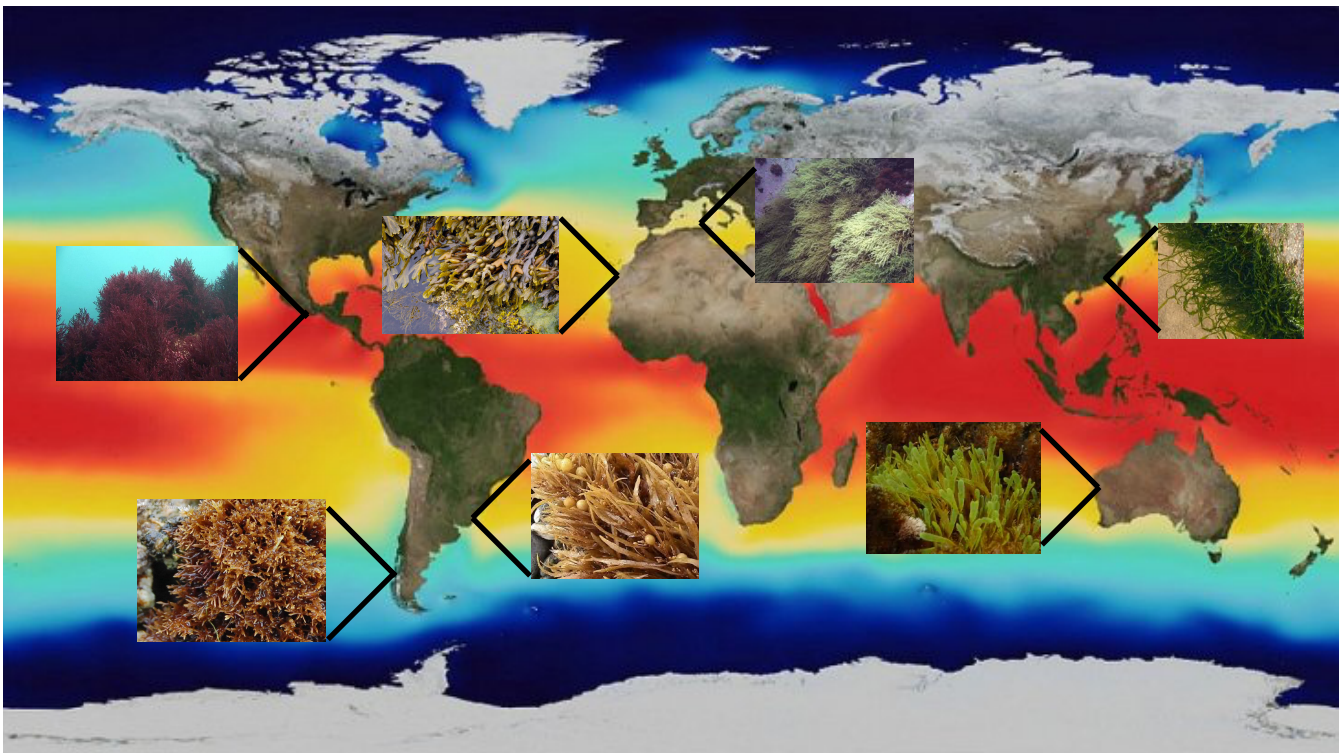


Predicción de cambios en el fitobentos de las islas Canarias como consecuencia del calentamiento global

Prediction of changes in the phytobenthos of the Canary islands as a consequence of global warming



Trabajo de Fin de Grado
MARTA CUÉTARA SÁNCHEZ
Tutorizado por Marta Sansón Acedo y Carlos Sangil Hernández
Grado en Biología. Junio 2020

Marta Sansón Acedo, Profesora Titular del Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal de la ULL, y **Carlos Sangil Hernández**, Investigador posdoctoral y CLI del Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología de la ULL

CERTIFICAN:

Que la memoria presentada por la alumna del Grado de Biología **Marta Cuétara Sánchez**, titulada *Predicción de cambios en el fitobentos de las islas Canarias como consecuencia del calentamiento global*, ha sido realizada bajo nuestra dirección, alcanzando todas las competencias, condiciones de calidad y rigor científico que se requieren para optar a su presentación y defensa como Trabajo de Fin de Grado, en el curso 2019-2020.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmamos el presente certificado, en San Cristóbal de La Laguna, a 9 de Junio de 2020.

**SANSON
ACEDO
MARTA
ISABEL -
42068614
G**

Firmado digitalmente por
SANSON ACEDO MARTA
ISABEL - 42068614G
Nombre de
reconocimiento (DN):
c=ES,
serialNumber=IDCES-4206
8614G,
givenName=MARTA
ISABEL, sn=SANSON
ACEDO, cn=SANSON
ACEDO MARTA ISABEL -
42068614G
Fecha: 2020.06.09 14:24:36
+01'00'



Fdo. Dra. Marta Sansón Acedo

Fdo. Dr. Carlos Sangil Hernández

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora y cotutor, Marta Sansón Acedo y Carlos Sangil Hernández, por haber enfocado el proyecto y por su valiosa ayuda durante todo el proceso. Me han facilitado todas las herramientas necesarias para completar este trabajo de fin de grado satisfactoriamente y me han sabido guiar en todo momento apoyándome durante el desarrollo de la redacción. Como ya hemos comentado en alguna ocasión, este año la pandemia que nos afecta nos ha trastocado parte de los planes y no hemos podido disfrutar tanto del proceso como hubiéramos querido, aunque al final todo ha acabado saliendo bien.

Me gustaría agradecer a todos los investigadores a los que se hace referencia en este trabajo por su esfuerzo y dedicación en las investigaciones sobre la temática en las que he basado este estudio ya que sin sus hallazgos no se hubiera podido lograr. En especial, mencionar al grupo de investigación BOTMAR-ULL del Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal de la Universidad de La Laguna que obtuvieron previamente a la realización de este TFG, los datos que han servido de base para la elección de las especies de macroalgas objeto de este estudio.

Por último, pero no por ello menos importante, gracias a mi familia y amigos que han supuesto un apoyo moral muy importante a lo largo de estos cuatro años de carrera.

De nuevo, gracias, porque sin ustedes esto no hubiera sido posible.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 3. MATERIAL Y MÉTODOS | 4 |
| 3.1. Área de estudio | 4 |
| 3.2. Selección de las especies de macroalgas. | 5 |
| 3.3. Obtención de los datos de distribución de las macroalgas | 6 |
| 3.4. Cálculo del rango potencial de temperaturas de las macroalgas | 6 |
| 3.5. Elaboración de los mapas de distribución | 7 |
| 3.6. Análisis de los datos | 7 |
| 4. RESULTADOS | 8 |
| 4.1. Macroalgas más abundantes de las costas rocosas de Canarias | 8 |
| 4.2. Distribución y rangos de temperaturas de las macroalgas | 9 |
| 4.3. Predicción de distribución en futuros escenarios de calentamiento global | 23 |
| 5. DISCUSIÓN | 24 |
| 6. CONCLUSIONES | 27 |
| 7. CONCLUSIONS | 28 |
| 8. REFERENCIAS | 29 |

RESUMEN

Las macroalgas marinas son los principales productores primarios de los océanos y mares constituyendo la base de muchos ecosistemas que dependen de ellas para sobrevivir. Ante el actual escenario de cambio climático global, se ha observado su regresión y hasta su desaparición en numerosas localidades del litoral mundial, debido al aumento de la temperatura del agua de mar. La distribución biogeográfica de estos organismos está sufriendo notables cambios y según las predicciones de futuros escenarios de calentamiento global, continuará bajo la influencia de las alteraciones de las condiciones ambientales. Con el objetivo de predecir futuras variaciones causadas por el aumento de las temperaturas, se examinaron las áreas de distribución junto con el rango de temperaturas óptimas para el crecimiento de las macroalgas más abundantes del fitobentos marino de las islas Canarias. Se concluye que la temperatura es el principal factor ambiental que determina la distribución geográfica de las macroalgas marinas lo que muestra su alta vulnerabilidad ante el cambio climático, estando más expuesto el límite sur de su distribución. Sin embargo, la mayoría de las especies estudiadas potencialmente tolerarán al menos el incremento de temperatura previsto en las islas Canarias para el 2100.

PALABRAS CLAVE

Cambio climático, distribución, islas Canarias, macroalgas, regresión, temperaturas.

ABSTRACT

Marine macroalgae are the primary producers of the oceans and seas which are the basis of many ecosystems that depend on them for survival. Given the current scenario of global climate change, its regression and even disappearance has been observed in many locations along the world's coastline, due to the rise in sea water temperature. The biogeographical distribution of these organisms is undergoing significant changes and according to predictions of future global warming scenarios, it will continue to be influenced by the alterations of environmental conditions. In order to predict future variations caused by the increasing temperatures, the areas of distribution along with the range of optimal temperatures for the growth of the most abundant macroalgae of the marine phytobenthos of the Canary islands were examined. We conclude that temperature is the main environmental factor that determines the geographical distribution of marine macroalgae, which shows their high vulnerability to climate change, with the southern limit of their distribution being more exposed. However, most of the species studied will potentially tolerate at least the increase in temperature predicted in the Canary islands for 2100.

KEY WORDS

Canary islands, climate change, distribution, macroalgae, regression, temperatures.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, existe un gran interés en la predicción de los efectos que el cambio climático puede llegar a ocasionar a corto y largo plazo sobre nuestro planeta, pudiéndose convertir en una herramienta muy útil en campos como la biogeografía, la ecología, la distribución de especies y la conservación de los ecosistemas, además de muchas otras áreas del saber. Este conocimiento puede ayudar a prevenir los impactos que pueden producirse en el futuro cercano, contribuyendo a la regresión parcial o total del cambio climático o, al menos, al entendimiento de cómo enfrentarnos y disminuir esos cambios ambientales antes de que ocurran o sean irreversibles (Tyberghein et al. 2012; Assis et al. 2018).

Las especies de macroalgas denominadas estructurantes, fundadoras de hábitats o ingenieras de los ecosistemas juegan un importante papel como productores primarios en los océanos (Tait y Schiel 2018), ofreciendo numerosos servicios ecosistémicos, como sustrato, refugio o alimento a muchos otros organismos marinos (Bertness et al. 1999; Benedetti-Cecchi et al. 2001; Steneck et al. 2002; Bruno et al. 2003), además de contribuir a la conservación de la biodiversidad marina (Martínez et al. 2015), la protección del litoral constituyendo arrecifes biogénicos (Mieszkowska et al. 2006), o la capacidad de secuestrar CO₂ (Raven y Falkowski 1999) reduciendo sus niveles actuales críticos. Las macroalgas marinas son organismos fotosintetizadores, que constituyen el acceso principal para el ingreso de energía en las redes tróficas, creciendo adheridos a diferentes tipos de sustratos, como arenas, lodos, rocas y otros sustratos vivos, siendo los elementos que caracterizan muchos paisajes a lo largo de las costas de islas y continentes (Lüning 1990; Tait y Schiel 2018). Por ello, son considerados los cimientos de todos los ecosistemas receptores de luz y se convierten en excelentes modelos para predecir lo que está ocurriendo y ocurrirá en escenarios futuros de cambio.

El cambio climático está provocando grandes alteraciones en mares y océanos incrementando la temperatura del agua, la estratificación, las condiciones de estrés generadas por la radiación solar, la acidificación y el descenso de la humedad, fomentando así los cambios en la circulación de las masas de agua. Estas alteraciones negativas de las condiciones ambientales que afectan directamente a la fisiología de las algas llevan consigo un amplio número de efectos y desequilibrios en los ecosistemas provocando un descenso de las poblaciones de macroalgas al inhibirse su crecimiento. Los impactos del cambio climático

se suman a muchas otras perturbaciones de carácter antropogénico, como la contaminación, la sobreexplotación de recursos y la destrucción de los hábitats, que tienen un alto impacto en los ecosistemas marinos (Kersting 2016).

Especialmente en las regiones templadas del mundo, las poblaciones de macroalgas están mostrando en las últimas décadas cambios en su distribución geográfica en respuesta principalmente al efecto del calentamiento global, desapareciendo en sus límites latitudinales más cálidos y trasladando su rango de distribución hacia latitudes más frías (Jueterbock et al. 2013). La distribución geográfica de las especies de macroalgas está estrechamente relacionada con la temperatura del agua del mar. La temperatura es uno de los principales factores que afectan al ciclo ecológico de las macroalgas, jugando un papel clave sobre su crecimiento, reproducción, dispersión y supervivencia. Así, las variaciones en este parámetro provocan estrés en los individuos y desequilibrios en los ecosistemas marinos. Cada macroalga tiene su rango de temperatura óptimo, con límites máximos y mínimos letales, fuera de los cuales la especie no puede sobrevivir. Por debajo de esos límites, las especies pueden perdurar creciendo vegetativamente, y en general solo bajo un rango más estrecho de temperaturas se reproducen (Bartsch et al. 2012; Eggert 2012). Por ello, las macroalgas tendrán mayor éxito de dispersión y migración hacia lugares más óptimos dependiendo de su habilidad para adaptarse a las nuevas condiciones de temperaturas en escenarios de cambios (Broennimann et al. 2006). No obstante, la distribución real de muchas macroalgas así como sus preferencias ecológicas aún están mal conocidas (Tyberghein et al. 2012).

En las costas europeas, las especies de macroalgas de afinidad templada características del intermareal y de los primeros metros del sublitoral han sufrido un gran declive en su abundancia y distribución en las últimas décadas. Las feofíceas *Himanthalia elongata*, *Fucus serratus*, *F. vesiculosus*, *Laminaria hyperborea*, *L. ochroleuca* y *Saccorhiza polyschides*, y la rodofícea *Gelidium corneum* se han visto muy afectadas llegando a su desaparición en algunas localidades donde eran muy abundantes (Martínez et al. 2015; Kersting 2016).

En Canarias, también existen evidencias que relacionan el calentamiento global con cambios en las comunidades de macroalgas. Así, diferentes estudios muestran la coincidencia del aumento de la temperatura superficial del agua de mar en las islas con la regresión notable de poblaciones de macroalgas estructurantes, la meridionalización y la tropicalización de las comunidades dominadas por macroalgas (Sangil et al. 2010, 2012, 2018). Por ejemplo, las

poblaciones de *Treptacantha abies-marina* han sufrido una drástica regresión de más de un 90% en las islas durante las últimas tres décadas (Sansón et al., 2017; Valdazo et al. 2017). También *Fucus guiryi*, *Gelidium arbuscula* y *G. canariense* han reducido sus poblaciones (Sansón et al. 2013; Álvarez-Canali et al. 2019). Además, diferentes especies de macroalgas nativas con afinidad por aguas cálidas, como las cianobacterias *Blennothrix lyngbyacea*, *Schizothrix calcicola*, *Schizothrix mexicana* y *Lyngbya* sp. (Sangil et al. 2012; Martín-García et al. 2014) han incrementado su abundancia. Por último, especies de algas verdes tropicales, como *Penicillus capitatus*, *Pseudotetraspora marina* y *Halimeda incrassata*, han aparecido recientemente en el archipiélago y forman en la actualidad densas poblaciones en algunas localidades (Sangil et al. 2010, 2012, 2018).

Por todo lo expuesto anteriormente, vincular la afinidad térmica de las diferentes especies de macroalgas con los cambios de temperatura en los océanos predecibles para las próximas décadas se convierte en una herramienta de interés para evaluar los efectos que el calentamiento global puede ejercer en un futuro sobre las principales comunidades marinas de las islas Canarias.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la distribución geográfica de las especies características más abundantes que componen el fitobentos marino de las islas Canarias y su relación con variaciones medioambientales en base al cambio climático. La biodiversidad del fitobentos canario está sufriendo notables cambios (declive o desaparición de poblaciones de especies estructurantes, incremento de especies de afinidad tropical, introducción de especies alóctonas) relacionados, entre otros parámetros, con el aumento de la temperatura de los océanos. Este estudio se ha diseñado con el propósito de (1) obtener el área de distribución documentada para cada especie de macroalga, (2) inferir el rango de temperaturas óptimas para el crecimiento de cada especie a partir del área de distribución obtenida y (3) predecir los cambios en la distribución geográfica actual de las especies más significativas del fitobentos de las islas en futuros escenarios de calentamiento global.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

Las islas Canarias comprenden ocho islas principales así como un grupo de pequeños islotes, y están situadas en el Atlántico oriental, a apenas 100 km de la costa africana próxima. La

interacción entre la fría corriente canaria, que fluye de NNE a SSW, y el afloramiento del noroeste de África crea un gradiente climático longitudinal entre las islas orientales más frías (Lanzarote, Archipiélago Chinijo, Fuerteventura) y las islas occidentales más cálidas (La Palma y El Hierro) (Barton et al. 1998; Davenport et al. 2002).

Los muestreos para la obtención de los datos de distribución y abundancia de las macroalgas objeto de este estudio se han realizado en la última década en diversas localidades de las costas rocosas expuestas o semiexpuestas al oleaje de las islas Canarias, abarcando diversos tipos de hábitats y ambientes donde concurre la mayor diversidad de macroalgas. Los muestreos en la zona intermareal se realizaron coincidiendo con los periodos de bajamar. En cada una de las localidades de estudio se establecieron un total de 30 cuadrantes de 25 x 25cm (situados a una distancia mínima de 10 m), repartidos en los tres niveles del eulitoral (inferior, medio y superior), muestreando por un lado las comunidades que quedan en emersión en las plataformas, y por otro las comunidades de charcos intermareales. Los muestreos de las comunidades sublitorales de macroalgas se realizaron mediante buceo autónomo, tomándose un total de 30 fotocuadrantes de 25 x 25 cm, repartidos en 5 niveles de profundidad, con 6 fotocuadrantes por nivel. En la medida de lo posible, las especies se identificaron *in situ*, así como su cobertura; sin embargo, para algunas fue necesaria una posterior identificación en el laboratorio. Estos datos han sido obtenidos por el grupo de investigación BOTMAR-ULL del Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal de la Universidad de La Laguna, previamente a la realización de este TFG y han servido de base para la elección de las especies objeto de este estudio.

3.2. Selección de las especies de macroalgas

A partir de los datos de abundancia media de las especies de macroalgas (Phaeophyceae, Rhodophyta y Chlorophyta) que dominan y caracterizan las comunidades intermareales y sublitorales de las islas Canarias incluyendo las comunidades dominadas por *Treptacantha abies-marina* (datos BOTMAR-ULL), se seleccionaron 37 taxones para el estudio, 19 Phaeophyceae (algas pardas), 5 Chlorophyta (algas verdes) y 13 Rhodophyta (algas rojas) que se corresponden con aquellos que presentan una abundancia media superior al 0,5%, expresada como porcentaje de cobertura. Dos grupos de Rhodophyta, Corallinales costrosas y Ceramiales, aunque pertenecen a este conjunto de especies características han sido finalmente excluidas del estudio ya que en cada uno de ellos se agrupan diversas especies, con diferentes

distribuciones geográficas, muy complejas de identificar y obtener su cobertura individualmente *in situ*.

3.3. Obtención de los datos de distribución de las macroalgas

La distribución geográfica de las diferentes especies de macroalgas seleccionadas se obtuvo a partir de la completa información incluida en la base de datos global de algas *AlgaeBase* (Guiry y Guiry 2020). Esta base de datos, además de información taxonómica y nomenclatural, recoge la distribución detallada con fuentes bibliográficas de la mayoría de las especies de algas documentadas hasta el momento (**Fig. 1**). La información se actualiza constantemente, de tal forma que los datos consultados representan el estado actual de conocimiento de la distribución de las especies, en base a datos publicados. Para cada especie, se extrajeron las localidades en las que se conoce su distribución a nivel mundial. En algunos casos, los datos disponibles necesitan aún ser confirmados combinando estudios morfológicos y moleculares; no obstante, para este estudio se seleccionaron las latitudes máxima y mínima del área de distribución en la que se ha documentado cada especie, estableciéndose así un rango biogeográfico de distribución según datos actuales.

The image shows a screenshot of the AlgaeBase website. The main content area displays the entry for *Treptacantha abies-marina* (S.G.Gmelin) Kützing 1843. It includes a small image of the alga, a classification tree, and a detailed distribution with sources section. The distribution section lists various locations and the authors who documented the species, such as the Atlantic Islands, Azores, Madeira, and Senegal.

Figura 1. Visualización de parte de la información disponible en la base de datos mundial *Algaebase* (Guiry & Guiry 2020), de donde se han extraído los datos sobre la distribución geográfica de las especies de macroalgas. Se muestran datos sobre *Treptacantha abies-marina*, una de las macroalgas con coberturas > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias.

3.4. Cálculo del rango potencial de temperaturas de las macroalgas

Para la obtención de los datos de temperatura superficial del agua de mar correspondientes a los rangos de distribución de las especies, se ha utilizado la plataforma de visualización de datos climáticos globales *Climate Reanalyzer* (Climate Change Institute, the University of Maine, the National Science Foundation and the Russell Grinnell Memorial Trust; <https://climatoreanalyzer.org/>). En esta plataforma se puede consultar información climática utilizando interfaces de reanálisis y datos de estaciones históricas. Para este estudio se realizó

el siguiente filtro para obtener el rango de temperaturas deseadas: Mapa de Reanálisis Mensual, NCEP/NCAR Reanálisis V1 (1948-2020), Variable Temperatura (Máxima y Mínima), Nivel Superficie y Región Noratlántica (**Fig. 2**). A partir de los datos de temperatura contenidos en *Climate Reanalyzer*, con precisión de 1°C, se obtuvieron las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales registradas mensualmente en las latitudes del límite norte y del límite sur del área de distribución de cada especie.

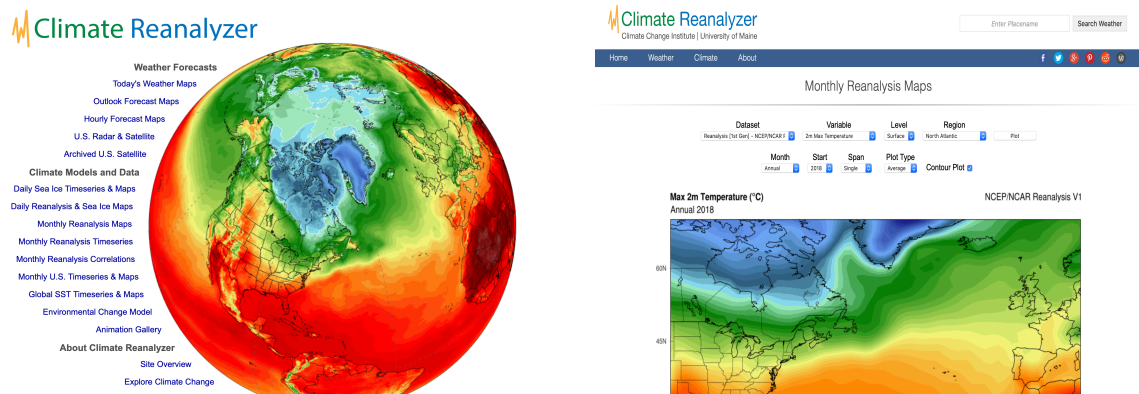


Figura 2. Visualización de la pantalla de inicio de la plataforma de datos climáticos globales *Climate Reanalyzer* (izquierda) y de los filtros seleccionados (derecha) para obtener los rangos de las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales registradas mensualmente en las latitudes correspondientes a la distribución en el Atlántico norte-Mediterráneo de cada una de las especies de macroalgas seleccionadas.

3.5. Elaboración de los mapas de distribución

Para cada una de las 35 especies de macroalgas seleccionadas para este estudio, se han elaborado mapas de distribución-temperatura representando gráficamente las latitudes máxima y mínima de su área de distribución en el Atlántico norte (occidental y oriental) y Mediterráneo, obtenidas de *Algaebase*, sobre dos mapas de temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar, obtenidos en *Climate Reanalyzer*. Los mapas se han recogido en 9 láminas (4 especies por lámina exceptuando la última en la que hay 3 especies), montadas con la herramienta Pluma del programa Pages de Mac.

3.6. Análisis de los datos

Las predicciones de las distribuciones de las especies en el futuro (2040-2100), se han realizado a partir de los datos obtenidos en *Climate Reanalyzer* en el apartado Explorar el Cambio Climático donde, además de otra información sobre el cambio climático, se nos presenta una gráfica con datos de clima histórico y de proyecciones climatológicas futuras. Esta gráfica muestra las desviaciones de la temperatura media global ya observadas (en negro), simuladas mediante modelos (en gris) y proyectadas en diferentes escenarios futuros (en azul, verde, naranja y rojo) con respecto a la línea de base climática de 1901-2000. Para

estas simulaciones de futuros escenarios climáticos, se han definido las Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCPs). El RCP 2.6 (en azul) contempla un escenario de pico y declive que termina en niveles muy bajos de concentración de gases de efecto invernadero a finales del s.XXI, el RCP 4.5 (en verde) y el RCP 6.0 (en naranja) muestran dos escenarios intermedios donde los niveles de concentración de gases de efecto invernadero se estabilizan y el RCP 8.5 (en rojo) considera un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (**Fig. 3**).

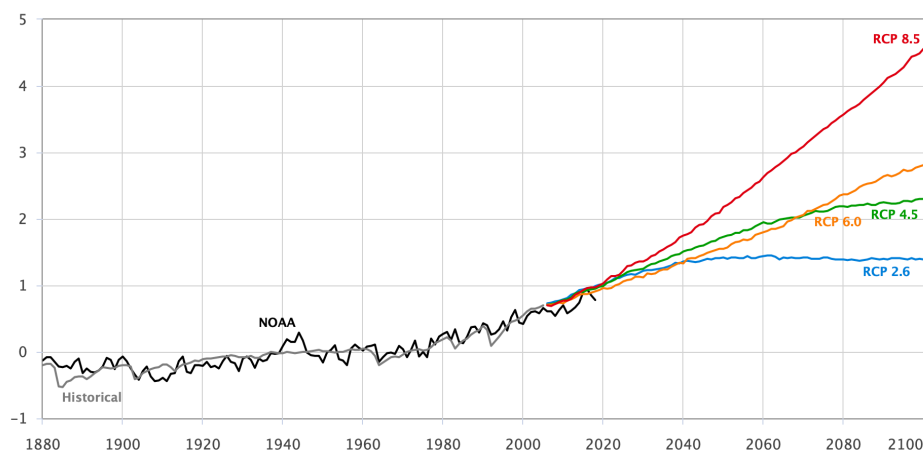


Figura 3. Anomalías de la temperatura global (°C) en el periodo 1880-2000 (históricas) y 1880-2020 (observaciones NOAA). Se añaden a partir del 2000 las simulaciones de temperaturas en 4 diferentes escenarios futuros: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5; obtenido de *Climate Reanalyzer*.

4. RESULTADOS

4.1. Macroalgas más abundantes de las costas rocosas de Canarias

Entre las aproximadamente 700 especies de algas documentadas en las islas Canarias, unas 127 especies o taxones, 46 Phaeophyceae (P), 26 Chlorophyta (C) y 55 Rhodophyta (R) presentan coberturas medias superiores a 0,01%, de las cuales 35 especies y dos taxones (Corallinales y Ceramiales) muestran una cobertura superior a 0,5% (**Tabla 1**).

En Phaeophyceae, el orden Dictyotales es el que presenta un mayor número de especies (9 especies: *Canistrocarpus cervicornis*, *Dictyota dichotoma*, *D. fasciola*, *D. spiralis*, *Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri* y *Padina pavonica*) con coberturas > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. En segundo lugar, Fucales está representado por 6 especies (*Carpodesmia tamariscifolia*, *Cystoseira compressa*, *C. humilis*, *Sargassum* aff. *hystrix*, *S. desfontainesii* y *Treptacantha abies-marina*) y Sphacelariales por 2 (*Halopteris scoparia* y *Pseudolithoderma adriaticum*). Los órdenes Ectocarpales y Nemodermatales solo están representados por una única especie, *Colpomenia sinuosa* y *Nemoderma tingitanum*, respectivamente.

En Chlorophyta, tres órdenes agrupan a las especies más abundantes, Bryopsidales (*Caulerpa webbiana* y *Codium intertextum*), Cladophorales (*Cladophora liebethuthii* y *Valonia utricularis*) y Dasycladales (*Dasycladus vermicularis*).

Finalmente, en Rhodophyta, los órdenes Ceramiales y Corallinales son los más numerosos en especies con coberturas medias superiores a 0,5% en las comunidades intermareales y submareales de Canarias. Ceramiales incluye a 4 especies (*Laurencia dendroidea*, *Lophocladia trichoclados*, *Palisada perforata* y *Wrangelia argus*) y un grupo de especies no identificadas. Corallinales agrupa a 3 especies geniculadas (*Corallina ferreyrae*, *Jania pedunculata* var. *adhaerens* y *J. virgata*) y al grupo de corallinales costrosas, no identificadas a nivel específico. El resto de los órdenes contienen una única especie, Bonnemaisoniales (*Asparagopsis taxiformis*), Gelidiales (*Gelidium pusillum*), Hildenbrandiales (*Hildenbrandia rubra*) y Gigartinales (*Hypnea spinella*).

4.2. Distribución y rangos de temperaturas de las macroalgas

En la Tabla 2 se recogen los límites latitudinales en el Atlántico norte (occidental y oriental) y Mediterráneo así como los valores de las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales para las macroalgas con cobertura media superior a 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. La mayoría de las especies estudiadas (51,43%; 18 especies: 7 P, 3 C, 8 R) están distribuidas por las tres regiones biogeográficas (Atlántico occidental y oriental, y Mediterráneo). El 25,71% (9 especies: 7 P, 2 R) se han documentado solo para el Atlántico oriental y Mediterráneo, mientras que el 22,86% (8 especies: 5 P, 2 C, 1 R) se conocen en ambos lados del Atlántico pero no en el Mediterráneo (**Tabla 2**).

Entre las especies seleccionadas, la mayoría alcanzan su límite norte en el Atlántico oriental (48,57%; 17 especies: 11 P, 1 C, 5 R). El 42,86% lo alcanzan en el Mediterráneo (15 especies: 6 P, 3 C, 6 R), mientras que el 8,57% restante (3 especies: 2 P, 1 C) lo hacen en el Atlántico occidental. La rodófito costrosa *Hildenbrandia rubra* es la especie que crece más al norte del Atlántico, a 76.57° en las islas Svalbard (**Tabla 2**).

Respecto al límite sur de distribución, 24 de las 35 especies (68,57%; 10 P, 5 C, 9 R) alcanzan el ecuador (Brasil) o zonas muy cálidas (Venezuela, Martinica, Guadalupe, Curazao, Golfo de Méjico) en el Atlántico occidental, llegando 16 de ellas (45,71%) también al ecuador en el Atlántico oriental (Gabón o Santo Tomé y Príncipe) o a localidades tropicales o subtropicales africanas (Guinea Ecuatorial, Camerún, Sierra Leona, islas de Cabo Verde).

Tabla 1. Especies de macroalgas con abundancia media > 0,5%, expresada como porcentaje medio de cobertura, encontradas en las comunidades intermareales, sublitorales y en las comunidades dominadas por *Treptacantha abies-marina* en las islas Canarias. Datos obtenidos por el grupo BOTMAR-ULL.

| ESPECIES | Intermareal | Sublitoral | <i>Treptacantha abies-marina</i> |
|--|-------------|------------|----------------------------------|
| Phaeophyceae (algas pardas) | | | |
| <i>Canistrocarpus cervicornis</i> (Kützting) De Paula & De Clerck | 0,3190 | 6,3761 | |
| <i>Carpodesmia tamariscifolia</i> (Hudson) Orellana & Sansón | 0,3777 | 0,2164 | |
| <i>Colpomenia sinuosa</i> (Mertens ex Roth) Derbès & Solier | 0,1125 | 0,0589 | 0,3692 |
| <i>Cystoseira compressa</i> (Esper) Gerloff & Nizamuddin | 1,0695 | 0,1026 | 0,4417 |
| <i>Cystoseira humilis</i> Schousboe ex Kützting | 4,0763 | | |
| <i>Dictyota dichotoma</i> (Hudson) Lamouroux | 0,7706 | 1,1424 | 0,6300 |
| <i>Dictyota fasciola</i> (Roth) Lamouroux | 0,5577 | 0,0416 | 0,0333 |
| <i>Dictyota spiralis</i> Montagne | 0,4868 | 0,0288 | 0,0708 |
| <i>Halopteris scoparia</i> (Linnaeus) Sauvageau | 1,4425 | 1,9627 | 1,6000 |
| <i>Lobophora canariensis</i> (Sauvageau) Vieira, De Clerck & Payri | 0,0959 | 2,4013 | |
| <i>Lobophora delicata</i> Camacho & Fredericq | 0,1076 | 1,2218 | 0,7250 |
| <i>Lobophora littlerorum</i> Schneider, Schultz & Le Gall | 0,0646 | 0,0232 | 16,2667 |
| <i>Lobophora schneideri</i> Vieira | 8,7893 | 31,7558 | 19,9917 |
| <i>Nemoderma tingitanum</i> Schousboe ex Bornet | 1,1712 | 0,0216 | 0,6833 |
| <i>Padina pavonica</i> (Linnaeus) Thivy | 2,3533 | 2,2823 | 0,1008 |
| <i>Pseudolithoderma adriaticum</i> (Hauck) Verlaque | 4,3074 | 0,0701 | 2,0000 |
| <i>Sargassum</i> aff. <i>hystrix</i> | 0,1507 | 0,0495 | 0,3500 |
| <i>Sargassum defontainesii</i> (Turner) C. Agardh | 0,6115 | 0,0299 | 0,6000 |
| <i>Treptacantha abies-marina</i> (Gmelin) Kützting | 0,3963 | 0,2098 | 62,6500 |
| Chlorophyta (algas verdes) | | | |
| <i>Caulerpa webbiana</i> Montagne | 0,1196 | 1,5046 | |
| <i>Cladophora liebetruthii</i> Grunow | 1,1104 | 0,0837 | 0,4167 |
| <i>Codium intertextum</i> Collins & Hervey | 1,0470 | | 2,4583 |
| <i>Dasycladus vermicularis</i> (Scopoli) Krasser | 0,4973 | 0,0021 | |
| <i>Valonia utricularis</i> (Roth) C. Agardh | 0,5313 | | 0,0017 |
| Rhodophyta (algas rojas) | | | |
| <i>Asparagopsis taxiformis</i> (Delile) Trevisan | 0,3053 | 0,8682 | 0,3667 |
| <i>Corallina ferreyrae</i> Dawson, Acleto & Foldvik | 4,7380 | 0,1314 | |
| <i>Gelidium pusillum</i> (Stackhouse) Le Jolis | 1,1671 | | |
| <i>Hildenbrandia rubra</i> (Sommerfelt) Meneghini | 0,0098 | 0,0597 | 1,5167 |
| <i>Hypnea spinella</i> (C. Agardh) Kützting | 1,2241 | 0,2131 | |
| <i>Jania pedunculata</i> var. <i>adhaerens</i> (Lamouroux) Harvey et al. | 12,1182 | 1,8755 | 1,1733 |
| <i>Jania virgata</i> (Zanardini) Montagne | 0,9415 | | 0,3333 |
| <i>Laurencia dendroidea</i> J. Agardh | 0,2710 | 0,0307 | 0,3350 |
| <i>Lophocladia trichoclados</i> (C. Agardh) Schmitz | 0,2158 | 9,9221 | 0,1167 |
| <i>Palisada perforata</i> (Bory) K.W. Nam | 2,3508 | | |
| <i>Wrangelia argus</i> (Montagne) Montagne | 0,4687 | 0,0738 | 3,3117 |
| Ceramiales | 0,8297 | 0,2980 | |
| Corallinales costrosas | 14,7671 | 12,2078 | 49,5750 |

Otras 10 especies (28,57%; 8 P, 2 R) llegan a estas regiones tan cálidas solo en el Atlántico oriental. La feofícea costrosa *Pseudolithoderma adriaticum* es la única especie que muestra su límite sur de distribución absoluto a 27.64° en las islas Canarias (**Tabla 2**). A esta especie hay que añadir otras 5 feofíceas (*Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri* y *Sargassum desfontainesii*) y 3 clorófitas (*Cladophora liebetruithii*, *Codium intertextum* y *Dasycladus vermicularis*) que, aunque alcanzan latitudes más cálidas en el Atlántico occidental, presentan su límite sur en el Atlántico oriental en las islas Canarias.

En cuanto a los valores de temperatura analizados, se han obtenido rangos de las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales para cada especie a partir de sus límites latitudinales Norte y Sur (**Tabla 2**).

En el límite norte más frío de su distribución, las especies estudiadas soportan variaciones de temperatura de apenas 1°C (*Lobophora variegata*) hasta 8°C (*Lobophora schneideri*), aunque la mayoría de las especies toleran de 2°C (10 especies) a 6°C (12 especies) entre la temperatura media de las máximas y la de las mínimas actuales. *Halopteris scoparia* y *Hildenbrandia rubra* son las especies que crecen en lugares más fríos, con temperaturas mínimas de hasta -2°C. Por el contrario, *Sargassum* aff. *hystrix* y *Codium intertextum* no toleran temperaturas inferiores a 21°C (**Tabla 2**).

En el límite sur más cálido de su distribución, todas las especies estudiadas están sometidas a cambios estacionales de temperatura reducidos, de 1-3°C, excepto *Lobophora delicata* y *Dictyota spiralis* que soportan hasta 7 y 5°C respectivamente, de diferencia entre la temperatura media de las máximas y la de las mínimas actuales en la localidad situada más al sur de su área de distribución. *Lobophora delicata* y *Nemoderma tingitanum* son las especies que crecen en lugares más cálidos, con temperaturas medias de las máximas alcanzadas de hasta 29 y 28°C, respectivamente; aunque también otras 24 especies pueden crecer hasta 27°C y 2 especies hasta 26°C. Por el contrario, 6 especies no soportan temperaturas superiores a 24°C, siendo *Pseudolithoderma adriaticum* la especie que peor tolera las altas temperaturas no creciendo por encima de 20°C (**Tabla 2**).

En las Figs 4-12 se presentan los mapas con las áreas de distribución de las 35 especies de macroalgas objeto de estudio, representándose los valores de las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en sus latitudes máximas y mínimas conocidas en el Atlántico norte-Mediterráneo.

Tabla 2. Límites latitudinales en el Atlántico norte-Mediterráneo y temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Datos de distribución obtenidos en *Algaebase*, coordenadas en Google Maps y temperaturas en *Climate Reanalyzer*.

| ESPECIES | Latitud° límite N | | | Latitud° límite S | | | T°C máxima límite N | T°C mínima límite N | T°C máxima límite S | T°C mínima límite S | Diferencia T°C límite N y límite S |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | | | | | |
| Phaeophyceae | | | | | | | | | | | |
| <i>Canistrocarpus cervicornis</i> | Carolina del Norte 36.54 | Madeira 33.13 | --- | Brasil 0 | Gabón 0 | --- | 19 | 14 | 27 | 24 | 13 |
| <i>Carpodesmia tamariscifolia</i> | --- | Gran Bretaña 58.59 | Italia 45.75 | --- | Islas Cabo Verde 14.81 | Grecia 34.81 | 10 | 7 | 24 | 23 | 17 |
| <i>Colpomenia sinuosa</i> | Carolina del Norte 36.54 | Islas del Canal 49.73 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Gabón 0 | Malta 35.81 | 14 | 9 | 27 | 24 | 18 |
| <i>Cystoseira compressa</i> | Bermudas 32.49 | Azores 39.73 | Adriático 45.75 | Bermudas 32.25 | Islas Cabo Verde 14.81 | Libia 30.25 | 12 | 6 | 24 | 23 | 18 |
| <i>Cystoseira humilis</i> | --- | Gran Bretaña 58.59 | Adriático 45.75 | --- | Islas Cabo Verde 14.81 | Grecia 34.81 | 10 | 7 | 24 | 23 | 17 |
| <i>Dictyota dichotoma</i> | Virginia 37.97 | Noruega 68.58 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Gabón 0 | Grecia 34.81 | 4 | 2 | 27 | 24 | 25 |
| <i>Dictyota fasciola</i> | --- | Francia 51.05 | Adriático 45.75 | --- | Islas Cabo Verde 14.81 | Libia 30.25 | 14 | 8 | 24 | 23 | 16 |
| <i>Dictyota spiralis</i> | --- | Francia 51.05 | Adriático 45.75 | --- | Mauritania 16.20 | Egipto 30.83 | 14 | 8 | 26 | 21 | 18 |
| <i>Halopteris scoparia</i> | Nuevo Brunswick 47.98 | Svalbard 76.57 | Adriático 45.75 | Nueva Escocia 43.44 | Islas Cabo Verde 14.81 | Libia 30.25 | 0 | -2 | 24 | 23 | 26 |
| <i>Lobophora canariensis</i> | Bermudas 32.49 | Madeira 33.13 | --- | Martinica 14.40 | Canarias 27.64 | --- | 19 | 18 | 27 | 26 | 9 |
| <i>Lobophora delicata</i> | Golfo de Méjico 30.32 | Madeira 33.13 | Mediterráneo 45.75 | Golfo de Méjico 18.15 | Canarias 27.64 | Mediterráneo 30.25 | 12 | 6 | 29 | 22 | 23 |
| <i>Lobophora littlerorum</i> | Puerto Rico 18.49 | Canarias 29.41 | --- | Guadalupe 15.87 | Canarias 27.64 | --- | 20 | 18 | 27 | 26 | 9 |

Tabla 2 (continuación). Límites latitudinales en el Atlántico norte-Mediterráneo y temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Datos de distribución obtenidos en *Algaebase*, coordenadas en Google Maps y temperaturas en *Climate Reanalyzer*.

| ESPECIES | Latitud° límite N | | | Latitud° límite S | | | T°C máxima límite N | T°C mínima límite N | T°C máxima límite S | T°C mínima límite S | Diferencia T°C límite N y límite S |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | | | | | |
| <i>Lobophora schneideri</i> | Bermudas 32.49 | Canarias 29.41 | Israel 33.05 | Guadalupe 15.87 | Canarias 27.64 | Israel 31.60 | 24 | 16 | 27 | 26 | 11 |
| <i>Nemoderma tingitanum</i> | --- | Azores 39.73 | Italia 45.75 | --- | Sierra Leona 6.98 | Sur España 36.00 | 12 | 6 | 28 | 25 | 22 |
| <i>Padina pavonica</i> | Bermudas 32.49 | Gran Bretaña 58.59 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Gabón 0 | Libia 30.25 | 10 | 7 | 27 | 24 | 20 |
| <i>Pseudolithoderma adriaticum</i> | --- | Canarias 29.41 | Adriático 45.75 | --- | Canarias 27.64 | Egipto 30.83 | 12 | 6 | 20 | 18 | 14 |
| <i>Sargassum aff. hystrix</i> | Bermudas 32.49 | Canarias 29.41 | --- | Brasil 0 | Sierra Leona 6.98 | --- | 23 | 21 | 27 | 24 | 6 |
| <i>Sargassum desfontainesii</i> | Trinidad y Tobago 11.36 | Azores 39.73 | --- | Venezuela 8.56 | Canarias 27.64 | --- | 19 | 17 | 27 | 24 | 10 |
| <i>Treptacantha abies-marina</i> | --- | Azores 39.73 | Italia 45.75 | --- | Senegal 12.40 | Libia 30.25 | 12 | 6 | 26 | 24 | 20 |
| Chlorophyta | | | | | | | | | | | |
| <i>Caulerpa webbiana</i> | Cuba 23.26 | Azores 39.73 | --- | Brasil 0 | Islas Cabo Verde 14.81 | --- | 19 | 17 | 27 | 24 | 10 |
| <i>Cladophora liebetruhtii</i> | Bermudas 32.49 | Madeira 33.13 | Adriático 45.75 | Curazao 11.99 | Canarias 27.64 | Grecia 34.81 | 12 | 6 | 27 | 25 | 21 |
| <i>Codium intertextum</i> | Bermudas 32.49 | Islas Salvasjes 30.15 | --- | Brasil 0 | Canarias 27.64 | --- | 23 | 21 | 27 | 24 | 6 |
| <i>Dasycladus vermicularis</i> | Bermudas 32.49 | Madeira 33.13 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Canarias 27.64 | Libia 30.25 | 12 | 6 | 27 | 24 | 21 |
| <i>Valonia utricularis</i> | Carolina del Norte 36.54 | Portugal 41.81 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Islas Cabo Verde 14.81 | Libia 30.25 | 12 | 6 | 27 | 24 | 21 |

Tabla 2 (continuación). Límites latitudinales en el Atlántico norte-Mediterráneo y temperaturas medias de las máximas y de las mínimas actuales para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Datos de distribución obtenidos en *Algaebase*, coordenadas en Google Maps y temperaturas en *Climate Reanalyzer*.

| ESPECIES | Latitud° límite N | | | Latitud° límite S | | | T°C máxima límite N | T°C mínima límite N | T°C máxima límite S | T°C mínima límite S | Diferencia T°C límite N y límite S |
|--|-----------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | WAtlántico | EAtlántico | Mediterráneo | | | | | |
| Rhodophyta | | | | | | | | | | | |
| <i>Asparagopsis taxiformis</i> | Carolina del Norte 36.54 | Galicia (España) 43.78 | Italia 45.75 | Brasil 0 | Guinea Ecuatorial 1.03 | Egipto 30.83 | 12 | 6 | 27 | 24 | 21 |
| <i>Corallina ferreyrae</i> | --- | Gran Bretaña 58.59 | Francia 43.79 | --- | Ghana 4.76 | Grecia 34.81 | 10 | 7 | 27 | 25 | 20 |
| <i>Gelidium pusillum</i> | Carolina del Norte 36.54 | Noruega 68.58 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Gabón 0 | Egipto 30.83 | 4 | 2 | 27 | 24 | 25 |
| <i>Hildenbrandia rubra</i> | Groenlandia 68.36 | Svalbard 76.57 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Santo Tomé y Príncipe 0 | Grecia 34.81 | 0 | -2 | 27 | 24 | 29 |
| <i>Hypnea spinella</i> | Bermudas 32.49 | Azores 39.73 | Francia 43.79 | Brasil 0 | Gabón 0 | Italia 36.65 | 15 | 11 | 27 | 24 | 16 |
| <i>Jania pedunculata</i> var. <i>adhaerens</i> | Carolina del Norte 36.54 | Azores 39.73 | Francia 43.79 | Brasil 0 | Santo Tomé y Príncipe 0 | Egipto 30.83 | 15 | 11 | 27 | 24 | 16 |
| <i>Jania virgata</i> | --- | Irlanda 55.35 | Adriático 45.75 | --- | Islas Cabo Verde 14.81 | Libia 30.25 | 11 | 8 | 24 | 23 | 16 |
| <i>Laurencia dendroidea</i> | Carolina del Norte 36.54 | Canarias 29.41 | Francia 43.79 | Brasil 0 | Gabón 0 | Grecia 34.81 | 15 | 11 | 27 | 24 | 16 |
| <i>Lophocladia trichoclados</i> | Bermudas 32.49 | Madeira 33.13 | Córcega 42.99 | Brasil 0 | Islas Cabo Verde 14.81 | Grecia 34.81 | 17 | 14 | 27 | 24 | 13 |
| <i>Palisada perforata</i> | Bermudas 32.49 | Madeira 33.13 | Adriático 45.75 | Brasil 0 | Gabón 0 | Egipto 30.83 | 12 | 6 | 27 | 24 | 21 |
| <i>Wrangelia argus</i> | Bermudas 32.49 | Azores 39.73 | --- | Brasil 0 | Camerún 2.36 | --- | 19 | 17 | 27 | 24 | 10 |

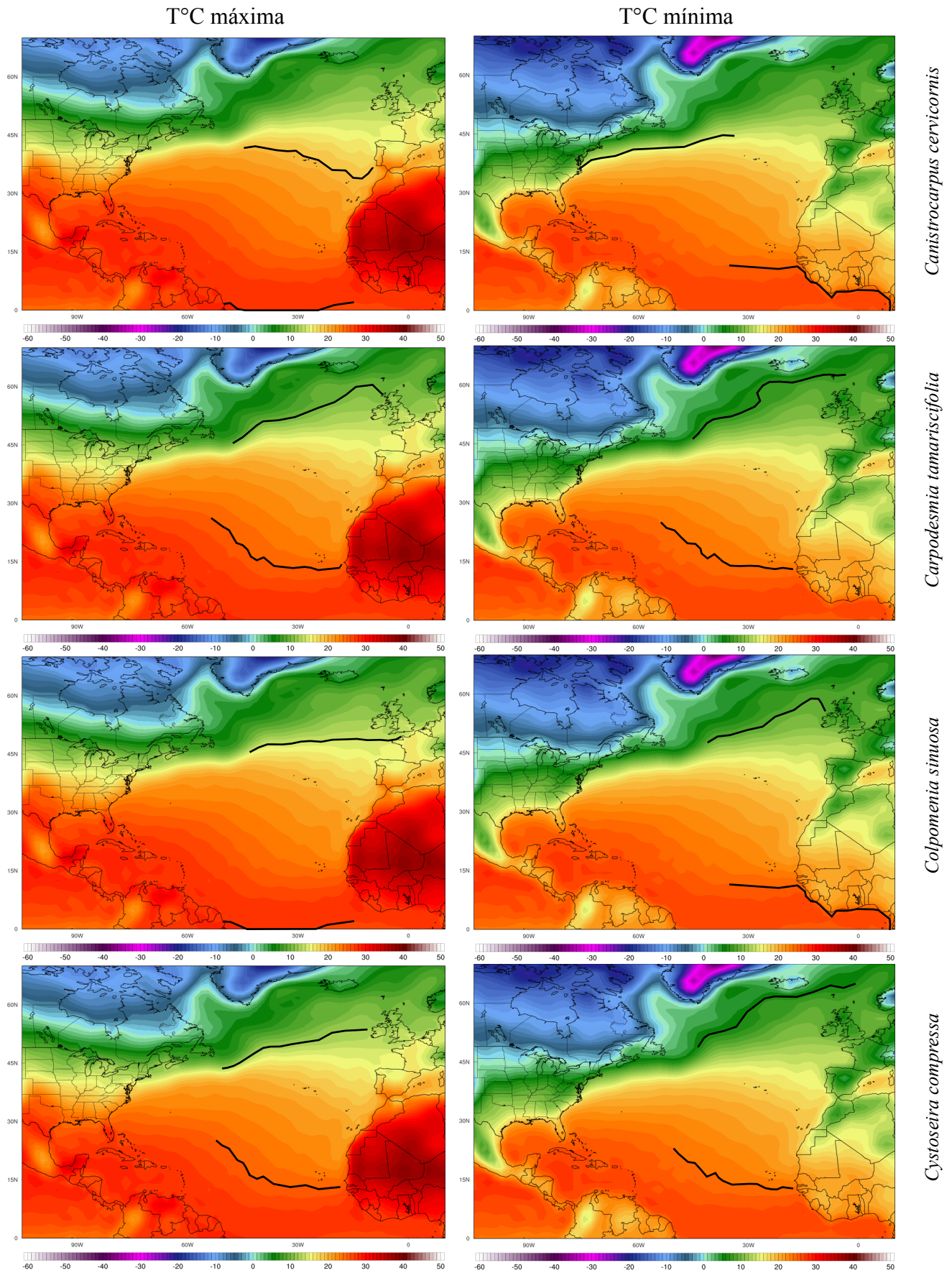


Figura 4. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

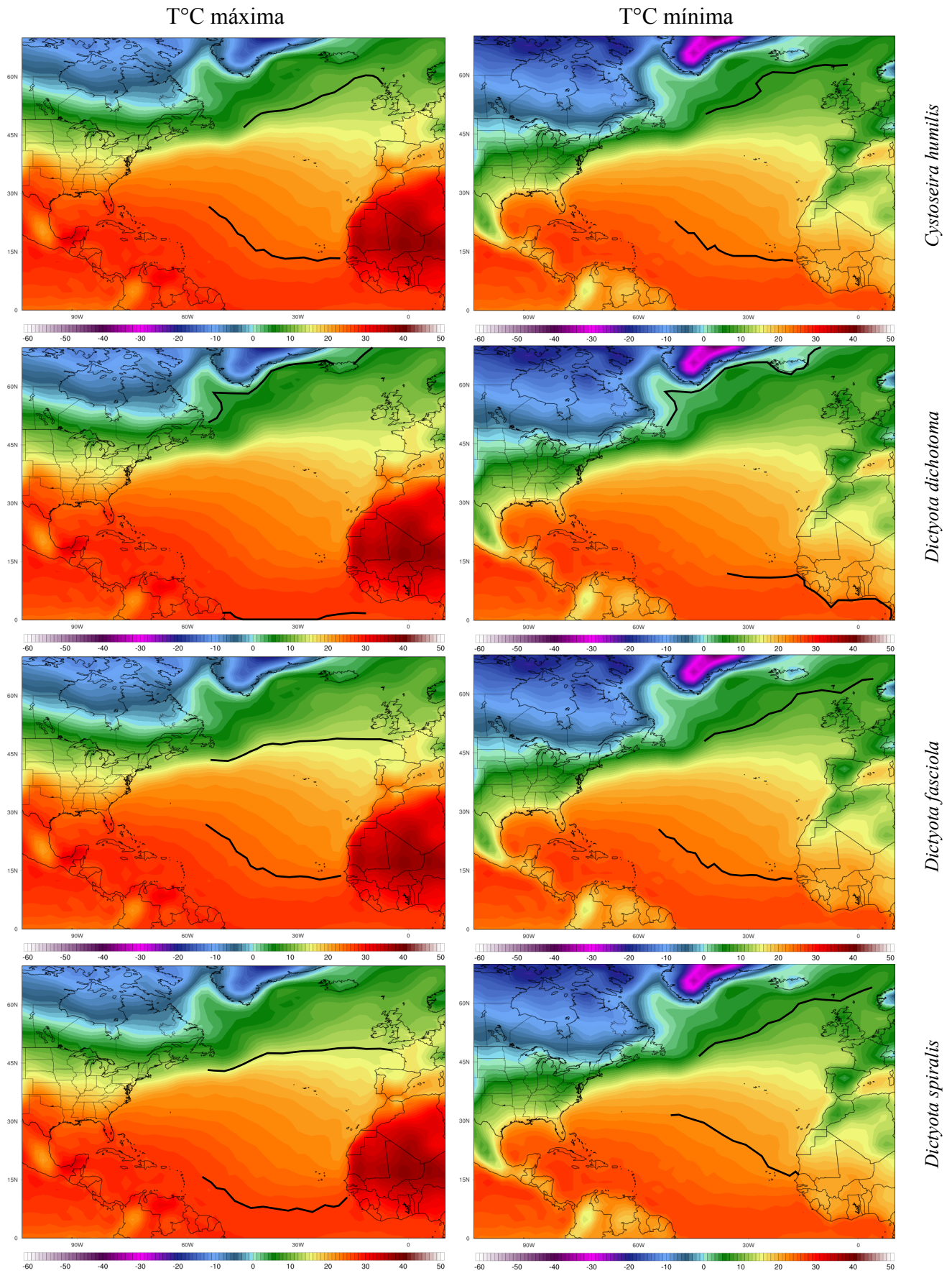


Figura 5. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

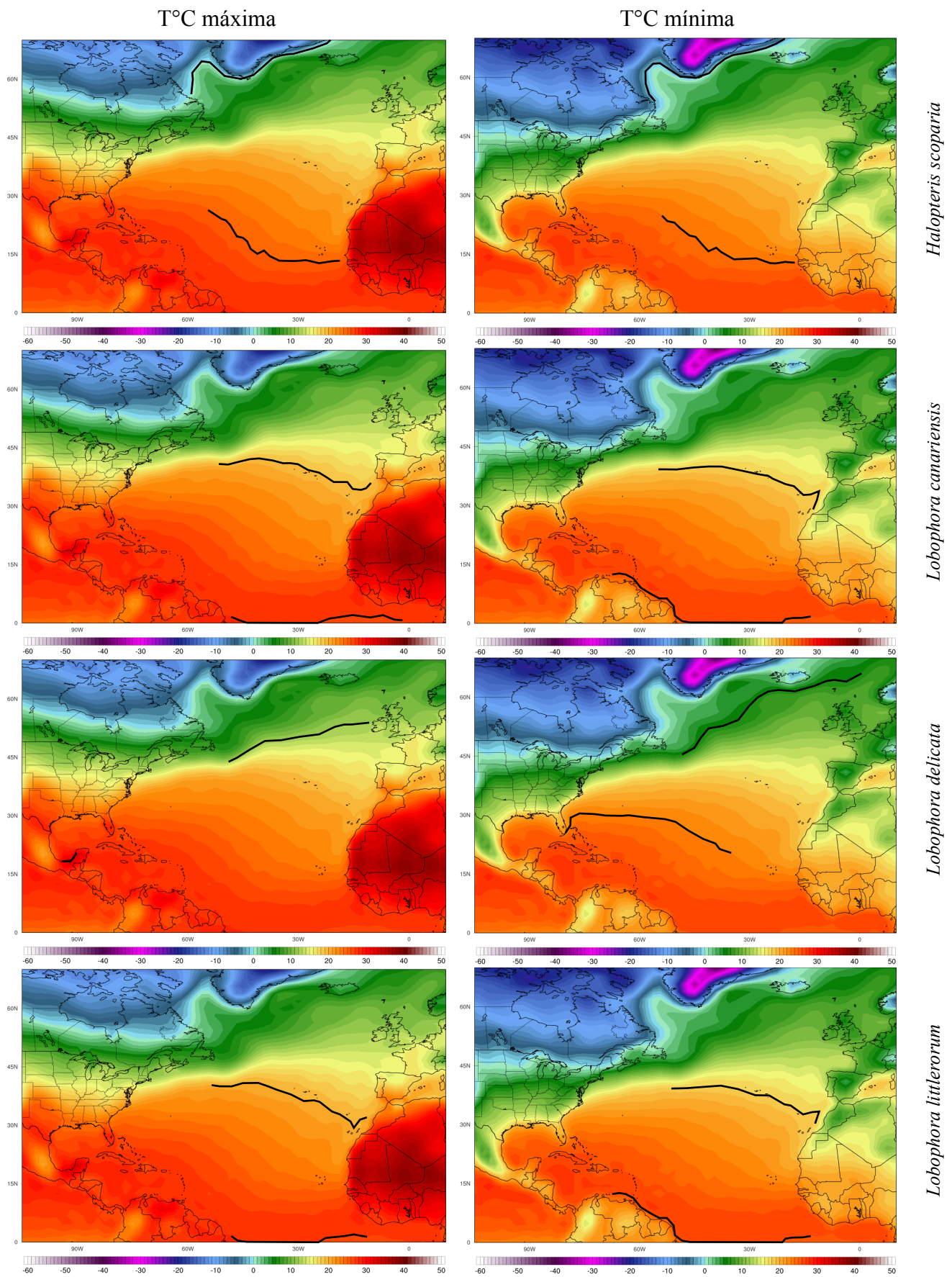


Figura 6. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

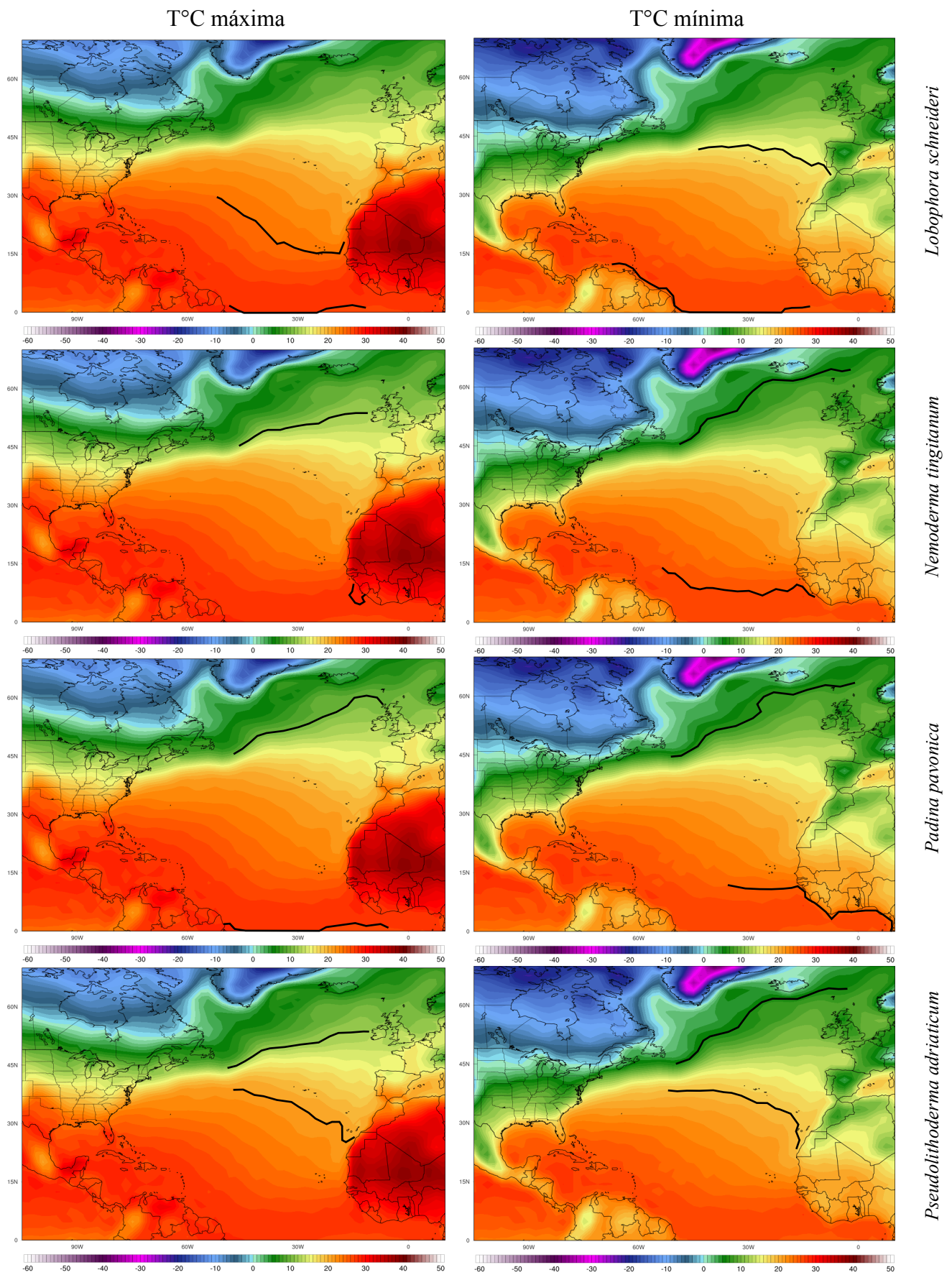


Figura 7. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

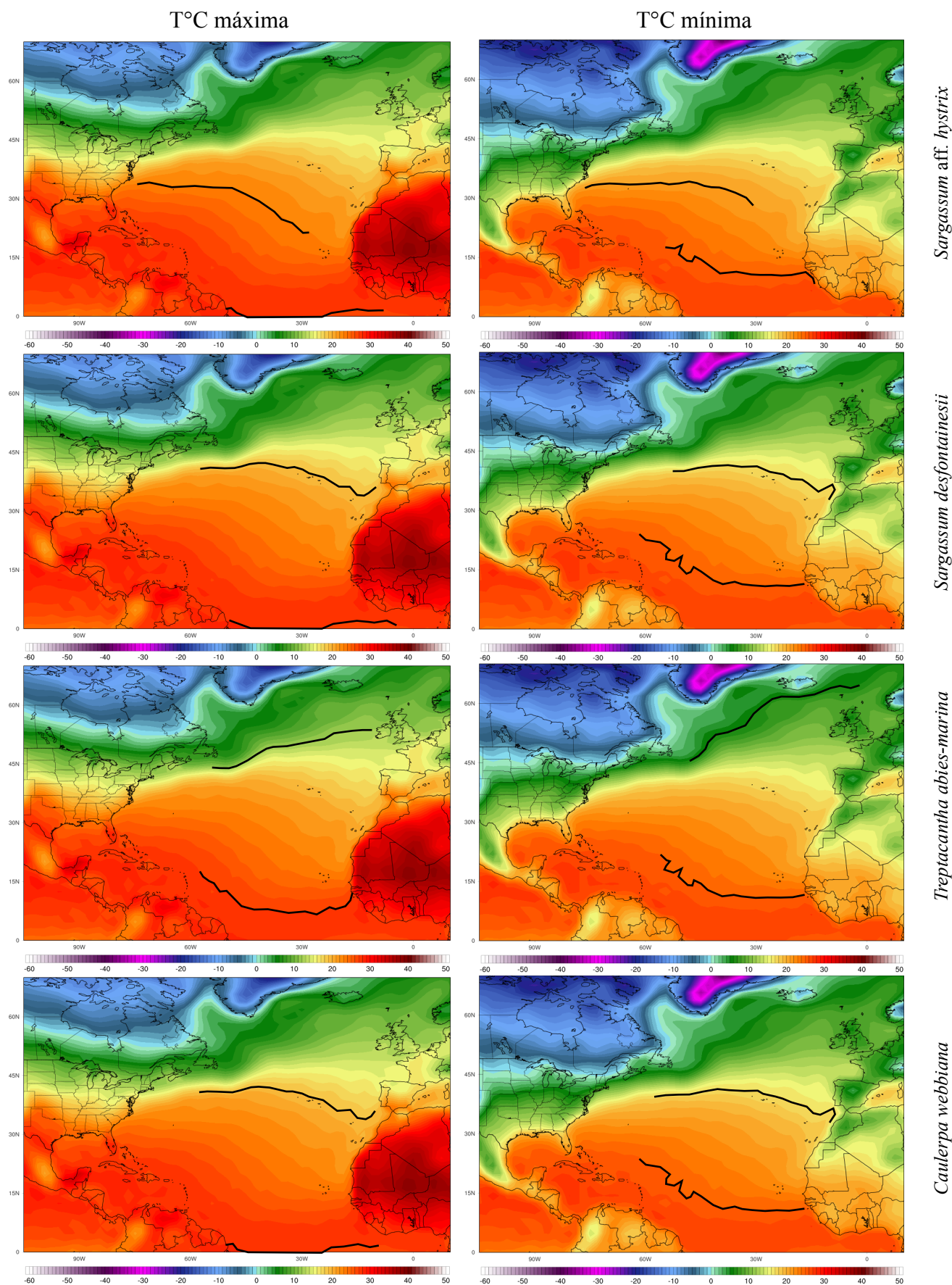


Figura 8. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

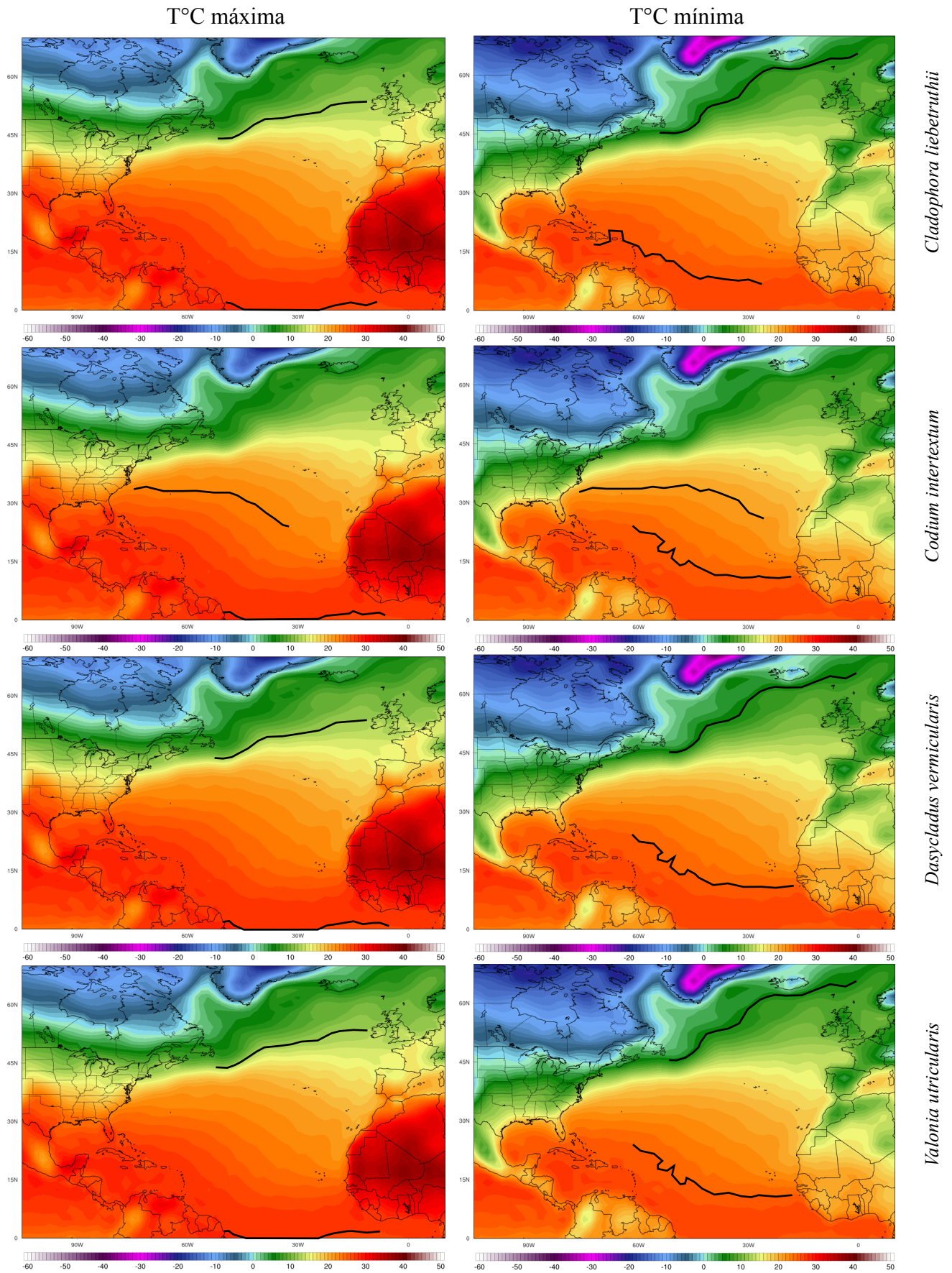


Figura 9. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

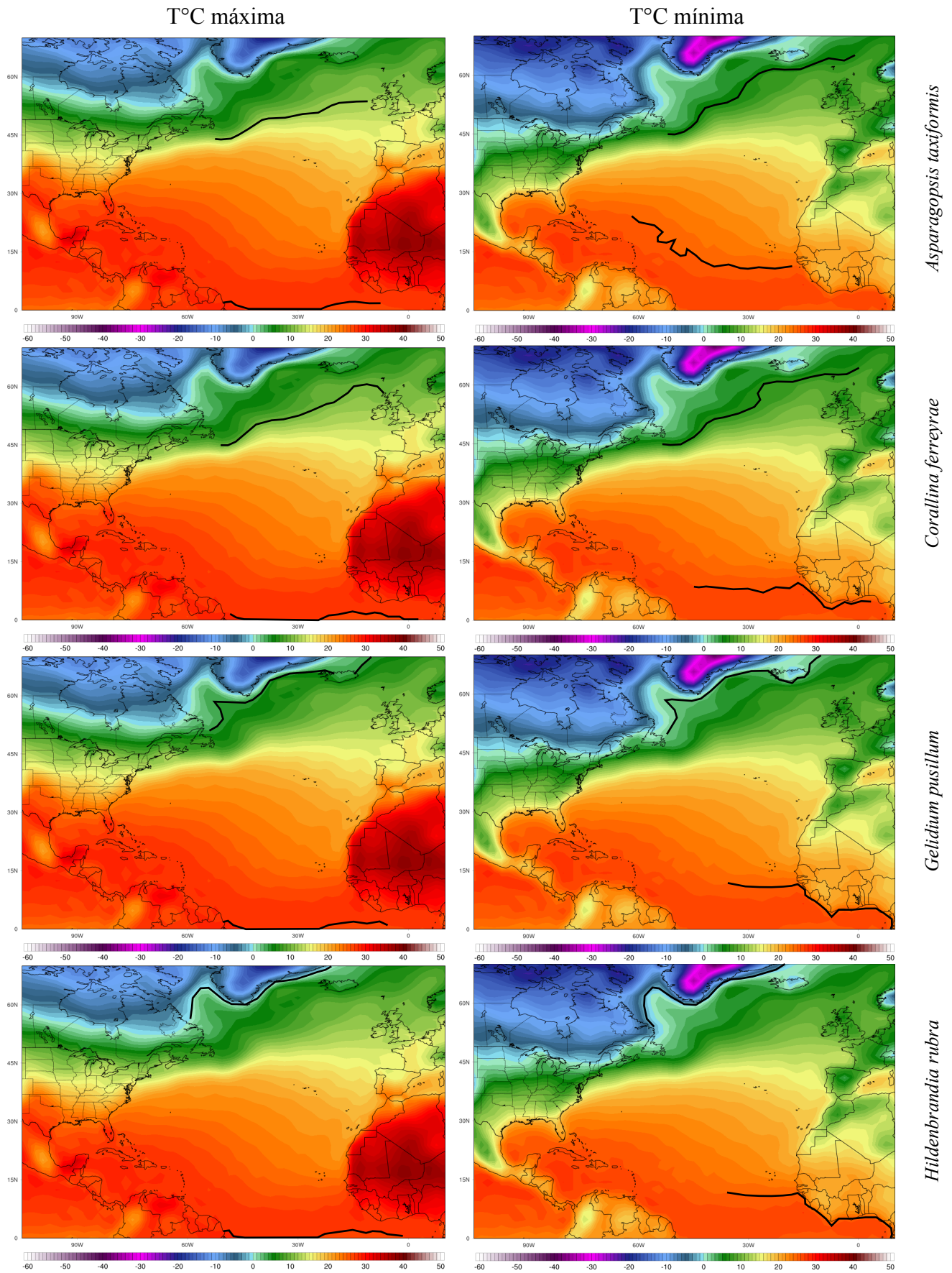


Figura 10. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

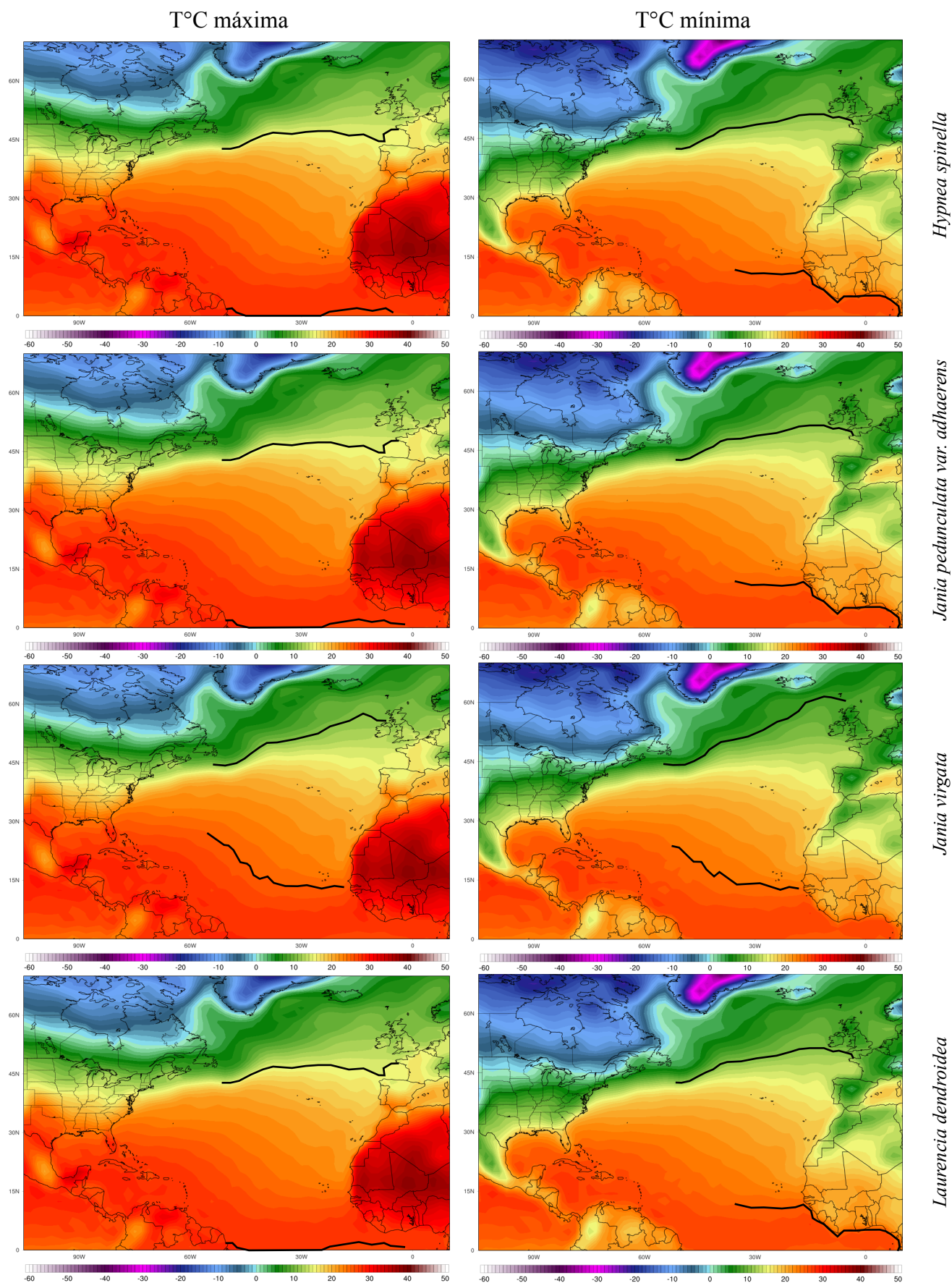


Figura 11. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

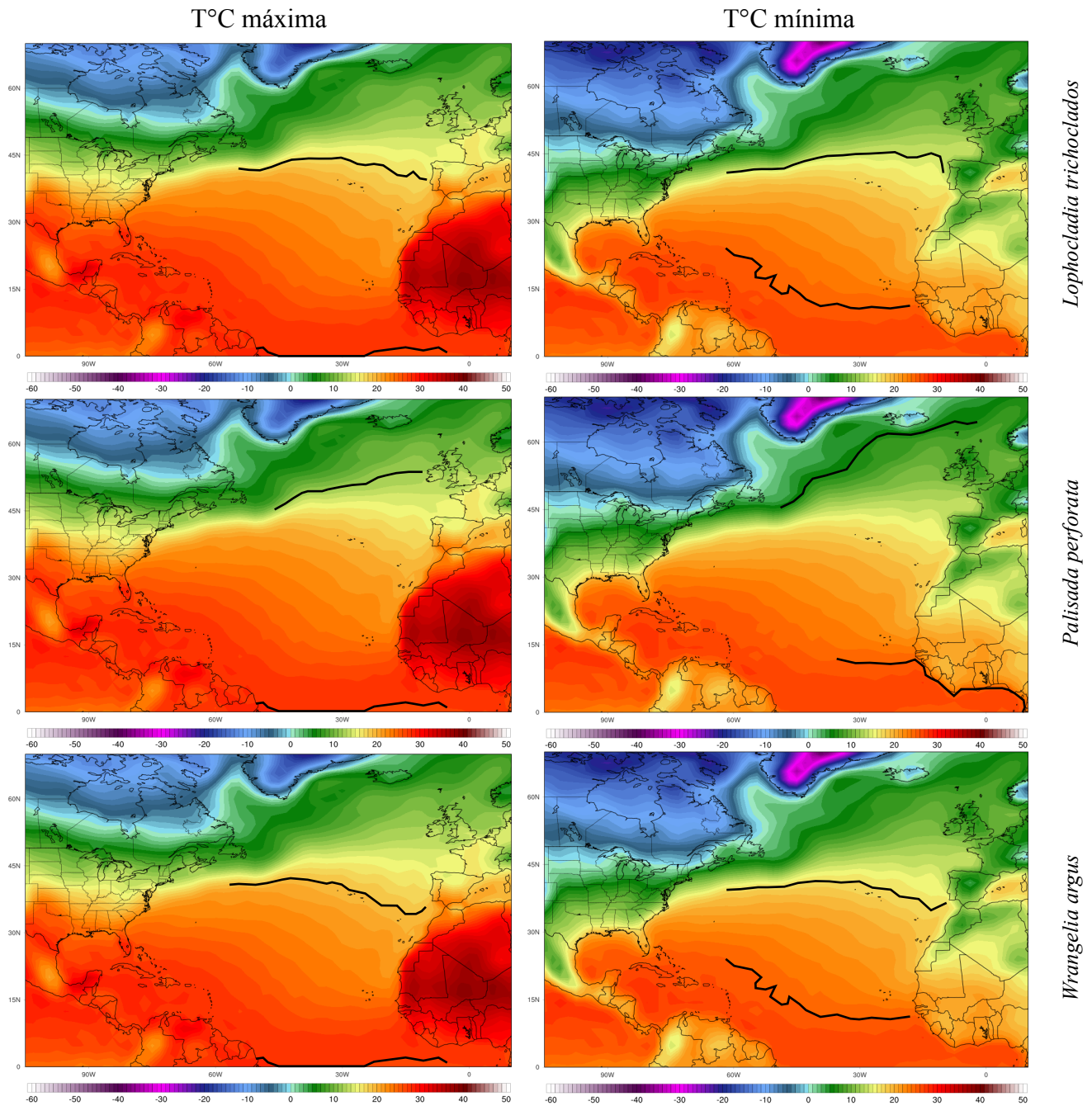


Figura 12. Mapas de distribución-temperatura para las macroalgas con cobertura media > 0,5% en las comunidades marinas de las islas Canarias. Se representan para cada especie las temperaturas superficiales medias de las máximas y de las mínimas actuales del agua de mar en el Atlántico norte-Mediterráneo. Las líneas negras indican la temperatura en el límite latitudinal norte y sur absoluto respectivamente.

4.3. Predicción de distribución en futuros escenarios de calentamiento global

En el escenario de calentamiento global más extremo (RCP 8.5), la temperatura media del agua de mar se incrementará desde 0,8 °C en 20 años (2040) hasta 3,6°C en 80 años (2100). Por el contrario, en el escenario más conveniente (RCP 2.6), la temperatura aumentará entre 0,3°C (2040) y 0,4°C (2100). En escenarios intermedios (RCP 6.0 y RCP 4.5), la temperatura alcanzará un incremento medio de 0,4°C (2014) hasta 1,3-1,8°C (2100) (**Fig. 3**).

Si comparamos estos valores con las temperaturas máximas registradas para cada una de las especies en su límite sur de distribución (**Tabla 2**), se observa que la mayoría de las especies estudiadas potencialmente tolerarán al menos los incrementos de temperatura que se predicen en las islas Canarias para el 2100, ya que se distribuyen actualmente en localidades con más de 3,6°C superiores a los alcanzados en el archipiélago. Sin embargo, al menos 6 de las 35 especies, aquellas que no crecen en localidades con temperaturas superiores a 24°C (*Carpodesmia tamariscifolia*, *Cystoseira compressa*, *C. humilis*, *Dictyota fasciola*, *Halopteris scoparia*, *Jania virgata*) desaparecerán en sus localizaciones actuales más meridionales, en la mayoría de ellas las islas de Cabo Verde, constituyendo Canarias probablemente su nuevo límite sur de distribución. En el caso de *Pseudolithoderma adriaticum*, los datos predicen su desaparición en las comunidades marinas de las islas Canarias debido a que su límite sur de distribución alcanza temperaturas medias de las máximas de 20°C donde en 2040 se superarán los 20,3°C (RCP 2.6) - 20,8°C (RC P8.5) y en 2100 los 20,4°C (RCP 2.6) - 23,6°C (RCP 8.5). Para otras 5 feofíceas (*Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri* y *Sargassum desfontainesii*) y 3 clorófitas (*Cladophora liebetruthii*, *Codium intertextum* y *Dasycladus vermicularis*) destacadas en el apartado anterior de esta memoria, los datos predicen una situación de amenaza similar a la de *Pseudolithoderma adriaticum*, ya que aunque alcanzan latitudes más cálidas en el Atlántico occidental presentan en Canarias su límite sur en el Atlántico oriental.

5. DISCUSIÓN

La flora marina de las islas Canarias se caracteriza por presentar unas 700 especies de algas (Gallardo et al. 2016) lo que convierte al archipiélago en un lugar con elevada riqueza en su área de distribución geográfica, la región templado-cálida del Atlántico oriental (Hoek 1985; Spalding et al. 2007). Del total de especies, aproximadamente el 31% son endémicas de esta región, aunque las especies con afinidades tropicales y subtropicales (30%) también constituyen elementos comunes en las islas (Sansón et al. 2001). Los resultados de este estudio ponen en evidencia que, sin embargo, el número de macroalgas que caracterizan los paisajes litorales rocosos tanto intermareales como sublitorales de las islas, mostrando altas coberturas relativas en las comunidades, es reducido en relación al número total de especies que constituyen la flora marina. Si se considera una cobertura media superior a 0,5%, solo destacan 35 especies (5,28% de la flora), a las que hay que añadir los grupos morfofuncionales filamentosas-ceramiales y costrosas-coralinales que contribuyen

notablemente a los paisajes marinos pero que incluyen diversas especies complejas de identificar *in situ* y de estimar su cobertura real en las comunidades.

Por otra parte, los resultados reflejan que las macroalgas más abundantes en las comunidades marinas analizadas presentan áreas de distribución particulares de diferente amplitud en el Atlántico norte, estando algunas especies ampliamente distribuidas mientras que otras muestran una distribución geográfica mucho más restringida, de acuerdo a Guiry y Guiry (2020). De las especies estudiadas, la mitad se encuentran documentadas a ambos lados del Atlántico y en el Mediterráneo, mientras que solo 9 especies se distribuyen exclusivamente en las costas orientales. No obstante, en la actualidad es necesaria la confirmación de la distribución geográfica de algunas de las especies, ya que aún no se han realizado estudios combinando datos morfológicos y moleculares que garanticen su correcta identificación a lo largo de sus áreas de distribución. Estas áreas son difíciles de delinear en los océanos actuales, sometidos a notables variaciones ambientales, especialmente derivadas de las actividades antropogénicas. Sin embargo, si queremos comprender cómo la organización espacial de las especies responde a los cambios de factores ambientales, se requiere la utilización de datos de ocurrencia de los taxones (Kocsis et al. 2018). De acuerdo con estos autores, la distribución de las masas de tierra (continentes e islas) y las heterogeneidades de la temperatura del agua de mar constituyen los principales impulsores de la regionalización del bentos marino, la primera proporcionando separación longitudinal y las segundas proporcionando separación latitudinal.

Las variaciones longitudinales junto con los límites latitudinales obtenidos para cada una de las macroalgas estudiadas nos indica diferencias claras entre las especies en relación con sus tolerancias a las temperaturas. La temperatura es el principal factor ambiental que determina la distribución geográfica de las macroalgas marinas (Lobban y Harrison 1994; Eggert 2012), existiendo tres valores críticos de temperaturas máximas y mínimas que regulan sus ciclos de vida. Todas las especies presentan unos límites máximo y mínimo de temperaturas letales, por fuera de los cuales la especie no puede sobrevivir (Orfanidis 1991, 1993). Dentro de estos límites, cada especie presenta un rango de temperatura en el que crece vegetativamente de forma óptima y, por último, unos límites de temperatura más estrictos que permiten su reproducción (Bartsch et al. 2012; Eggert 2012). En este sentido, conocer los valores críticos de temperatura de las diferentes especies en base al conocimiento de sus áreas geográficas y de sus límites latitudinales potenciales, contribuye significativamente a poder

predecir los cambios que pueden ocurrir en futuros escenarios de calentamiento global, considerando los hallazgos fundamentales del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC 2019).

No todas las macroalgas muestran similar vulnerabilidad frente al calentamiento global (Broennimann et al. 2006), sino que ésta depende de la habilidad de las diferentes especies para adaptarse a las nuevas condiciones ambientales o poder migrar hacia latitudes más favorables, esto último en ocasiones mucho más difícil para especies nativas de territorios insulares, como las islas Canarias, que para especies de territorios continentales que pueden avanzar progresivamente mediante dispersión marginal hacia localizaciones más idóneas (Jueterbock 2013). Los cambios en la distribución geográfica de las macroalgas constituyen un fenómeno a nivel mundial, como consecuencia del aumento progresivo de la temperatura de los océanos registrado en las últimas décadas (IPCC 2019). Entre otras macroalgas, sirven de ejemplo las fucas intermareales o las laminariales que ocupan el sublitoral somero de las regiones templado-frías del Atlántico norte, las cuales han desaparecido en localidades situadas al sur de su área de distribución avanzando hacia latitudes más septentrionales en aquellas localidades sin barreras geográficas (Duarte et al. 2013; Jueterbock et al. 2013; Nicastro et al. 2013).

En escenarios de calentamiento global, las localidades situadas en el límite sur de las áreas de distribución de las especies son las más vulnerables, ya que el incremento de pocos grados en la temperatura del agua de mar puede provocar que las macroalgas no puedan reproducirse, lo que impide completar sus ciclos biológicos, paralizando sus fases de dispersión, reclutamiento y mantenimiento de sus poblaciones, o causando su desaparición si se superaran los límites letales (Eggert 2012). En este sentido, entre las macroalgas aquí estudiadas, nueve especies (las feofíceas *Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri*, *Pseudolithoderma adriaticum* y *Sargassum desfontainesii*; y las clorófitas *Cladophora liebetruthii*, *Codium intertextum* y *Dasycladus vermicularis*) presentan su límite sur de distribución en el Atlántico oriental en Canarias, por lo que serían las especies previsiblemente más proclives a desaparecer de la flora marina de las islas. Sin embargo, todas ellas (excepto *Pseudolithoderma adriaticum*) se distribuyen en latitudes más cálidas en el Atlántico occidental (Guiry y Guiry 2020), lo que indica que se trata de especies que podrían tolerar temperaturas más elevadas a las registradas actualmente en Canarias. La especie costrosa *Pseudolithoderma adriaticum* sería la que presenta mayor vulnerabilidad, ya

que se distribuye por el Mediterráneo, constituyendo Canarias su única localización conocida en el Atlántico (John et al. 2004; Guiry y Guiry 2020).

Aunque el resto de especies analizadas en el presente trabajo parecen mostrar más resiliencia a los cambios esperados, el 94,72% de la flora marina de las islas Canarias no ha sido aún evaluada, ya que son especies con coberturas estudiadas inferiores a 0,5% en las comunidades intermareales y sublitorales de sustratos rocosos. La posible pérdida de especies con reducidas coberturas, principalmente aquellas que forman parte de la mesoflora (especies cespitosas macroscópicas, de hasta unos 3 cm de longitud) o microflora (especies microscópicas) pasará desapercibida o será solo detectable como resultado de detallados estudios de seguimiento de poblaciones de referencia. Sin embargo, existen evidencias de otras especies macroscópicas no estudiadas aquí por ser elementos de hábitats particulares (rocosos muy expuestos al oleaje, arenosos, etc.) y presentar coberturas medias <0,5%, que también están sufriendo reducciones notables en sus poblaciones y que probablemente se vean afectadas por las predicciones futuras de calentamiento de los océanos, especialmente algunas macroalgas endémicas de Canarias (por ej. *Gelidium canariense*) o de Canarias y de las costas africanas próximas (por ej. *Gelidium arbuscula*) (Sansón et al. 2014).

En definitiva, el estudio detallado de las distribuciones potenciales así como de los rangos de temperaturas característicos de las especies de macroalgas de las islas Canarias es esencial y permitirá predecir los cambios en las comunidades dominadas por macroalgas en las islas Canarias como consecuencia del calentamiento global, y así poder valorar los posibles efectos cascada en los ecosistemas litorales de las islas y establecer medidas de conservación y gestión para disminuir la pérdida de biodiversidad y consecuentemente la pérdida de los servicios ecosistémicos que esta biodiversidad ofrece.

6. CONCLUSIONES

1.- El cambio climático tiene un efecto directo sobre el área de distribución de las macroalgas más abundantes del fitobentos de las islas Canarias debido a una de sus principales consecuencias, el calentamiento global, el cual provoca el aumento de la temperatura del agua de mar a causa de una mayor concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

2.- El límite sur de las áreas de distribución de las macroalgas es el más vulnerable y se desplazará hacia las latitudes más septentrionales a medida que aumenten las temperaturas.

3.- La mayoría de las especies objeto de estudio soportarán el incremento de temperatura previsto en las islas Canarias para el 2100, aunque aquellas incapaces de crecer a temperaturas superiores a 20-24°C desaparecerán en el límite sur de su distribución actual.

Pseudolithoderma adriaticum es la especie más amenazada en las islas Canarias, junto con otras feofíceas (*Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri* y *Sargassum desfontainesii*) y clorófitas (*Cladophora liebetruthii*, *Codium intertextum* y *Dasycladus vermicularis*) que tienen su límite sur de distribución en el Atlántico oriental en las Canarias.

4.- Conocer los rangos óptimos de temperatura de las diferentes especies de macroalgas en base a su distribución biogeográfica y a sus límites latitudinales, contribuye a predecir los posibles cambios en futuros escenarios de calentamiento global que pudieran llegar a ocasionar la pérdida de biodiversidad.

5.- Se necesita confirmar la identificación de algunas de las especies a lo largo de sus áreas de distribución geográfica mediante estudios morfológicos y moleculares.

7. CONCLUSIONS

1.- Climate change has a direct effect on the distribution area of the most abundant macroalgae of the phytobenthos of the Canary islands due to one of its main consequences, global warming, which causes the increase in seawater temperature because of a higher concentration of greenhouse gases in the atmosphere.

2.- The southern limit of the macroalgae's distribution areas is the most vulnerable and it will move towards northernmost latitudes as temperatures rise.

3.- Most of the species under study will withstand the increase in temperature predicted in the Canary islands for 2100, although those unable to grow at temperatures above 20-24°C will disappear at the southern limit of their current distribution. *Pseudolithoderma adriaticum* is the most threatened species in the Canary islands, together with other phaeophycean (*Lobophora canariensis*, *L. delicata*, *L. littlerorum*, *L. schneideri* and *Sargassum desfontainesii*) and chlorophytes (*Cladophora liebetruthii*, *Codium intertextum* and *Dasycladus vermicularis*) which have their southern limit of distribution in the eastern Atlantic in the Canary islands.

4.- Knowing the optimal temperature ranges of the different species of macroalgae based on their biogeographic distribution and their latitudinal limits helps to predict possible changes in future global warming scenarios that could lead to the loss of biodiversity.

5.- The identification of some of the species throughout their geographical areas of distribution needs to be confirmed by morphological and molecular studies.

8. REFERENCIAS

- Álvarez-Canali, D., Sangil, C., Reyes, J. & Sansón, M. 2019. Local variations in environmental parameters govern 50 years of the decline of *Fucus guiryi* populations in the Canary Islands (eastern Atlantic). *Journal of Sea Research*, 155: e101823.
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosh, S., Verbruggen, H., Serrão, E.A. & De Clerck, O. 2018. Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27: 277-284.
- Barton, E.D., Aristegui, J., Tett, P., Cantón, M., García-Braun, J., Hernández-León, S., Nykjaer, L., Almeida, C., Almunia, J., Ballesteros, S., Basterretxea, G., Escáñez, J., García-Weill, L., Hernández-Guerra, A., López-Laatzén, F., Molina, R., Montero, M.F., Navarro-Pérez, E., Rodríguez, J.M., van Lenning, K., Vélez, H. & Wild, K. 1998. The transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress in Oceanography*, 41: 455-504.
- Bartsch, I., Wiencke, C. & Laepple, T. 2012. Global seaweed biogeography under a changing climate: the prospected effects of temperature. In: Wiencke C., Bischof K. (eds) *Seaweed Biology. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 383-406.
- Benedetti-Cecchi, L., Pannacciulli, F., Bulleri, F., Moschella, P.S., Airoidi, L., Relini, G. & Cinelli, F. 2001. Predicting the consequences of anthropogenic disturbance: large-scale effects of loss of canopy algae on rocky shores. *Marine Ecology Progress Series*, 214: 137-150.
- Bertness, M.D., Leonard, G.H., Levine, J.M. & Bruno, J.F. 1999. Climate-driven interactions among rocky intertidal organisms caught between a rock and a hot place. *Oecologia*, 120: 446-450.
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G.F., Alkemade, J.R. & Guisan, A. 2006. Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12: 1079-1093.
- Bruno, J.F., Stachowicz, J.J. & Bertness, M.D. 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends on Ecology & Evolution*, 18: 119-125.
- Davenport, N., Neuer, S., Helmke, P., Pérez-Marrero, J. & Llinas, O. 2002. Primary productivity in the northern Canary Islands region as inferred from SeaWiFS imagery. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49: 3481-3496.
- Duarte, L., Viejo, R.M., Martínez, B., de Castro, M., Gómez-Gesteira, M. & Gallardo, T. 2013. Recent and historical range shifts of two canopy-forming seaweeds in North Spain and the link with trends in sea surface temperature. *Acta Oecologica* 51: 1-10.
- Eggert, A. 2012. Seaweed Responses to Temperature. In: Wiencke C. & Bischof K. (eds), *Seaweed Biology. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 47-66.
- Gallardo, T., Bárbara, I., Afonso-Carrillo, J., Bermejo, R., Altamirano, M., Gómez-Garreta, A., Barceló-Martí, M.C., Rull-Lluch, J., Ballesteros, E. & De la Rosa, J. 2016. Nueva lista crítica de las algas bentónicas marinas de España. *Algas* 51: 7-52.
- Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2020. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>; consultado mayo 2020.
- Hoek, van den, C. 1975. Phytogeographic provinces along the coasts of the northern Atlantic Ocean. *Phycologia* 14: 317-330.
- IPCC 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. En: Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.).
- John, D.M., Prud'homme van Reine, W.F., Lawson, G.W., Kostermans, T.B. & Price, J.H. 2004. A taxonomic and geographical catalogue of the seaweeds of the western coast of Africa and adjacent islands. *Beihefte zur Nova Hedwigia* 127: 1-339.
- Jueterbock, A., Tyberghein, L., Verbruggen, H., Coyer, J.A., Olsen, J.L. & Hoarau, G. 2013. Climate change impact on seaweed meadow distribution in the North Atlantic rocky intertidal. *Ecology and Evolution*, 3: 1356-1373.
- Kersting, D.K. 2016. Cambio climático en el medio marino español: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 166 pp.
- Kocsis, Á.T., Reddin, C.J. & Kiessling, W. 2018. The stability of coastal benthic biogeography over the last 10 million years. *Global Ecology and Biogeography*, 27: 1106-1120.
- Lobban, C.S. & Harrison, P.J. (1994). *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge: Cambridge University Press. 366 pp.

- Lüning, K. 1990. Seaweeds: Their Environment, Biogeography, and Ecophysiology. John Wiley & Sons-Interscience. 544 pp.
- Martín-García, L., Herrera, R., Moro-Abad, L., Sangil, C. & Barquín-Diez, J. 2014. Predicting the potential habitat of the harmful cyanobacteria *Lyngbya majuscula* in the Canary Islands (Spain). *Harmful Algae*, 34: 76-86.
- Martínez, B., Afonso-Carrillo, J., Anadón, R., Araújo, R., Arenas, F., Arrontes, J., ... & Fernández, C. 2015. Regresión de las algas marinas en la costa atlántica de la Península Ibérica y en las Islas Canarias por efecto del cambio climático. *Algas*, 49: 5-12.
- Mieszkowska, N., Kendall, M.A., Hawkins, S.J., Leaper, R., Williamson, P., Hardman-Mountford, N.J. & Southward, A.J. 2006. Changes in the range of some common rocky shore species in Britain – a response to climate change? *Hydrobiologia*, 555: 241-251.
- Nicastro, K.R., Zardi, G.I., Teixeira, S., Neiva, J., Serrão, E.A. & Pearson, G.A. 2013. Shift happens: trailing edge contraction associated with recent warming trends threatens a distinct genetic lineage in the marine macroalga *Fucus vesiculosus*. *BMC Biology* 11: 6.
- Orfanidis, S. 1991. Temperature responses and distribution of macroalgae belonging to the warm-temperate Mediterranean-Atlantic distribution group. *Botanica Marina* 34: 541-552.
- Orfanidis, S. 1993. Temperature responses and distribution of several Mediterranean macroalgae belonging to different distribution groups. *Botanica Marina* 36: 359-370.
- Raven, J. & Falkowski, P.G. 1999. Oceanic sinks for atmospheric CO₂. *Plant, Cell & Environment*, 22: 741-755.
- Sangil, C., Martín-García, L., Afonso-Carrillo, J., Barquín, J. & Sansón, M. 2018. *Halimeda incrassata* (Bryopsidales, Chlorophyta) reaches the Canary Islands: mid- and deep-water meadows in the eastern subtropical Atlantic Ocean. *Botanica Marina* 61: 103-110.
- Sangil, C., Sansón, M., Afonso-Carrillo, J. & Martín-García, L. 2010. Extensive off-shore meadows of *Penicillus capitatus* (Udoteaceae, Chlorophyta) in the Canary Islands (eastern Atlantic Ocean). *Botanica Marina*, 53: 183-187.
- Sangil, C., Sansón, M., Afonso-Carrillo, J., Herrera, R., Rodríguez, A., Martín-García, L. & Díaz-Villa, T. 2012. Changes in subtidal assemblages in a scenario of warming: proliferations of ephemeral benthic algae in the Canary Islands (eastern Atlantic Ocean). *Marine Environmental Research*, 77: 120-128.
- Sansón, M., Reyes, J. & Afonso-Carrillo, J. 2001. Flora marina. In: Fernández-Palacios, J.M., Martín-Esquivel, J.L. *Naturaleza de las Islas Canarias: Ecología y Conservación*. Santa Cruz de Tenerife: Ed. Turquesa. pp. 193-198.
- Sansón, M., Sangil, C. & Orellana, S. 2013. Do the size shifts of marine macroalgae match the warming trends in the Canary Islands? XIX Simposio de Botánica Criptogámica. Las Palmas de Gran Canaria.
- Sansón, M., Sangil, C., Orellana, S. & Afonso-Carrillo, J. 2014. Do the size shifts of marine macroalgae match the warming trends in the Canary Islands? *Algas* 48: 12-13.
- Sansón, M., Martín, L., Rancel, N., Sangil, C., Reyes, J., Brito, A., Afonso, J. & Barquín-Diez, J. 2017. Análisis de distribución histórica y distribución actual de las especies *Cystoseira abies-marina*, *Cystoseira tamariscifolia* y *Cystoseira mauritanica* en la provincia occidental canaria para la toma de decisiones en la elaboración de sus planes de recuperación. Universidad de La Laguna-Gobierno de Canarias. Informe científico-técnico. 118 pp.
- Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, N., Ferdana, Z.A., Finlayson, M., Halpern, B.S., Jorge, M.A., Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C.A. & Robertson, J. 2007. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *Bioscience*, 57: 573-582.
- Steneck, R.S., Graham, M.H., Bourque, B.J., Corbett, D., Erlandson, J.M., Estes, J.A. & Tegner, M.J. 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation*, 29: 436-459.
- Tait, L.W. & Schiel, D.R. 2018. Ecophysiology of layered macroalgal assemblages: Importance of subcanopy species biodiversity in buffering primary production. *Frontiers in Marine Science*, 5: e00444.
- Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F. & De Clerck, O. 2012. Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 21: 272-281.