

Evidencias de cambios en las distribuciones de las especies en la plataforma continental noratlántica y mediterránea de la península ibérica durante las últimas décadas como consecuencia de los cambios en temperatura del agua.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global está causando modificando la redistribución de especies a un ritmo sin precedentes en ambientes marinos (Cheung et al., 2009; Burrows et al., 2011), con implicaciones generalizadas en las interacciones ecológicas, las funciones y los servicios de los ecosistemas (Pecl et al., 2017; Pinsky et al., 2020b; Poloczanska et al., 2013). En el ámbito marino, los cambios más comúnmente descritos se refieren a modificaciones en las distribuciones de la abundancia de especies marinas. Las especies generalmente rastrean la velocidad del cambio climático (es decir, cambios de isoterma) y existe un número creciente de evidencias de que los cambios de distribución se producen mayoritariamente hacia los polos (Burrows et al., 2014, 2011; Melbourne-Thomas et al., 2021; Pinsky et al., 2013) o hacia mayores profundidades (Pinsky et al., 2013) a una tasa que multiplica varias veces la velocidad de cambio en las especies terrestres. El 80% de los cambios observados en las distribuciones de las especies marinas son consistentes con el impacto esperado de la calentamiento, y los cambios fenológicos también cumplen (en más del 75% de los casos reportados) con la estacionalidad climática alterada (Poloczanska et al., 2013). Sin embargo, todavía existe mucha falta de información que cuales están siendo los impactos en aquellas zonas donde orográficamente las especies no tienen capacidad para desplazarse hacia el norte (por ejemplo en mares semicerrados como el Mar Mediterráneo) o otras zonas donde de confluencia con otros factores ambientales regionales o globales tienen a veces mucha importancia en los patrones de distribución de las especies, como es el caso del norte y noroeste de la península Ibérica.

En un reciente estudio sobre la comunidad de peces demersales del el noroeste de la península ibérica (Punzón et al., 2016) mostró que la mayoría de las especies (53%) estaba aumentando su frecuencia de ocurrencia significativamente en esta zona, lo que se interpretó como una meridionalización del ecosistema, en el que las especies lusitánicas que tienen su centro de distribución en esta zona aumentan su abundancia y expanden su distribución con el aumento de temperatura (Figura 1). Evaluando los cambios en los centros de gravedad de las distribuciones de las especies, el 35% de la comunidad mostró cambios significativos en su centro de gravedad de profundidad, que en un 80% de los casos se desplazó hacia zonas más profundas. Los aumentos más pronunciados fueron mostradas por aquellas especies que típicamente habitan el talud continental como *Chlorophthalmus agassizii*, *Galeus spp.*, *Chimera monstrosa*, *Malacocephalus laevis* o *Phycis blennoides*. Los cambios longitudinales y latitudinales en los centros de gravedad fueron menos frecuentes que las de profundidad, afectando al 19% y 27% de las especies, respectivamente, con la mayoría de los desplazamientos latitudinales ocurriendo hacia el sur (84%) y la mayoría de los longitudinales hacia el oeste (88%), e indicando que el movimiento preferente de las especies escapaba del calentamiento del interior del Golfo hacia aguas con una mayor influencia oceánica.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

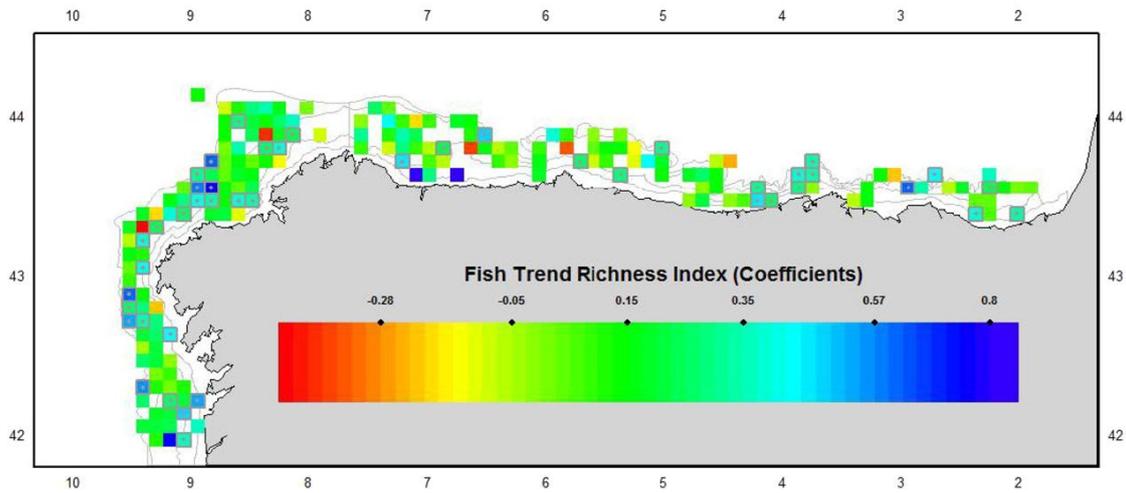


Figura 1. Cambios en la riqueza taxonómica de las comunidades de peces demersales en las plataformas continentales del noroeste de la península ibérica entre 1983-2010. Las celdillas recuadradas en gris indican las zonas donde las tendencias en riqueza son significativas a lo largo de la serie (Punzón et al., 2016).

Aunque en los ecosistemas mediterráneos sería esperable encontrar un efecto similar de desplazamiento de las especies, no contábamos con evidencias sobre el efecto del calentamiento de las aguas sobre las distribuciones de las distintas especies demersales. Por ello, **el proyecto VADAPES ha sido pionero en estudiar la velocidad del cambio climático como la velocidad a la que se desplazan las isotermas de temperatura superficial del mar, y hemos evaluado cómo esta velocidad de desplazamiento afecta a las distribuciones de las especies. Los resultados muestran que los cambios en la velocidad del cambio climático no sólo han cambiado los centros de gravedad de su distribución sino también ha afectado sus patrones de agregación. Este trabajo, del que ya existe un borrador avanzado para su publicación, se enviará próximamente a una revista científica de alto impacto (Actividad R.2.0.1).**

Aunque la unidad habitual en los estudios de cambio climático es la especie, el efecto acumulado de las distintas especies puede a menudo ser reconocido en comunidades completas, que pueden modificar su distribución promedio. Ejemplos de indicadores capaces de identificar los efectos del aumento de temperatura del mar sobre comunidades marinas incluyen la temperatura de preferencia de la comunidad (Collie et al., 2008; Lucie and Nye, 2010) o la temperatura de la captura (Cheung et al., 2013). Apoyándonos sobre estos trabajos, **en el proyecto VADAPES hemos construido un indicador de cambio climático en comunidades de peces: “la temperatura media de la comunidad” que nos permita evaluar cómo la comunidad demersal del sur del Golfo de Vizcaya se ha adaptado al aumento de temperatura. Este trabajo dio lugar a una publicación en la revista ICES Journal of Marine Science, Punzón et al. (2020). (Actividad R.2.0.2)**

Organiza:



Con el apoyo de:



R2.0.1 Velocidad del cambio climático y cambios espaciales en las comunidades demersales

MÉTODOS

Exploramos 8 indicadores espacialmente explícitos (Tabla 1), incluyendo indicadores espacialmente dependientes como el centro de gravedad (CG) en latitud, longitud y profundidad, e indicadores espacialmente independientes como la inercia (In), el índice de parcheo (Ipatch), el índice de dispersión (Idisp), y el índice de agregación (Iagg). Estos indicadores espaciales se basan en las distribuciones de densidad y abundancia de las poblaciones, y se sabe que responden a los impactos del clima y los cambios antropogénicos (Rufino et al., 2018, Puerta et al. 2014).

Tabla 1: Información sobre los indicadores espaciales y temporales aplicados.

Indicador espacial	Descripción	Fórmula	REferencias
Centro de gravedad (CG-lat, CG-lon, CG-depth)	Localización geográfica media de la población (latitud o longitud) ponderada por la densidad (número de individuos por km ²), también denominado: centro de población o centro de distribución. El centro de gravedad batimétrico (CG-profundidad) es la localización de profundidad media ponderada por la densidad.	$\frac{\Sigma(\text{latitud} \cdot \text{densidad})}{\Sigma(\text{densidad})}$ $\frac{\Sigma(\text{longitud} \cdot \text{densidad})}{\Sigma(\text{densidad})}$ $\frac{\Sigma(\text{profundidad} \cdot \text{densidad})}{\Sigma(\text{densidad})}$	Bez and Rivoirard, (2001); Woillez et al., (2009)
Inercia (In)	Dispersión espacial de la población en torno a su CG-lat. La distancia cuadrática media entre la latitud de un pez individual y su centro de gravedad, ponderada por la densidad. Es la variabilidad o heterogeneidad asociada al centro de gravedad	$\frac{\Sigma((\text{lat}-\text{CG-lat})^2 \cdot \text{densidad})}{\Sigma(\text{densidad})}$	Bez, (1997); Bez and Rivoirard, (2001); Woillez et al., (2009)
Índice de agregación(Iagg)	Densidad media por individuo (la media de la densidad de la muestra ponderada por el número de individuos por muestra) y dividida por la abundancia total estandarizada. Como cada valor de abundancia tiene en cuenta el número de individuos que representa, el índice de agregación no se ve afectado por los valores nulos (i.e. no presencias), y también muy poco afectado por las bajas densidades.	$\frac{\Sigma(\text{densidad}^2)}{(\Sigma(\text{densidad}))^2}$	Bez and Rivoirard, (2001)
Índice de dispersión (Idisp)	Patrón de distribución dentro del rango. Relación entre la media y la varianza de la densidad, incluidos aquellos lances dentro del rango de profundidad de la	$\frac{\Sigma(\text{densidad})}{\text{var}(\text{densidad})}$	Southwood, (1978); Greenstreet et al., (2012)

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

	especie donde la abundancia relativa fue cero.		
Índice de fragmentación de Lloyd (lpatch)	Cuantificación del grado de fragmentación. Tiene en cuenta la densidad media y la varianza de muestreo.	$1 + \frac{\text{var}(\text{densidad})^2}{(\text{mean}(\text{densidad})^2 - 1/\text{mean}(\text{densidad}))}$	Lloyd, (1967); Bez, (2000); Rindorf and Lewy, (2012)

Se ha aplicado cálculos estadísticos basados en individuos (y herramientas geoestadísticas) para evitar el problema de la delimitación del área de presencia dando a cada muestra un peso proporcional a su densidad, es decir, proporcional al número de individuos que representa. Es por esto que el índice de agregación y la inercia no se ven afectados por los ceros y en general por bajas concentraciones. Los indicadores son sensibles a las ausencias (abundancias nulas) y, por lo tanto, dependen del dominio sobre el que se calcula, excepto los indicadores CG e lagg (Rufino et al., 2018). La estadística ldisp se basa en la distribución estadística de los datos de conteo muestreados y, por lo tanto, está influenciada por los conteos con valor cero observados fuera del área de presencia de peces (es decir, dependiente del dominio), mientras que lagg es una estadística libre de dominio, es decir, no varía con el presencia de ceros externos en los datos de la muestra (Bez y Rivoirard, 2001).

Calculamos las afinidades de temperatura de las especies en función de las temperaturas de la superficie del mar teniendo en cuenta el área de distribución de cada especie que se obtuvieron de los modelos de nicho climático desarrollados por AQUAMAPS (Kaschner et al., 2019). Para cada especie se consideró únicamente el área donde la probabilidad de ocurrencia fue mayor a 0.5 según estos modelos. Usando el conjunto de datos ambientales de Aquamaps (Kaschner et al., 2016), calculamos la temperatura preferida (Tmean) de la especie como la temperatura media de la superficie del mar (SST) y estimamos el rango de temperatura (Trange) de manera conservadora como el rango entre 0.1 y 0.9 cuantiles de la TSM dentro del área de distribución de la especie, para evitar valores atípicos y posibles errores en los extremos de las distribuciones. Solo las especies presentes en la base de datos AQUAMAPS fueron seleccionadas de los datos MEDITS sobre abundancia de especies (101 especies). Las afinidades de profundidad se calcularon en función de los registros de presencia de especies obtenidos a nivel mundial de la base de datos OBIS (OBIS, 2020) y la batimetría digital proporcionada por EMODNET (<http://emodnet-bathymetry.eu>). La profundidad preferida (Dmedia) se calculó como la profundidad media, mientras que el rango de profundidad (Drange) se estimó como el rango entre los cuantiles 0,1 y 0,9 de la distribución de profundidad para cada una de las especies. Las afinidades de temperatura (media y rango) se combinaron para clasificar las especies en cuatro grupos (Figura 2a). La categoría T1 incluye especies con afinidades de temperatura media baja (Tmedia < 15 °C), mientras que la categoría T4 incluye especies con afinidad de temperatura media alta (Tmedia > 20°C), independientemente del rango de temperatura de la especie. Las categorías T2 y T3 incluyen especies con afinidad por temperaturas moderadas (15 °C < Tmedia < 20 °C); mientras que T2 comprende especies con amplios rangos de temperatura (Trange > 15 °C), T3 incluye solo especies con tolerancia estrecha a la temperatura (Rango < 15 °C). Las afinidades de profundidad (media y rango) se combinaron para clasificar las especies en tres grupos (Figura 2b). La categoría D1 incluía especies que tenían su profundidad preferida sobre la plataforma continental (Dmean < 200 m) y rangos de profundidad estrechos (Drange < 200 m). La categoría D2 también incluía especies con preferencias de profundidad sobre la plataforma continental (Dmean < 250 m) pero con rangos de profundidad más

Organiza:

Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

amplios (Drange > 200 m). La categoría D3 incluía especies profundas cuya profundidad media estaba sobre el talud continental (Dmedia > -250m) independientemente de su rango de profundidad. y Drange ≤ 150m), D2 (Dmean > -250m y Drange > 150m) y D3 (Dmean < -250m y Drange > 0m). Las especies con afinidad de profundidad media desde la superficie del mar hasta el talud de rotura (250m) y que se encuentran en un rango bajo de profundidades hasta los 150m se agrupan en el nivel D1 (Figura 2b). Especies de nivel D2, con afinidades de profundidad para la misma profundidad media pero un rango más amplio de profundidades (> 150 m) y especies de afinidades de profundidad D3, con profundidades más altas y el rango más amplio de profundidades. No se ha encontrado correlación entre los niveles de temperatura y las afinidades de profundidad.

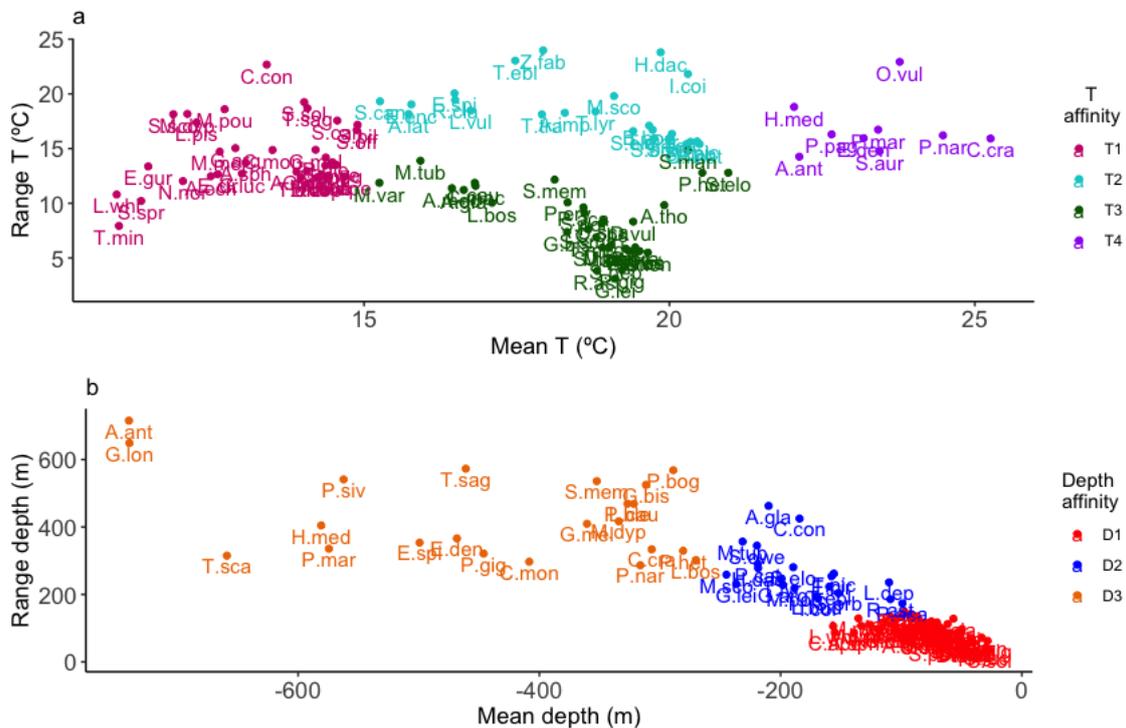


Figura 2: Clasificación de las especies según sus afinidades por la temperatura (a) y la profundidad (b y c). a) Afinidades por la temperatura: T1 en rosa, T2 en azul claro, T3 en verde oscuro y T4 en violeta; b) Afinidades por la profundidad: D1 en rojo, D2 en azul oscuro y D3 en naranja.

Los análisis estadísticos se realizaron en dos pasos para analizar: (1) la influencia de la velocidad del clima en los valores medios de los índices espaciales de las principales especies de la comunidad demersal en el Mediterráneo peninsular para toda la serie temporal y (2) en sus tendencias temporales interanuales.

En primer lugar, se evaluó la exposición de estas especies a la velocidad climática mediante modelos de regresión lineal con los valores medios de los índices espaciales como variable independiente y la magnitud de la velocidad climática como variable explicativa calculada para toda el área GSA6, la cual comprende desde cabo de Palos a la límite con el Golfo de León. Esto cálculos también se realizaron para las subáreas norte, central y sur de la GSA6. En segundo lugar, evaluamos el efecto de la magnitud de la velocidad del clima en la tasa de cambio anual de los índices espaciales. Para evaluar si los índices espaciales mostraban tendencias interanuales, ajustamos modelos lineales a las series temporales de los índices espaciales,

Organiza:



Con el apoyo de:



descartando aquellas especies que no mostraron tendencias significativas a lo largo de la serie. Además de estas tendencias, también calculamos la variación temporal (incremento del índice espacial) a lo largo de las series temporales como la diferencia entre el índice del primer y último año de la serie. Esto se realizó para cada uno de los índices y cada una de las especies siempre que el índice estuviera disponible durante al menos 10 años dentro del período de estudio. En cuanto a la variación temporal del GC, se calculó se calculó en relación al cambio de grados de latitud y longitud entre el primer y último año de la serie temporal (Diff CG) pero también como la diferencia en metros entre el centro de gravedad en el primer y último año de la serie (Dist-CG).

Tanto las tasas de cambio como la diferencia a lo largo de la serie temporal de cada índice se modelaron como variables independientes y se ajustaron a la magnitud de la velocidad del clima mediante modelos lineales. Las afinidades térmicas y de profundidad de las especies se consideraron en este segundo paso como factores para evaluar si el efecto de la velocidad climática sobre cada una de estas categorías era diferente. Se descartó el índice de fragmentación como índice espacial de interés, ya que sólo 6 especies mostraron una tendencia significativa en este índice a lo largo de la serie temporal.

El mejor modelo para cada indicador se seleccionó después de comparar el Criterio de Información de Akaike (AIC) para todas las configuraciones del modelo, seleccionando la configuración que minimizaba esta métrica. Para cada modelo, se verificaron los residuos para que cumplieren los requisitos de homogeneidad de varianza y ausencia de autocorrelación temporal. También se comprobó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$).

RESULTADOS

La magnitud de la velocidad climática en el Mediterráneo occidental es bastante variable, con los valores más altos en el Mar de Liguria con hasta $400 \text{ Km} \cdot \text{año}^{-1}$ y los valores más bajos en el Estrecho de Gibraltar (Figura 3). En nuestra área de estudio, la costa mediterránea norte de España (GSA6), las velocidades climáticas fueron generalmente altas, aumentando en la región GSA6 Central cerca de la desembocadura del río Ebro con valores de $300 \text{ Km} \cdot \text{año}^{-1}$, mientras que el sur y al norte del GSA6 presentó valores más bajos (200 a $150 \text{ Km} \cdot \text{año}^{-1}$, Figura 3). Las trayectorias de la velocidad climática fueron heterogéneas. La mayoría de las trayectorias se originaron alrededor de 39.5°N (desde el GSA6 central, el mar Balear, la cuenca de Alghero-Provençal hasta Cerdeña), donde predominan altas velocidades, de hasta $300 \text{ km} \cdot \text{año}^{-1}$ (Figura 2). El Mar de Liguria presentó los valores más altos, hasta $360 \text{ Km} \cdot \text{año}^{-1}$ actuando como fuente de trayectorias (Figura 3). En el Golfo de León se detectaron bajas velocidades de ya que esta zona lo que corresponde a un área de formación de aguas intermedias y profundas.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

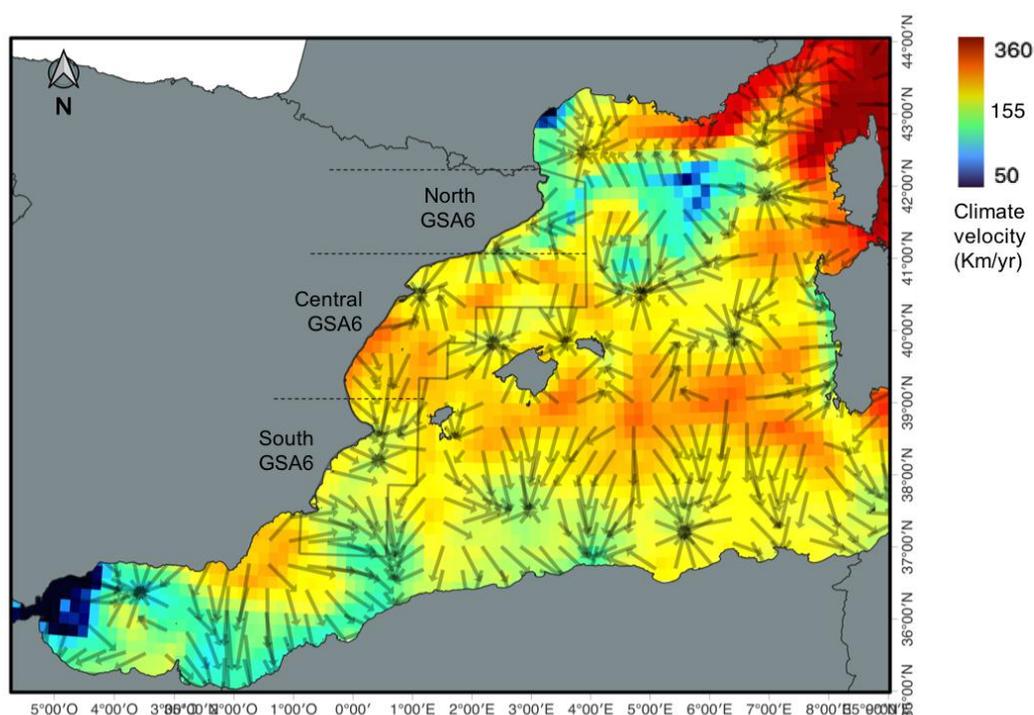


Figura 3: Mapa del Mar Mediterráneo occidental que cuantifica la velocidad del cambio climático en función de los datos mensuales de TSM durante 32 años (1984-2019). Las flechas representan las trayectorias de la velocidad del clima, el cambio en la ubicación de los puntos a lo largo de las isotermas durante el período de 32 años.

Nuestros resultados evidenciaron patrones lineales a lo largo del estudio en la exposición de las distribuciones de especies a la velocidad del clima. Las especies que tuvieron su CG hacia el norte, el oeste y a mayor profundidad fueron las expuestas a mayores velocidades climáticas (Tabla 2). Al analizar la exposición en cada una de las subregiones, el centro de gravedad de la especie continuó mostrando patrones lineales con la magnitud de la velocidad del clima (Tabla 2), pero la pendiente difería entre las subregiones, reflejando la variabilidad local de la magnitud de la velocidad del clima en el área de estudio (Tabla 2, Figura 3). Mientras que para toda el área GSA6 otros índices espaciales no parecieron variar con la velocidad del clima, cuando esta se evaluó en cada una de las subáreas la exposición a la velocidad del clima tuvo un efecto sobre la inercia de las especies, la cual aumentó con la velocidad del clima en las subregiones del centro y sur, mientras que aumentó con la velocidad del clima en la región norte. El índice de agregación solo respondió a la velocidad del clima en la región central, y la dispersión pareció no responder a la velocidad del clima en ningún caso (Tabla 2).

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

	GSA6				North GSA6				Central GSA6				South GSA6			
	Intercept	Slope	N	df	Intercept	Slope	N	df	Intercept	Slope	N	df	Intercept	Slope	N	df
1. CG in latitude	34.708 ***	0.020 ***	101	99	42.650 ***	-0.005 ***	81	79	42.532 ***	-0.009 ***	81	79	37.305 ***	0.005	93	91
2. CG in longitude	7.578 ***	-0.023 ***	81	79	7.578 ***	-0.023 ***	81	79	5.546 ***	-0.018 ***	81	79	1.157	-0.005	93	91
3. Bathymetric CG	920.347 **	-2.947 *	101	99	1829.166 ***	-7.392 ***	81	79	2246.300 ***	-7.901 ***	81	79	1827.097 **	-7.392 *	93	91
4. Aggregation Index	0.118	0.001	81	79	0.118	0.001	81	79	2.241 ***	-0.007 ***	81	79	-0.188	0.003	93	91
5. Inertia	0.26	0.004	101	99	-0.111	0.001 *	81	79	0.753 ***	-0.002 **	81	79	0.491 **	-0.002 *	93	91
6. Dispersion Index	1.01	-0.003	101	99	0.862	-0.002	81	79	0.853	-0.002	81	79	-0.172	0.002	93	91
7. Patchiness Index	-115154350	552720.5	101	99	-32661062747	1.56E+08	81	79	-18828702851	75633465	81	79	12277638096	-5.3E+07	93	91

Tabla 2: Modelos lineales (LMs) ajustados a los indicadores y la velocidad del clima. Se indican la intersección y la pendiente significativas (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$), así como el número de observaciones (N) y los grados de libertad (df).

En cuanto a los patrones temporales en los indicadores espaciales, el 42% de las especies (42/102) cambiaron significativamente su distribución en el tiempo (Figura 4). Entre ellos, el 62% (26/42) mostraron cambios significativos en su distribución horizontal con el 52% de las especies (22/42) moviéndose hacia el sur. A lo largo del eje de profundidad, el 38% de las especies (16/42) desplazaron su centro de gravedad, la mayoría (29%, 12/42) hacia aguas más profundas (Figura 4a). Entre las especies de peces con cambios más significativos en el centro de gravedad de sus distribuciones destacaron: *Gadiculus argenteus* (tendencia significativa de CG-lon), *Scyliorhinus canicula* (tendencias significativas de CG-lat, CG-lon y CG-profundidad) y *Helicolenus dactylopterus* (tendencias significativas de CG-lat y CG-lon). Las especies de cefalópodos también cambiaron sus patrones de distribución preferentemente hacia el sur, como *Todaropsis eblanae* (tendencias significativas de CG-lat y CG-lon) y *Sepietta oweniana* (tendencias significativas de CG-lon) (Figura 4a). Los crustáceos como *Nephrops norvegicus* (tendencias significativas de CG-lat y CG-lon) y *Solenocera membranacea* (tendencia significativa de CG-lon) también cambiaron sus patrones de distribución generalmente hacia el sur (Figura 4a). Además, 16 especies presentaron un cambio significativo en la profundidad de su centro de gravedad, de las cuales 12 especies se hicieron más profundas y 4 se hicieron más someras (Figura 4b). Las especies con los valores más altos de centro de gravedad promedio en profundidad fueron *Galeus melastomus*, *Phycis blennoides*, *Lophius budegassa*, *Plesionika gigliolii* y *Macropipus tuberculatus*.

Predictors	8. CG-lat rate	11. Aggregation index rate	12i. Inercia rate	13i. Dispersion index rate	15. Dist CG	16d. Diff CG-lat	17f. Diff CG-lon
Intercept	-0.443 *	-0.063 **	-0.023 *	-0.023 *	35555.003 ***	-0.238 **	-0.242 **
GV	0.002 *	0.000 **			-124.422 ***	0.001 **	0.001 *
DaffD2			-0.013	-0.013		0.013	-0.171
DaffD3			0.075 **	0.075 **		0.029 **	0.381 *
GV:DaffD1							
GV:DaffD2							0.001
GV:DaffD3							-0.001 *
N	18	28	31	31	102	103	103
df	3	3	4	4	3	5	7
AICc	-78.506	-220.87	-96.585	-96.585	1933.721	-385.845	-421.237

Tabla 3: Modelos lineales ajustados a la tasa de indicadores para cada especie examinada de aguas del Mediterráneo occidental (GSA6) (a partir de modelos lineales ajustados a series temporales de todos los indicadores). Los predictores son la velocidad climática (GV) y los factores

Organiza:

Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

de afinidad Temperatura y Profundidad. Se indican la intersección y la pendiente significativas ($*p<0,05$, $**p<0,01$, $***p<0,001$), así como el número de observaciones (N) y los grados de libertad (df).

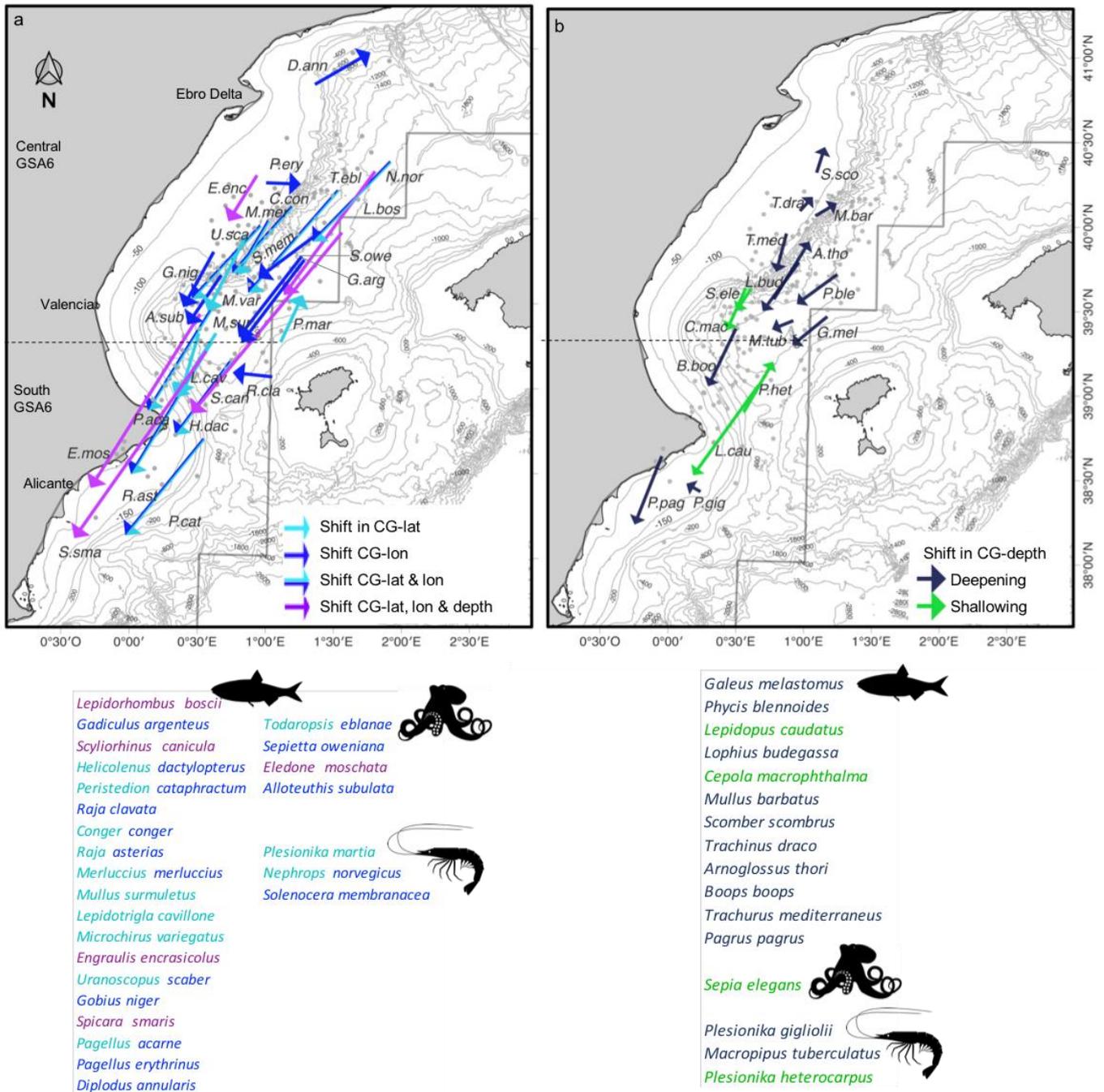


Figura 4: Cambios de CG para cada especie examinada en GSA6. Los vectores parten del GC promedio y su longitud corresponde a la tasa de cambio obtenida a partir de modelos lineales ajustados a series temporales del GC y multiplicado por la mitad del lapso de tiempo. a) Escala de colores de cambios significativos en latitud y longitud CG: azul claro (cambio significativo en latitud), azul oscuro (cambio significativo en longitud), azul medio claro y azul medio oscuro (cambio significativo en latitud y longitud), púrpura (cambio significativo en latitud, longitud y profundidad) y puntos grises (sin cambio significativo en latitud ni longitud). b) Especies que muestran un cambio significativo solo en profundidad de CG: el azul oscuro indica un cambio de profundidad (tasa significativa negativa de modelos lineales ajustados a series de tiempo de CG batimétricas) y el verde indica un cambio de profundidad (tasa significativa positiva de CG batimétrica). Las listas de nombres de especies para ambas figuras (a y b) están ordenadas de mayor a menor CG batimétrico medio.

Organiza:

Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

El modelo que mejor explica la evolución temporal de los índices espaciales basados en la velocidad del clima difirió para cada uno de los índices, incluyendo en algunos casos la interacción con las categorías de afinidad térmica y de profundidad (Tabla 3). Las tasas de cambio de CGlat, que en general se desplazaron hacia el sur (nótese los valores negativos) aumentó con la velocidad climática (Fig. 5a), lo que indica que la tasa absoluta de cambio fue menor (más cercana a 0) para las especies sujetas a una mayor velocidad climática. Estas tendencias también podrían reconocerse en Dist CG, con las especies bajo velocidades climáticas más pequeñas desplazando sus centros de gravedad más lejos (Fig. 5c). Con respecto a la diferencia de latitud entre el comienzo y el final de la serie temporal (Diff CGlat), el patrón refleja el de las tasas de CG-lat, lo que indica que las especies se mueven más hacia el sur (valores grandes y negativos) a velocidades climáticas más bajas que en velocidades climáticas más altas, cuando la diferencia en CG-lat está más cerca de 0 (Fig. 5d). Para esta variable, el efecto de las afinidades de profundidad fue significativo, lo que indica que las especies con afinidades más profundas (D3) cambiaron su CG-lat con menos rapidez (Fig. 5e). La diferencia entre la longitud CGin (Diff CG-lon) al principio y al final de la serie temporal también podría explicarse por la velocidad del cambio climático, pero siguió diferentes tendencias para diferentes categorías de profundidad. Las especies que tienen su profundidad preferida sobre la plataforma continental (D1 y D2) se movieron más hacia el Oeste (valores negativos) con velocidades climáticas decrecientes, mientras que las especies que tenían su profundidad preferida sobre el talud continental (D3) cambiaron su distribución más fuertemente hacia el Oeste (valores negativos) con velocidades climáticas crecientes (Fig. 5 h). La tasa de agregación aumentó con las velocidades climáticas a valores cercanos a 0, lo que indica que las especies bajo velocidades climáticas más bajas están más desagregadas (Fig. 4b). El resto de los modelos de tasa CG-lat no presentaron diferencias en AICc ($\Delta AICc < 2$) y la velocidad climática fue significativa en todos ellos ($p < 0,05$, Tabla S1 y S2) así como Taff ($p < 0,05$, Tabla S1).

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

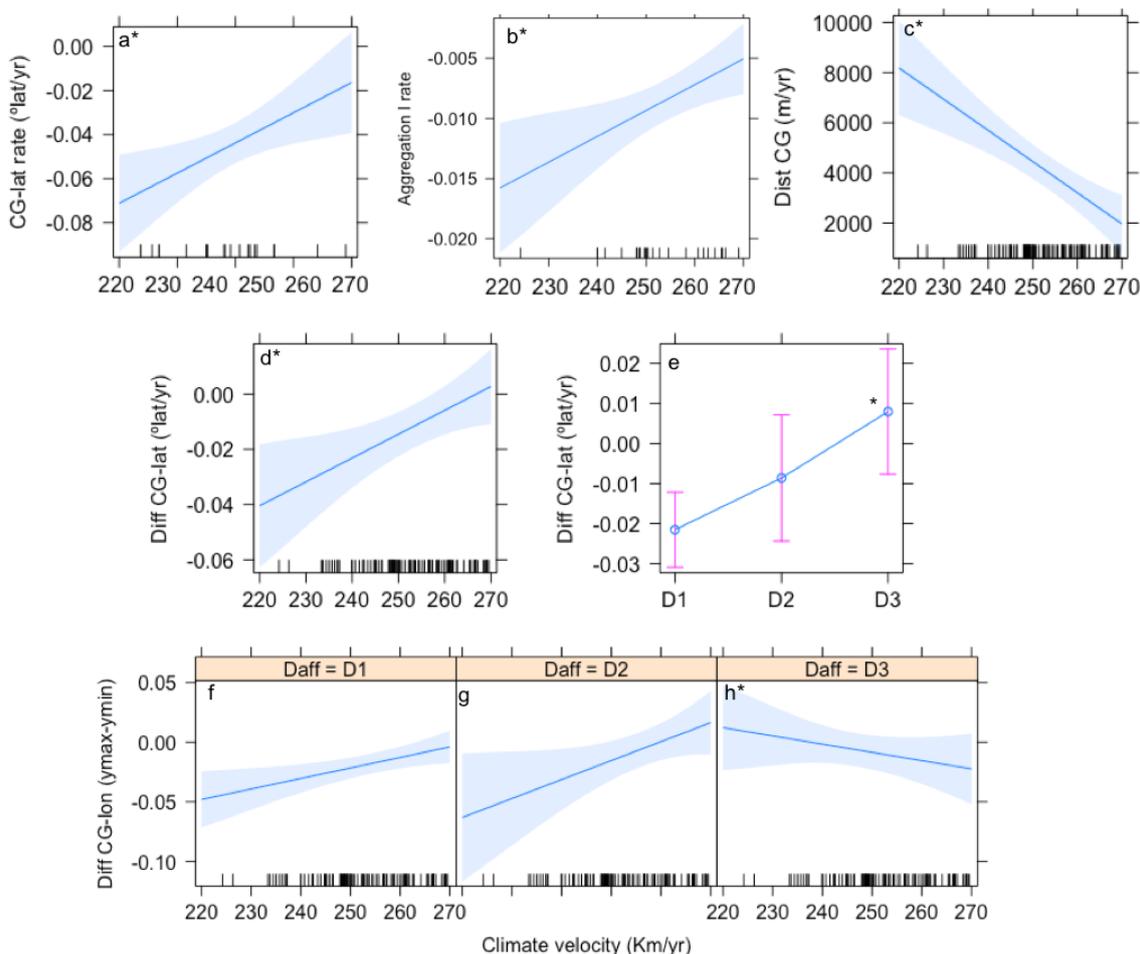


Figure 5: Análisis del modelo lineal de índices significativos de indicadores espaciales y temporales de especies que responden a la velocidad del clima (a, b, c, d), la afinidad de profundidad como factor aditivo (e) y su interacción (e, f, g). Las respuestas significativas se indican con un asterisco. Ver más detalles estadísticos en la Tabla 2, S1 y S2.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Nuestro estudio proporciona la evaluación de la velocidad del clima a la escala más fina hasta la fecha y calcula el cambio de distribución de la comunidad demersal (102 especies) en el Mediterráneo occidental, revelando cambios dominantes hacia el sur del área de estudio (GSA6) y desplazamientos verticales de la distribuciones de especies hacia capas más profundas. Estos resultados se oponen al paradigma de una migración de especies hacia el norte y la meridionalización del mar Mediterráneo, donde se supone que el mar Adriático y el golfo de León actúan como refugio para las especies de aguas frías y se convierten en un callejón sin salida para la extinción hacia finales de siglo según estudios basados en proyecciones climáticas (Ben Rais Lasram et al., 2010; Burrows et al., 2014). Sin embargo, nuestros resultados concuerdan con otros estudios recientes, como el de Ramírez et al. (2021), que identificaron un clima permanentemente subóptimo y en constante deterioro para la anchoveta y la sardina en el norte y el centro de GSA6, en contraste con condiciones climáticas más estables y óptimas para estas especies en el sur de GSA6. Nuestro estudio se suma al creciente número de evidencias de cambios en la distribución de especies

Organiza:

Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

siguiendo los patrones locales de calentamiento en lugar de las expectativas globales. Por ejemplo, en el golfo de Vizcaya (atlántico nororiental), el cambio dominante en la distribución de la comunidad demersal fue hacia el oeste y hacia aguas más profundas, escapando a las mayores tasas de calentamiento del interior del golfo. En esta área, se demostró que las comunidades de aguas cálidas se expanden a altas velocidades (~250 km año⁻¹) mientras que las comunidades frías se retraen a menor velocidad (150 km año⁻¹) (Punzón et al., 2021).

Nuestros resultados instan a realizar urgentemente estudios que caractericen los patrones de calentamiento y sus efectos sobre las especies y comunidades, para poder gestionar los ecosistemas de manera efectiva a una escala óptima a la que se pueda monitorizar las respuestas de las especies, así como la evaluación y seguimiento de las posibles medidas de adaptación.

Organiza:



Con el apoyo de:



R2.0.2 Temperatura media de la comunidad como indicador de los efectos del cambio climático

MÉTODOS

La comunidad de peces bentónicos-demersales ha sido muestreada cada otoño desde 1983 hasta 2015 (excepto en 1987) por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) utilizando la metodología estandarizada ICES para las campañas de prospección pesquera internacionales (International Bottom Trawl Surveys, ICES, 2017). Estas prospecciones siguieron un esquema de muestreo aleatorio estratificado por área, con tres estratos batimétricos de profundidad (70–120, 121–200, 201–500) y cinco sectores geográficos delimitados por las principales características geográficas: para aguas gallegas los sectores geográficos son Río Miño- Cabo Finisterre (MF) y C. Finisterre- C. Estaca (FE); para el Mar Cantábrico los sectores geográficos son C. Estaca-C. Peñas (EP); C. Peñas-C. Ajó (PA); y C. Río Ajo-Bidasoa (AB) (Figura 1). La unidad de muestreo consiste en redes de arrastre de fondo de 30 minutos a 3 nudos, utilizando un arte de arrastre de puertas estándar 'baca' 44/60 con malla de copo de 10 mm. La apertura horizontal y vertical media de la red es de 18.9 y 2.0 m, respectivamente. Después de cada lance, se identifican, pesan, cuentan y miden todas las especies de peces. En el análisis posterior se utilizaron todas las especies de peces de la comunidad, excepto aquellas pocas especies que se identificaron de manera ambigua a lo largo de la serie temporal (familia Gobiidae y Myctophidae), y aquellas cuya ocurrencia se consideró incidental (más detalles en Punzón et al., 2016). Así, toda la comunidad comprendía 69 especies de peces, la mayoría de ellos típicamente demersales (71 %), pero también incluía algunas especies que se consideran bentónicas con alta movilidad vertical (16 %) y pocas que se caracterizan como pelágicas (13 %).

La temperatura media de la columna de agua (MTW por sus siglas en inglés *Mean Temperature of the Water*) y la temperatura por debajo de la capa mixta de invierno (TBWML por sus siglas en inglés *Temperature Below the Water Mixed Layer*) se han utilizado como variables explicativas para estudiar las tendencias espacio-temporales de las comunidades demersales. No se ha utilizado la temperatura del fondo porque no concuerda con la oceanografía del área de estudio, debido principalmente a que es una zona de afloramiento, como puede verse en la literatura científica (por ejemplo, Serrano et al., 2011), pero también porque la mayoría de las especies demersales tienen una gran capacidad de desplazamiento vertical (Poloczanska et al., 2013, Le Marchand et al, 2020).

Los datos de temperatura de la columna de agua se obtuvieron del producto de re-análisis de física oceánica "*Atlantic-Iberian Iberian Biscay Irish- Ocean Physics Reanalysis*", generado y proporcionado por el CMEMS IBI-MFC y descargado de www.myocean.eu. El modelo proporcionó medias mensuales de temperatura para 50 profundidades diferentes, entre 0.5 y 5698 m de profundidad para el período de 2002 a 2015. Dado que la comunidad de peces siempre se muestrea a principios de otoño (septiembre-octubre), se calculó un valor medio para los 5 meses anteriores (junio a octubre) para cada profundidad en capas cuadradas de resolución 5x5 km. Se seleccionó esta ventana temporal porque presenta unas condiciones ambientales estables (por ejemplo, temperatura y afloramiento) previas al estudio. Posteriormente, calculamos la temperatura media de la columna de agua (MTW) y la temperatura delta (Δ MTW, diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la columna de agua) de los primeros 1000 m, con base en un conjunto de 17 profundidades distribuidas uniformemente.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

Para proporcionar evidencia de la relación de los cambios detectados en las comunidades y los cambios de temperatura en el área de estudio, utilizamos los perfiles de temperatura del re-análisis oceánico (ECMWF *Ocean Reanalysis System 4*, ORAS4) (Balmaseda et al., 2013). El re-análisis ORAS4 proporciona datos mensuales de temperatura, salinidad, corriente y nivel del mar en 42 niveles de presión de 5 a 5000 m con mayor espaciado vertical hacia el fondo y una resolución espacial de 1°x1°. Este re-análisis se ha presentado sistemáticamente junto con datos de secciones oceanográficas en el Golfo de Vizcaya para el estudio de los cambios hidrográficos y de circulación en las latitudes medias del Atlántico Norte Oriental (Somavilla et al. 2016, 2017). Estas comparaciones previas sirven como una validación importante, ya que los conjuntos de datos cuadrículados en general se ven afectados por factores como la influencia de los errores del modelo en los datos de re-análisis oceánicos (Balmaseda et al., 2013) o la estrategia para llenar las lagunas en los datos climatológicos (Cheng y Zhu , 2015). Calculamos entonces el promedio anual de temperatura en el rango de profundidad entre 300 y 600 m de profundidad, excluyendo de este promedio la profundidad de la capa de mezcla superficial afectada por su fuerte estacionalidad. Los máximos de la capa de mezcla invernal en la zona se encuentra dentro de los 250 m de profundidad, por lo que denominamos a esta temperatura media de aquí en adelante Temperatura por Debajo de la Capa de Mezcla Invernal (TBWML por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, se calculó la temperatura media ponderada de la comunidad (CWMT) en cada lance como,

$$CWMT_i = \frac{\sum T_{pref_s} * W_{si}}{\sum W_{si}}$$

Donde CWMT_i es la temperatura media ponderada de la comunidad en el lance i, T_{pref_s} es la temperatura preferida de las especies y W_{si} es la biomasa en peso de las especies en el lance i.

La temperatura de preferencia para cada especie se calculó ponderando espacialmente la temperatura media del fondo del agua y la probabilidad de ocurrencia de la especie (Anexo_2.1). Los rangos de distribución y las probabilidades de ocurrencia de todas las especies de peces se obtuvieron de los modelos de envoltura bioclimática desarrollados por AQUAMAPS (Kaschner et al., 2016). De este modo evitamos el sesgo de considerar solo las temperaturas dentro del área de y usamos la temperatura del agua en el fondo del mar, que es más sensible para las comunidades bentónico-demersales, particularmente cuando se incluyen especies de profundidad (Hiddink & Hofstede, 2008). Sin embargo, estas temperaturas preferidas deben considerarse un indicador de la afinidad de la temperatura de la especie, en lugar de la temperatura óptima de la especie.

Las estadísticas de CMWT por rango de profundidad y sector geográfico se estimaron con base en el CWMT por lance. La distribución espacial de esta métrica para el período de tiempo (2002-2015) se comparará con la información disponible para MWT y se calculó como la media para cada estación de muestra. Usando la distribución espacial de MWT y la temperatura media ponderada de la comunidad (CWMT) entre 2002 y 2015, calculamos la correlación entre ellos. Para representar el índice (CWMT) con una resolución más fina, utilizamos el análisis universal de *kriging*. El *kriging* se calculó usando la función *autofitVariogram* del paquete de *R automap* (Hiemstra et al., 2008) para calcular el variograma, y la función *krige* del paquete *gstat* (Pebesma, 2004) para hacer el *kriging* universal, usando la profundidad como covariable.

Organiza:



Con el apoyo de:



Para estimar la evolución en el tiempo de la evolución en el tiempo de CWMT para el área total y por sector geográfico se realizó un Modelo Aditivo General (GAMs; Hastie & Tibshirani, 1990). Para analizar las tendencias en la distribución espacial en el tiempo, se clasificó el CWMT por recorrido utilizando el algoritmo *k-means* para discriminar áreas geográficas distintas. *K-means* almacena *k* centroides que utiliza para definir los clústeres.

Los análisis también se realizaron utilizando R (R Development Core Team, 2018). El GAM se realizó utilizando el paquete *mgcv* sin limitar los grados de libertad del interpolado y asumiendo una distribución gaussiana (Wood, 2011). La clasificación *k-means* se realizó utilizando la biblioteca *classInt* (Bivand, 2018).

RESULTADOS

El patrón espacial muestra la Temperatura Media de la Columna de Agua (MTW) sobre la plataforma continental, y refleja la oceanografía regional del sur del Golfo de Vizcaya, aumentando generalmente en valores medios y/o máximos desde el Suroeste al Noreste, hacia el interior del Golfo de Vizcaya (Figura 6a). A través de los estratos de profundidad, el MTW disminuyó ($T^{70-120} = 14.32$, $T^{120-200} = 13.98$, $T^{200-500} = 13.82$), pero agregando los datos de MTW por estrato de profundidad y sector geográfico, esta disminución de temperatura con la profundidad sólo se apreció en el Mar Cantábrico (Golfo de Vizcaya interior), pero no en los sectores más occidentales. En función de la temperatura de la columna de agua, la ΔT^a (diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la columna de agua), es mínima en la plataforma de aguas gallegas, principalmente en MF (Figura 6b). Por su parte en el Mar Cantábrico la ΔT^a tiene un patrón según los estratos de profundidad, mínimo en los estratos someros y máximo en los profundos (Figura 6b).

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

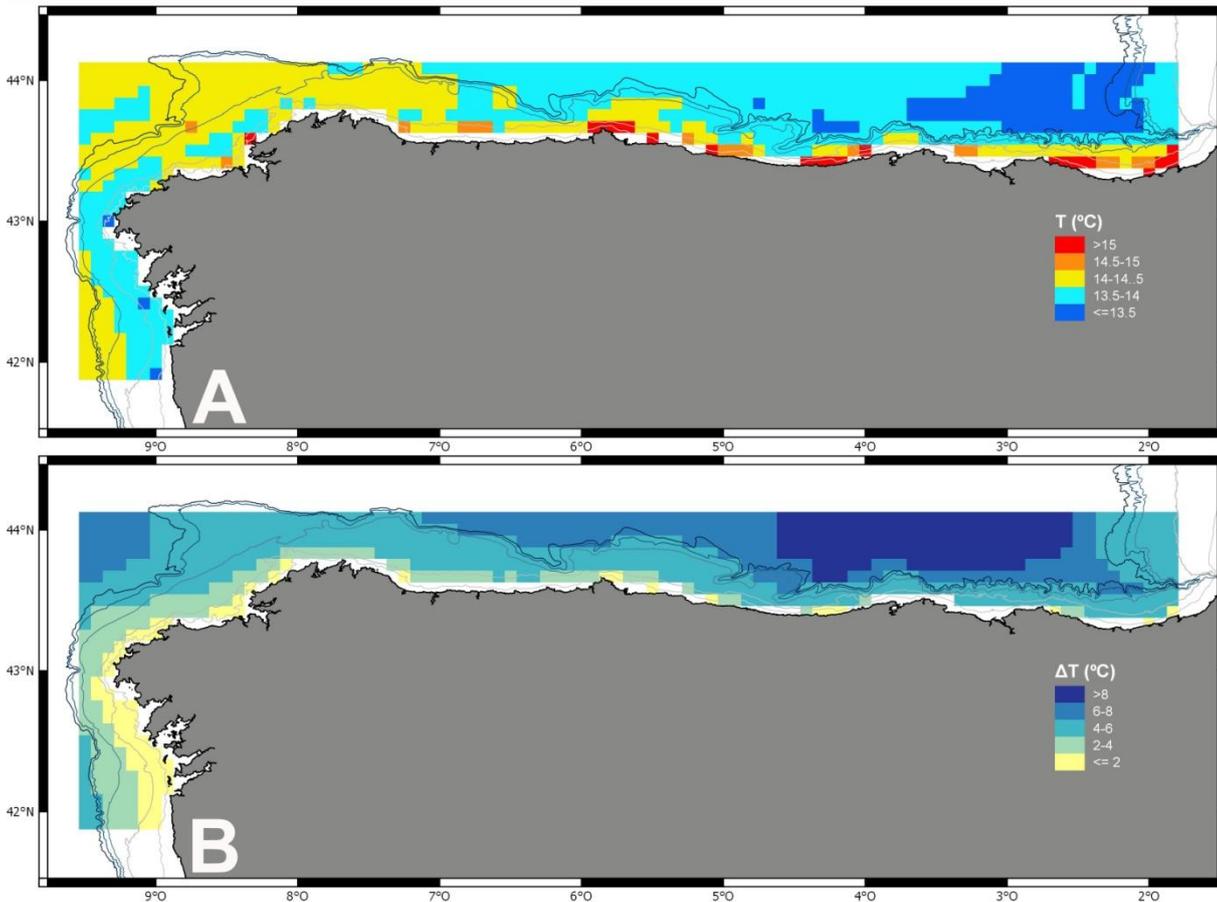


Figura 6. Distribución espacial de la Temperatura Media de la Columna de Agua (MTW): valor promedio (A) e incremento (diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la columna de agua) de MTW (B) durante el período 2002-2015.

Al comparar las distribuciones de MTW y CWMT, los patrones espaciales mostrados por ambas métricas fueron bastante similares (Figura 6a, Figura 7). La correlación de Pearson entre CWMT y MTW fue de 0,372 (intervalo de confianza=0,29-0,44, $p= 2,2e-16$).

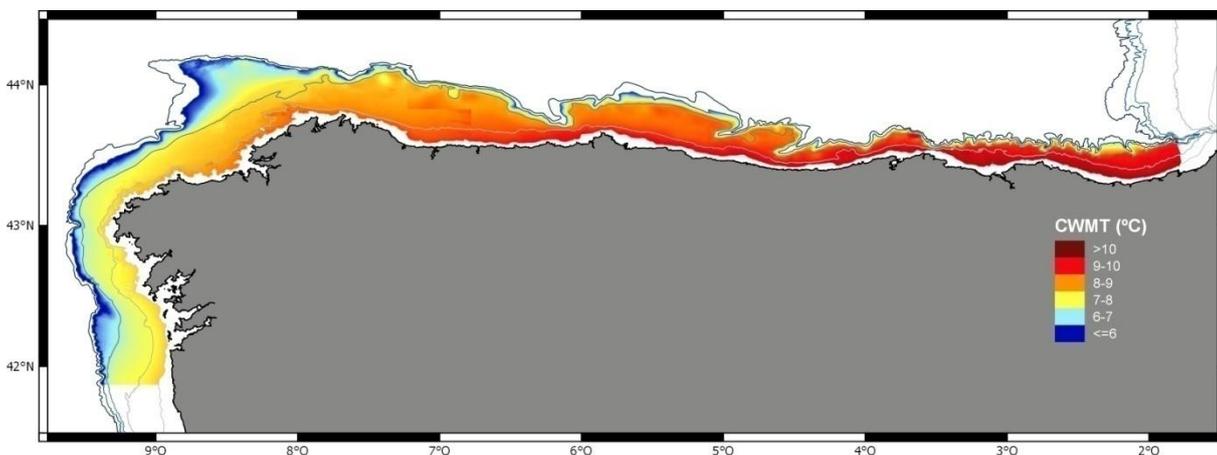


Figura 7. Distribución espacial de la temperatura media ponderada de la comunidad (CWMT) entre 2002-2015.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

La tendencia anual de CWMT para toda el área (Figura 8b) está de acuerdo con la tendencia anual de TBWML (Figura 8a). En ninguna de las dos series se identificó autocorrelación temporal. La conexión de Pearson entre series temporales fue de 0.613 (con un intervalo de confianza = 0.34-0.79, $p \ll 0,001$). Nuestro análisis reveló también un patrón temporal claro en el CWMT ($CWMT \sim \text{año}$, $p \ll \ll 0.001$) (Figura 8ba), pero heterogénea entre sectores geográficos (Fig 9), y con una tasa de incremento anual de la CWMT de 0.04 °C /año. Los sectores del oeste mostraron patrones más bajos pero más fluctuantes en comparación con los sectores del este, con los patrones en MF, FE y EP temporalmente asincronizados desde mediados de los 90 con el patrón AB. La conexión de Pearson entre el CWMT del área occidental (sectores MF y FE) con el TBWML del área occidental fue de 0.522 (con un intervalo de confianza = 0.21-0.78, $p \ll \ll 0.001$), mientras que esta correlación entre CWMT del área nororiental y el TBWML de esta área fue 0.59 (con un intervalo de confianza = 0.30-0.78, $p \ll \ll 0.001$).

Identificamos las especies involucradas en la tendencia temporal observada, en función de su porcentaje de contribución a la CWMT (Figura 8bc). La proporción de especies con temperaturas preferidas más frías es suficiente con el tiempo, en particular la bacaladilla (*Micromesistius poutassou*), que a pesar de su alta concentración interanual es una de las especies dominantes en la comunidad. Por otro lado, el número de especies con temperaturas preferidas más cálidas que incluyen entre otras *Scyliorhinus canicula*, *Pagellus acarne* o *Lepidorhombus whiffiagonis*, parece estar aumentando con el tiempo (Figura 8b). Los aumentos excepcionales de CWMT en 1994 y 2008 fueron causados por diferentes comunidades (Figura 8). El primer pico estuvo relacionado con el aumento en la abundancia de unas pocas especies con temperaturas preferidas más cálidas, en particular *Macroramphosus scolopax* y *Trachurus trachurus*, mientras que el segundo fue causado por una fuerte disminución de *M. poutassou* y una ganancia generalizada en la abundancia de especies con temperaturas de preferencia más cálidas (Figura 8).

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

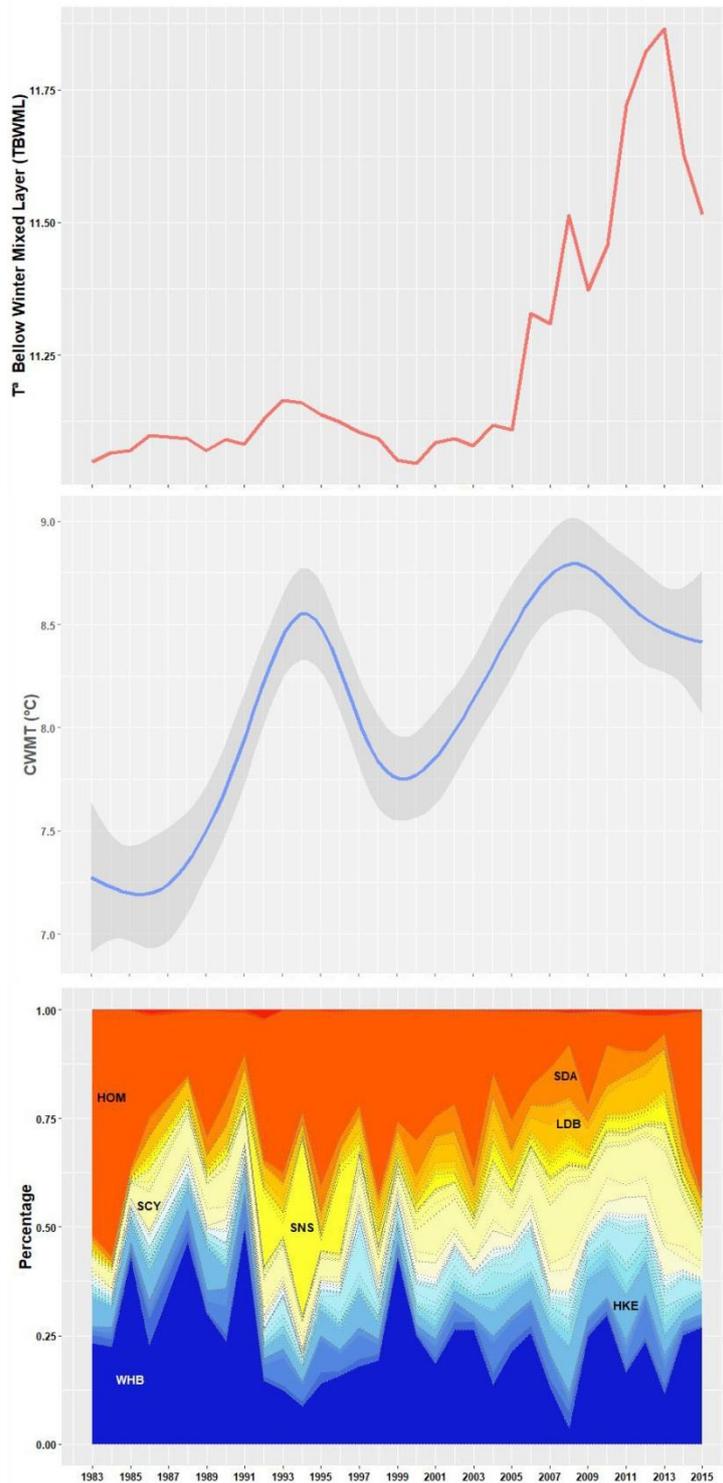


Figura 8. Temperatura Anual Bajo Capa de Mezcla (TBWML): (A), Cambios anuales en CWMT (resultados del Modelo Aditivo Generalizado) (AB) y abundancias relativas de las diferentes especies de peces en la comunidad anualmente (B)C. El color de cada especie refleja la temperatura media de la especie, siendo el azul el más frío y el rojo el más cálido (ver Tabla Supl. 1). Código de especie: *Micromesistius poutassou* (WHB), *Scyliorhinus canicula* (SCY), *Merluccius merluccius* (HKE), *Trachurus trachurus* (HOM), *Macroramphosus scolopax* (SNS), *Pagellus acarne* (SDA), *Lepidorhombus boscii* (LDB).

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

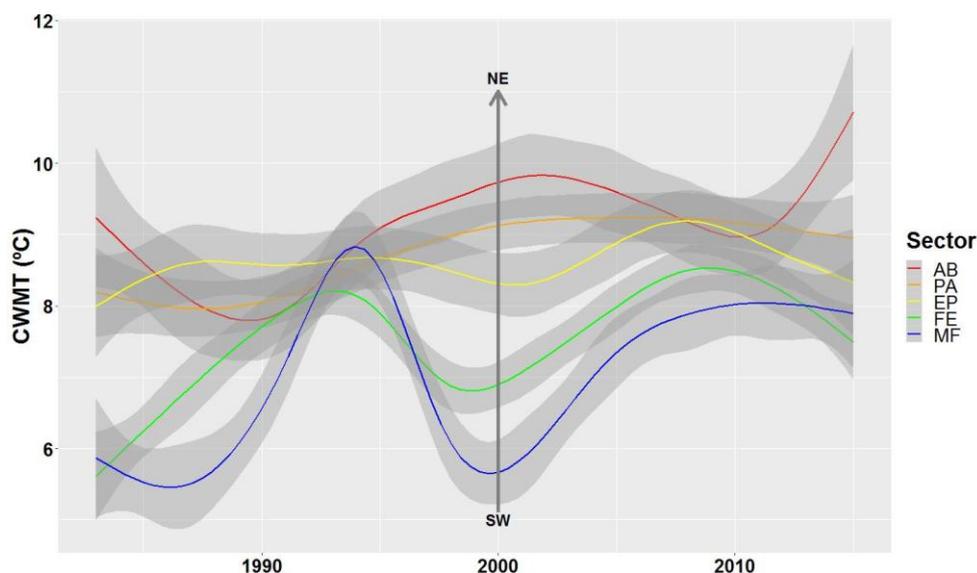


Figura 9. Variabilidad en los cambios anuales en CWMT representados por sector geográfico (resultados del Modelo Aditivo Generalizado).

Para analizar las tendencias espacio-temporales del CWMT, clasificamos el CWMT por lance en tres grupos mediante el método k-mean. El rango de CWMT por grupos fue: Frío ≤ 6.64 °C; 6.64 °C < Templado ≤ 9.58 °C; Caliente > 9.58 °C. En la figura 10 mostramos la distribución espacial de los tipos de comunidad para todas las series temporales, donde la comunidad cálida se encuentra en la zona litoral de los sectores geográficos del Mar Cantábrico y escasamente en el norte de las Aguas de Galicia. En los sectores geográficos de Aguas de Galicia, la comunidad templada es la más importante. La interpolación espacial se estimó para cada año a partir de los datos por lance, y cada celda se clasificó para estimar el área ocupada por grupos de distribución CWMT. En la Figura 6 mostramos la tendencia por grupos de rango CWMT. La tendencia para los grupos CWMT cálidos y fríos fue significativa (cálido, $p = 0.0013$; frío, $p = 0.014$). La pendiente para el grupo Warm CWMT fue de $268,41 \text{ km año}^{-1}$, y para el grupo Cold fue de $-155,39 \text{ km año}^{-1}$.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

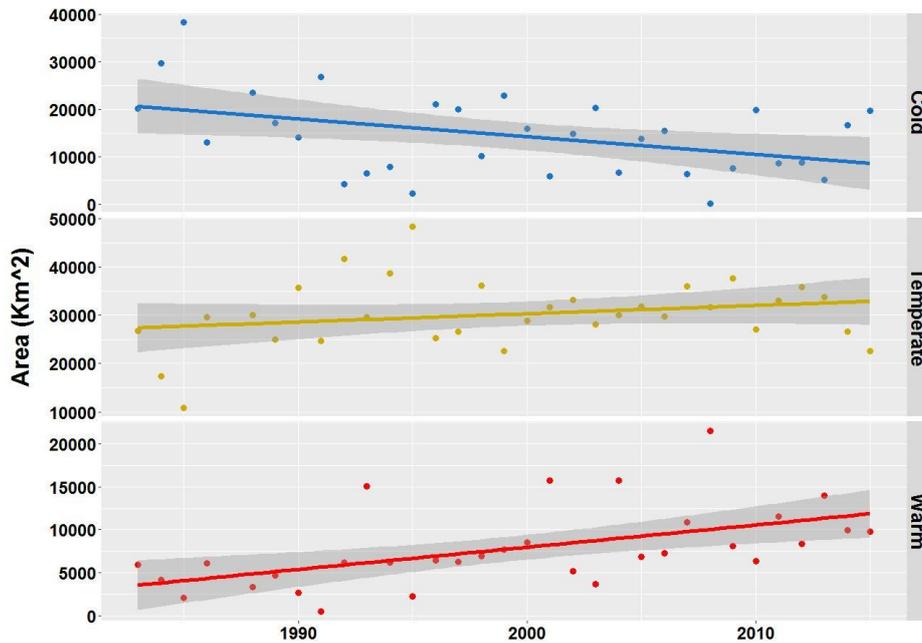


Figura 10. Tendencias en la ocupación espacial de los tipos de comunidad: cálida ($p= 0.0013$, $r^2= 0.3$, pendiente= 268.41), templada ($p= 0.18$, $r^2= 0.06$, pendiente= -121.35) y fría ($p= 0.0144$, $r^2= 0.18$, pendiente= -155.39).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las comunidades de peces bentónicos-demersales analizadas en el presente estudio respondieron a la temperatura en diferentes escalas espacio-temporales reflejando: (i) las tendencias de calentamiento observadas en la columna de agua; (ii) los procesos oceanográficos locales; y (iii) su estructura interna. Por lo tanto, el CWMT demuestra ser un buen indicador de cambios en las comunidades marinas, reflejando tanto su variabilidad espacial como temporal. De hecho, el CWMT capturó la dinámica de la comunidad incluso en ausencia de reemplazos de especies o migración de nuevas especies al Golfo de Vizcaya, mientras que estos eventos se han informado comúnmente en comunidades de peces de clima templado frío sujetas a tasas similares de calentamiento (Perry et al. 2005; Collie et al., 2008; Hofstede et al., 2010), la zona biogeográfica puede ser la diferencia clave entre estos estudios, ya que este estudio se sitúa en una "provincia de clima cálido", mientras que los estudios anteriores se realizaron en "provincias templadas-frías", respondiendo a la hipótesis de Hiddink & Hofstede (2008), quienes sugirieron que los cambios en la riqueza de especies ocurrirían preferentemente en latitudes templadas y frías, en relación a latitudes más cálidas. Por lo tanto, planteamos la hipótesis de la existencia de un gradiente en la tasa de cambio de las comunidades entre "provincias cálidas" y "provincias frías", siendo más rápido en latitudes más altas. Por lo tanto, CWMT podría ser una herramienta útil para investigar más a fondo esta hipótesis y probar el rendimiento de este índice en un rango latitudinal de ecosistemas marinos para probar la generalidad de nuestros hallazgos. El ritmo de cambio de las comunidades del Golfo de Vizcaya Sur es suficiente para impactar profundamente en las actividades económicas basadas en los recursos bentónico-demersales. Esto destaca la importancia de predecir la evolución del ecosistema demersal bajo diferentes escenarios de cambio climático, con el objetivo de implementar herramientas de adaptación y mitigación.

Organiza:



Con el apoyo de:



BIBLIOGRAFÍA

- Balmaseda, M. A., K. E. Trenberth, and E. Kalén (2013), Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1754–1759, doi:10.1002/grl.50382.
- Ben Rais Lasram, F., Guilhaumon, F.F., Albouy, C., Somot, S., Thuiller, W., Mouillot, D., 2010. The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change. *Glob. Chang. Biol.* 16, 3233–3245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02224.x>
- Bez, N., 1997. Covariogram and related tools for structural analysis of fish survey data. *Geostatistics Wollogong'96* 2, 1316–1327.
- Bez, N., 2000. On the use of Lloyd's index of patchiness. *Fish. Oceanogr.* 9, 372–376. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2000.00148.x>
- Bez, N., Rivoirard, J., 2001. Transitive geostatistics to characterise spatial aggregations with diffuse limits: An application on mackerel ichthyoplankton. *Fish. Res.* 50, 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(00\)00241-1](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(00)00241-1)
- Burrows, M. T., Schoeman, D. S., Buckley, L. B., Moore, P., Poloczanska, E. S., Brander, K. M., Brown, C., Bruno, J.F., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C.V., Kiessling, W., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F.B., Sydeman, W.J., Richardson, A.J. (2011). The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science*, 334(6056), 652-655.
- Burrows, Schoeman, D.S., Buckley, L.B., Moore, P., Poloczanska, E.S., Brander, K.M., Brown, C., Bruno, J.F., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C. V., Kiessling, W., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F.B., Sydeman, W.J., Richardson, A.J., 2011. The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science* (80-.). 334, 652–655. <https://doi.org/10.1126/science.1210288>
- Cheng, L., and J. Zhu (2015), Influences of the choice of climatology on ocean heat content estimation, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 32, 388–394, doi:10.1175/JTECH-D-14-00169.1.
- Cheung, W. W., Lam, V. W., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., & Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and fisheries*, 10(3), 235-251.
- Cheung, W. W., Watson, R., & Pauly, D. (2013). Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497, 365-368.
- Collie, J. S., Wood, A. D., & Jeffries, H. P. (2008). Long-term shifts in the species composition of a coastal fish community. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65, 1352-1365.
- Greenstreet, S.P.R., Rossberg, A.G., Fox, C.J., Quesne, W.J.F. Le, Blasdale, T., Boulcott, P., Mitchell, I., Millar, C., Moffat, C.F., 2012. Demersal fish biodiversity: species-level indicators and trends-based targets for the Marine Strategy Framework Directive. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 1789–1801.
- Hastie, T. J., & Tibshirani, R. J. (1990). *Generalised additive models* (p. 335). London, UK: Chapman and Hall.

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

- Hiddink, J., & Ter Hofstede, R. (2008). Climate induced increases in species richness of marine fishes. *Global Change Biology*, 14, 453-460.
- Hiemstra, P.H., Pebesma, E.J., Twenhofel, C.J.W., & Heuvelink, G.B.M. (2008). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch Radioactivity Monitoring Network. *Computers & Geosciences*, 35(8), 1711-1721.
- Hofstede, T.R., Hiddink, J.G., & Rijnsdorp, A.D. (2010). Regional warming changes fish species richness in the eastern North Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 414, 1–9.
- Kaschner, K., Kesner-Reyes, C., Garilao, J., Rius-Barile, T., Rees, and R. Froese. (2016). AquaMaps: Predicted range maps for aquatic species. World wide web electronic publication, www.aquamaps.org, Version 08/2016.
- Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Garilao, C., Segschneider, J., Rius-Barile, J., Rees, T., Froese, R., 2019. AquaMaps: Predicted range maps for aquatic species, Version October 2019.
- Le Marchand, M., Hattab, T., Niquil, N., Albouy, C., Le Loc'h, F. and Ben Rais Lasram, F. (2020). Climate change in the Bay of Biscay: Changes in spatial biodiversity patterns could be driven by the arrivals of southern species. *Marine Ecology Progress Series*, 647, 17-31
- Lloret, J., Sabatés, A., Muñoz, M., Demestre, M., Solé, I., Font, T., Casadevall, M., Martín, P., Gómez, S., 2015. How a multidisciplinary approach involving ethnoecology, biology and fisheries can help explain the spatio-temporal changes in marine fish abundance resulting from climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 24, 448–461. <https://doi.org/10.1111/geb.12276>
- Lloyd, M., 1967. Mean crowding'. *J. Anim. Ecol.* 1–30.
- Lucey, S. M., & Nye, J. A. (2010). Shifting species assemblages in the northeast US continental shelf large marine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 415, 23-33.
- Melbourne-Thomas, J., Audzijonyte, A., Brasier, M.J., Cresswell, K.A., Fogarty, H.E., Haward, M., Hobday, A.J., Hunt, H.L., Ling, S.D., McCormack, P.C., Mustonen, T., Mustonen, K., Nye, J.A., Oellermann, M., Trebilco, R., van Putten, I., Villanueva, C., Watson, R.A., Pecl, G.T., 2021. Poleward bound: adapting to climate-driven species redistribution. *Rev. Fish Biol. Fish.* 32, 231–251. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09641-3>
- Pebesma, E.J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30: 683-691.
- Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., Blanchard, J., Bonebrake, T.C., Chen, I.-C., Clark, T.D., Colwell, R.K., Danielsen, F., Evengård, B., 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* (80-). 355.
- Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R., Reynolds, J.D., 2005. Ecology: Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* (80-). 308, 1912–1915. <https://doi.org/10.1126/science.1111322>

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

- Pinsky, M.L., Selden, R.L., Kitchel, Z.J., 2020b. Climate-Driven Shifts in Marine Species Ranges: Scaling from Organisms to Communities. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 12, 153–179. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010916>
- Pinsky, M.L., Worm, B., Fogarty, M.J., Sarmiento, J.L., Levin, S.A., 2013. Marine taxa track local climate velocities. *Science* (80-.). 341, 1239–1242.
- Poloczanska, E.S., Brown, C.J., Sydeman, W.J., Kiessling, W., Schoeman, D.S., Moore, P.J., Brander, K., Bruno, J.F., Buckley, L.B., Burrows, M.T., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C.V., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S.A., & Richardson, A.J., (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3(10), 919.
- Puerta, P., Hidalgo, M., González, M., Esteban, A., & Quetglas, A. (2014). Role of hydro-climatic and demographic processes on the spatio-temporal distribution of cephalopods in the western Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*, 514, 105-118.
- Punzón, A., López-López, L., González-Irusta, J.M., Preciado, I., Hidalgo, M., Serrano, A., Tel, E., Somavilla, R., Polo, J., Blanco, M., Ruiz-Pico, S., Fernández-Zapico, O., Velasco, F., Massuti, E., 2021. Tracking the effect of temperature in marine demersal fish communities. *Ecol. Indic.* 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107142>
- Punzón, A., Serrano, A., Sánchez, F., Velasco, F., Preciado, I., González-Irusta, J., & López-López, L. (2016). Response of a temperate demersal fish community to global warming. *Journal of Marine Systems*, 161, 1-10.
- R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- Ramírez, F., Pennino, M.G., Albo-Puigserver, M., Steenbeek, J., Bellido, J.M., Coll, M., 2021. SOS small pelagics: A safe operating space for small pelagic fish in the western Mediterranean Sea. *Sci. Total Environ.* 756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144002>
- Rindorf, A., Lewy, P., 2012. Estimating the relationship between abundance and distribution. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 69, 382–397. <https://doi.org/10.1139/F2011-153>
- Rufino, M.M., Bez, N., Brind'Amour, A., 2018. Integrating spatial indicators in the surveillance of exploited marine ecosystems. *PLoS One* 13, 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207538>
- Somavilla, R., C. González-Pola, and J. Fernández-Díaz (2017), The warmer the ocean surface, the shallower the mixed layer. How much of this is true?, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 7698–7716, doi:10.1002/2017JC013125.
- Somavilla, R., C. González-Pola, U. Schauer, and G. Budéus (2016), Mid-2000s North Atlantic shift: Heat budget and circulation changes, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2059–2068, doi:10.1002/2015GL067254.
- Southwood, T.R.E., 1978. *Ecological Methods: with Particular Reference to the Study of Insect Populations*, Chapman & Hall, London.
- Woillez, M., Rivoirard, J., Petitgas, P., 2009. Notes on survey-based spatial indicators for monitoring fish populations. *Aquat. Living Resour.* 22, 155–164. <https://doi.org/10.1051/alr/2009017>

Organiza:



Con el apoyo de:



A2.0 Evidencias de los efectos del cambio climático sobre las comunidades demersales

Wood, S.N. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 73(1),3-36.

Organiza:



Con el apoyo de:

