5), 1127–1133.
- Brenes, C. L. y Chaves, J. (2001). Variación de las propiedades termohalinas en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 49. Supl. 2: 145-152, 2001,
- Brenes, A. y Saborio, V.F. (1994). Changes in the General Circulation and its influence on precipitation trends in Central America: Costa Rica. *Ambio*. 23(1): 87-90.

- Broecker, W. S. (1997). Thermohaline circulation, the Achilles Heel of our climate system: Will. man-made CO upset the current Balance? *Science* 278: 1582-1588.
- Brown, B. (2016). Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature Climate Change* 6,323–330.
- Caldeira, K. y Wickett, M. E. (2003). Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425, 365 (25 September 2003) | doi:10.1038/425365^a.
- Cazenave, A., y Llovel, W. (2010). Contemporary sea level rise, *Annual Review of Marine Science*, pp. 145–173
- Chaves, J. y Birkicht M. (1996). Equatorial subsurface water and the nutrient seasonality of the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 44 (Suppl.3): 41-47.
- Chávez, A. y Campos, F. (2014). Repercusiones del cambio climático en la pesca artesanal. *Ambientico* 246. 1: 4-7.
- Corrales, L. (2014). Adaptación al cambio climático en zonas costeras de Costa Rica: tarea Pendiente. *Ambientico* 246. 5: 29-35.
- Eyre, B. y Balls, P. (1999). A comparative study of nutrient behavior along the salinity gradient of tropical and temperate estuaries. *Estuaries* 22: 313-326.
- FAO. (2012). Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura. Visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. Documento técnico de pesca y acuicultura 530. 237 pags.
- FAO. (2011). Cambio climático, pesca y acuicultura en América Latina Potenciales impactos y desafíos para la adaptación. Taller FAO/Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental (COPAS). Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Actas de pesca y acuicultura 29.
- FAO. (2008). Report of the FAO Expert Workshop on Climate Change. Implications for Fisheries and Aquaculture. FAO Informe de Pesca 870. 32 pags.
- Freeland, H., Denman, K., Wong, C. S. , Whitney F., y Jacques R. (1997). Evidence of change in the winter mixed layer in the North East Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 44: 2117–2129.
- Frost, M., Baxter, J. M., Buckley, P. J., Cox, M., Stephen, R. Dye, S. R., y Harvey, N. W. (2012). Impacts of climate change on fish, fisheries and aquaculture. *Mar. Freshw. Ecosyst.* 22: 331–336.
- GLOBEC. (2003). Marine Ecosystems and Global Change. *IGBP Science* 5: 1-32.
- Graham, C. T. y Harrod, C. (2009). Implications of climate change or the fishes of the British Isles. *Journal of Fish Biology* 74: 1143–1205.

- Henson, S. A., Sarmiento, J. L., Dunne, J. P., Bopp, L., Lima, I., Doney, S. C., John, J. y Beaulieu, C.. (2010). Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences*, 7, 621–640, 2010.
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E.J. y Quesada-Montano B. (2016). Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584-016-1786-y
- IPCC. (2013). Cambio climático 2013. Bases físicas. Resumen técnico y preguntas frecuentes. 204pags.
- IPCC. (2001). Working Group II: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cap. 14. Latin America. 14.1.2.2. Future: Climate Scenarios.
- Kress, N., Brenner, S. , León, S., Brenes, C. L. y Arroyo, C. (2002). Horizontal transport and seasonal distribution of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll- *a* in the Gulf of Nicoya, Costa Rica: a tropical estuary. *Cont. Shelf Res.* 22: 51-66.
- Lizano, O.G. (2016). Distribución espacio-temporal de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto alrededor del Domo Térmico de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 64 (Supl. 1): S135-S152.
- Lizano, O. G. (2014). Algunos impactos costeros en Costa Rica debido al calentamiento global. *Ambientico* 246. 4: 25-28.
- Lizano, O.G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, XIV (17): 6-27.
- Lizano, O.G. (2008). Dinámica de las aguas alrededor de la Isla del Coco, Costa Rica. *Rev. Biología Tropical*. 56 (Supl.2): 31-48.
- Lizano, O.G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*. 24: 51-64.
- Lizano, O.G. y Salas, D. M. (2001). Variaciones geomorfológicas de la Isla Damas, Quepos en los últimos 50 años. “Ecosistemas Acuáticos de Costa Rica”. *Rev. Biol. Trop.* 49 (Supl. 2): 171-177.
- Lizano, M.A. y Lizano O.G. (2010). Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. *InterSedes*. Universidad de Costa Rica. XI(21): 215-229.
- Moreno, M. y Alfaro, E. J. (2018). Valoración socioeconómica del impacto de la variabilidad climática sobre la pesca artesanal en Costa Rica. *UNICIENCIA*. 32(1): 18-31.
- OLDEPESCA. (2009). Efectos de las principales alteraciones atmosféricas y oceanográficas sobre la actividad pesquera de los países miembros de OLDEPESCA. www.oldepesca.

- Osborn, T. J., Hulme, M., Jones, P. D. y Basnett, T. A. (2000). Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology* 20: 347–364.
- Palter, J., León, S. y Ballesteros, D. (2007). The distribution of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll *a* in the upper Gulf of Nicoya, Costa Rica, a tropical estuary. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)* Vol. 55 (2): 427-436, June 2007 427.
- Peterson, C. (1958). The Physical Oceanography of the Gulf of Nicoya, Costa Rica, a Tropical Estuary. *Bull. Inter. Am. Trop. Tuna Com* 3: 139-188.
- Richardson, A.J. y Schoeman, D. S. (2004). Climate impact on plankton ecosystems in the North East Atlantic, *Science*, 305: 1609–612.
- Roessig, J. M., Woodley, C. M., Cech Jr., J. J., y Hansen, L. J. (2004). Effects of global climate change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Reviews of Fish Biology and Fisheries*. 14: 251–275.
- Southward, A. J. y Boalch, G. T. (1994). The effect of changing climate on marine life: Past events and future predictions. *Exeter Maritime Studies*. 9, 101–143.
- Southward A.J., Hawkins, S. J., y Burrows, M. T. (1995). Seventy years of changes in the distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature. *J. Therm. Biol.*, 20: 127–155.
- Steward. R. H. (2008). Introduction to Physical Oceanography. 345 pags. http://www.colorado.edu/oclab/sites/default/files/attached-files/stewart_textbook.pdf
- Wang, X. L., Feng, Y., y Swail, V. R. (2014). Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058650.

APÉNDICE A. Documentación de bases de datos.

COPERNICUS: MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE: Base de datos Europeo con resultados de modelos numéricos, algunos con asimilación de datos de boyas, barcos y satélites. La salinidad y temperatura se ofrece a nivel global en una resolución espacial de 5 minutos. La clorofila y el oxígeno disuelto a una resolución de 0.25x0.25°. 2007-2016.

CPC: precipitación basada en estaciones meteorológicas e interpolación numérica con observaciones del proyecto COADS y datos de satélite. Resolución 0.5x0.5 grados. 1948-2016.

CAMS_OPI-OLR: una técnica de la estimación de la precipitación que produce análisis de precipitación mensual en tiempo real a nivel global. Combina datos de estaciones meteorológicas y satélite. Resolución 2.5x2.5°. 1979-2016.

CMAP: estima precipitación mensual a nivel global desde estaciones meteorológicas y estimaciones de varios satélites (infrarrojos y microondas). Resolución de $2.5 \times 2.5^\circ$. 1979-2016.

CMIP5: Producción primaria de carbono orgánico ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Interpolación con modelo numérico. Resolución $1 \times 1^\circ$. 1850-2005.

ECMWF-ORA-S3: análisis y re-análisis. Resultado de modelación numérica con asimilación de datos en tiempo real. Resolución $1 \times 1^\circ$. 1959-2009.

GODA: NCEP Global Ocean Data Assimilation System. Resultado de modelos numéricos. Usa re-análisis atmosféricos de NCEP para generar salinidad y temperatura del mar. Resolución $1 \times 1^\circ$. 1980-2016.

HADLEY CENTRE: re-análisis de observaciones de perfiles de temperatura y salinidad. Resolución $1 \times 1^\circ$. 1990-2014.

ICOADS: International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set. Observaciones e interpolaciones por varios sistemas de observación desde barcos, derivadores y boyas ancladas y plataformas submarinas. Resolución $1 \times 1^\circ$. 1960-2014.

NCEP2: NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFS v2). Un modelo numérico completamente acoplado que representa la interacción entre la atmósfera, el océano, la tierra y las capas de hielo. Resolución $0.5 \times 0.5^\circ$. 1948-2016.

MODIS: Datos de sensores de satélites de NASA MODIS a bordo del satélite Aqua and Terra. Resolución $0.05 \times 0.05^\circ$. 1948-2016.

SEAWIF. Datos del satélite. Resolución de $0.25 \times 0.25^\circ$. 1997-2010.

TOPEX: Anomalías del nivel del mar. Datos combinados de los satélites TOPEX Poseidon, ERS y Jason 1. Resolución $1/3$ de grado. 1992-2013.

WHOI. Woods Hole Oceanographic Institute. Interpolaciones desde datos in situ e integrados de satélites y anclajes superficiales, reportes de barcos y con información meteorológica de modelos superficiales re-analizados. Resolución 1×1 . 1958-2015.

WAVEWATCHIII. Modelo numérico de pronóstico de oleaje que utiliza datos de viento del modelo Global Forecasting System (GFS), este último, un modelo con asimilación de datos de estaciones terrestres, oceánicas y satélites. Resolución 1.25×1 . 1997-2016.