

**PROYECTO MARRISK
TEMPERATURA DEL AGUA DEL MAR: DOWNSCALING DINÁMICO DE
LOS CAMBIOS FUTUROS EN EL NORTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA
UTILIZANDO EL MODELO ROMS**

Pedro Daniel MELO DA COSTA¹, Anabela NETO VENÂNCIO¹, Juan TABOADA HIDALGO¹

¹*Departamento de Investigación y Predicción Numérica, Meteogalicia*
numericometeogalicia@xunta.gal

RESUMEN

El proyecto MarRisK ha sido una iniciativa del observatorio transfronterizo RAI A cuyo objetivo era asegurar un crecimiento inteligente y sostenible en las zonas litorales de Galicia y Norte de Portugal, evaluar los riesgos costeros más relevantes asociados al cambio climático y, ofrecer servicios climáticos que permitan mejorar la capacidad de adaptación y respuesta de las comunidades costeras. En la primera fase el estudio se centró sólo en la temperatura del agua del mar, se presentó una comparación estadística de los modelos climáticos con el objetivo de determinar cuáles de ellos eran los mejores candidatos para la elaboración de un downscaling dinámico. Este experimento demostró la importancia de emplear una corrección por medio de métodos que permitan reducir el sesgo. Tras el uso de la técnica mencionada, se obtuvieron los resultados del estudio de proyección del cambio de la temperatura del agua del mar por medio de la realización de un downscaling dinámico mediante el uso del modelo regional de los océanos ROMS. El downscaling empleado en las ejecuciones para el futuro mostró magnitudes fuertes para los cambios de temperatura superficial del mar en ambos períodos decadales estudiados (2035-2045, 2075-2085), de entre 2 y 4 grados, más importantes en el segundo período y más intensos a lo largo de 44°N entre 9.5°W y 4.5°W alcanzando casi los 3.5 grados de temperatura. El aumento proyectado más fuerte de la temperatura superficial del mar alcanzó los 4.0 grados en la década 2075-2085 en los meses de abril y mayo.

Palabras clave: MarRisK, downscaling, ROMS, TSM

ABSTRACT

The MarRISK project is oriented towards the development of adaptation strategies, prevention measures and risk management on climate change scenarios for the coastal areas of the north of Portugal and Galiza, Spain. The aim of this project is to evaluate the most important coastal risks in climate change scenarios and to improve the adaptation to these risks while enhancing cooperation, ensuring smart and sustainable growth. Firstly only the temperature of the sea water was studied, a statistical comparison of the climate models was presented with the objective of determining

which ones were the best candidates for the elaboration of a dynamic downscaling. This experiment demonstrated the importance of applying a correction method which allows to reduce the bias. After using the appropriated method, the results of the projection related to increase of the sea water temperature were obtained through the performance of a dynamical downscaling employing the Regional Ocean Modeling System ROMS. The downscaling method used for future executions, showed strong magnitudes for the changes of the sea surface temperature in both decadal periods (2035-2045, 2075-2085), between 2 and 4 degrees more important in the second period and more intense throughout the 44°N between 9.5°W and 4.5°W, reaching 3.5 degrees of temperature. The highest rise of the sea surface temperature reached 4.0 degrees in the decade 2075-2085 in the months of April and May.

Key words: MarRisk, downscaling, ROMS, SST

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la acción 2.1 del proyecto MarRisk fue llevar el conocimiento que actualmente existe en la gran escala sobre las variaciones que el cambio climático tendrá en parámetros físicos tales como corrientes, salinidad, temperatura, oleaje, sedimentos o corriente de deriva litoral a una escala suficientemente detallada para poder acometer tareas de adaptación. En esta acción se deberá hacer un downscaling dinámico de diferentes modelos climáticos. Esta técnica usa modelos generales de gran escala como contorno para otros modelos locales, que serán los que nos dan una información más pormenorizada de las condiciones físico-químicas que podemos esperar en la costa del área de cooperación Galicia-Norte de Portugal a medida que avance el presente siglo XXI.

En este presente documento nos centramos exclusivamente en la temperatura del agua del mar. En primer lugar, se describirán brevemente los resultados de la comparación estadística de modelos climáticos que tuvo como objetivo determinar cuál de los modelos climáticos disponibles es el mejor candidato para la elaboración de un downscaling dinámico.

Para finalizar exponemos la técnica empleada y los resultados obtenidos en el estudio de proyección del cambio de la temperatura superficial del mar (TSM) en el norte de la Península Ibérica por medio de la realización de un downscaling dinámico.

2. MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos climáticos globales constituyen la herramienta básica para estimar y obtener información sobre el clima futuro. Consisten en modelos acoplados atmósfera-océano que tratan de describir y simular los distintos componentes del sistema climático, las interacciones entre ellos y su evolución. Los modelos utilizados para este estudio provienen del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6), y se eligieron por los informes de IPCC y por diversa literatura que describían su habilidad en representar el océano. Para la elección del mejor modelo o modelos necesitamos definir unos indicadores mínimos que nos permitan

evaluar la correcta representación del clima marítimo en cada uno de los modelos. Es de esperar que si el clima está correctamente representado en cada uno de los modelos climáticos evaluados los cálculos estadísticos de cada parámetro deben ser similares a la distribución de referencia, en este caso se utilizó la base de datos de observaciones World Ocean Atlas 2018 (WOA18) con 1 grado de resolución, para el periodo histórico de 1955 a 2004.

2.1. Metodología

Para evaluar los modelos con base en las observaciones del WOA18 se calcularon indicadores estadísticos para la temperatura del agua del mar correspondiente al margen atlántico ibérico con longitud comprendida entre 45°W y 5°E y latitud entre 25°N y 55°N. Los resultados corresponden a promedios del ciclo anual y estacional. Se calculan con base en las observaciones del WOA18 que son promedios mensuales por estación del año (años: 55-64, 65-74, 75-84, 85-94, 95-A4). Las salidas de los modelos fueron adaptadas a este conjunto de observaciones tanto temporal, como espacial. Para ello se procedió a una interpolación de los valores de las mismas variables en los puntos de la rejilla del WOA18.

2.2. Evaluación de los modelos climáticos

Para esta comparación se han elegido cinco modelos climáticos globales del CMIP6 (Tabla 1).

Modelo	Institución	País	Resolución Atmósfera (km)	Resolución Tierra (km)
AWI-CM 1.1 MR	Alfred Wegener Institute	Alemania	100	100
CNRM-CM6-1-HR	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	100	100
HadGEM3-GC31- MM	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	100	100
MPI-ESM1.2-HR	Max Planck Institut für Meteorologie	Alemania	100	100
GFDL-CM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos	100	100

Tabla 1: Resumen de las principales características de los modelos climáticos evaluados.

Para el ciclo anual de la variable TSM, en general todos los modelos demostraron una tendencia a subestimar las observaciones. Por estación del año se verifica que para la primavera y verano todos los modelos poseen un BIAS y MAE apreciable en la rejilla.

Los mejores resultados se obtuvieron para los modelos AWI-CM 1.1 MR, HadGEM3-GC31-MM y GFDL-CM4, destacando el modelo AWI-CM 1.1 MR principalmente en el área del margen ibérico. Considerando los cortes verticales, los modelos HadGEM3-GC31-MM y GFDL-CM4 tienen dificultad en reproducir las principales masas de agua cerca de la plataforma. Las zonas de mayor error se corresponden con la localización de las masas de agua del Atlántico central ENACW y del Mediterráneo. El modelo AWI-CM 1.1 MR reproduce las principales masas de agua típicas en la región de estudio.

Los resultados de estos modelos muestran que para poder ser utilizados en un downscaling dinámico puede ser necesario un tratamiento previo de los datos, como por ejemplo proceder a la corrección de sus errores teniendo como base datos de observaciones el reanálisis. Considerando el conjunto de resultados, ciclo anual, indicadores estadísticos, cortes verticales y perfiles, el modelo que en general registra el mejor desempeño es el modelo AWI-CM 1.1 MR.

3. DOWNSCALING DINÁMICO

Para realizar el downscaling dinámico para la proyección de los cambios futuros en la temperatura de la superficie del mar se ha utilizado como modelo base los resultados procedentes del AWI-CM 1.1 MR, bajo el escenario SSP2-4.5.

3.1. Modelado regional de los océanos ROMS

El sistema de modelado regional de los océanos ROMS (Regional Ocean Model System), se empleó en este estudio para la reducción de la escala espacial y proyectar los cambios en la TSM causados por el calentamiento global. Para implementar el modelo en la región de interés, se consideró un refinamiento de la solución, haciendo énfasis en la región del norte de la Península Ibérica. El modelo cubre la región comprendida entre 32°W y 0.8°W y 30°N y 48°N. Cuenta con una resolución horizontal de 0.1° × 0.1° grados y 30 niveles sigma en la dirección vertical. La batimetría fue extraída de la base de datos ETOPO1 (Amante, 2009).

Los esquemas utilizados para las condiciones de contorno y de mezcla son los siguientes: la condición de contorno de Radiación + Anidamiento (Radiation/Nudging) con una escala de tiempo de 30 días, se utilizó para los trazadores (temperatura y salinidad) y el modo baroclínico. Para la superficie libre y para el momento bidimensional (barotrópico) se eligió un contorno cerrado (tipo pared), esto es, una condición de gradiente cero para la elevación de la superficie y flujo cero para la velocidad normal. Un operador armónico de mezcla a lo largo de las superficies horizontales (densidad constante) ha sido aplicado a los trazadores, mientras que al momento un bi-armónico a lo largo de los niveles verticales geopotenciales (profundidad constante).

En la advección horizontal para los trazadores y momento se ha aplicado un tercer orden ascendente parcial. Para la advección vertical una cuarta orden centrada en las diferencias (Shchepetkin, 2005).

La parametrización de la mezcla vertical se basa en el K-perfil de la formulación de la capa límite (Large et al. 1994). El factor de arrastre cuadrático ha sido considerado para la fricción de fondo.

3.2. Configuración de experimentos

3.2.a. Ejecución de control (1985-2005)

La ejecución de control (ROMS-CTRL) para el período 1985-2005 proporciona una referencia importante para interpretar los resultados de las ejecuciones de futuro. Las condiciones iniciales son basadas en la climatología del World Ocean Atlas 2018 (WOA2018), donde las variables de salinidad y temperatura potencial son interpoladas utilizando los promedios mensuales. Los campos de velocidad y nivel del mar comienzan con una condición estacionaria (se establecen en cero) adquiriendo una dinámica con el avance de la simulación. El forzamiento atmosférico superficial proviene del reanálisis climático ERA5 producido por el ECMWF. La ejecución de control es forzada con vientos, temperatura del aire, presión al nivel del mar, humedad específica, radiación de onda corta flujo descendente y radiación de onda larga flujo descendente en intervalos de 6 horas. El rozamiento del viento en la superficie y los flujos de calor se calculan utilizando la Bulk Formula (Fairall, 2003). Las condiciones de contorno se recopilaron y procesaron para las tres fronteras abiertas (Norte, Oeste y Sur), obtenidas de la base de datos SODA (Simple Ocean Data Assimilation).

3.2.b. Ejecuciones de futuro (2025-2045 y 2065-2085)

Las variables que resultan de los modelos climáticos, principalmente en los parámetros momento y flujos de calor utilizados en el downscaling del clima actual (Lee, 2013) pueden presentar errores sistemáticos (sesgos) importantes debido a la falta de resolución espacial, procesos físicos y termodinámicos simplificados, errores en las condiciones iniciales y de frontera. Por este motivo, es importante aplicar una corrección en los datos mediante métodos que permitan reducir el sesgo. Para ello, las dos ejecuciones futuras, 2025-2045 (ROMS-FUT) y 2065-2085 (ROMS-FUT2), bajo el escenario SSP2-4.5, son forzadas con campos atmosféricos construidos. Se suma a los parámetros observados (usados en la ejecución de control, ERA5, WOA y SODA) la diferencia en la media mensual entre los parámetros del modelo AWI-CM 1.1 MR de los años 2025-2045 (o segunda ejecución de futuro 2065-2085) y los parámetros del modelo AWI-CM 1.1 MR en los años históricos 1985-2005.

Los detalles de la metodología empleada son los siguientes: (a) para los vientos, temperatura del aire, humedad relativa, presión al nivel del mar y flujos de radiación para cada mes y conjunto de años calculamos las diferencias en la media mensual del modelo AWI-CM 1.1 MR entre los años 2025-2045 (o 2065-2085) bajo el escenario SSP2-4.5 y los datos históricos de los años 1985-2005 (por ejemplo, abril de 2029 menos abril de 1989); (b) Las diferencias calculadas se agregan (se suman) a los campos de la superficie atmosférica ERA5 para el mes y año correspondientes para el período 1985-2005 utilizado en la ejecución de control; (c) con estos parámetros calculados en el punto (b) y utilizando Bulk Formula se pueden calcular los flujos superficiales proyectados de momento, calor sensible y latente.

Esta metodología también se aplicó a las condiciones de frontera inicial y borde lateral. Las condiciones iniciales para las ejecuciones futuras también se generan agregando las diferencias de temperatura y salinidad entre enero de 1985 y enero de 2025 (o enero de 1985 y enero de 2065) en el modelo AWI-CM 1.1 MR a la condición

inicial de ROMS-CTRL. El nivel del mar y las velocidades iniciales se establecen en cero en todas las ejecuciones futuras. Las condiciones de frontera para las ejecuciones futuras se crean agregando las diferencias en la media mensual de temperatura, salinidad y de la velocidad entre 2025-2045 (o 2065-2085) y 1985-2005 del modelo AWI-CM 1.1 MR a los campos respectivos de la base de datos SODA 3.4.2 en el período 1985-2005.

4. RESULTADOS

Todas las ejecuciones, de control, experimento histórico y futuro se ejecutarán por 20 años completos. Sin embargo, teniendo en cuenta el tiempo de relajación, denominado “spin-up”, solo los diez últimos se utilizaron para el presente estudio (1995-2005, 2035-2045, 2075-2085).

4.1. Comparación entre ROMS-CTRL y observaciones

Para evaluar el downscaling hecho con el modelo ROMS, los resultados del ciclo anual y mensual de la TSM de la ejecución ROMS-CTRL se comparan contra las observaciones de la TSM OSTIA (análisis operacional de la temperatura superficial del mar y del hielo marino en su versión OSTIA-UKMO-L4-GLOB-v2.0 (Donlon et al. 2012)). En las figuras se observó claramente que reproducía las características de la TSM, como se esperaba. El error medio absoluto y el sesgo casi nunca superaban 1 grado de temperatura. La media anual de la TSM, obtenida en la ejecución ROMS-CTRL mostró buenos resultados, acercándose a los valores observados, principalmente en la región sur. A lo largo de la costa ibérica es difícil llegar a una conclusión debido al error estándar del TSM OSTIA.

Para el corte latitudinal los perfiles de temperatura del ROMS-CTRL son aceptables con patrones similares, pero cerca de la plataforma se destaca una tendencia del modelo a sobrestimar en las capas superficiales la temperatura. Las características de la temperatura en la superficie del mar son aquellas donde el modelo consigue un mejor ajuste comparando con las observaciones.

4.2. Cambios regionales de temperatura de la superficie del mar

En esta sección se describen los resultados más relevantes obtenidos de las proyecciones climáticas de la variable TSM para el norte de la Península Ibérica. Estas se han calculado para el escenario SSP-2.45, en los periodos, 2035-2045 (figura 1, imagen izquierda) y 2075-2085 (figura 1, imagen derecha). El sesgo climático del modelo ha sido corregido en el proceso descrito en la sección anterior. Los resultados de las proyecciones de futuro observados en la figura 1, muestran que el valor de la TSM en ambos períodos decadales (10 años) tiende a aumentar en todas las zonas del océano Atlántico que baña las costas del norte peninsular. El ascenso más intenso se sitúa al norte, alrededor de la latitud de 44°N, y entre las longitudes de 9.5°W y 4.5°W, donde el valor máximo de TSM alcanza los 3.5 grados en la década 2075-2085.

En la figura 2 se puede observar la proyección del ciclo anual de la TSM para la década 2035-2045 (línea azul) y 2075-2085 (línea roja) en relación con 1995-2005. Las proyecciones del downscaling muestran un aumento de la TSM en todo el ciclo anual. En la década 2035-2045, se alcanzan los valores máximos de 1.5 y 2.5 grados en los

meses de mayo y octubre, respectivamente. Para la década 2075-2085 el ascenso más fuerte se obtiene en los meses de abril y mayo, alcanzando un máximo de 4 grados. Entre los meses de agosto y noviembre el incremento no supera 1 grado de temperatura. En ambos casos con respecto a la década 1995-2005.

En la figura 3, a través de los cortes verticales para la latitud 42°N, se muestra la proyección climática de la temperatura hasta los 100 metros de profundidad obtenida en la ejecución ROMS-FUT (imagen izquierda) y ROMS-FUT2 (imagen derecha), comparando con la década 1995-2005. Se observa principalmente en las capas que se sitúan entre los 0 y los 25 metros de profundidad que las proyecciones del downscaling muestran un aumento de la media anual de temperatura del agua del mar de 2.5 grados, siendo más intenso lejos de la plataforma continental.

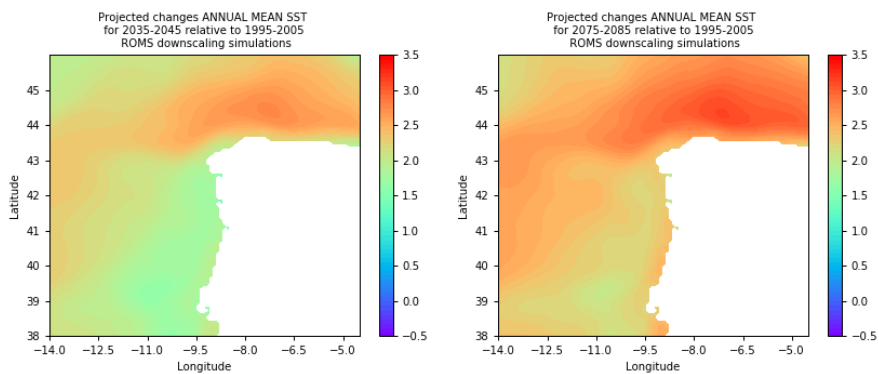


Fig. 1: Proyección climática (escenario SSP-2.45) del downscaling dinámico de la media anual de la temperatura superficial del mar para 2035-2045 (imagen izquierda) y 2075-2085 (imagen derecha), en respecto a 1995-2005.

5. SUMARIO Y CONCLUSIONES

En este estudio investigamos el futuro cambio de la temperatura del agua del mar en el norte de la Península Ibérica, bajo el escenario SSP2-4.5, mediante la realización de un downscaling dinámico utilizando el modelo ROMS con una resolución de 0.1 grados. Para evaluar el aumento de la TSM en las décadas 2035-2045 y 2075-2085, seleccionamos el modelo climático AWI-CM 1.1 MR, con el mejor desempeño cerca del norte de la Península Ibérica en el periodo histórico de 1955 a 2004. El downscaling dinámico se realizó para tres periodos: la ejecución de control (1985-2005) y dos ejecuciones futuras (2025-2045 y 2065-2085). La ejecución de control es forzada por los flujos aire-mar calculados utilizando datos del ERA5. Este experimento demostró la importancia de emplear una corrección a los modelos empleados en las condiciones de frontera, por medio de métodos que permitan reducir el sesgo. Debido a eso, las ejecuciones futuras, 2025-2045 y 2065-2085, están forzadas con un campo atmosférico construido agregando la diferencia entre los parámetros del modelo climático AWI-CM 1.1 MR, para los periodos de 2025-2045

(o 2065-2085) y la década 1985-2005, a los campos de forzamiento utilizados en la ejecución de control.

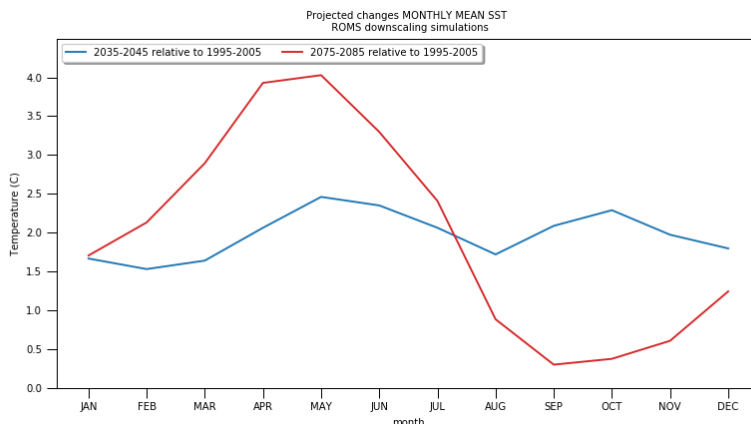


Fig. 2: Proyección climática (escenario SSP-2.45) del downscaling dinámico del ciclo mensual de la temperatura superficial del mar para 2035-2045 (línea azul) y 2075-2085 (línea roja), en respecto a 1995-2005.

El downscaling empleando el modelo ROMS en las ejecuciones de futuro capturó magnitudes fuertes para los cambios de TSM, entre 2 y 4 grados, en ambos períodos estudiados, siendo más intensos al final de siglo. Los cambios más acusados se observan alrededor de la latitud de 44°N y entre las longitudes de 9.5°W y 4.5°W, que alcanzan casi 3.5 grados de temperatura. El aumento más fuerte de la TSM alcanza los 4.0 grados de temperatura, en la década 2075-2085, en el mes de mayo. Las proyecciones climáticas muestran que los incrementos de la TSM cerca de la costa son menores que los aumentos en océano abierto, inferiores a 1.5 grados en la década 2035-2045. Los cortes verticales para la latitud 42°N y en las capas que se sitúan entre los 0 y los 25 metros de profundidad, las proyecciones muestran un incremento de la media anual de la temperatura del agua del mar, que puede alcanzar 2.5 grados.

Otro aspecto en este estudio, cuando se comparan estas proyecciones con modelos forzados con CMIP5 escenario RCP4.5 (teniendo como referencia el estudio realizado por Aveiro Univ. Ocean Group), es que se puede ver un mayor incremento de la TSM. Esto está de acuerdo con varios autores que describieron comparaciones entre los modelos CMIP5 y CMIP6. En las simulaciones CMIP6 se emplearon las nuevas Trayectorias Socio-económicas Compartidas y difieren de las realizadas en las fases anteriores (es decir, CMIP3 y CMIP5), por ejemplo, años de inicio diferentes para los escenarios futuros, nuevos conjuntos de especificaciones de concentraciones, emisiones y uso de la tierra (Gidden, 2019). Es importante destacar que los modelos CMIP6 presentan en promedio una sensibilidad climática mayor a las de los modelos CMIP5, por lo tanto, los modelos CMIP6 presentarán cambios superiores en temperatura. (Hausfather, 2020), (Stolpe, 2020). Como consecuencia, el downscaling dinámico debe estar correlacionado con la mayor sensibilidad climática de los modelos CMIP6, conduciendo a un calentamiento más elevado en las proyecciones

de futuro. Por otro lado, hay que tener en cuenta el sesgo de los modelos, que a pesar de su evolución para que sean más precisos, se trata de sistemas muy complejos y que por lo tanto, necesitan más esfuerzos de investigación para identificar los orígenes del calentamiento y los impactos de los sesgos generados.

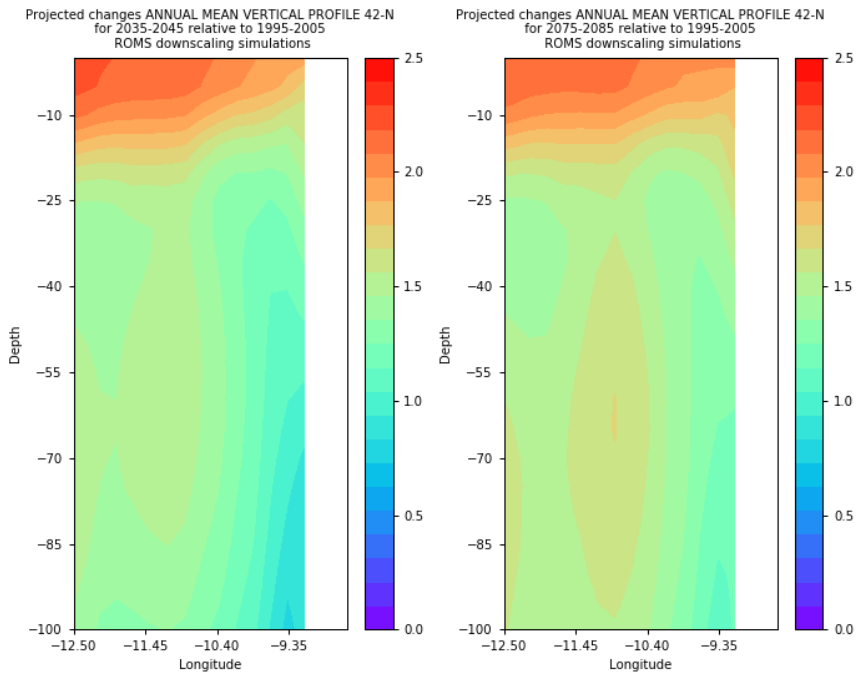


Fig. 3: Proyección climática (escenario SSP-2.45) del downscaling dinámico del corte vertical (latitud 42°) de la temperatura media hasta los 100m de profundidad para 2035-2045 (imagen izquierda) y 2075-2085 (imagen derecha) en respecto a 1995-2005.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto europeo MarRISK: Adaptación costera ante el Cambio Climático: conocer los riesgos y aumentar la resiliencia (0262_MarRISK_1_E), a través del EP-INTERREG V A España-Portugal (POCTEP) program. www.poctep.eu/es/2014-2020/marrisk

REFERENCIAS

Amante, C. Eakins, BW. (2009). ETOPO1 Global Relief Model converted to PanMap layer format. NOAA-National Geophysical Data Center. PANGAEA.
Donlon, C. (2012). The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment* 116. pp. 140-158.
Fairall, C. Bradley, E. Hare, J. Grachev, A. Edson, J. (2003). Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm, *Journal of Climate*, 16(4), 571-591.

- Gidden, M. Riahi, K. Smith, S. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geosci. Model Dev.* 12. pp. 1443-1475.
- Hausfather, Z. Drake, H. Abbott, T. Schmidt, G. (2020). Evaluating the performance of past climate model projections. *Geophysical Research Letters.* 47.
- Large, W. McWilliams, J. Doney, S. (1994). Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev Geophys* 32:363-404.
- Lee, T. Waliser, D. Li, J. Landerer, F. Gierach, M. (2013). Evaluation of CMIP3 and CMIP5 wind stress climatology using satellite measurements and atmospheric reanalysis products. *J Clim* 26:5810-5826.
- Marchesiello, P. McWilliams, J.C. Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic model. *Ocean Model* 3:1-20.
- Semmler, T. Danilov, S. Rackow, T. Sidorenko, D. Barbi, D. Hegewald, J. Sein, D. Wang, Q. Jung, T. (2018). AWI AWI-CM1.1MR model output prepared for CMIP6 CMIP. Version 20191101. Earth System Grid Federation.
- Shchepetkin, A. McWilliams J. (2005). The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Modelling.* 9. 347-404.
- Sippel, S. Tokarska, K. Stolpe, M. Fischer, E. Smith, C. Lehner, F. Knutti, R. (2020). Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models *Sci Adv.* March. 6(12).