



Itsasoko eta kostako txostena
Informe marino-costero

Klima-aldaketaren adierazleen joera eta bilakaera, eta kaltetuak izan daitezkeen espezieetan itsasoko bero-boladek eragindako efektuaren analisiak

Tendencia y evolución de indicadores de cambio climático y análisis del efecto de las olas de calor marinas en especies potencialmente afectadas



GIPUZKOA

Jasangarritasuna · Sostenibilidad



Naturklima

Aldaketa Klimatikoaren Fundazioa | Fundación de Cambio Climático de Gipuzkoa

Laburpena	4
1. Sarrera	6
1.1. Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisia	8
1.2. Bero-boladek mikroplanktonean eta antxoan duten efektuaren analisia	9
2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisia	11
2.1. Itsasoko tenperatura	11
2.2. Nahaste-geruza eta estratifikazioa	14
2.3. Itsas maila	15
2.4. Olatuak	19
2.5. Kostaldeko higadura hondartzetan	20
2.6. Azidotzea	23
2.6.1 pH-aren aldakortasuna eguneko zikloan	25
2.6.2 Bereizmen txikiko pH-aren denbora-joeren analisia	27
3. Bero-boladek antxoaren eta bakterio-komunitatearen hazkundean duten efektuaren analisia	30
3.1. Itsasoko bero-boladak	30
3.2. Tenperatura-muturrek mikroplanktonean eta antxoan duten inpaktuaren analisia	35
3.2.1. Planktoneko mikrobio-komunitatearen erantzunaren analisia	35
3.2.2. Antxoa gazteen hazkundearen erantzunaren analisia	40
4. Ondorioak	50
Glosarioa	54
Erreferentziak	57

Resumen	4
1. Introducción	6
1.1. Análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático	8
1.2. Análisis del efecto de las olas de calor sobre el microplancton y la anchoa	9
2. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático	11
2.1. Temperatura del mar	11
2.2. Capa de mezcla y estratificación	14
2.3. Nivel del mar	15
2.4. Oleaje	19
2.5. Erosión costera en playas	20
2.6. Acidificación (pH)	23
2.6.1 Variabilidad del pH en el ciclo diario	25
2.6.2 Análisis de tendencias temporales de pH de baja resolución	27
3. Análisis del efecto de las olas de calor en el crecimiento de la anchoa y la comunidad de bacterias	30
3.1. Olas de calor marinas	30
3.2. Análisis del impacto de los extremos de temperatura sobre el microplancton y la anchoa	35
3.2.1. Análisis de la respuesta en la comunidad microbiana del plancton	35
3.2.2. Análisis de la respuesta en el crecimiento de los juveniles de anchoa	40
4. Conclusiones	50
Glosario	54
Referencias	57

Laburpena

Resumen

Zein aldaketa ikusten ditugu gure itsasertzean?

- Bizkaiko golkoko itsasoaren berotzea 80ko hamarkadatik aurrera, 0,14 °C-tik 0,26 °C-ra bitarteko tasan hamarkada bakoitzeko, kokapenaren eta sakoneraren arabera. Berotzea lotuta egongo litzateke Ipar-ekialdeko Atlantikoaren berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano/atmosfera interakzio-patroiekin erlazionatuta.
- Bero-muturren igoera nabarmena (gainazaleko tenperaturaren 95 pertzentila) 1980–2022 aldian. Itsasoko bero-boladen kopurua, iraupena eta intentsitatea urtero igotzea aldi horretan.
- Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila 1,01 eta 3,40 cm arteko tasarekin igotzea hamarkada bakoitzeko (2,5 cm hamarkada bakoitzeko batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik. Igoera hori bizkortzen ari da azken hiru hamarkadetan. Hori bat dator maila globalean behatutako itsas mailaren igoerarekin.
- Goranzko joera –esanguratsua ez bada ere– olatuen batez besteko baldintzetan (batez besteko olatu-altuera adierazgarria). Aldiz, olatuen muturreko baldintzek (olatu-altuera adierazgarriaren hileko 90 pertzentila, Hs90) igoera nabarmena izan dute: +% 7,75 hamarkada bakoitzeko 1991–2022 aldian.
- Zarauzko hondartzaren nolabaiteko higadura-maila, 2010–2020 aldian kosta-lerroaren barrualderanzko atzerakada esanguratsuan islatzen dena. Seriea oraindik laburra denez, ezin da erabaki joera horiek itsas mailaren igoerarekin edo klima-aldaketaren beste efektu batzuekin lotura duten ala ez.
- Itsasoko uraren pH-aren jaitsiera (0,05 eta 0,07 pH unitate artean) hamarkada bakoitzeko 2002–2022 aldian. Tasa hori zertxobait altua goa da ozeano globalean, ozeano Atlantikoan eta Bizkaiko golkoko mendebaldeko kostaldean.

¿Qué cambios observamos en nuestro litoral?

- Calentamiento del mar en el golfo de Vizcaya a partir de los años 80, a una tasa de entre 0,14 °C y 0,26 °C por década en función de la localización y profundidad. Este calentamiento estaría asociado al calentamiento del Atlántico noreste, ligados a los patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático.
- Incremento significativo de los extremos de calor (percentil 95 de la temperatura superficial) en el periodo 1980–2022. Aumento anual del número, duración e intensidad de las olas de calor marinas en dicho periodo.
- Ascenso del nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya a una tasa de entre 1,01 y 3,40 cm por década (2,5 cm por década en promedio) desde los años 90. Este ascenso se está acelerando en las últimas tres décadas. Esto es consistente con el ascenso del nivel del mar observado a nivel global.
- Tendencia creciente, aunque no significativa, en las condiciones medias del oleaje (altura de ola significativa media). En cambio, las condiciones extremas del oleaje (percentil 90 mensual de altura de ola significativa, Hs90) sí presentan un incremento significativo, de +7,75 % por década en el periodo 1991–2022.
- Cierta grado de erosión de la playa de Zarautz reflejado en un retroceso significativo hacia el interior de la línea de costa en el periodo 2010–2020. Siendo la serie aún corta, no es posible asociar o descartar estas tendencias al ascenso del nivel del mar u otros efectos del cambio climático.
- Descenso del pH del agua de mar de entre 0,05 y 0,07 unidades de pH por década en el periodo 2002–2022. Esta tasa es ligeramente superior a la observada en el océano global, océano

behatutakoa baino. Prozesu hori ozeanoaren azidotze-prozesu globalarekin lotuta egon liteke neurri handi batean, baina beste faktore batzuek ere eragina izan lezakete (ekoizpen primarioak, esate baterako).

Atlántico y costa occidental del golfo de Vizcaya. Este proceso podría estar asociado en gran parte al proceso de acidificación oceánica global, aunque otros factores como la producción primaria podrían contribuir también.

Ba al dute efekturik behatutako bero-boladek?

- Badirudi udako hilabeteetan gertatutako itsasoko bero-boladek ez diotela eragin bakterio-plankton heterotrofoaren urtaroko ugaritasunari, ez eta *Synechococcus* generoko zianobakterioen ugaritasunari ere (baina antza azken hori batez-bestekoa baino zertxobait txikiagoa da).
- Uraren batez besteko tenperatura eta metatutako anomalia termikoak (klimatologiaren desbideratzeak) igotzeak antxoan banako gazteen tamaina handitzea eragin du. Gazteen emaitza hori bat dator 2000. urteaz geroztik behatutako antxoa helduen adinaren araberako pisu- eta luzera-murritzetarekin.

¿Tienen efectos las olas de calor observadas?

- Las olas de calor marinas durante los meses de verano no parecen afectar a la abundancia estacional del bacterioplancton heterótrofo ni a la abundancia de cianobacterias del género *Synechococcus*, aunque esta última parece ser algo inferior a la media.
- El aumento de la temperatura media del agua y de las anomalías térmicas acumuladas (desviaciones de la climatología) inducen un aumento del tamaño de los individuos juveniles de anchoa. Este resultado para los juveniles es coherente con la disminución del peso y longitud por edad observada en las anchoas adultas desde el año 2000.

1. Sarrera

Ozeanoek funtsezko zeregina dute elikagaien nahiz energiaren ekoizpenean, garraioan, bizi-kalitatean eta klimaren erregulazioan, eta, beraz, klima-aldaketaren modulazioan (UNESCOren Gobernuarteko Batzorde Ozeanografikoa, COI-UNESCO, 2019). Nolanahi ere, ozeanoa aurrekaririk gabeko aldaketak jasaten ari da klima-aldaketaren eta giza jarduerari lotutako beste faktore batzuen ondorioz – hala nola kutsadura edo gehiegizko ustiapena –, eta ekosistema horiek eta haien erresilientzia arriskuan daude (He & Silliman, 2019).

Klima-aldaketak zuzenean eragiten die ozeanoei, besteak beste berotzea, itsasoko bero-boladak, itsasoaren batez besteko mailaren igoera, desoxigenazioa eta azidotzea, korronteetako aldaketak edo biodibertsitatearen galera direla eta. Horrek guztiak arrisku garrantzitsuenak planteatzen ditu kostaldeko komunitateentzat, haien azpiegitura eta ekonomientzat eta ekosistema kalteberenentzat (IPCC, 2019; 2021; 2022).

Azken hamarkadan, itsasoaren gainazaleko tenperatura altuagoa da beste edozein behaketalditakoak baino. 2021etik 2022ra bitartean, ozeanoaren urteko batez besteko bero-edukia handitu egin zen, bai eta itsasoaren batez besteko maila ere, bi kasuetan maximo historikoak erregistratuz (Cheng et al., 2023; WMO, 2023). Gainera, ozeanoek karbono antropogenikoa xurgatu zuten, 1990–2020 batezbestekoa baino % 23 gehiago, eta itsasoko bero-bolada zabal eta luzeak detektatu ziren. Kalkulatzen da ozeanoaren gainazalaren % 58k itsasoko bero-bolada bat izan zuela gutxienez 2022an (WMO, 2023). Klima-aldaketaren agertokiek erakusten dutenez, aldaketek aurrera egingo dute, eta ozeanoak eta kostaldeak azken mende edo mihurtekoetan ikusi ez diren baldintzei egin beharko diete aurre (Fox-Kemper et al., 2021; Lee et al., 2021).

Arrisku horiei aurrea hartu ahal izateko, nahi-taetzkoa da prozesu ozeanikoak karakterizatzea eta ulertzea, bai eta haien konplexutasuna eta epe luzera nahiz epe laburrera nola aldatzen ari diren ere, eta ikusitako prozesuetan klima-aldaketak duen

1. Introducción

Los océanos desempeñan un papel fundamental en la producción de alimentos, de energía, en el transporte, en la calidad de vida y en la regulación del clima y, por tanto, en la modulación del cambio climático (Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, COI-UNESCO, 2019). Sin embargo, el océano está experimentando cambios sin precedentes debido al cambio climático y a otros factores asociados a la actividad humana, como la contaminación o sobreexplotación, poniendo en riesgo estos ecosistemas y su resiliencia (He & Silliman, 2019).

El cambio climático afecta directamente a los océanos debido, entre otros, al calentamiento, las olas de calor marinas, subida del nivel medio del mar, desoxigenación y acidificación, cambios en las corrientes o pérdida de biodiversidad. Todo ello plantea riesgos importantes para las comunidades costeras, sus infraestructuras y economías y para los ecosistemas más vulnerables (IPCC, 2019; 2021; 2022).

Durante la última década, la temperatura superficial del mar es mayor que en cualquier otro periodo de observación. Entre 2021 a 2022 el contenido medio anual de calor del océano aumentó, así como el nivel medio del mar, registrando ambos máximos históricos (Cheng et al., 2023; WMO, 2023). Además, los océanos absorbieron carbono antropogénico, un 23% por encima del promedio 1990–2020; y, se detectaron extensas y largas olas de calor marinas. Se estima que el 58 % de la superficie oceánica experimentó al menos una ola de calor marina durante 2022 (WMO, 2023). Los escenarios de cambio climático indican que estos cambios continuarán y que el océano y las costas se enfrentarán a condiciones sin precedentes en los últimos siglos o milenios (Fox-Kemper et al., 2021; Lee et al., 2021).

Para poder anticiparnos a estos riesgos es necesario caracterizar y comprender los procesos oceánicos, su complejidad y como están cambiando a largo plazo y simultáneamente a corto plazo, y el papel específico del cambio climático en los

zeregin espezifikoa. Kostaldeko behatokiak funtsezkoak dira horretarako. Izan ere, hainbat behaketa eta neurketatik abiatuta eta ikuspegi integratu eta diziplina anitzekoarekin, aukera ematen dute kostaldeko eremuaren barruko prozesuak, ozeanoaren egoera, haren aldakortasuna, joerak eta patroiak eta klima-aldaketak eta gizakiak eragindako bestelako presio batzuek eragindako aldaketak ulertzeko. Horren guztiaren ondorioz, kontzientzia areagotu daiteke, erabakiak ezagutzen oinarrituta hartu, eta egokitzeko estrategiak landu ahal izango dira kostaldeak eta ozeanoak babesteko eta kontserbatzeko helburuarekin.

Testuinguru horretan garatzen da *Gipuzkoako Itsasoko eta Kostako Behatokia*. Gure itsasertzen egoeraren eta klima-aldaketak bertan eragindako inpaktuaren jarraipen-sistema integratua da hau. Klima-aldaketaren adierazle batzuen bilakaera monitorizatzea eta aztertzea du helburu. Informazio horri esker, inpaktu horiek hobeto ezagutu eta klima-aldaketaren agertoki eskualdekotak eguneratu ahal izango dira. Hori guztia funtsezkoa da arriskuei aurrea hartzeko eta Gipuzkoak klima-aldaketaren aurrean duen erresilientzia hobetuko duten egokitzapen-irizpideak definitzeko, horrela Gipuzkoako Klima Aldaketaren Aurkako Borroka Estrategiaren (Gipuzkoa Klima 2050) helburuak lortzen lagunduz.

Txosten honen helburuak bi dira: (1) 2022ko Itsasoko eta Kostako Txostenean¹ definitutako klima-aldaketaren adierazle garrantzitsuenen jarraipenarekin eta analisiarekin jarraitzea, adierazle horiek klima-aldaketaren testuinguru batean duten bilakaerari dagokionez, eta (2) kaltetuak izan daitezkeen espezieetan bero-boladek –berezik 2022koek– eragindako efektua aztertzea: bakterio-komunitatea eta antxoa gazteen hazkundea.

procesos observados. Los observatorios costeros son fundamentales para ello, ya que, a partir de múltiples observaciones y mediciones y con un enfoque integrado y multidisciplinar, permiten comprender los procesos dentro de la zona costera, el estado del océano, su variabilidad, tendencias, patrones y cambios originados por el cambio climático y otras presiones humanas. Todo ello, permite aumentar la concienciación, la toma de decisiones basadas en el conocimiento, así como elaborar estrategias de adaptación con el objetivo de proteger y conservar las costas y océanos.

En este contexto se desarrolla el *Observatorio marino-costero de Gipuzkoa*. Este es un sistema integrado de seguimiento del estado y del impacto del cambio climático en nuestro litoral. Su objetivo es la monitorización y análisis de la evolución de una serie de indicadores de cambio climático. Esta información permitirá mejorar el conocimiento sobre estos impactos y la actualización de los escenarios de cambio climático regionalizados. Todo ello es clave para anticiparnos a los riesgos y definir criterios de adaptación que mejoren la resiliencia de Gipuzkoa ante el cambio climático, contribuyendo así a la consecución de los objetivos de la Estrategia Guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático, Gipuzkoa Klima 2050.

El objetivo de este informe es (1) continuar con el seguimiento y análisis de los indicadores de cambio climático más representativos, definidos en el Informe del Observatorio de 2022¹, en relación a la evolución de dichos indicadores en un contexto de cambio climático, y (2) analizar el efecto de las olas de calor, en especial las olas de calor de 2022, en especies potencialmente afectadas: comunidad de bacterias y el crecimiento de juveniles de anchoa.

¹ <https://www.naturklima.eus/itsasoko-eta-kostako-txostena.htm>

¹ <https://www.naturklima.eus/informe-marino-costero.htm>

1.1. Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisia

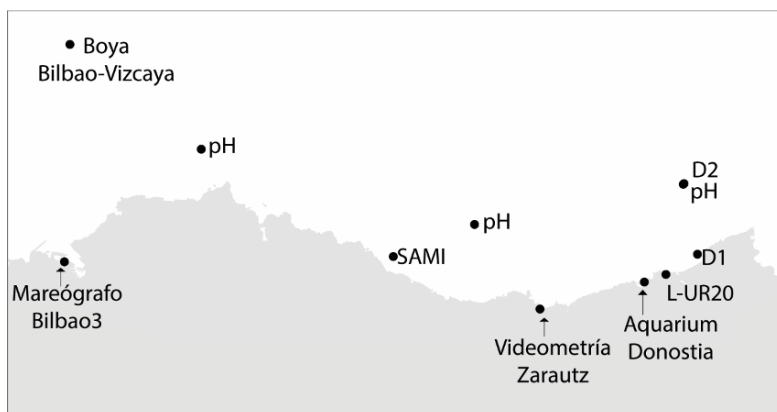
Joeren analisiaren helburua da 2022ko Itsasoko eta Kostako txostenean Gipuzkoako itsasertzeko definitutako klima-aldaketaren adierazle fisiko-kimikoen eta biologikoen jarraipena eta analisia egitea, eta tokiko klima-aldaketarekin lotutako joerak hobeto ulertzea. Zehazki, klima-aldaketaren bost adierazle adierazgarrien joerak aztertu dira: itsasoko tenperatura, itsasoaren batez besteko maila, olatuak, kostaldeko higaduraren adierazle geomorfologikoak eta itsasoko pH-a.

Adierazleen kalkulua plataforma kontinentalean egindako behaketa-multzo zabal batean oinarritzen da. Behaketa horietan sartzen dira mareografoek eta buiek denbora errealean egindako neurketak, bai eta kanpaina ozeanografikoetan in situ hartutako neurriak ere, hala nola 'Variaciones' (Azti) proiektuari lotutakoak, 2023an jarraipena izan dutenak Behatokiaren esparruan eta EAEko trantsizio-uren eta kostaldeko uren egoera ekologikoen jarraipen-sarearen (URA) esparruan. Itsasertzeko Bideometria Foru Sareko datuak erabiltzen dira hondartzen jarraipena egiteko eta, gainera, Bizkaiko Golkoaren zati handi bat estaltzen duten satelite-sentsoreen bidezko hainbat behaketa ere bai. Gure itsasertzaren behaketak osatzeko, 2023an pH-sentsore bat inplementatzeko lanekin jarraitu zen, etengabeko neurketak emateko eta ozeanoaren azidotzea monitorizatzeko aukera emango duena.

1.1. Análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático

El objetivo del análisis de tendencias es realizar el seguimiento y análisis de la evolución de indicadores físicoquímicos y biológicos del cambio climático definidos para el litoral de Gipuzkoa (Informe marino-costero de 2022), y ahondar en la comprensión de las tendencias observadas en relación con el cambio climático local. En concreto, se han analizado las tendencias de los cinco indicadores de cambio climático más representativos: temperatura del mar, nivel medio del mar, oleaje, indicadores geomorfológicos de erosión costera y pH del mar.

El cálculo de los distintos indicadores se basa en un amplio conjunto de observaciones realizadas sobre la plataforma continental. Estas incluyen las medidas en tiempo real realizadas por mareógrafos y boyas, así como medidas in situ recogidas en campañas oceanográficas, como las asociadas al proyecto 'Variaciones' (Azti) que han continuado en 2023 en el marco de este Observatorio, o las realizadas en el marco de la Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la CAPV (URA). Se utilizan datos de la Red Foral de Videometría Costera para el seguimiento de playas y, además, observaciones mediante sensores de satélite que cubren una mayor parte del Golfo de Vizcaya. Para completar las observaciones de nuestro litoral, en 2023 se continuó con los trabajos para la implementación de un sensor de pH que proporcione medidas en continuo y permita monitorizar la acidificación del océano.



1. ird. Aztertutako itsasertzeko laginketa-estazioak erakusten dituen mapa.

1. Fig. Mapa en el que se muestran las estaciones de muestreo del litoral analizadas.

Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisiak 2022ko Itsasoko eta Kostako Txostenean azaldu-tako metodologia berari jarraitzen dio. Egindako analisisa espezifiko da aldagai-mota bakoitzerako eta espazio-dimentsio desberdinetan eskuragarri dauden datuetarako (adibidez, neurketa-puntu bat edo asko, gainazaleko datuak soilik edo ur-zutabearen sakonera batean baino gehiagotan). Erabilitako metodo guztien helburua da aztertutako adierazlea denboran zehar aldatzen den ala ez zehaztea, bai eta aldakuntza hori gure eskualdeari dagokion klima-aldaketarekin lotuta ote dagoen ere. Klima-aldaketak, oro har, denboran zeharreko progresio oso pixkanakakoa duenez, klima-aldaketarekin izan daitekeen harremanaren aztarnak denboran zeharreko joera lineal gisa ezarri dira. Joeren analisisa Chust et al. (2022) lanean garatutako teknika estatistikoetan oinarritu da. Laburbilduz, bi metodologia erabili dira: (1) iragazki digital bat, urtebetetik beherako aldiko aldakortasuna kentzeko (Thompson, 1983; González & Fontán, 2013) eta joera-aldaketaren analisi bat (Mudelsee, 2010); eta (2) aldaketa-tasen estimazio bat, eredu gehigarri orokortu mistoen bidez (GAMM), denbora-seriea urtaroko osagai batean eta epe luzeko edo joerako aldakortasun batean deskonposatzeko.

1.2. Bero-boladek mikroplanktonean eta antxoan duten efektuaren analisisa

Ozeanoen berotze globalak itsasoko eskualdeko bero-boladak eragiten ditu, gero eta ohikoagoak, luzeagoak eta intentsitate handiagoak. Muturreko gertakari hauetan uraren tenperatura anormalki altua da denbora luzean (gutxienez 5 egunez, baina kasu batzuetan hilabeteetan zehar) (Hobday et al., 2016). Agertokiek adierazten dute klima-aldaketaren ondorioz muturreko gertakari horien intentsitatea, maiztasuna eta iraupena handitzen ari direla (IPCC, 2021).

Klima-aldaketaren ondoriozko uraren tenperaturaren igoera progresiboak eta itsasoko bero-boladen hazkundeak inpaktuak dituzte ekosistema ozeanikoetako prozesu ekologiko eta biogeokimikoetan, bai eta floran eta faunan ere, ekosistemen egituraren eta funtzionamenduan ondorio suntsitzaileak eraginez eta itsasotik ateratzen ditugun baliabideei erasanez.

El análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático sigue la misma metodología que la expuesta en el Informe del Observatorio de 2022. El análisis realizado es específico para cada tipo de variable y de los datos disponibles en las diferentes dimensiones espaciales (ej. uno o múltiples puntos de medición, datos sólo en superficie o en varias profundidades de la columna de agua). Todos los métodos empleados tienen como objetivo establecer si el indicador analizado varía en el tiempo y si dicha variación está relacionada con el cambio climático correspondiente a nuestra región. Dado que, en general, el cambio climático tiene una progresión muy gradual en el tiempo, los indicios de la posible relación con el cambio climático se han establecido como una tendencia lineal en el tiempo. El análisis de las tendencias se ha basado en técnicas estadísticas desarrolladas en Chust et al. (2022). De forma resumida, se han utilizado dos metodologías: (1) un filtro digital para retirar la variabilidad de período inferior a 1 año (Thompson, 1983; González & Fontán, 2013) y un análisis de cambio de tendencia (Mudelsee, 2010), y (2) estimación de las tasas de cambio mediante modelos aditivos generalizados mixtos (GAMMs) que permiten descomponer la serie temporal en una componente estacional y una variabilidad de largo plazo o tendencia.

1.2. Análisis del efecto de las olas de calor sobre el microplancton y la anchoa

El calentamiento global de los océanos provoca olas de calor marinas regionales, cada vez más frecuentes, largas e intensas. Estos son eventos extremos en los que la temperatura del agua es anormalmente elevada durante un largo periodo de tiempo (al menos 5 días, pero algunas pueden durar meses) (Hobday et al., 2016). Los escenarios indican un aumento de la intensidad, frecuencia y duración de estos eventos extremos debido al cambio climático (IPCC, 2021).

El progresivo incremento de la temperatura del agua debido al cambio climático y el aumento de las olas de calor marinas tiene impactos sobre los procesos ecológicos y biogeoquímicos de los ecosistemas oceánicos, y sobre la flora y fauna, con repercusiones devastadoras sobre la estructura y funcionamiento de ecosistemas y afectando a los recursos que obtenemos del mar.

Ozeanoko mikrobio-komunitatea oso anitza da. Kate trofikoaren oinarria da, eta funtsezko zeregina du itsasoko ekosistemen ziklo biogeokimikoan eta funtzionamenduan (adib., Moran et al., 2015). Ingurumen-aldaketekiko –hala nola itsasoaren berotzearekiko– oso sentiberak diren komunitateak dira. Adibidez, itsasoko bero-boladek komunitatearen aniztasunaren urtaro-patroiak modula ditzakete, edo komunitatearen osaera alda dezakete.

Arrain ektotermoen edo 'odol hotzeko' espezieen kasuan, tenperaturak prozesu fisiologikoak bultzatzen ditu (Brett, 1971), tasa metabolikoei, immunitate-erantzunei, elikadurari eta errendimenduari, ugalketari eta hazkundeari eragiten dietenak (Pörtner & Farrel, 2008; Pittman et al., 2013). Tenperaturaren igoerari arrainek ematen dioten erantzunari buruzko azterketek ez dituzte beti kontuan hartzen arrainen bizi-ziklo konplexuak. Bizi-zikloaren ondoz ondoko etapek eskakizun desberdinak dituzte (habitata, fisiologia, tamaina, forma, nitxo termikoa); beraz, espero da klima-aldaketak organismoen modu desberdinean eragitea beren bizi-zikloan zehar. Bizkaiko golkoko antxoari buruz egindako azterketetan ikusi da batez besteko tamaina (luzera eta pisua) jaitsi egin dela adin-tarte guztietan. Gazte-etapetan badirudi populazio-dentsitateak efektua izan dezakeela murrizketa horretan; helduetan, berriz, tenperaturaren efektua garrantzitsuagoa dela dirudi. Behatutako patroiak bat datoz tenperaturaren kontrako efektuarekin, hazkunde goiztiarra bizkortuz eta helduen tamaina murriztuz (Taboada et al., 2023). Larba-fasearen kasuan, uraren tenperatura faktore erabakigarria da hazkunde-tasetan, haien iraupenean edo gertakari metamorfikoan (Green & Fisher, 2004; Spies & Steele, 2016). Tenperaturak etapa goiztiar horietako hazkundean duen inpaktuak ondorioak eragin ditzake epe luzera populazioentzat.

Azterketa honetan, bero-boladek itsasoko ekosisteman duten efektua aztertzen da, bereziki planktonaren mikrobio-komunitatean eta antxoa gazteen hazkundean (arrantza-intereseko espeziea gure itsasertzean).

La comunidad microbiana del océano es extremadamente diversa. Constituye la base de la cadena trófica y juega un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico y funcionamiento de los ecosistemas marinos (ej. Moran et al., 2015). Son comunidades altamente sensibles a los cambios ambientales, como el calentamiento del mar. Por ejemplo, las olas de calor marinas pueden modular los patrones estacionales de la diversidad de la comunidad o modificar la composición de la comunidad.

En el caso de los peces ectotermos o especies de 'sangre fría', la temperatura impulsa los procesos fisiológicos (Brett, 1971) que afectan a las tasas metabólicas, las respuestas inmunitarias, la alimentación y el rendimiento, la reproducción y el crecimiento (Pörtner & Farrel, 2008; Pittman et al., 2013). Los estudios sobre la respuesta de los peces al incremento de la temperatura no siempre consideran sus complejos ciclos de vida. Las etapas sucesivas del ciclo de vida tienen diferentes requisitos (hábitat, fisiología, tamaño, forma, nicho térmico) y, por lo tanto, se espera que el cambio climático afecte de forma diferente a los organismos a lo largo de su ciclo de vida. En estudios realizados sobre la anchoa del golfo de Vizcaya se ha observado una disminución en el tamaño medio (longitud y peso) en todas las clases de edad. En las etapas juveniles parece que la densidad de población puede tener efecto en esta disminución, mientras que en los adultos el efecto de la temperatura parece más importante. Los patrones observados son consistentes con un efecto contrario de la temperatura, acelerando el crecimiento temprano y disminuyendo el tamaño de los adultos (Taboada et al., 2023). En el caso de la fase larvaria, la temperatura del agua es un factor determinante de las tasas de crecimiento, su duración o el suceso metamórfico (Green & Fisher, 2004; Spies & Steele, 2016). El impacto de la temperatura en el crecimiento en estas etapas tempranas podría tener consecuencias a largo plazo para las poblaciones.

En este estudio se analiza el efecto de las olas de calor sobre el ecosistema marino, en particular sobre la comunidad microbiana del plancton y el crecimiento de juveniles de anchoa, especie de interés pesquero en nuestro litoral.

2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa

2. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático

2.1. Itsasoko temperatura

Ozeanoaren berotzea –gainazaletik hondoraino– aurrekaririk gabeko erritmoan ari da gertatzen, eta berotze global antropogenikoaren ondorioz bizkortzen ari da (IPCC, 2021; Cheng et al., 2024). Planetan metatutako beroaren % 90 inguru ozeanoan biltegitatu da batez ere azken hamarkadetan. Horregatik, ozeanoen berotzeak giza jarduerak sortutako berotzearen funtsezko neurria ematen du (von Schuckmann et al., 2023).

Itsasoaren batez besteko gainazaleko tenperatura globala $+0,4 \pm 0,02$ °C-tik gora igo da 1993az geroztik. 2022an, $+0,83 \pm 0,05$ °C baino altuagoa izan zen 1850–1900 aldikoa baino. Hurbileneko erreferentzia-aldiaren aldean (1991–2020), igoera hori $+0,13$ °C-koa izan zen (Cheng et al., 2023).

Eskualde mailan, ozeanoen berotzeak inplikazioak ditu eskala handian. Adibidez, ozeanoen berotzeak behatutako itsas mailaren igoeraren % 30eko ekarpena egiten du, eta ozeanoko korrontek aldatzen ditu (Gulev et al., 2021). Ekaitzen ibilbidea ere zeharka aldatzen du (IPCC, 2019), ozeanoen estratifikazioa handitzen du (Li et al., 2020), eta itsasoko ekosistemen aldaketak eragin ditzake (Biandoff et al., 2019). Bereziki, azidotzearekin eta desoxigenazioarekin batera, ozeanoen berotzeak aldaketa drastikoak eragin ditzake ekosistemen dinamikan, biodibertsitatearen galeran, koralen zuritzean eta espezieen fenologian eta banaketan.

Donostiako Aquariumean 1946–2022 aldian erregistratutako kostako itsasoko gainazaleko tenperaturak goranzko joera esanguratsua du, $+0,07 \pm 0,02$ °C-koa hamarkada bakoitzeko. Denbora-serie horretan, bi joera desberdin ikusten dira: alde batetik, beharrezko joera 1946tik 1980ra bitartean ($-0,19 \pm 0,06$ °C hamarkada bakoitzeko); eta, bestetik, goranzko joera 1980–2022 aldi berrienean ($+0,26 \pm 0,03$ °C hamarkada bakoitzeko). Bizkaiko golkoaren eskalan,

2.1. Temperatura del mar

El calentamiento del océano desde la superficie hasta el fondo está sucediendo a un ritmo sin precedentes y se está acelerando como consecuencia directa del calentamiento global antropogénico (IPCC, 2021; Cheng et al. 2024). Alrededor del 90% del calor acumulado en el planeta se ha almacenado principalmente en el océano en las últimas décadas. Por ello, el calentamiento de los océanos proporciona una medida fundamental del calentamiento generado por la actividad humana (von Schuckmann et al., 2023).

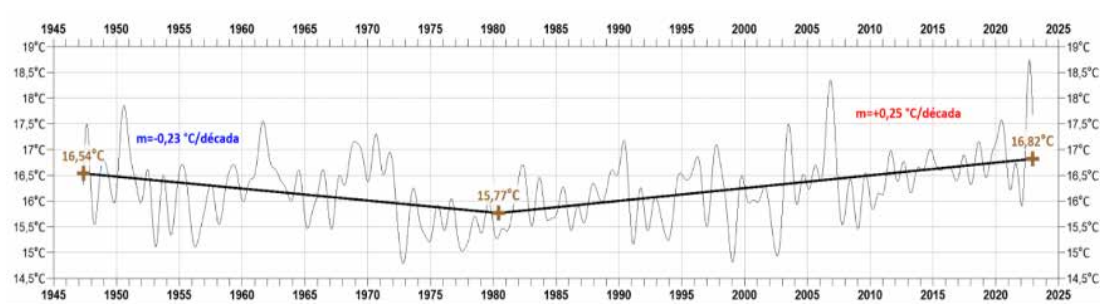
La temperatura superficial global media del mar ha aumentado en más de $+0,4 \pm 0,02$ °C desde 1993. En 2022, fue $+0,83 \pm 0,05$ °C superior a la del periodo 1850–1900. Respecto al periodo de referencia más próximo (1991–2020) este incremento fue de $+0,13$ °C (Cheng et al., 2023).

A escala regional, el calentamiento de los océanos tiene implicaciones a gran escala. Por ejemplo, el calentamiento de los océanos contribuye al 30% del aumento del nivel del mar observado y modifica las corrientes oceánicas (Gulev et al., 2021). También modifica indirectamente la trayectoria de las tormentas (IPCC, 2019), aumenta la estratificación de los océanos (Li et al., 2020) y puede conducir a cambios en los ecosistemas marinos (Biandoff et al., 2019). En particular, junto con la acidificación y la desoxigenación, el calentamiento de los océanos puede provocar cambios drásticos en la dinámica de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad, el blanqueo de corales, así como cambios en la fenología y distribución de especies.

La temperatura del mar superficial en la costa, registrada en el Aquarium de Donostia / San Sebastián, presenta en el periodo 1946–2022 una tendencia significativa al calentamiento, $+0,07 \pm 0,02$ °C por década. En dicha serie temporal, se observan dos

itsasoaren gainazaleko tenperaturaren goranzko joera esanguratsua ere ikusten da, tasa aldatzen delarik denbora-seriearen luzeraren eta erabilitako datu-basearen arabera $+0,15 \pm 0,03$ °C hamarkada bakoitzeko (2003–2022, MODIS²/Aqua) eta $+0,20 \pm 0,03$ °C hamarkada bakoitzeko (1981–2022, OSTIA³) artean.

tendencias diferenciadas, una tendencia decreciente entre 1946 y 1980 ($-0,19 \pm 0,06$ °C por década) y una tendencia creciente en el periodo más reciente 1980–2022 ($+0,26 \pm 0,03$ °C por década). A escala del golfo de Vizcaya, también se observa una tendencia creciente y significativa de la temperatura superficial del mar, con una tasa que oscila en función de la longitud de la serie temporal y de la base de datos utilizada, entre $+0,15 \pm 0,03$ °C por década (2003–2022, MODIS²/Aqua) y $+0,20 \pm 0,03$ °C por década (1981–2022, OSTIA³).



2. ird. Donostiako Aquariumean neurtutako gainazaleko tenperatura (SST) (datu iragaziak) eta 1946–2022 aldiko bat-bateko joera-alaketaren analisia.

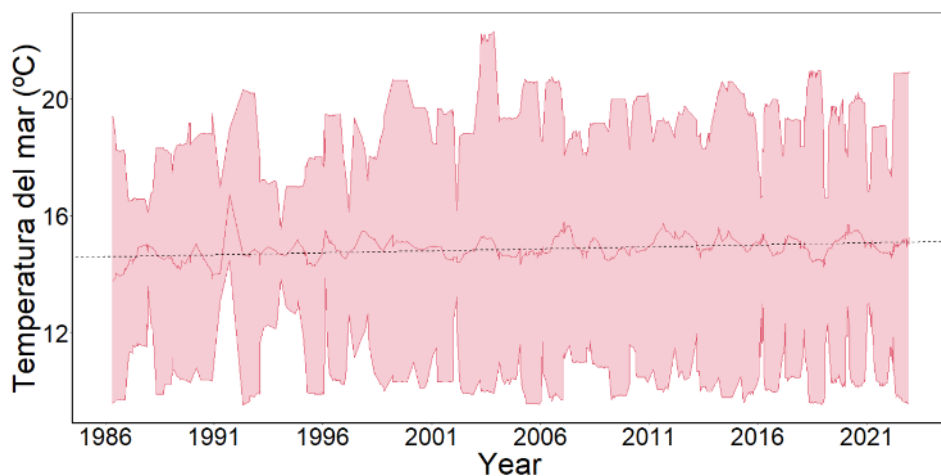
2. Fig. Temperatura superficial (SST) medida en el Aquarium de Donostia / San Sebastián (datos filtrados) y análisis del cambio abrupto de tendencias en el periodo 1946–2022.

Berotzea ez da mugatzen itsasoko gainazalera. Geruzarik sakonenetarantz hedatzen da. Pasaia-aren parean dagoen D2 estazioko ur-zutabeari (0–100 m) buruzko analisiak adierazten du 1986–2022 aldian sakonera desberdinetako tenperaturak berotze esanguratsua duela batez beste, $+0,136 \pm 0,035$ °C-ko tasan hamarkada bakoitzeko.

El calentamiento no se limita a la superficie del mar. Este se extiende hacia las capas más profundas. El análisis en la columna de agua (0–100 m) en la estación D2 situada frente a Pasaia, indica que en el periodo 1986–2022, la temperatura a diferentes profundidades presenta en promedio un calentamiento significativo a una tasa de $+0,136 \pm 0,035$ °C por década.

2 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

3 Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis. https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001/description



3. ird. Itsasoko tenperaturaren urteko batezbesteko mugikorra (lerro gorria) eta haren konfiantza-tartea (gorri lausotuan) 0 eta 100 m bitarteko sakoneretan 1986–2022 aldian eta joera lineala (lerro beltza).

3. Fig. Media móvil anual (línea roja) y su intervalo de confianza (sombreado rojo) de la temperatura del mar a profundidades de 0 a 100 m en el periodo 1986–2022 y la tendencia lineal (línea negra).

Beraz, adierazle horien guztien joerek erakusten dute Bizkaiko golkoko itsasoaren berotzea 80ko hamarkadatik aurrera. Behatutako berotze-tasak $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tik $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra bitartekoak dira hamarkada bakoitzeko, analisisian kontuan hartutako ur-zutabearen kokapenaren eta sakoneraren arabera. Euskal kostaldeko eta Bizkaiko golkoko itsasoaren berotze-tasa horiek aurretiazko azterketetan detektatutako joerak berresten dituzte (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; Costoya et al., 2015). 1981–2021 aldiko joerei dagokienez (Naturklima, 2023), joera berak behatzen dira, hamartarraren goranzko diferentziak gorabehera.

Bero-muturrak

Bizkaiko golkoko gainazaleko tenperaturaren berotzearen arrazoi nagusia da denboraldi beroaren iraupena luzatu izana, gainazaleko temperatura oso beroko egunen kopuruaren igoera $+1,16 \pm 0,23$ egunekoa eta $+1,81 \pm 0,42$ egunekoa delako hamarkada bakoitzeko udaberrian eta udazkenean, hurrenez hurren (Costoya et al., 2015).

Itsasoko tenperaturaren muturrak eta haien bilakaera aztertzeko, uraren gainazaleko temperatura-seriearen urteko 5 eta 95 pertzentilen bilakaera aztertu da, 1980–2022 aldian Donostiako Aquariumean neurtuta.

Por tanto, las tendencias de todos estos indicadores señalan el calentamiento del mar en el golfo de Vizcaya a partir de los años 80. Las tasas de calentamiento observadas oscilan entre $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, en función de la localización y profundidad en la columna de agua considerada en el análisis. Estas tasas de calentamiento del mar en la costa vasca y el golfo de Vizcaya confirman las tendencias detectadas en estudios previos (Valencia et al., 2004; Goikoetxea et al., 2009; Costoya et al., 2015). Respecto a las tendencias en el periodo 1981–2021 (Naturklima, 2023), se observan las mismas tendencias, con ligeras diferencias al alza en el decimal.

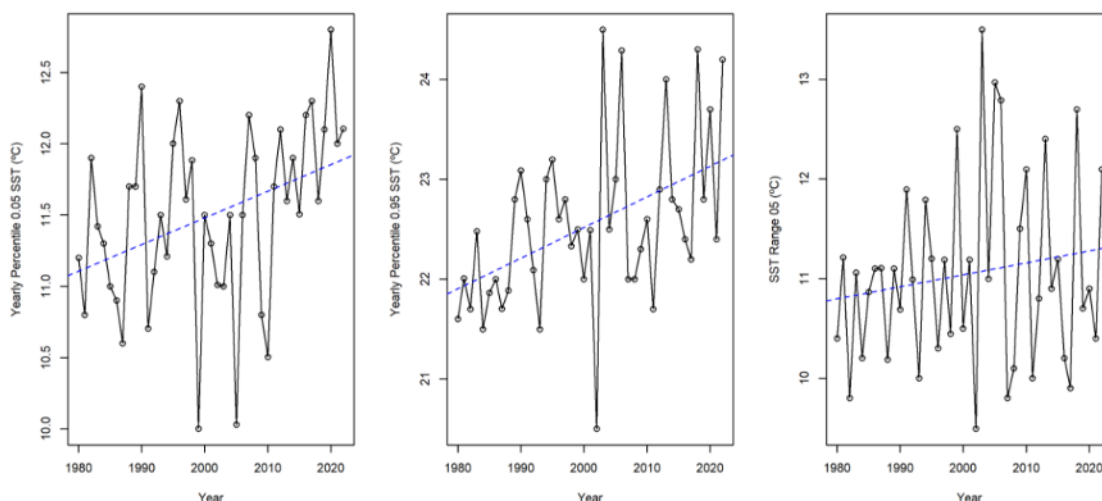
Extremos de calor

El calentamiento de la temperatura superficial del golfo de Vizcaya se debe principalmente a un aumento de la duración de la temporada cálida, ya que el aumento del número de días de temperatura superficial extremadamente cálida es de $+1,16 \pm 0,23$ días y $+1,81 \pm 0,42$ días por década en primavera y otoño, respectivamente (Costoya et al., 2015).

Para analizar los extremos de la temperatura del mar y su evolución, se ha analizado la evolución de los percentiles 5 y 95 anual de la serie de temperatura superficial del agua medida en el Aquarium de Donostia / San Sebastián durante el periodo 1980–2022.

Bi pertzentilak igo ziren $+0,19 \pm 0,01$ °C 5 pertzentilaren kasuan, eta $+0,31 \pm 0,09$ °C 95 pertzentilaren kasuan. 95 pertzentilaren berotzea handiago da. Esanguratsua ez den arren, tenperatura-balioen % 90 barne hartzen duen pertzentil arteko tartea igotzeko joera du ($+0,12 \pm 0,12$ °C hamarkada bakoitzeko).

Ambos percentiles aumentaron, $+0,19 \pm 0,01$ °C en el caso del percentil 5 y $+0,31 \pm 0,09$ °C para el percentil 95. Se aprecia un mayor calentamiento del percentil 95. Aunque no es significativo, el intervalo interpercentil que incluye el 90% de los valores de temperatura tiende a aumentar ($+0,12 \pm 0,12$ °C por década).



4. ird. 5 eta 95 pertzentilak eta bi balio horien arteko aldea Donostiako Aquariumeko gainazaleko tenperaturan (SST), 1980–2022 aldian.

4. Fig. Percentil 5 y 95 y diferencia entre estos dos valores de la temperatura superficial (SST) del Aquarium de Donostia / San Sebastián analizados en el período 1980–2022.

2.2. Nahaste-geruza eta estratifikazioa

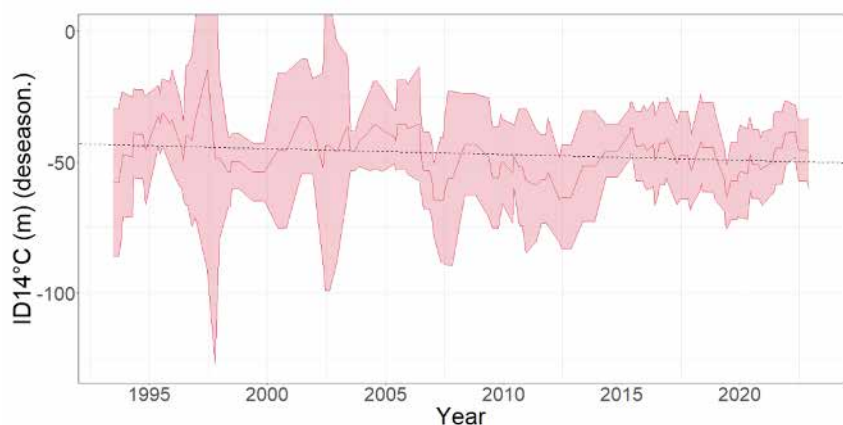
Klima-aldaketarekin lotuta ozeanoko geruza azalekoenak berotzeak ur-zutabearen estratifikazio handiagoa eragin dezake (Li et al., 2020), gainazaleko uren eta geruza sakonagoen arteko nahaste bertikala murriztuz. Horrek mugatu egin dezake ekoizpen primarioarako mantenugaien erabilgarritasuna gainazaleko geruzetan.

Isoterma jakin baten sakoneraren jarraipena egitea metodo oso hedatua da estratifikazio-zikloak monitorizatzeko. Bizkaiko golkoko hego-ekialdean estratifikazioaren bilakaeraren aldi baterako indize gisa 14 °C-ko isotermaren murgiltze-sakontzea erabili da (Valencia et al., 2004; 2019).

2.2. Capa de mezcla y estratificación

El calentamiento de las capas más superficiales del océano asociado al cambio climático puede conllevar una mayor estratificación de la columna de agua (Li et al., 2020), reduciendo la mezcla vertical entre las aguas superficiales y las capas más profundas. Esto puede limitar la disponibilidad de nutrientes para la producción primaria en las capas más superficiales.

El seguimiento de la profundidad de una determinada isoterma es un método muy extendido para monitorizar los ciclos de estratificación. En el sureste del golfo de Vizcaya se ha utilizado como índice temporal de la evolución de la estratificación la profundización de inmersión de la isoterma de 14 °C (Valencia et al., 2004; 2019).



5. ird. 14 °C-ko isothermaren sakoneraren denbora-seriea D2 estazioan, 1993–2022 aldian, estratifikazioa dagoen hilabeteetan zehar.

5. Fig. Serie temporal de la profundidad de la isoterma de 14 °C a lo largo de los meses que hay estratificación en la estación D2 en el periodo 1993–2022.

Joera-analisiaren emaitzek adierazten dutenez, 14 °C-ko isothermaren sakonera ez da nabarmen aldatzen, baina joera negatiboa da (–2,21 m hamarkada bakoitzeko). Hau da, esanguratsua ez bada ere, isothermaren joera da ur-zutabearen 100 metroko berotzearekin bat etorritz sakontzea.

Los resultados del análisis de tendencia indican que la profundidad de la isoterma de 14 °C no varía significativamente, si bien la tendencia es negativa (–2,21 m por década). Esto es, aunque no es significativa, la tendencia de la isoterma es a profundizarse en concordancia con el calentamiento detectado de los 100 m de la columna de agua.

2.3. Itsas maila

Itsasoaren batez besteko mailaren aldaketak klimaren bilakaeraren funtsezko adierazlea dira, islatzen dituztelako, alde batetik, ozeanoaren berotzearen ondoriozko hedapen termikoa, eta, bestetik, glaziarrek eta izotz-geruzak desizoztearen ondoriozko ozeanoko masaren handitzea.

Kostaldean, itsas mailaren aldakuntzak lurra mugimendu bertikalei gainjartzen zaizkie, eta kosta-lerroa atzerarazten du, eremu horietako ekosistemak eta komunitateak mehatxatuz. Klima-aldaketaren agertokiek kostako higadura eta uholdeak areagotzea proiektatzen dute, itsas mailak gora egiten jarraituko baitu, jada gertatutako berotzeari ozeanoak emandako erantzun iraunkorra dela-eta (IPCC, 2021).

Itsasoaren batez besteko maila, eskala globalen, batez beste $+3,4 \pm 0,3$ mm igo da urtean 1993az geroztik (hau da, $+10,3$ cm-ko hazkundea izan du azken 30 urteetan). Igoeraren % 30 ozeanoaren hedapen termikoari egotz dakiok; gainerako

2.3. Nivel del mar

Los cambios en el nivel medio del mar son un indicador esencial de la evolución del clima al reflejar estos cambios, tanto la expansión térmica del océano en respuesta a su calentamiento, como el aumento de la masa oceánica debido al deshielo de glaciares y capas de hielo.

En las zonas costeras, las variaciones del nivel del mar se superponen a los movimientos verticales del terreno, y genera el retroceso de la línea de costa, amenazando a los ecosistemas y las comunidades en esas áreas. Los escenarios de cambio climático proyectan un agravamiento de la erosión e inundación costera, ya que el nivel del mar continuará aumentando debido a la respuesta sostenida del océano al calentamiento que ya ha ocurrido (IPCC, 2021).

El nivel medio del mar a escala global ha ascendido de media $+3,4 \pm 0,3$ mm por año desde 1993, lo que representa un incremento de $+10,3$ cm en los últimos 30 años. El 30% del ascenso puede atribuirse



ehunekoa, berriz, batez ere glaziarren eta izotz polarren geruzen desizozteari. Itsas mailaren igoera bizkortzen ari da azken hamarkadetan, eta joera pasatu da 1993–2003 aldian urtean $+2,1 \pm 1,1$ mm igotzetik 2013–2023 aldian urtean $+4,3 \pm 0,6$ mm igotzera (hau da, % 105eko hazkundea).

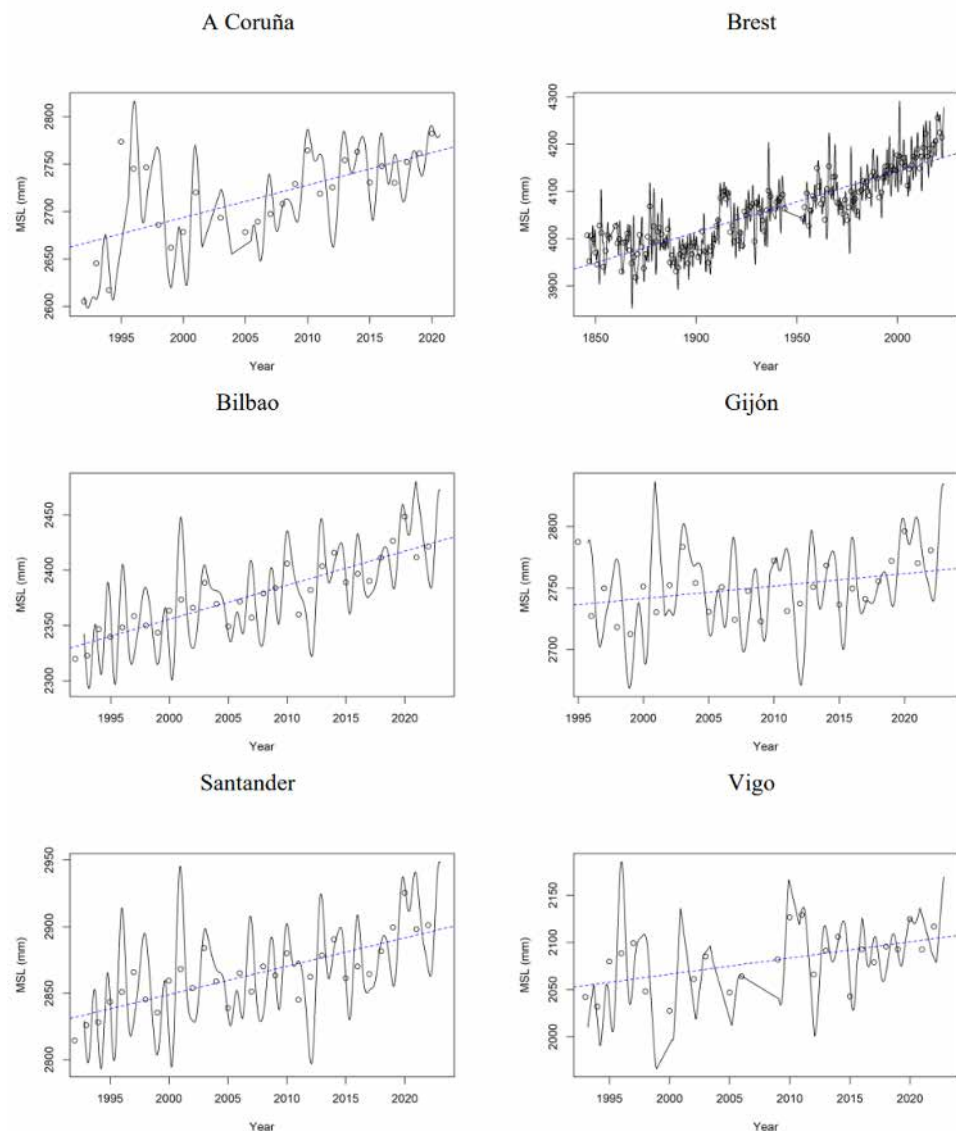
Itsas mailaren eskualde-joerak aldakuntza nabarmenak izan ditzake mundu-mailako joeran, prozesu ozeanikoak direla-eta, hala nola ozeanoko beroaren birbanaketa, higadura, ozeanoko eskualde-korronteak edo lurraren subsidentzia edo goratzea. Europa mailan, igoera orokorra ikusten da, zeina urtean 2 eta 4 mm artekoa izan den azken 30 urteetan.

Bizkaiko Golkoko kostaldeetan ere ikusi da itsasoaren batez besteko mailaren igoera. Eskualdeko mareografoen denbora-serieen analisiak igoera esanguratsuak adierazten ditu horietan guztietan, tasa zertxobait aldakorrek: $+1,01 \pm 0,49$ cm hamarkada bakoitzeko (Gijón, 1995–2022) eta $+3,42 \pm 0,81$ cm hamarkada bakoitzeko (Coruña, 1992–2022). Oro har, tasarik handienak azken aldiei dagozkie (90eko hamarkadatik aurrera). Hala egiaztatzen da Bresteko mareografoaren serie bera aztertuz gero 1992tik 2022ra bitartean. Kasu horretan, igoera-tasa $+2,93 \pm 0,41$ cm-koa da hamarkada bakoitzeko, 1846–2022 seriearen aldi osorakoa halako bi ($+1,29 \pm 0,05$ cm hamarkada bakoitzeko).

a la expansión térmica del océano y el resto principalmente al deshielo de glaciares y capas de hielo polares. Este ascenso del nivel del mar se está acelerando en las últimas décadas, incrementándose la tendencia de $+2,1 \pm 1,1$ mm por año en el periodo 1993–2003 a $+4,3 \pm 0,6$ mm por año en 2013–2023, es decir, un incremento del 105%.

La tendencia regional del nivel del mar puede presentar variaciones significativas de la tendencia mundial debido a procesos oceánicos como la redistribución de calor en el océano, erosión, corrientes oceánicas regionales, o a la subsidencia o elevación del terreno. A escala europea, se observa un ascenso generalizado que oscila entre 2 y 4 mm por año en los últimos 30 años.

En las costas del golfo de Vizcaya también se observa el ascenso del nivel medio del mar. El análisis de las series temporales de los mareógrafos en la región indica ascensos significativos en todos ellos, con tasas que oscilan entre $+1,01 \pm 0,49$ cm por década (Gijón, 1995–2022) y $+3,42 \pm 0,81$ cm por década (A Coruña, 1992–2022). En general, las tasas más elevadas corresponden a los periodos más recientes (desde los años 90), como se comprueba analizando la misma serie del mareógrafo de Brest de 1992 a 2022 y cuya tasa de ascenso, $+2,93 \pm 0,41$ cm por década, es más del doble que para el periodo completo de la serie (1846–2022), $+1,29 \pm 0,05$ cm por década.

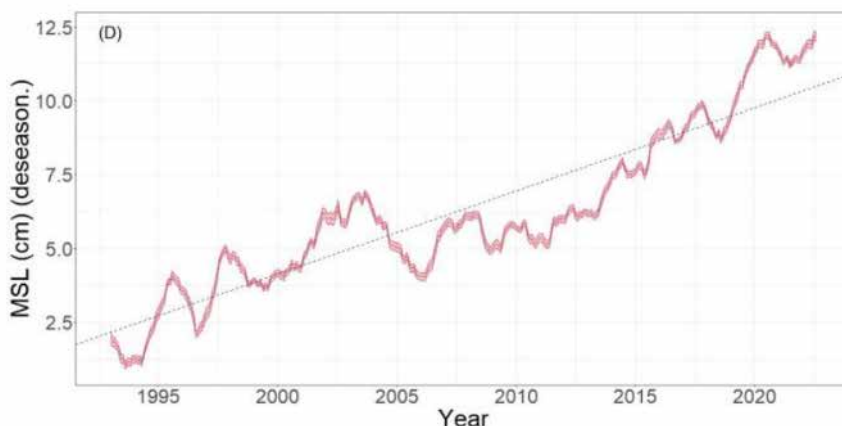


6. ird. Bizkaiko golkoko mareografoetako itsas mailaren denbora-serieak.

6. Fig. Series temporales del nivel del mar en los mareógrafos del golfo de Vizcaya.

Bizkaiko golkoaren eskalan, satellite bidez neur-tutako itsasoaren batez besteko mailak iguera-tasa esanguratsua erakusten du ($+2,81 \pm 0,35$ cm hamarkada bakoitzeko 1993-2022 aldian).

A escala del golfo de Vizcaya, el nivel medio del mar medido mediante satélite presenta una tasa de ascenso significativa, de $+2,81 \pm 0,35$ cm por década en el periodo 1993-2022.



7. ird. Satellite bidez neurtutako itsas maila Bizkaiko golkoan, urtaroko osagaia eta behatutako joera ezabatuz.

7. Fig. Nivel del mar mediante satélite en el golfo de Vizcaya, eliminando la componente estacional, y tendencia observada.

Laburbilduz, analisiek adierazten dute Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila +1,01 cm eta +3,40 cm bitarteko tasan igotzen ari dela hamarkada bakoitzeko (+2,5 cm hamarkada bakoitzeko, batez beste) 90eko hamarkadaz geroztik. Aztertutako serie batzuetan, tasak aurreko txostenean ikusitakoak baino zertxobait altuagoak dira. Tasa hori aldi berari dagokion tasa globala baino apur bat txikiagoa da (+3,2–3,6 cm hamarkada bakoitzeko; IPCC, 2019). Hala ere, kontuan hartu behar da itsas mailaren igoera ez dela homogenea izan ozeanoko eskualde guztietan (Cazenave et al., 2018). Horrela, Atlantikoaren ipar-ekialdean eta, zehazkiago, Bizkaiko golkoaren ekialdean, batezbesteko globala baino igoera txikiagoa ikusi da. Beraz, Bizkaiko golkoko kostaldean eta itsasoan detektatutako igoera bat dator maila globaleko igoerarekin. Halaber, ikusi da itsas mailaren igoera bizkortzen ari dela eremuan azken hiru hamarkadetan XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aldi luzeagoak aztertzen dituzten ikerketekin bat etorriz (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

En resumen, los distintos análisis indican que el nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya está ascendiendo a una tasa de entre +1,01 cm y +3,40 cm por década (+2,5 cm por década en promedio) desde los años 90. En algunas de las series analizadas las tasas son ligeramente superiores a las observadas en informe previos. Esta tasa es ligeramente inferior a la tasa global en el mismo periodo (+3,2–3,6 cm por década, IPCC, 2019). No obstante, hay que tener en cuenta que el ascenso del nivel del mar no ha sido homogéneo en todas las regiones oceánicas (Cazenave et al., 2018). Así, en el NE Atlántico y más concretamente en el este del golfo de Vizcaya, se ha observado un ascenso menor al del promedio global. Por tanto, el ascenso detectado en la costa y mar del golfo de Vizcaya es consistente con el ascenso a nivel global. Además, se ha observado una aceleración en el ascenso del nivel del mar en la zona en las tres últimas décadas con respecto al ascenso medio en el siglo XX, en coherencia con estudios que analizan periodos más largos (Woppelmann et al., 2006; Dangendorf et al., 2019).

2.4. Olatuak

Olatuak klima-sistemaren elementu garrantzitsua dira, atmosferaren eta ozeanoaren arteko interakzioa modulatzeko baitute (Cavaleri et al., 2012). Klima-aldaketak olatuen ezaugarriak alda ditzake, olatuen sorkuntzarekin eta hedapenarekin zuzenean lotutako aldagaiak aldatzearen ondorioz. Hau da, azaleko haize-eremuetako aldaketek transmititutako energia edo hedapen-norabidea eta -distantzia alda ditzakete (Reguero et al., 2019).

Olatuak kostaldeko morfodinamika-prozesuen motor garrantzitsua dira, hala nola kostaldeko higadurarena, eta itsas mailaren muturrei ekarpena egiten diete denbora-escala askotan (Melet et al., 2018; Melet et al., 2020). Hala, inpaktua eragin dezakete kostaldeko komunitateetan, ekosistemetan eta azpiegituretan. Euskadiko kostaldearen kasuan, itsas mailari gainjarrita, aurreikusten da olatuen inpaktua handitzea klima-aldaketaren etorkizuneko agertokietan (Liria et al., 2011). Adibidez, Donostiaren kasuan, espero da uholde-kotaren igoera ez-lineala gertatzea, itsasoko klimaren ezaugarrien, itsas mailaren igoeraren magnitudearen eta profilaren eta babes-egituren morfologiaren ondorioz (De Santiago et al., 2020).

Eskualde mailan, Ulazia et al.-en azterketa batek (2017) aukera eman du 1900etik Bizkaiko golkoko olatu-altuera adierazgarriaren (Hs) igoera karakterizatzeko. Zehazki, Bilbo-Bizkaiko buiatik gertuko puntu batean Hs-ren $+0,4$ cm/urteko eta $+0,3$ cm/urteko igoera. 1970–2000 aldiari dagokionez, Paris et al.-ek (2014) Hs-ren batez besteko igoera handiagoa identifikatu zuten ($+0,5$ cm urte bakoitzeko, batez besteko baldintzetan), eta Hs90-en (muturreko baldintzetan) $+3$ cm arteko igoera urte bakoitzeko udazkeneko hilabeteetan. Bizkaiko golkoko Hs-ren joerak lotu dira Ipar Atlantikoko Oszilazioaren (NAO) klima-aldakortasunaren adierazleekin eta Mendebaldeko Europaren gaineko Presio Anomalian (WEPA) oinarritutako adierazlearekin (Castelle et al., 2017).

Azterketa honetan, olatuen batezbesteko eta muturreko (olatu-altuera adierazgarriaren hileko 90 pertzentila, Hs90) baldintzen joerak aztertu dira, Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako serie historikotik abiatuta. Hs-k batez beste $+1,425 \pm 2,730$ cm-ko goranzko tasa du hamarkada bakoitzeko 1991–2022 aldian, esanguratsua ez bada ere. Aldiz, hileko

2.4. Oleaje

El oleaje es un elemento importante del sistema climático al modular la interacción entre la atmósfera y el océano (Cavaleri et al., 2012). El cambio climático puede modificar las características del oleaje al modificar las variables directamente relacionadas con su generación y propagación, esto es, cambios en los campos de vientos en superficie pueden cambiar la energía transmitida o la dirección y distancia de propagación (Reguero et al., 2019).

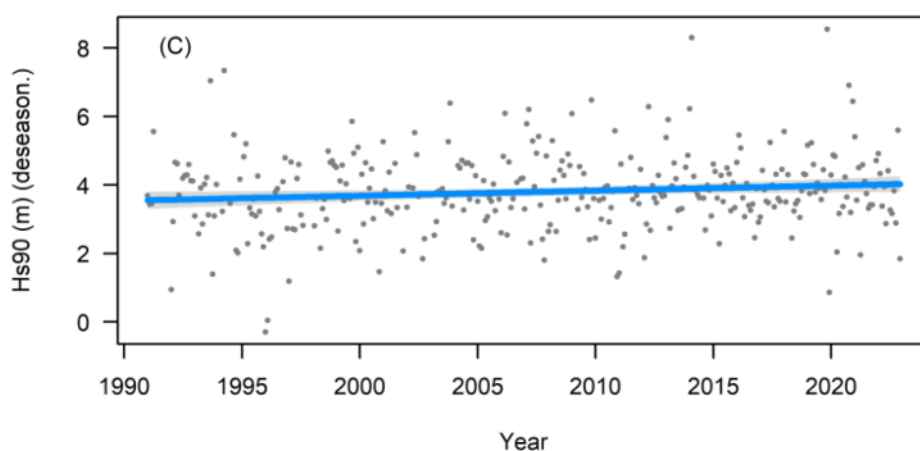
El oleaje es un importante motor de los procesos de morfodinámica costera, como la erosión costera y contribuye a los extremos del nivel del mar en múltiples escalas de tiempo (Melet et al., 2018; Melet et al., 2020), pudiendo afectar a las comunidades, ecosistemas e infraestructuras costeras. En el caso de la costa vasca, superpuesto al nivel del mar, el impacto del oleaje se prevé que se incremente en futuros escenarios de cambio climático (Liria et al., 2011). Por ejemplo, en el caso de Donostia / San Sebastián se espera un aumento de la cota de inundación no lineal derivado de las características del clima marino, la magnitud del aumento del nivel del mar y la morfología del perfil y estructuras de protección (de Santiago et al., 2020).

A nivel regional, el estudio de Ulazia et al. (2017) ha permitido caracterizar un aumento de la altura significativa de ola (Hs) desde 1900 en el golfo de Vizcaya. En particular, un aumento de Hs de $+0,4$ cm por año y de $+0,3$ cm por año en un punto cercano a la boya de Bilbao-Vizcaya. Sobre el periodo 1970–2000, Paris et al. (2014) identificaron un aumento medio de Hs mayor ($+0,5$ cm/año en condiciones medias) y un aumento de Hs90 (condiciones extremas) de hasta $+3,0$ cm por año en los meses de otoño. Las tendencias de Hs en el golfo de Vizcaya se han relacionado con los indicadores de variabilidad climática de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y con el indicador basado en la Anomalía de Presión sobre Europa Occidental, WEPA (Castelle et al., 2017).

En este estudio, se han analizado las tendencias de condiciones medias y extremas (percentil 90 mensual de altura de ola significativa, Hs90) del oleaje a partir de la serie histórica registrada en la boya de Bilbao-Vizcaya de Puertos del Estado. La Hs medio en el periodo 1991–2022 presenta una tasa ascendente, aunque no significativa, de $+1,425$

muturren analisiak, Hs90, hazkunde-joera nabarmena adierazten du, $+14,702 \pm 6,663$ cm-ko tasarekin hamarkada bakoitzeko (% 7,75eko igoera hamarkada bakoitzeko) aldi horretan. Datu horiek bat datoz 1991-2019 aldirako aztertutakoekin, baina joerak aldi horretarako lortutakoak baino zertxobait baxuagoak dira (Naturklima, 2022).

$\pm 2,730$ cm por década. En cambio, el análisis de los extremos mensuales, Hs90, sí indica una tendencia de aumento significativa, con una tasa de $+14,702 \pm 6,663$ cm por década (aumento de 7,75 % por década) en el mismo periodo. Estos datos son consistentes con los analizados para el periodo 1991-2019, aunque las tendencias son ligeramente inferiores que las obtenidas para dicho periodo (Naturklima, 2022).



8. ird. Hs90en denbora-seriea, urtaroko osagaia eta behatutako joera ezabatuz.

8. Fig. Serie temporal de Hs90, eliminando la componente estacional y tendencia observada.

2.5. Kostaldeko higadura hondartzetan

Itsas mailaren igoera eta klima-aldaketari lotutako olatuen eta muturreko gertakarien aldaketak dira hondartzetako higadura-arriskuaren eragile nagusiak, hareatzen atzerakada eragiten baitute. Munduko kostalde hareatsu asko higatzen ari dira jada (Bird, 1985; Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018), eta, klima-aldaketaren ondorioz, haien egoera larriagotu egin liteke (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe, 2016).

Hondartzak eta harea-eremuak dira Gipuzkoako kostaldeko klima-aldaketarekiko elementurik kalteberenetakobat (Chust et al., 2010). Ereduek %21 eta %29 arteko higadura-tasak proiektatzen dituzte mende-amaierarako gure itsasertzeko hondartzetarako,

2.5. Erosión costera en playas

El incremento del nivel del mar y los cambios en el oleaje y eventos extremos asociados al cambio climático son los principales factores responsables del riesgo de erosión de las playas, al inducir el retroceso de los arenales. Gran parte de las costas arenosas del mundo ya están erosionándose (Bird, 1985; Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018), y su situación podría agravarse por el cambio climático (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe, 2016).

Las playas y zonas de arena son uno de los elementos costeros en Gipuzkoa más vulnerables al cambio climático (Chust et al., 2010). Los modelos proyectan para las playas de nuestro litoral tasas de erosión por el efecto combinado del aumento del

itsas mailaren igoeraren eta ekaitz-olatuen efektu konbinatuaren ondorioz (Santiago et al., 2021).

Kosta-lerroaren mugimendua da kostaldearen atzeraldien edo akrezioaren adierazlerik erabiliena (Hanslow, 2007). Kosta-lerroa, testuinguru horretan, lurraren eta uraren arteko interfaze gisa definitzen da. Interfaze horrek aldakortasun handia du, eta epe laburreko mugimenduei zein epe luzeko prozesuei lotuta dago. Denbora-escala guztietan, emaitza gisa, hondartzen higadura-/akrezio-zikloak lortzen dira, jarraipena egiteko funtsezko adierazleak direnak. Higadura-/akrezio-tasa horiek tokiko faktoreek zehazten dituzte nagusiki, hala nola kostaldearen goratzea, malda eta elementuak nahiz ezaugarriak eta aldaketa-tasa historikoa.

Kosta-lerroaren bilakaera aztertzeko, Gipuzkoako Itsasertzeko Bideometria Foru Sarearen kostaldeko bideometria-estazioek hartutako irudien informazioa prozesatzen da⁴. Zarauzko hondartzako datu-seriea da luzeena (2010–2022) eta, beraz, hura erabiltzen da hondartzetako higaduraren bilakaera historikoa aztertzeko.

Irudi horietatik abiatuta, adierazle morfologiko hauek aztertu dira hondartzen jarraipena egiteko: (1) mareaz gaindiko hileko batez besteko azalera; (2) marearteko hileko batez besteko azalera; eta (3) hondartzaren zabalera itsasgoran eta itsasbeheran.

Emaitzek mareaz gaindiko eremuaren $-3.482,0 \pm 5.354,0 \text{ m}^2$ -ko joera adierazten dute hamarkada bakoitzeko, baina ez da esanguratsua. Marearteko eremuaren joera positiboa da hamarkada bakoitzeko, baina ez esanguratsua ($+1.503,0 \pm 9.520,0 \text{ m}^2$ hamarkada bakoitzeko). Bi emaitzek, modu integratuan, hondartzaren izaera disipatiboagoa iradokitzen dute. Emaitzek 2010–2021 aldiko serieko analisisiko joera berak erakusten dituzte, baina joerak zertxobait txikiagoak dira (Naturklima, 2022). Ez da erraza jakiten ea aldaketa horiek oraindik ere 2013–2014ko neguko gertakari oso energetikoen inpaktuaren ondorio diren (serie osoko higadura-tasa handiena eragin zuten) ala klima-aldaketari lotutako epe luzeagoko joera baten ondorio diren.

nivel del mar y el oleaje de tormenta, de entre 21 % y 29 % a finales de siglo (de Santiago et al., 2021).

El movimiento de la línea de costa es el indicador más utilizado de recesión o acreción costera (Hanslow, 2007). La línea de costa, en este contexto, se define como la interfaz entre la tierra y agua. Esta interfaz es muy variable, estando asociado tanto a movimientos de corto plazo, así como a procesos de largo plazo. En todas las escalas temporales, como producto resultante se obtienen los ciclos de erosión/acreción de las playas, indicador clave para su seguimiento. Estas tasas de erosión/acreción están determinadas principalmente por factores locales, como es la elevación costera, la pendiente de la costa, los elementos y características de la costa y la tasa histórica de cambio.

Para analizar la evolución de la línea de costa se procesa la información de las imágenes capturadas por las estaciones de videometría costera de la Red Foral de Videometría Litoral de Gipuzkoa (RFVLG)⁴. La serie de datos de la playa de Zarautz es la más larga (2010–2022) y la que, por tanto, se utiliza para el análisis de la evolución histórica de la erosión en playas.

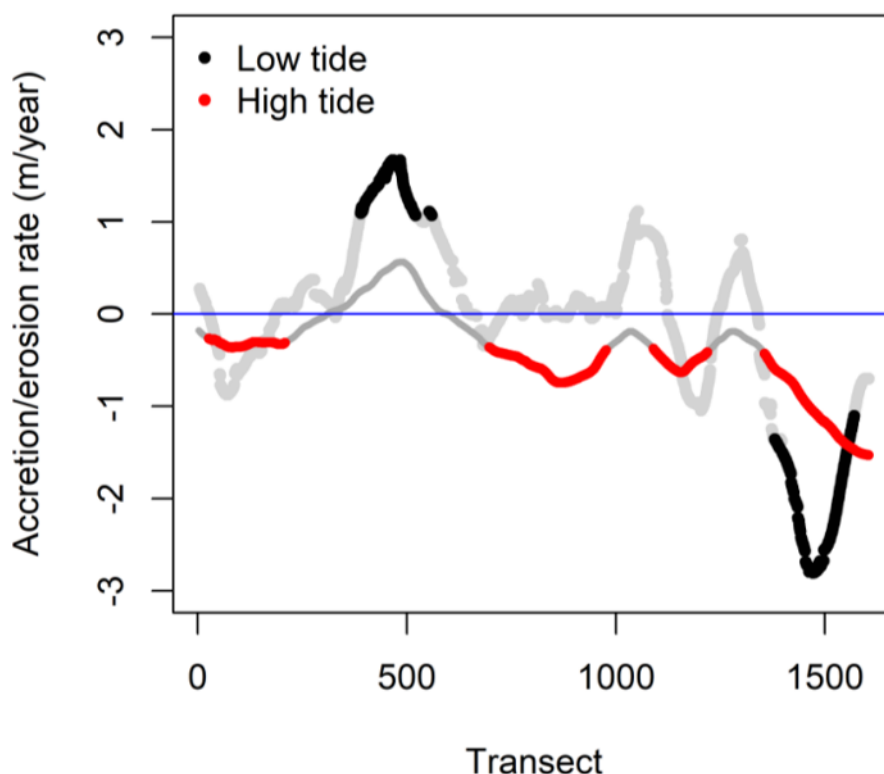
Partiendo de estas imágenes, se han analizado los siguientes indicadores morfológicos para el seguimiento de playas: (1) superficie supramareal media mensual, (2) superficie intermareal media mensual, y (3) anchura de la playa en pleamar y bajamar.

Los resultados indican una tendencia del área supramareal de $-3.482,0 \pm 5.354,0 \text{ m}^2$ por década, aunque no es significativa. La tendencia del área intermareal por década es positiva pero no significativa, $+1.503,0 \pm 9.520,0 \text{ m}^2$ por década. Ambos resultados, de forma integrada, sugieren un ligero aumento del carácter disipativo de la playa. Estos resultados presentan las mismas tendencias que en el análisis para la serie en el periodo 2010–2021, aunque las tendencias son ligeramente inferiores (Naturklima, 2022). Es complicado saber si estos cambios se deben aún al impacto de los eventos extraordinariamente energéticos del invierno de 2013–2014, que derivaron en la mayor tasa de erosión de toda la serie, o a una tendencia de más largo plazo asociada al cambio climático.

4 <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/ingurumena/hondartzak/bideometria-foru-sarea>

Hondartzaren batez besteko zabalerari dagokionez, akrezio- edo uzkuarte-joerak aztertu dira zenbait trantsektutarako, bai itsasgoran bai itsasbeheran. Profil gehienetan, itsasgora-lerroak nabarmen egiten du atzera, $-0,5$ m/urte-tik $-1,5$ m/urte-ra bitarteko balioekin, eta atzerakada handiagoa hondartzaren ekialdeko eremuan gertatzen da. Horren arrazoia da higadura-tasa handiagoa jasan dezakeen harea-erreserba handiagoa (dunak) egoitea (mendebaldeko eremuan horma batek mugatzen du). Itsasbehera-lerroak, aldiz, $+1,0$ eta $+2,0$ m/urte bitarteko aurrerapen-eremu zentrala erakusten du (itsasorantz), eta atzerapen-eremu bat ekialdean ($-1,0$ tik $-2,5$ m/urte-ra bitartekoa). Bi lerroen luzetarako modulazio hori antzekoa da, eta adierazten du puntu horietan itzulera-korronteak eta barrak egon direla disposizio erritmiko batekin, maximoak barrekin eta minimoak itzulera-korronteekin lotuz.

En cuanto a la anchura media de la playa, se han analizado tendencias de acreción o retracción para distintos transectos, tanto en pleamar como en bajamar. En la mayoría de los perfiles, la línea de pleamar retrocede significativamente con valores de $-0,5$ m/año a $-1,5$ m/año, siendo mayor el retroceso en la zona este de la playa. Esto es debido a la presencia de una mayor reserva de arena (dunas) que permite una mayor tasa de erosión, la cual queda limitada en la zona oeste por la presencia del muro. Por el contrario, la línea de bajamar presenta una zona central de avance (hacia el mar) de $+1,0$ a $+2,0$ m/año y una zona este de retroceso ($-1,0$ a $-2,5$ m/año). Esta modulación longitudinal de ambas líneas, la cual es similar, indica que en estos puntos han existido corrientes de retorno y barras con una disposición rítmica, asociando los máximos a barras y los mínimos a corrientes de retorno.



9. ir. Kosta-lerroaren akrezioa (balio positiboak) eta higadura (balio negatiboak) itsasgoran eta itsasbeheran, trantsektuaren joeratik abiatuta kalkulatuta (mendebaldetik:0 ekialdera:1500), 2010-2022 aldian. Malda ez-esanguratsuaren balioa grisez dago adierazita.

9. Fig. Acreción (valores positivos) y erosión (valores negativos) de la línea de costa de pleamar y de bajamar estimada a partir de la tendencia del transecto (de oeste:0 a este:1500) en el periodo 2010-2022. En valor de la pendiente no significativa se indica en gris.

Analisiak erakusten duenez, bi kosta-lerroak batez beste barrualderantz mugitzen ari dira, bereziki hondartzaren ekialdeko eremuan: itsasbehera-lerroa barnealderantz migratzen ari da 0,89 m/urteko erritmoan, eta itsasgora-lerroa (hondartza lehorra definitzen duena) 3,61 m/urtekoan. Itsasgorako kosta-lerroaren kasuan, zaila da jakitea aldaketa hori 2013-2014ko neguko ezohiko gertakari energetikoen inpaktuaren emaitza den edo klima-aldaketari lotutako epe luzeagoko joeraren emaitza. Itsasbeherako kosta-lerroaren atzerakadaren kasuan, badirudi batez ere lotuta dagoela itzulera-korronteen eta barren luzetarako modulazioarekin.

2.6. Azidotzea (pH-a)

Giza jarduerak eragindako CO₂ emisioen ia laurden bat ozeanoek xurgatzen dute, klima-aldaketaren inpaktua moderatuz (Friedlingstein et al., 2013; WMO, 2023). Hala ere, azidotzea eragiten du horrek; hau da, ozeanoko uraren pH-a jaitea. Itsasoko uraren pH-a 1985ean 8,11koa izatetik 2021ean 8,05ekoa izatera pasatu da; hau da, azidotasuna +% 15 igo da aldi horretan, eta +% 40 industriaurreko mailekiko. Aldaketa horiek, batez ere, atmosferako CO₂-aren kontzentrazioa handitzeak eta uraren berotzeak eragindakoak dira, horrek ere beheranzko joera hori bultzatzen baitu (Ma et al., 2023). Ozeanoko pH-ak jaisten jarraituko duela aurreikusten da, gutxi gorabehera 0,15 eta 0,5 unitate bitartean 2100erako, kontuan hartutako emisio-agertokiaren arabera. Ozeanoa azidotu ahala, atmosferako CO₂ xurgatzeko duen gaitasuna murrizten da, eta horrek ozeanoak klima-aldaketaren moderazioan duen zeregina murrizten du (IPCC, 2019).

Ozeanoen azidotzeak inpaktuak eragiten ditu itsas organismoetan. Besteak beste, kaltzio karbonatoaren erabilgarritasuna murrizten du, eta horrek zaildu egiten du organismo askok -koralek, moluskuak eta plankton-espezie batzuek, besteak beste- beren egiturak eraikitzea eta haien osotasuna mantentzea. Inpaktu horiek eta itsasoko kate trofiko osoan eragindako efektuek ekosistema-zerbitzuak alda ditzakete; esaterako, arrantza.

El análisis indica que en promedio ambas líneas de costa están desplazándose hacia el interior, principalmente en la zona este de la playa: la línea de bajar migra hacia el interior a un ritmo de 0,89 m/año y la de pleamar (que define la playa seca) a 3,61 m/año. En el caso de la línea de costa en pleamar es complicado saber si este cambio es resultado aún del impacto de los eventos extraordinariamente energéticos del invierno de 2013-2014 o a una tendencia a más largo plazo asociada al cambio climático. En el caso del retroceso de la línea de costa en bajamar, parece estar principalmente relacionado con la modulación longitudinal de corrientes de retorno y barras.

2.6. Acidificación (pH)

Casi una cuarta parte de las emisiones de CO₂ causadas por la actividad humana son absorbidas por los océanos, moderando el impacto del cambio climático (Friedlingstein et al., 2013; WMO, 2023). Sin embargo, esto provoca su acidificación, esto es, una disminución del pH del agua del océano. El pH del agua de mar ha descendido de 8,11 en 1985 a 8,05 en 2021, lo que corresponde a un aumento del +15 % de la acidez en dicho periodo y a un +40 % desde los niveles preindustriales. Estos cambios son causados principalmente por el aumento de la concentración del CO₂ atmosférico, junto con el calentamiento del agua que también impulsa esta tendencia de descenso (Ma et al., 2023). Se prevé que el pH del océano continúe disminuyendo, entre aproximadamente 0,15 y 0,5 unidades a 2100, dependiendo del escenario de emisiones considerado. A medida que el océano se acidifica, disminuye su capacidad de absorber CO₂ de la atmósfera, lo que reduce el papel del océano en la moderación del cambio climático (IPCC, 2019).

La acidificación de los océanos tiene impactos en los organismos marinos. Entre otros, reduce la disponibilidad de carbonato de calcio, lo que dificulta a muchos organismos como corales, moluscos y algunas especies de plancton construir y mantener la integridad de sus estructuras. Estos impactos y sus efectos en cascada en toda la cadena trófica marina pueden modificar servicios ecosistémicos, como la pesca.

Epe luzerako joerak nabarmen aldatzen dira eskualde batetik bestera. Eskualdeen arteko desberdintasun horiek, batez ere, gainazaleko ozeanoak CO₂ antropogenikoa atzitzeko eta arintzeko duen gaitasunaren eskualde-mailako desberdintasunen ondorio dira. Gainera, kostaldean joera askotarikoak dituzte, azidotzea, atmosferako CO₂ xurgatzeak ez ezik, tokiko prozesuek ere baldintzatzen baitute (ibaien deskargak, jarduera biologikoak, tenperatura-aldaketek edo giza jarduerarekin lotutako isurketek, besteak beste). Ozeanoen azidotzeari buruzko azken OSPAR (McGovern, 2023) txostenak adierazten duenez, pH-a, oro har, bizkorrago murrizten ari da kostaldeko eskualde ez oso sakonetan ozeano irekian baino, aipatutako prozesu gehigarri horien ondorioz. Hori bereziki garrantzitsua da, ozeanoko biodibertsitatearen zatirik handiena kostaldeko eremuetan baitago.

Beraz, garrantzitsua da kostaldean pH-a neurtzea, ozeanoen azidotze-joerak detektatzeko. 2021era arte, neurri puntualak ezarrita egon arren, ez zegoen Gipuzkoako kostaldean uraren pH-a etengabe monitorizatzeko ekiporik. 2021ean, pH-sentsore bat (SAMI) erosi zen, eta harrezkero hura ezartzeko lanean ari da. 2023an, ekipoa ia etenaldirik gabe egon zen urpean murgilduta urte osoan zehar, eta hori mugarri bat izan zen funtsezko aldagai hori zehaztasunez eta etenaldirik gabe neurtzen hasteko, eta, beraz, ozeanoaren azidotzearen magnitudea ezagutzeko.

Joerak aztertzeak aukera ematen duen eta behar bezain luzea den serie jarraiturik oraindik ez badago ere, SAMI sentsoreak emandako neurketek aukera eman dute kostaldeko uretako pH-aren eguneko bilakaera karakterizatzeko. Bestalde, kostaldeko pH-aren erregistro puntualen denbora-seriearen prospekzio bat egin da, eta horretarako datuak 'EAEko trantsizio-uren eta itsasertzeko uren egoera ekologikoaren jarraipena egiteko sarea' (URA) proiektutik atera dira.

Las tendencias a largo plazo varían substancialmente de una región a otra. Estas diferencias regionales son principalmente consecuencia de las diferencias regionales en la capacidad del océano superficial para capturar y amortiguar el CO₂ antropogénico. Además, en la zona costera presentan tendencias más variadas, al estar la acidificación condicionada además de por la absorción de CO₂ atmosférico por procesos locales, como la descarga de ríos, actividad biológica, cambios en la temperatura o los vertidos asociados a la actividad humana. El último informe OSPAR (McGovern, 2023) sobre la acidificación de los océanos indica que el pH, en general, está disminuyendo más rápidamente en las regiones costeras poco profundas en comparación con el océano abierto debido a dichos procesos adicionales. Esto es especialmente relevante, ya que la mayor parte de la biodiversidad del océano se encuentra en las zonas costeras.

Por tanto, son importantes las mediciones de pH en la zona costera, con el objetivo de detectar tendencias de acidificación de los océanos. Hasta el 2021, a pesar de contar con medidas puntuales, no se disponía de un equipo que permitiera monitorizar en continuo el pH del agua en la costa guipuzcoana. En 2021 se adquirió un sensor de pH (SAMI) y desde entonces se está trabajando en su implementación. En 2023 el equipo permaneció sumergido prácticamente sin interrupciones a lo largo de todo el año, lo cual ha constituido un hito para comenzar a medir de forma precisa y en continuo esta variable esencial para conocer la magnitud de la acidificación del océano.

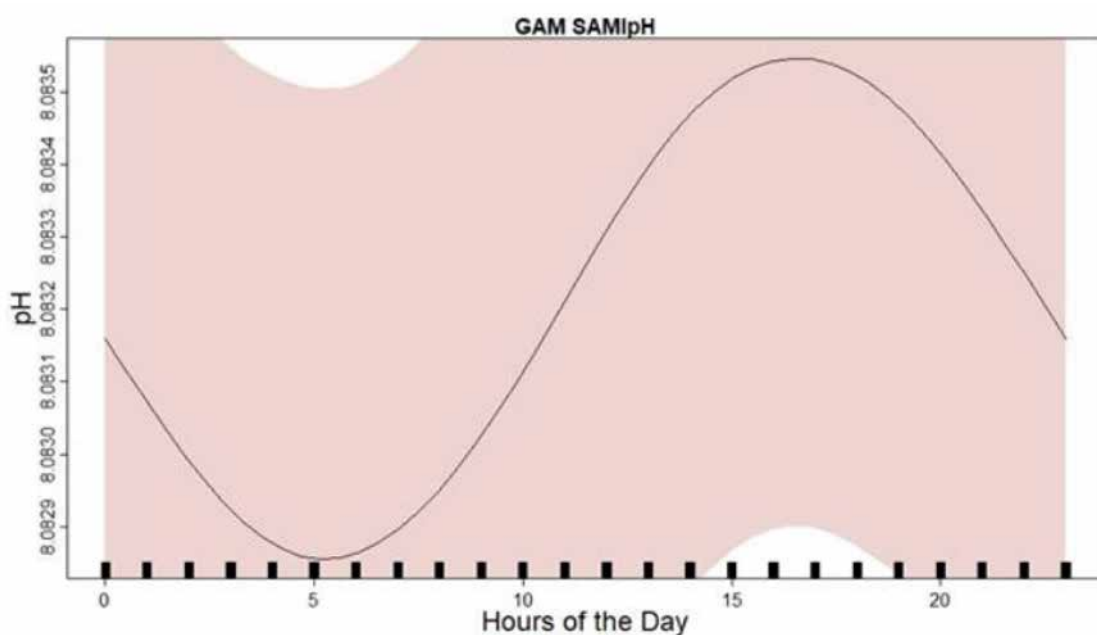
A pesar de que todavía no se dispone de una serie en continuo suficientemente larga que permita el análisis de tendencias, las medidas proporcionadas por el sensor SAMI han permitido caracterizar la evolución diaria del pH en las aguas costeras. Por otro lado, se ha realizado una prospección de la serie temporal de registros puntuales de pH de la costa cuyos datos han sido extraídos del proyecto 'Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la CAPV' (URA).

2.6.1. pH-aren aldakortasuna eguneko zikloan

Ozeano irekian, pH-ak ez du gorabehera handirik izan denboraren eta espazioaren aldetik. Kostaldean, berriz, pH-a aldakortasun handia izaten ari da, jarduera biologikoari eta ibaien eraginari lotuta, besteak beste. Horregatik, SAMI sentsoreak erregistratutako pH-aren eguneko zikloa ulertzea izan da lehenengo urratsa. Denbora-seriea 2023ko datuekin zabaltzean –daturik gabeko aldi gutxiagorekin–, 2022ko txostenean (Naturklima, 2022) azaldutakoa berretsi da. Hau da, pH-aren seinalearen eguneko ziklo bat: gauean murriztu egiten da, eta eguzki-argiarekin handitzen hasten da, 6:00etatik 7:00etara bitartean, modu konstantean, harik eta 15:00etatik 16:00etara bitartean gailur batera iritsi arte; ondoren, pixkanaka murrizten da.

2.6.1. Variabilidad del pH en el ciclo diario

En el océano abierto el pH no presenta grandes fluctuaciones, ni temporales ni espaciales. En la zona costera, en cambio, el pH presenta gran variabilidad, asociado a la actividad biológica y a la influencia de ríos, entre otros. Por ello, el primer paso ha sido comprender el ciclo diario del pH registrado por el sensor SAMI. Al ampliar la serie temporal con los datos de 2023, en el que ha habido menos periodos sin datos, se confirma lo mostrado en el Informe de 2022 (Naturklima, 2022). Esto es, un ciclo diario en la señal de pH, en el que disminuye durante la noche y comienza a aumentar con la luz solar, entre las 6:00 y 7:00, de forma constante hasta alcanzar un pico entre las 15:00 y 16:00, tras lo cual disminuye gradualmente.



10. ird. pH-aren eguneko zikloaren aldakuntza.

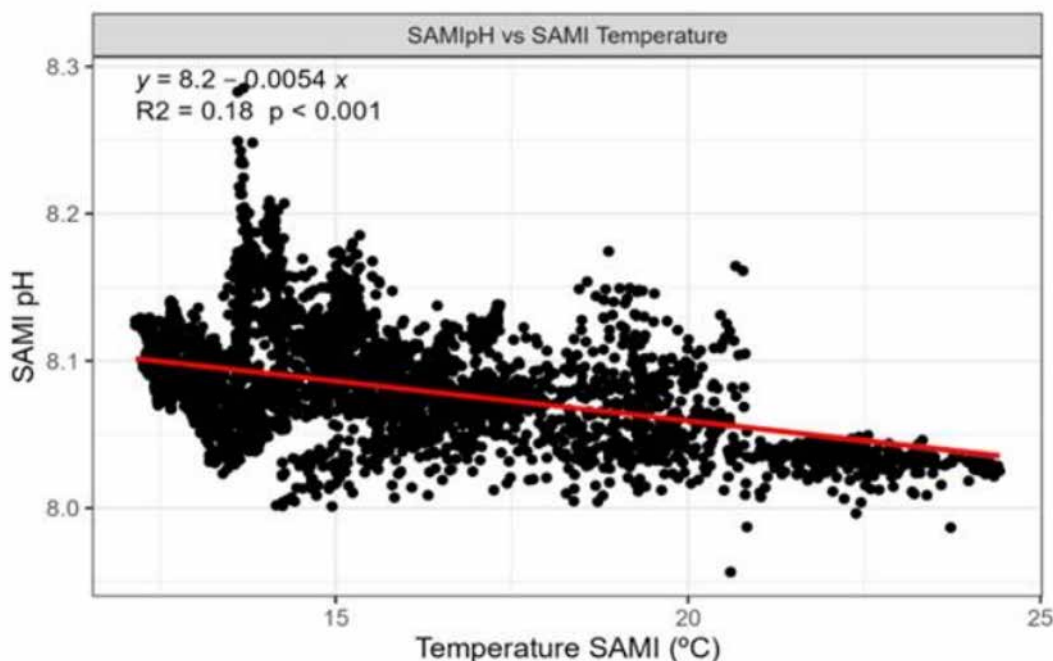
10. Fig. Variación del ciclo diario del pH.

Aldakortasun hori azaldu liteke zenbait faktorek –hala nola tenperatura-aldaketek– pH-an duten eraginaren ondorioz. Itsasoko uraren tenperaturaren eragina izan dezaketen zenbait faktore daude, hala nola ur-masen nahasketa edo eguzki-argiko orduek geruza fotikoa berotzea. Beste faktore batzuek ere eragina izan dezakete pH-aren aldakortasunean, hala nola ekoizpen primarioak.

Kasu honetan, pH-aren eta tenperaturaren arteko korrelazioa aztertu da, eta bi aldagaien arteko alderantzizko korrelazioa ikusten da: pH-a murrizten da tenperatura igotzen denean. Korrelazio hori gorabehera, oraindik ere denbora-serie luzeagoak behar dira bi aldagaien arteko erlazioa hobeto ezagutu ahal izateko.

Esta variabilidad se podría explicar debido a la influencia de diferentes factores sobre el pH, como por ejemplo los cambios de temperatura. Existen distintos factores que pueden afectar a la temperatura del agua de mar, como puede ser la mezcla de masas de agua o el calentamiento de la capa fótica durante las horas de luz. Otros factores como la producción primaria también pueden afectar a la variabilidad de pH.

En este caso, se ha analizado la correlación del pH con la temperatura, y se observa una correlación inversa entre las dos variables, disminuyendo el pH cuando la temperatura aumenta. A pesar de esta correlación, se necesitan todavía series temporales más largas para tener un mejor conocimiento de la relación entre las dos variables.



11. ird. pH-aren eta tenperaturaren arteko erlazioa.

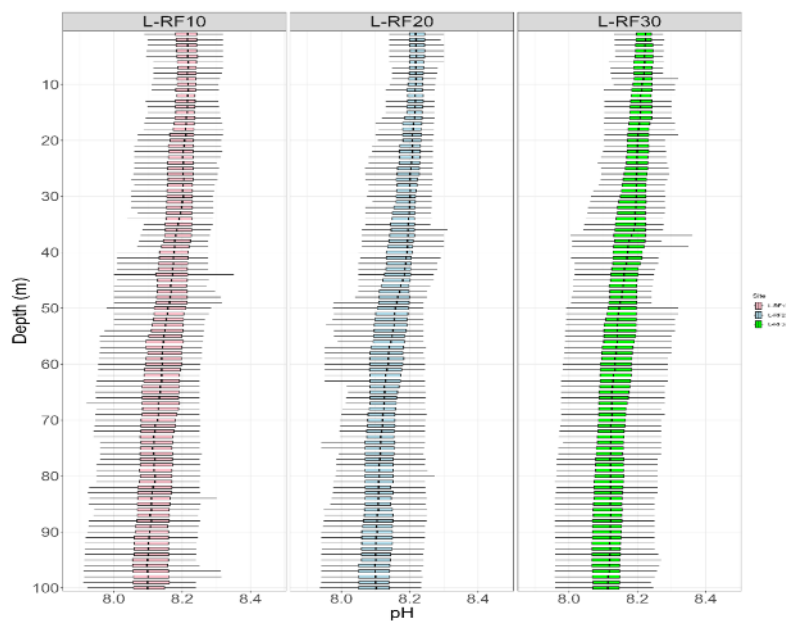
11. Fig. Relación entre pH y temperatura.

2.6.2. Bereizmen txikiko pH-aren denbora-joeren analisi

EAEko trantsizio-uren eta kostaldeko uren egoera ekologikoaren jarraipen-sareak oxigeno disolbatuak, mantenugaiek eta klorofilaren kontzentrazioak ur-zutabean duten bilakaeraren jarraipena egiten du. pH-aren bilakaera aztertu da 1994-2022 aldian, kontuan hartuz gainazaletik hondorainoko datuak erreferentziazko hiru estazioetan (L-RF 10, L-RF 20 eta L-RF 30), kostaldetik 10 km ingurura, itsasertzeko plataformaren gainean 110 m-ko hondoen gainean, CTD (eroankortasuna, tenperatura, sakonera) zunda batekin egindako neurketa puntualetatik abiatuta (4 urtean).

2.6.2. Análisis de tendencias temporales de pH de baja resolución

La Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la CAPV realiza el seguimiento del oxígeno disuelto, nutrientes y concentración de clorofila en la columna de agua. Se ha analizado la evolución del pH, en el periodo 1994-2022, teniendo en cuenta los datos desde superficie hasta el fondo, en tres estaciones de referencia (L-RF 10, L-RF 20 y L-RF 30) situadas a unos 10 km de a costa sobre la plataforma litoral sobre fondos de 110 m, a partir de las medidas puntuales (4 al año) realizadas con una sonda CTD (conductividad, temperatura, profundidad).



12. ird. pH profilak euskal kostaldeko erreferentzia-estazio bakoitzeko. Kutxen muturrak beheko kuartilak (Q1) eta goikoak (Q3) dira, eta koadroaren barruko banda, berriz, mediana. Biboteak kutxaren koantil arteko tartea (Q3-Q1) halako 1,5 arte zabaltzen dira.

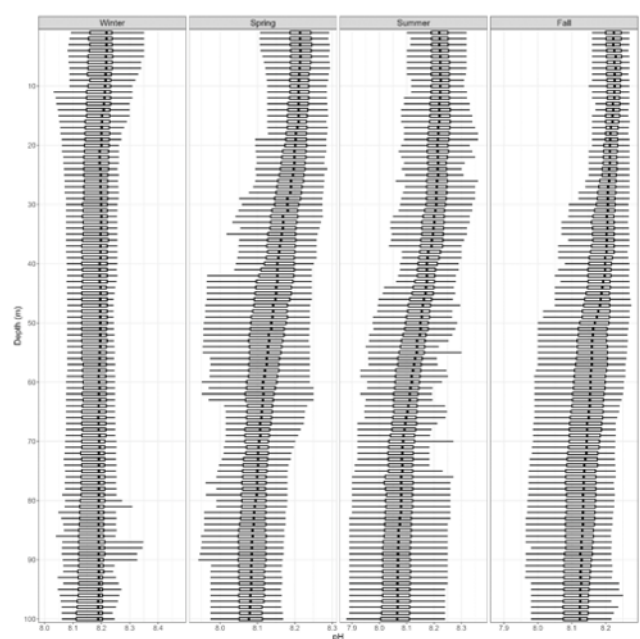
12. Fig. Perfiles de pH para cada estación de referencia en la costa vasca. Los extremos de las cajas son los cuartiles inferiores (Q1) y superior (Q3) y la banda dentro del cuadro la mediana. Los bigotes se extienden hasta 1,5 veces el rango inter cuartil (Q3-Q1) de la caja.

Aztertutako hiru estazioetan, pH-gradiente bat ikusten da gainazaletik hondoraino, balio handiagoekin gainazalean (8,35 pH-unitateko batez besteko balioak) eta txikiagoekin hondoraino (7,95 pH-unitateko batez besteko balioak). Udaberrian eta udan, behatutako termoklina ur-zutabean askoz

En las tres estaciones analizadas se observa un gradiente de pH desde la superficie a fondo, con valores más altos en la superficie (valor promedio de 8,35 unidades de pH) y más bajos en el fondo (valor promedio de 7,95 unidades de pH). Durante los meses de primavera y verano, cuando la termoclina

ere nabarmenagoa denean, pH-baliorik handienak gainazaletik termoklina ingururaino (40 m inguru) ikusten dira, eta balio txikiagoetara jaisten dira pixkanaka hondorantz jaitsi ahala. 60 m ingurutik aurrera, pH-aren batez besteko balioak ia aldaketarik gabe mantentzen dira 100 m-ra arte. Udazkenean, eta bereziki neguan, nahaste-geruza hondoraino iristen denean, ez da pH-gradiente esanguratsurik ikusten sakoneran.

observada es mucho más evidente en la columna de agua, los valores de pH más altos se observan desde la superficie hasta aproximadamente la termoclina (aprox. 40 m) y descienden suavemente a valores más bajos hacia el fondo. A partir de unos 60 m, los valores medios de pH se mantienen casi sin cambios hasta los 100 m. En otoño, y especialmente en invierno cuando la capa de mezcla llega al fondo, no se observan gradientes de pH importantes en profundidad.

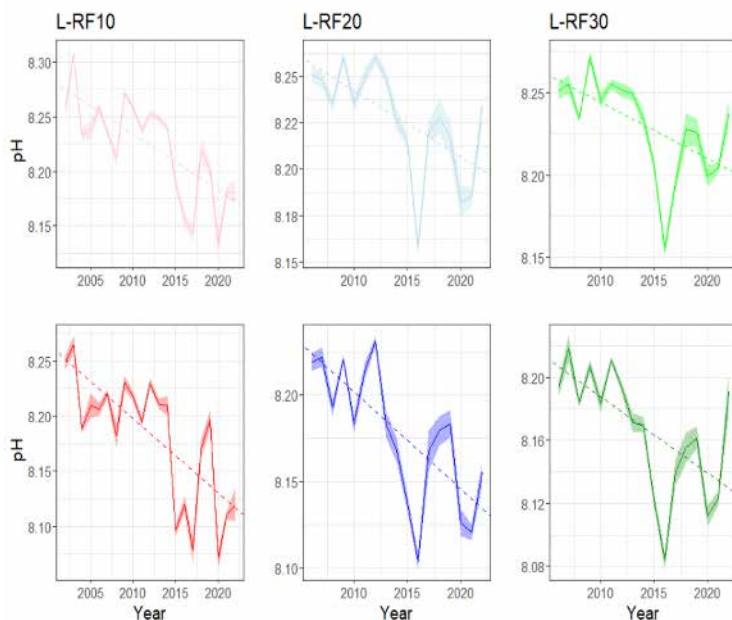


13. ird. pH-aren urtaroko aldakuntza ur-zutabearen erreferentzia-estazioetan. Kutxen muturrak beheko kuartilak (Q1) eta goikoak (Q3) dira, eta koadroaren barruko banda, berriz, mediana. Biboteak kutxaren koantil arteko tartea (Q3-Q1) halako 1,5 arte zabaltzen dira.

13. Fig. Variación estacional del pH en la columna de agua en las estaciones de referencia. Los extremos de la caja son los cuartiles inferiores (Q1) y superior (Q3) y la banda dentro del cuadro la mediana. Los bigotes se extienden hasta 1,5 veces el rango intercuantil (Q3-Q1) de la caja.

Urte arteko joerari dagokionez, pH-aren jaitsiera ikusten da aztertutako hiru estazioetan denbora-serie osoan zehar. Hori nahiko esanguratsua da. Izan ere, jaitsiera ikusi da hiru estazioetan, diferentzia txikiekin (0,05 eta 0,07 pH-unitate bitartean harkada bakoitzeko 2002tik 2022ra). Ur-zutabearen beheko geruzan (61-100 m) joerak handiagoak dira gainazaleko geruzan (0-60 m) baino. Halako ziurgabetasuna nabarmendu behar da bai tasak eta bai tasen konfiantza estatistikoko tartea estimatzean, kasu honetan erabilitako sentsorearekin egindako neurketen zehaztasuna $\pm 0,1$ pH-unitatekoa baita.

En cuanto a la tendencia interanual, se observa un descenso del pH a lo largo de toda la serie temporal en las tres estaciones analizadas. Este hecho es bastante significativo ya que en las tres estaciones se ha determinado un descenso con pequeñas diferencias, que oscilan entre 0,05 y 0,07 unidades de pH por década entre 2002 y 2022. En la capa inferior de la columna de agua (61-100 m) las tendencias son mayores que en la capa superficial (0-60 m). Cabe destacar cierta incertidumbre en la estimación de dichas tasas y sus intervalos de confianza estadística, ya que la exactitud de las medidas realizadas con el sensor utilizado en este caso es de $\pm 0,1$ unidades de pH.



14. ird. Batez besteko pH-aren denboran zeharreko aldakuntza sakonera-geruza desberdinetan eta erreferentzia-estazio bakoitzean. Kolore argienek sakonerako goiko geruzak (0,5-60 m) irudikatzen dituzte, eta ilunenek sakonerako beheko geruzak (61-100 m).

14. Fig. Variación en el tiempo del pH medio a través de las diferentes capas de profundidad en cada estación de referencia. Los colores más claros representan las capas superiores de profundidad (0,5-60 m) y los más oscuros la capa inferior de profundidad (61-100 m).

Estazioa Estación	Sakonera (m) Profundidad (m)	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	SE	p balioa p-valor	Behaketa-kop. observaciones	r ²
L-RF10	0-60	-0,05	0,01	0,0012	4916	0,270
L-RF20	0-60	-0,05	0,02	0,0043	4078	0,187
L-RF30	0-60	-0,06	0,02	0,0010	4078	0,235
L-RF10	61-100	-0,07	0,01	<0,0001	3238	0,456
L-RF20	61-100	-0,06	0,01	<0,0001	2720	0,465
L-RF30	61-100	-0,06	0,02	0,0001	2703	0,352

1. taula. pH-aren aldaketa-tasa estazio bakoitzean sakonera-geruza desberdinetarako, dagozkion errore estandarrekin (SE), p balioekin, korrelazioarekin eta behaketa-kopuruarekin.

1. Tabla. Tasa de cambio del pH para diferentes capas de profundidad para cada estación con sus respectivos errores estándar (SE), p-valores, correlación y número de observaciones.

3. Antxoaren hazkundera eta bakterio-komunitatean bero-boladek duten efektuaren analisia

3. Análisis del efecto de las olas de calor en el crecimiento de la anchoa y la comunidad de bacterias

3.1. Itsasoko bero-boladak

Ozeanoaren berotze globalak itsasoko bero-boladak bultzatu ditu eskualde mailan, eskualde askotan erregistratutako tenperatura-balio oso altuekin. Gertakari horiek gero eta ohikoagoak eta zabala-goak dira eskala globalean (Peal et al., 2023).

Itsasoko bero-boladak uraren berotze-gertakari diskretu, luze eta anomaloak dira (Hobday et al., 2016). Oro har, bero-bolada batek gutxienez 5 egun irauten du, eta egun horietan tenperatura altuagoa da behaketa klimatologikoen 90 pertzentila baino (Hobday et al., 2016; 2018b). Bero-boladak toki mailako prozesuen emaitza dira (bero-fluxuak, bero-adbekzio horizontala eta bertikala eta nahaste-prozesuak), eta prozesu horiek, aldi berean, eskala handiko klima-aldakortasunak modulatu ditzake (Ipar Atlantikoko oszilazioa, NAO) (Holbrook et al., 2019; Oliver et al., 2021; Schlegel et al., 2021). Prozesu horiek guztiek zuzenean eragiten diete itsasoko gainazaleko tenperaturaren aldakuntzei (Oliver et al., 2018b; Oliver et al., 2021).

Bizkaiko golkoan, aldakortasun atmosferikoaren modurik garrantzitsuenak NAO eta Ekialde Atlantikoko (EA) oszilazioa dira (Borja et al., 2019). Bi patroiak presio-anomaliarekin lotuta daude (Le Cozannet et al., 2011), eta itsasoko uraren gainazaleko tenperaturaren aldakortasunaren zati handi bat azaltzen dute, % 25 arte EArako (García-Soto & Pingree, 2012). Eskualdeko batezbestekoaren gainetik dagoen tenperaturaren anomaliak EAren eta NAOren fase positiboarekin lotuta daude (Duarte et al., 2013; Voerman et al., 2013; Izquierdo et al., 2022). Fase positibo horiek presio atmosferiko altuen sistema baten iraunkortasuna errazten dute, zero oskarbiak, aire beroa eta ozeanoaren berotze azkarra eragiten duten haize-abiadura txikiak eraginez (Overland et al., 2001; Bond et al., 2015).

3.1. Olas de calor marinas

El calentamiento global del océano ha impulsado a escalas regionales olas de calor marinas, con valores de temperatura extremadamente altos registrados en muchas regiones. Estos episodios son cada vez más frecuentes y más extensos a escala global (Peal et al., 2023).

Las olas de calor marinas son episodios discretos, prolongados y anómalos de calentamiento del agua (Hobday et al., 2016). Por lo general, se considera que una ola de calor dura al menos 5 días durante los cuales la temperatura es más alta que el percentil 90 de las observaciones climatológicas (Hobday et al., 2016; 2018b). Estas son el resultado de procesos a escala local (flujos de calor, advección horizontal y vertical de calor y procesos de mezcla) que pueden ser modulados por la variabilidad climática a gran escala (la oscilación del Atlántico Norte, NAO) (Holbrook et al., 2019; Oliver et al., 2021; Schlegel et al., 2021). Todos estos procesos afectan directamente a las variaciones de la temperatura superficial del mar (Oliver et al., 2018b; Oliver et al., 2021).

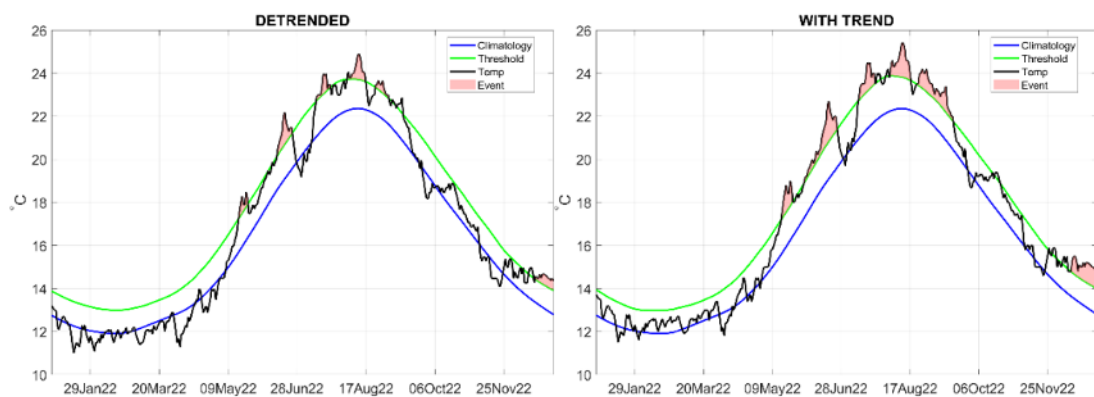
En el golfo de Vizcaya, los modos de variabilidad atmosférica más importantes son la NAO y la oscilación del Atlántico Este (EA) (Borja et al., 2019). Ambos patrones están relacionados con anomalías de presión (Le Cozannet et al., 2011) y explican gran parte de la variabilidad de la temperatura superficial del agua de mar, hasta un 25% solo para EA (García-Soto & Pingree, 2012). Las anomalías de la temperatura por encima de la media en la región están relacionadas con la fase positiva del EA y de la NAO (Duarte et al., 2013; Voerman et al., 2013; Izquierdo et al., 2022). Estas fases positivas suelen favorecer la persistencia de un sistema de altas presiones atmosféricas, que provocan cielos despejados, aire cálido y velocidades del viento reducidas que inducen un rápido calentamiento del océano (Overland et al., 2001; Bond et al., 2015).

Gure itsasertzeko bero-boladak aztertzeko, Hobday et al.-ek (2016, 2018a) garatutako metodologiari jarraituz definitu dira, eta Donostiako Aquariumean erregistratutako itsasoko uraren gainazaleko tenperaturaren datuei aplikatu zaie, bai eta plataforma kontinentalaren satellite-irudiei ere, kostaldearen eta plataforma kontinentalaren artean Garona ibaia-aren aurrean (Juvena eremua, 43°N–48°N; 8°O–1°O; 21. ird.).

Itsasoko bero-boladak kokapen eta urte-sasoi bakoitzaren balio historikoekin alderatuta detektatzen dira, hala nola behaketa klimatologikoen 90 pertzentiletik gorako tenperaturak. Horrela, erreferentziako klimatologia behar bezala ezartzea funtsezkoa da bero-boladak detektatzeko. Martínez et al.-en arabera (2022, 2023), bero-boladen kalkuluan bi ekarpen hartu behar dira kontuan: (1) tenperaturaren epe luzerako joera; eta (2) tenperaturaren bat-bateko aldaketak. Amaya et al.-ek (2023) itsasoko bero-boladen eta epe luzeko joeraren artean bereiztea proposatzen dute, eta 'total heat exposure' terminoa erabiltzea planteatzen dute epe luzeko joeraren eta bero-boladen konbinazioari erreferentzia egiteko. Tenperaturaren epe luzeko joera on-dorioztatzen ez bada, denbora-seriearen hasieran detektatutako gertakari-kopurua azpiestimaten da, eta seriearen amaieran gainestimaten (15., 16. ird.).

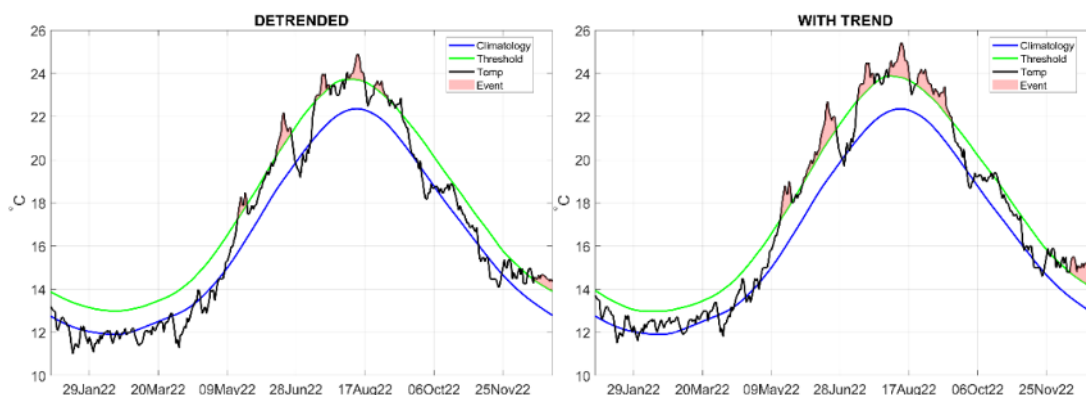
Para analizar las olas de calor en nuestro litoral, estas se han definido siguiendo la metodología desarrollada por Hobday et al. (2016, 2018a) y se ha aplicado a los datos de la temperatura superficial del agua de mar registrada en el Aquarium de Donostia / San Sebastián e imágenes satelitales en la plataforma continental entre la costa y la plataforma continental frente al río Garona (dominio Juvena, 43°N–48°N; 8°O–1°O; Fig. 21).

Las olas de calor marinas se detectan por comparación con los valores históricos de cada localización y época del año, como las temperaturas por encima del percentil 90 de las observaciones climatológicas. Así, el correcto establecimiento de la climatología de referencia es crucial para la detección de la ola de calor. Según Martínez et al. (2022, 2023) es necesario considerar dos contribuciones en el cálculo de las olas de calor: (1) la tendencia a largo plazo de la temperatura y, (2) los cambios súbitos de la misma. Amaya et al. (2023) proponen diferenciar entre las olas de calor marina y la tendencia de largo plazo y proponen el término 'total heat exposure' para hacer referencia a la combinación de la tendencia a largo plazo y las olas de calor. Si no se extrae la tendencia de largo plazo de la temperatura, se subestima el número de eventos detectados en el inicio de la serie temporal y se sobreestima al final de la misma (Fig. 15, 16).



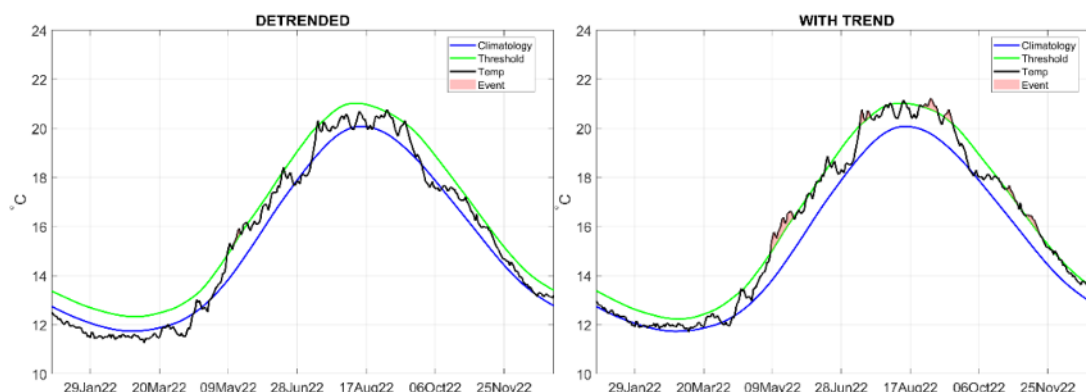
15. ird. Donostiako Aquariumeko estazioan 2022an detektatutako bero-boladen konparazioa, Hobday et al.-en (2016) metodologia aplikatuz, joera zuzenduta (ezk.) edo zuzendu gabe (esk.), Amaya et al.-ek (2023) proposatutako 'total heat exposure' terminoaren analogoa.

15. Comparación de las olas de calor detectadas en la estación del Aquarium de Donostia / San Sebastián durante 2022, aplicando la metodología de Hobday et al. (2016) corrigiendo (izq.) o sin corregir (dcha.) la tendencia, análogo al término 'total heat exposure' propuesto por Amaya et al. (2023).



15. ird. Donostiako Aquariumeko estazioan 2022an detektatutako bero-boladen konparazioa, Hobday et al.-en (2016) metodologia aplikatuz, joera zuzenduta (ezk.) edo zuzendu gabe (esk.). Amaya et al.-ek (2023) proposatutako 'total heat exposure' terminoaren analogoa.

15. Fig. Comparación de las olas de calor detectadas en la estación del Aquarium de Donostia / San Sebastián durante 2022, aplicando la metodología de Hobday et al. (2016) corrigiendo (izq.) o sin corregir (dcha.) la tendencia, análogo al término 'total heat exposure' propuesto por Amaya et al. (2023).



16. ird. Detektatutako bero-boladen konparazioa Juena domeinuko 2022an zeharreko batez besteko datuekin (SST OSTIA), Hobday et al.-en (2016) metodologia aplikatuz, joera zuzenduta (ezk.) edo zuzendu gabe (esk.). Amaya et al.-ek (2023) proposatutako 'total heat exposure' terminoaren analogoa.

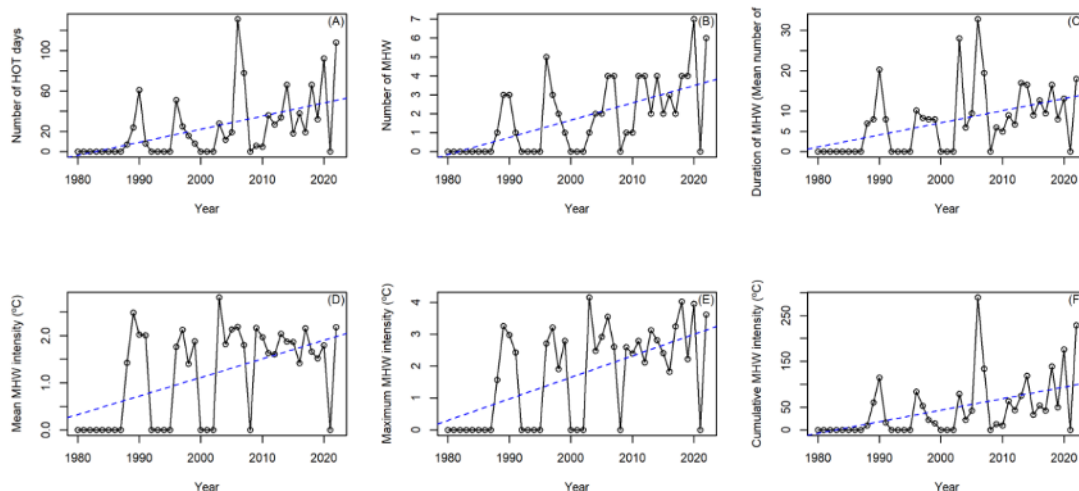
16. Fig. Comparación de las olas de calor detectadas con datos de SST OSTIA promediados en el dominio Juena durante 2022, aplicando la metodología de Hobday et al. (2016) corrigiendo (izq.) o sin corregir (dcha.) la tendencia, análogo al término 'total heat exposure' propuesto por Amaya et al. (2023).

Itsasoko bero-boladen kopurua eta haien iraupen- eta intentsitate-aldaketak aztertuta dira 1980-2022 aldian, Donostiako Aquariumeko itsasoko uraren gainazaleko tenperaturaren erregistroetatik abiatuta, joera kendu gabe (total heat exposure terminoaren analogoa). Emaitzek erakusten dutenez, egun beroen kopurua handitu egin da ($+12,98 \pm 3,47$ bero-egun gehigarri hamarkada bakoitzeko). Horren arrazoiak hauek dira: bero-boladen kopurua-aren igoera nabarmena ($+0,91 \pm 0,19$ olatu hamarkada bakoitzeko); halakoan batez besteko iraupenak ($+2,98 \pm 0,90$ egun hamarkada bakoitzeko); eta haien

Se ha analizado el número de olas de calor marinas y los cambios en su duración e intensidad en el periodo 1980-2022 a partir de los registros de temperatura superficial del agua de mar en el Aquarium de Donostia / San Sebastián sin quitar la tendencia (análogo al término total heat exposure). Los resultados muestran que el número de días calurosos aumenta, con $+12,98 \pm 3,47$ días de calor adicionales por década. Esto se explica por el aumento significativo del número de olas de calor ($+0,91 \pm 0,19$ olas por década), de sus duraciones medias ($+2,98 \pm 0,90$ días por década) y de sus intensidades medias

batez besteko intentsitateak ($+0,39 \pm 0,11$ °C hamarkada bakoitzeko), intentsitate maximoa ($+0,67 \pm 0,90$ °C hamarkada bakoitzeko) eta intentsitate metatua ($+25,28 \pm 7,18$ °C metatu hamarkada bakoitzeko).

($+0,39 \pm 0,11$ °C por década), intensidad máxima ($+0,67 \pm 0,90$ °C por década) e intensidad acumulada ($+25,28 \pm 7,18$ °C acumulados por década).

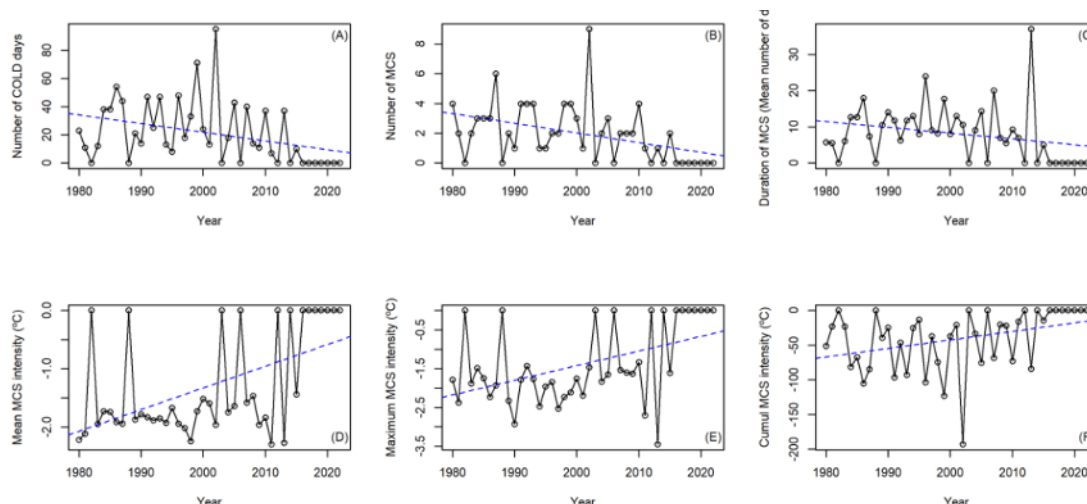


17. ird. Bilakaerak: (A) egun beroen kopurua; (B) bero-boladen kopurua; (C) batez besteko iraupena; (D) batez besteko intentsitatea; (E) intentsitate maximoa; eta (F) itsasoko bero-boladen intentsitate metatua, berotze-joeraren efektu gainjarria kontuan hartuta, Donostiako Aquariumeko gainazaleko tenperaturaren seriearako 1980–2022 aldian.

17. Fig. Evolución de (A) número de días calurosos, (B) número de olas de calor, (C) duración media, (D) intensidad media, (E) máxima y (F) acumulada de las olas de calor marinas, considerando el efecto superpuesto de la tendencia al calentamiento, para la serie de temperatura superficial del Aquarium de Donostia / San Sebastián en el periodo 1980–2022.

Hotz-boladen bilakaera ere aztertu da; hau da, 5 egunez gutxienez eguneko gainazaleko temperatura klimatologiaren 10 pertzentila baino txikiagoa den gertakarien bilakaera (Schlegel et al., 2017). Metodologiarekin eta joera kendu gabe egindako analisiaren emaitzek erakusten dutenez, egun hotzen kopurua nabarmen jaitsi da: $-6,13 \pm 2,58$ hotz-egun gutxiago hamarkada bakoitzeko. Prozesu horren arrazoiak hauek dira: hotz-boladen kopuruaren beherakada nabarmena ($-0,65 \pm 0,22$ olatu hamarkada bakoitzeko); batez besteko iraupena jaisteko joera, esanguratsua ez izan arren ($-1,61 \pm 0,93$ egun hamarkada bakoitzeko); halakoen batez besteko intentsitateen murrizketa esanguratsua ($-0,37 \pm 0,09$ °C hamarkada bakoitzeko); intentsitate maximoa ($-0,38 \pm 0,11$ °C hamarkada bakoitzeko); eta intentsitate metatua ($-12,31 \pm 5,09$ °C hamarkada bakoitzeko). 2016az geroztik ez da hotz-boladarik erregistratu.

También se ha analizado la evolución de las olas de frío, definidas como eventos en los que al menos durante 5 días la temperatura superficial diaria es inferior al percentil 10 de la climatología (Schlegel et al., 2017). Los resultados del análisis con la metodología sin quitar la tendencia muestran que el número de días fríos disminuye significativamente, con $-6,13 \pm 2,58$ días de frío menos por década. Este proceso se explica por una disminución significativa del número de olas de frío ($-0,65 \pm 0,22$ olas por década), duración media que tiende a disminuir, aunque la tendencia no es significativa ($-1,61 \pm 0,93$ días por década), reducción significativa de sus intensidades medias ($-0,37 \pm 0,09$ °C por década), de la intensidad máxima ($-0,38 \pm 0,11$ °C por década) y de la intensidad acumulada ($-12,31 \pm 5,09$ °C por década). Desde 2016 no se ha registrado ninguna ola de frío.



18. ird. Bilakaerak: (A) egun hotzen kopurua; (B) hotz-boladen kopurua; (C) batez besteko iraupena; (D) batez besteko intentsitatea; (E) intentsitate maximoa; eta (F) itsasoko hotz-boladen intentsitate metatua, berotze-joeraren efektu gainjarria kontuan hartuta, Donostiako Aquariumeko gainazaleko tenperaturaren serierako 1980-2022 aldian.

18. Fig. Evolución de (A) número de días fríos, (B) número de olas de frío, (C) duración media, (D) intensidad media, (E) máxima y (F) acumulada de las olas de frío marinas, considerando el efecto superpuesto de la tendencia al calentamiento, para la serie de temperatura superficial del Aquarium de Donostia / San Sebastián en el periodo 1980-2022.

2022an (bai eta 2023an ere), planetaren ezhiko berotzearen arrazoiak ulertzeko azterketak egin dira. Hala, ondorioztatu da berotzea zenbait faktoreen konbinazioaren emaitza izan daitekeela: alde bate-tik, berotegi-efektuko gasen emisioek eragindako berotze globala; bestetik, 2022ko hasieran Tongan (ozeano Barean) kokatutako Hunga Tonga urpeko sumendiaren erupzioa (Millán et al., 2022; Sellitto et al., 2022; Jenkins et al., 2023); eta, azkenik, El Niño fenomeno. Euskal kostaldean, itsasoko bero-bolada (Donostiako Aquariumean itsasoaren gainazalean neurtuta) bereziki garrantzitsua izan zen ekainean eta irailean, 57,6 eta 49,5 °C-ko intentsitate metatuekin, hurrenez hurren. Aztertutako aldian (1988-2022), 2022a da bigarren urterik beroena, kontuan hartuz gero bero-egunen kopuru osoa (108 egun), bero-boladen kopurua (6 bero-bolada) eta fenomeno horien intentsitate metatua (228 °C).

En 2022, el calentamiento inusual del planeta (y también en 2023) ha suscitado estudios sobre su origen en los que se puede haber combinado el calentamiento global provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero, la erupción del volcán submarino Hunga Tonga situado en Tonga (océano Pacífico) de principios de 2022 (Millán et al., 2022; Sellitto et al., 2022; Jenkins et al., 2023) y el fenómeno de El Niño. En la costa vasca, la ola de calor marina (medida en la superficie del mar en el Aquarium de Donostia / San Sebastián) fue especialmente importante en junio y septiembre, con intensidades acumuladas de 57,6 y 49,5 °C, respectivamente. En el periodo analizado (1988-2022), 2022 es el segundo año más caluroso en cuanto al número total de días de calor (108 días), el número de olas de calor (6 olas de calor) y la intensidad acumulada de estos fenómenos (228 °C).

3.2. Temperatura-muturrek mikrop planktonean eta antxoan duten inaktuaren analisia

Klima-muturrak gero eta ohikoagoak dira. Ozeanoetan, itsasoko bero-boladak gero eta ohikoagoak dira, eta areagotu egin dira, itsasoko ekosistemen osotasunari eraginez maila globalean. Besteak beste, itsasoaren berotzeak eta itsasoko bero-boladek eragin dezakete alga toxikoak ugaritzea, koralak zuritzea, heriotza-tasa masiboa eta ekosistema osoak berregituratzea eta aldaketak gertatzea espezieen banaketan, tamainan nahiz fenologian (Wernberg et al., 2016; Ummenhofer & Meehl, 2017; Pinsky et al., 2020).

Espezieek tenperatura-muga batzuk (nitxo termikoa) dituzte, eta muga horietatik kanpo haien jarduna murriztu daiteke eta heriotza-tasa gertatu. Gero eta agerikoagoa da epe laburreko bero-muturrei emandako erantzun biologikoak zabalak eta orokorrak direla, eta berotze-joera gradualen eta muturreko gertakarien konbinazioak aurrekaririk gabeko aldaketa ekosistemikoak eragin ditzaketela (Harris et al., 2018).

Txosten honetan, tenperaturaren igoerak eta bero-boladek (batez ere 2022koek) itsasoko ekosisteman duten efektua aztertzen da, bereziki planktoneko mikrobio-komunitatean eta interes ekonomikoko espezieen hazkundean; esate baterako, antxoarenean (*Engraulis encrasicolus*).

3.2.1. Planktoneko mikrobio-komunitatearen erantzunaren analisia

Mikrobio-komunitateak itsasoko kate trofikoaren oinarrian daude, eta funtsezko zeregina dute itsasoko ekosistemen biogeokimikan eta funtzionamenduan. Tenperatura funtsezko aldagaia da, mikrobio-komunitateen biogeografia eta osaera zehazten baititu; beraz, uste da muturreko berotze-gertakariak eragina izan dezaketela haien egituran eta funtzioan.

Azterketa hau egiteko, hileko batez besteko ugaritasun absolutua (zelulen zenbaketa) aztertu da haien zelulen ezaugarri zitometrikoen arabera identifika daitezkeen hiru mikroorganismo-talde nagusien kasuan⁵: bakterioplankton heterotrofoa, *Synechococcus spp.* generoko zianobakterioak

3.2. Análisis del impacto de los extremos de temperatura sobre el microplancton y la anchoa

Los extremos climáticos son cada vez más comunes. En los océanos, las olas de calor marinas son cada vez más frecuentes y se han intensificado, con impacto en la integridad de los ecosistemas marinos a nivel global. Entre otros, el calentamiento del mar y las olas de calor marinas pueden provocar, proliferación de algas tóxicas, blanqueamiento de corales, mortalidad masiva y reestructuración de ecosistemas enteros, cambios en la distribución, tamaño o fenología de especies (Wernberg et al., 2016; Ummenhofer & Meehl, 2017; Pinsky et al., 2020).

Las especies presentan ciertos límites de temperatura (nicho térmico) fuera de los cuales su desempeño disminuye y la mortalidad puede ocurrir. También es cada vez más evidente que las respuestas biológicas a los extremos de calor a corto plazo son amplias y generalizadas, y la combinación de tendencias graduales de calentamiento y eventos extremos pueden impulsar cambios ecosistémicos sin precedentes (Harris et al., 2018).

En este informe se analiza el efecto del incremento de la temperatura y olas de calor (en especial las olas de calor de 2022) sobre el ecosistema marino, en particular sobre la comunidad microbiana del plancton y el crecimiento de especies de interés económico como la anchoa (*Engraulis encrasicolus*).

3.2.1. Análisis de la respuesta en la comunidad microbiana del plancton

Las comunidades microbianas constituyen la base de la cadena trófica marina y desempeñan importantes funciones en la biogeoquímica y funcionamiento de los ecosistemas marinos. La temperatura es una variable clave que determina la biogeografía y composición de las comunidades microbianas y, por lo tanto, se considera que los eventos de calentamiento extremo pueden afectar a su estructura y función.

Para realizar este estudio, se ha analizado la abundancia absoluta (recuento de células) media mensual para tres grupos principales de microorganismos que se pueden identificar por las

eta pikofitoplankton eukariotoa, 2015-2022 aldian. Bai bakterioak eta bai eukarioto zelulabakarrak itsasoan dibertsitate taxonomikorik handiena duten organismoak dira, eta espezie horietako batzuk oso sentiberak dira berotzearekiko. Talde bakoitzaren ugaritasuna zehazteko, kostaldeko hiru estazioetan (D1, D2 eta L-UR20) hilero jasotako laginetako fluxu-zitometria erabili zen.

Tenperaturak eta bero-boladek mikrobio-komunitatean eragindako efektua zehazteko, talde bakoitzaren hileko ugaritasunaren desbideratzea kalkulatu zen dagokion hilabeteko batezbesteko globalarekiko, eta laginak hartu aurreko 30 egunetan metatutako bero-boladen intentsitatearekin (tenperaturaren desbideratzea) konparatu zen. Bero-boladak Donostiako Aquariumean erregistratutako eguneko tenperaturatik abiatuta zehaztu ziren, Hobday et al.-en (2016) itsasoko bero-boladei buruzko definizioari jarraituz.

Analisi-aldi osoko batez besteko urtarokotasunari dagokionez, *Synechococcus spp.*-k urtarokotasun argia erakutsi zuen, ugaritasun maximoekin abuztuan-irailean hiru estazioetan. Pikoeukarioten urtarokotasuna ez da hain argia: maximoak apirilean dituzte D1 eta D2 estazioetan, baina ez dute urtarokotasun argirik erakusten L-UR20 estazioan. Bakterioplankton heterotrofoak antzeko urtarokotasun argia erakutsi zuen hiru estazioetan, gailurrekin abuztuan-irailean D1 eta D2 estazioetan eta uztailean-abuztuan L-UR20 estazioan.

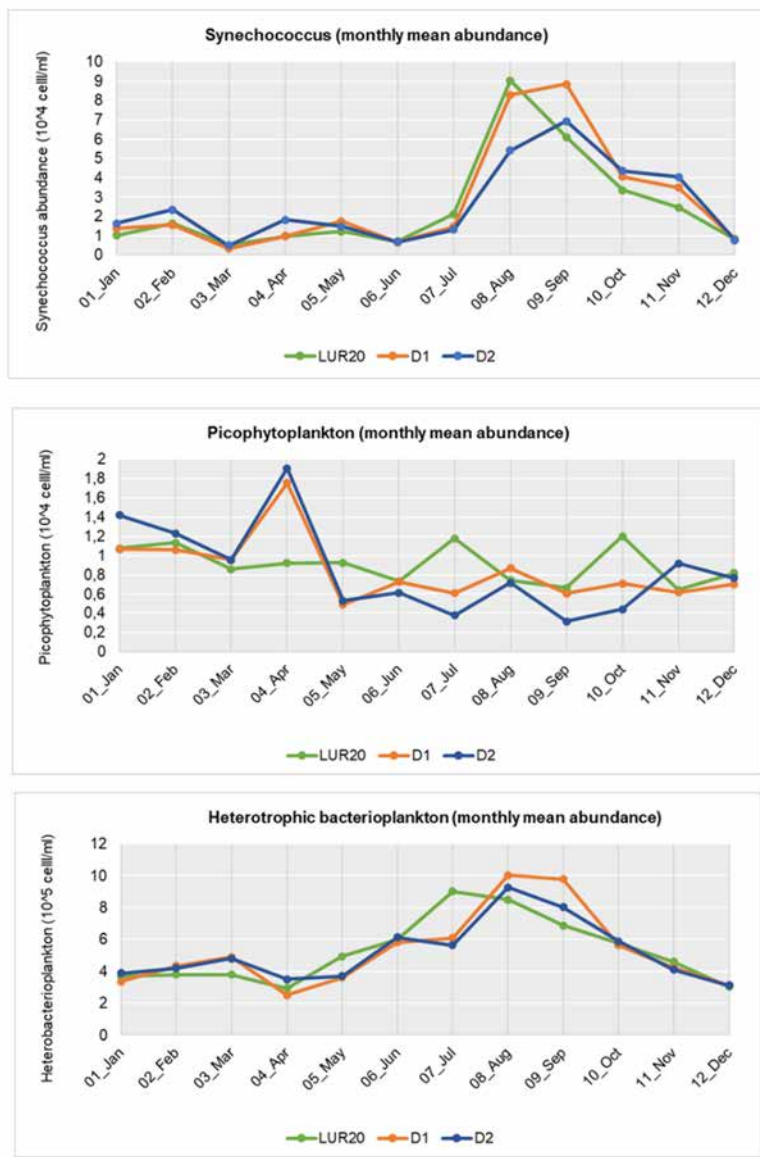
características citométricas de sus células⁵: (bacterioplankton heterótrofo, cianobacterias del género *Synechococcus spp.* y picofitoplankton eucariota) en el periodo 2015-2022. Tanto bacterias como eucariotas unicelulares son los organismos que presentan mayor diversidad taxonómica en el mar, y algunas de sus especies son altamente sensibles al calentamiento. La abundancia de cada grupo se determinó mediante citometría de flujo en muestras recogidas mensualmente en tres estaciones de la costa, D1, D2 y L-UR20.

Para determinar el efecto de la temperatura y las olas de calor sobre la comunidad microbiana, se calculó la desviación de la abundancia mensual de cada uno de los grupos respecto a la media global del mes correspondiente, y se comparó con la intensidad de las olas de calor (desviación de la temperatura) acumuladas durante los 30 días anteriores a la recogida de las muestras. Las olas de calor se determinaron a partir de la temperatura diaria registrada en el Aquarium de Donostia / San Sebastián siguiendo la definición de ola de calor marina de Hobday et al. (2016).

En cuanto a la estacionalidad media durante todo el periodo de análisis, *Synechococcus spp.* mostró una clara estacionalidad, con abundancias máximas en agosto-septiembre en las tres estaciones. Los picoeucariotas mostraron una estacionalidad menos clara, con máximos en abril en las estaciones D1 y D2, pero sin estacionalidad clara en L-UR20. El bacterioplankton heterótrofo mostró una clara estacionalidad similar en las tres estaciones, con picos en agosto-septiembre en D1 y D2 y en julio-agosto en L-UR20.

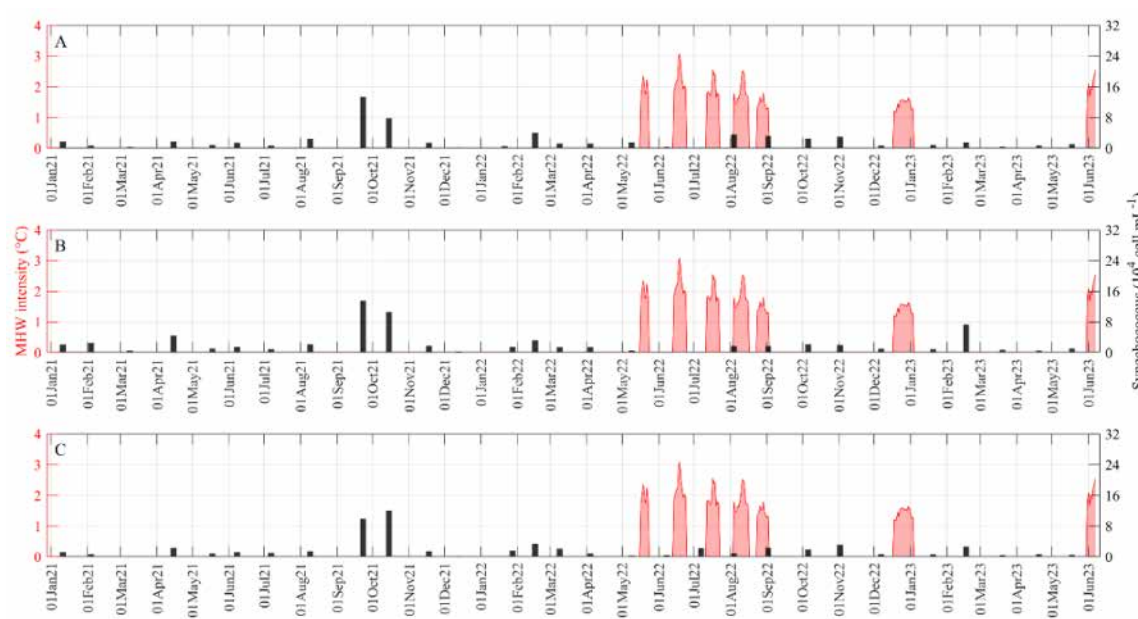
5 Identifikatzeko aukera ematen duten ezaugarriak dira, zehazki, zitometroko (laser-argiaren erabilera oinarritutako zelulak zenbatzeko eta sailkatzeko teknologia) laser-argiaren desbideratze-angelua zelulekin talka egitean (zelula-tamainaren funtzioa, besteak beste), eta haien fluoreszentzia-maila.

5 Las características que permiten su identificación son en concreto el ángulo de desviación de la luz del láser del citómetro (tecnología para el recuento y clasificación de células basada en la utilización de luz láser) al impactar con las células (función del tamaño de célula, entre otras características) y su nivel de fluorescencia.



19. ird. *Synechococcus* spp.-ren, pikofitoplanktonaren eta bakterio-plankton heterotrofoaren zelulen hileko batez besteko ugaritasuna, fluxu-zitometrian oinarrituta.

19. Fig. Abundancia media mensual de células de *Synechococcus* spp., picofitoplankton y bacterioplankton heterótrofo basado en citometría de flujo.



20. ird. *Synechococcus* spp.-ren hileko ugaritasunak fluxu-zitometrian oinarrituta (barra beltzak, zelulak/ml), D1 (A), D2 (B) eta L-UR20 (C) estazioetan 2021eko urtariletik 2023ko ekainera, bero-boladen eguneko intentsitateekin, berotzerako joeraren efektu gainjarria (gorriz) kontuan hartuta. Ikusi da 2022ko abuztutik urrira bitartean ez dela detektatu *Synechococcus* spp.-ren-ren ugaritasunaren ohiko gailurra, bero-boladen ezohiko metaketaren ondoren.

20. Fig. Abundancias mensuales basadas en citometría de flujo (barras negras, células / ml) de *Synechococcus* spp. en las estaciones D1(A), D2(B) y L-UR20 (C) de enero 2021 a junio 2023, con intensidades diarias de olas de calor considerando el efecto superpuesto de la tendencia al calentamiento (en rojo). Se observa que en el periodo de agosto a octubre 2022 no se ha detectado el pico característico de abundancia de *Synechococcus* spp. tras una inusual acumulación de olas de calor.

Bero-bolada luze eta gogorreneko aldiak 2018, 2020 eta 2022ko udak izan ziren, 30 °C inguruko 30 eguneko intentsitate metatuekin. Gainera, 2023ko neguan bero-bolada bat gertatu zen abendutik otsailera bitartean. Zehazki, 2022ko eta 2023ko bero-boladak aztertuz gero, ez da desbideratze argirik ikusten aztertutako hiru taldeetako bakar baten ugaritasunean bero-boladen ondoren hileko batezbestekoari dagokionez (19. ird). *Synechococcus* spp.-ren kasuan, ugaritasun-balioak, oro har, ohiko hileko batezbestekoak baino txikiagoak izan ziren bero-boladen ondoren hiru estazioetan, baina joera ez zen esanguratsua izan. Ugaritasunaren desbideratzeak laginketaren aurreko 30 egunetan metatutako tenperatura-desbideratzeekin alderatzean, bero-boladaren intentsitate metatuarekin lortutakoen antzeko emaitzak lortzen dira. Hiru estazioak batera kontuan hartzean, *Synechococcus* spp.-ren ugaritasuna murrizteko joera ahula ikusten da, eta tenperaturaren desbideratze gero eta handiagoa laginketaren aurretik. 2022ko ekainetik irailera bitartean izandako bero-bolada handiaren

Los periodos con las olas de calor más largas e intensas fueron los veranos de 2018, 2020 y 2022, con intensidades acumuladas de 30 días cercanas a los 30 °C. Además, en el invierno de 2023 se produjo una ola de calor entre diciembre y febrero. Analizando en concreto las olas de calor de 2022 y 2023, no se observan desviaciones claras en la abundancia de ninguno de los tres grupos analizados tras episodios de olas de calor en relación a la media mensual (Fig. 19). En el caso de *Synechococcus* spp. los valores de abundancia fueron en general inferiores a sus medias mensuales tras las olas de calor en las tres estaciones, aunque esta tendencia no fue significativa. Al comparar las desviaciones de la abundancia con las desviaciones de temperatura acumulada en los 30 días anteriores al muestreo se obtienen resultados similares a las obtenidas con la intensidad acumulada de la ola de calor. Al considerar las tres estaciones juntas, se observa una tendencia débil de reducción de la abundancia de *Synechococcus* spp., con una desviación creciente de la temperatura antes del muestreo. En el caso de

kasuan, ezohiko ugaritasun txikia aurkitu zen hiru estazioetan uda-amaieran (normalean populazio horrek gailur nabarmena du une horretan ugaritasunari dagokionez).

Pikofitoplankton eukariotoaren eta bakterio-plankton heterotrofoaren populazioen kasuan, litekeena da joera esanguratsurik ez egotearen arrazoia izatea talde horiek zabalegiak direla maila ekologikoan. Zelula guztien zenbaketa aldatu ez arren, litekeena da aldaketak gertatzea talde heterogeneo handi horiek osatzen dituzten taxon indibidualen osieran. Gainera, eskuragarri dagoen zortzi urteko denbora-seriea oso laburra da, oraindik, seguruenik, eta ez du nahikoa bereizmenik tenperaturak plankton-komunitate horietan dituen efektu konplexuak aztertzeko. Etorkizunean, bakterio-planktonaren eta pikoeukariotoen azterketa DNA metabarcoding⁶ bezalako teknikekin zabaltzeak aukera eman lezake xehetasunez aztertzeko komunitate osoaren konposizio espezifikoak itsasoko bero-boladei emandako erantzuna.

Laburbilduz, fluxu-zitometria bidez bereiz daitezkeen hiru plankton-talde ugarienen hileko ugartasunak aztertu ziren, eta Donostiako Aquariumeko tenperatura-datuetatik eta 2015-2023 aldiko laginketaren aurreko hilabeteko tenperatura-desbideratzetik abiatuta identifikatutako bero-boladekin alderatu ziren. Udako hilabeteetako itsasoko bero-boladen ondoren, badirudi *Synechococcus spp.*-ren ugaritasuna batezbestekoa baino txikiagoa dela, baina joera hori ezin izan zen estatistikoki egiaztatu azterketa-epenean iraupena oso laburra zelako. Bakterioplankton heterotrofoaren eta pikofitoplankton eukariotoaren kasuan, ez da urtaro-patroien desbideratze argirik ikusi.

la intensa ola de calor que tuvo lugar entre junio y septiembre de 2022, se encontró una abundancia inusualmente baja en las tres estaciones a finales de verano, cuando generalmente esta población presenta un claro pico en abundancia.

En el caso de las poblaciones de picofitoplancton eucariota y bacterioplancton heterótrofo, es posible que el hecho de no encontrar tendencias significativas se deba a que estos grupos son demasiado amplios a nivel ecológico. Aunque el recuento total de células no cambie, es probable que se produzcan cambios en la composición de los taxones individuales que componen estos grandes grupos heterogéneos. Además, la serie temporal disponible de ocho años es probablemente aún muy corta y no tiene suficiente resolución para analizar los complejos efectos de la temperatura sobre estas comunidades del plancton. En el futuro, una ampliación del estudio con técnicas como DNA metabarcoding⁶ para el plancton bacteriano y picoeucariota podría permitir analizar en detalle la respuesta de la composición específica de la comunidad en su conjunto a las olas de calor marinas.

En resumen, se estudiaron las abundancias mensuales de los tres grupos de plancton más abundantes que se pueden distinguir mediante citometría de flujo y se compararon con las olas de calor identificadas a partir de los datos de temperatura del Aquarium de Donostia / San Sebastián y la desviación de temperatura en el mes anterior al muestreo en el periodo 2015-2023. Después de las olas de calor marinas durante los meses de verano, la abundancia de *Synechococcus spp.* parece ser inferior a la media, aunque esta tendencia no pudo ser verificada estadísticamente dada la corta duración del periodo de estudios. Para el bacterioplankton heterótrofo y picofitoplancton eucariota no se han observado desviaciones claras de los patrones estacionales.

⁶ Lagin baten biodibertsitatearen karakterizazioa, bertan dauden espezieak identifikatzen dituzten DNA gene batzuen (barra-kodea deiturikoen) sekuentziazioan oinarrituta.

⁶ Caracterización de la biodiversidad de una muestra a base de secuenciar algunos genes de ADN (los llamados códigos de barras) que identifican las especies presentes.

3.2.2. Antxoa gazteen hazkundearen erantzunaren analisia

Analisi honen helburua da tenperaturak Europako antxoa (*Engraulis encrasicolus*) gazteen hazkundearen duen efektua hobeto ulertzea. Pelagiko txikien dinamika ingurumen-gorabeherekin lotuta egon ohi da (Borja et al., 2008; Checkley et al., 2009), eta azkar erantzuten dio klima-aldakortasunari (Montero-Serra et al., 2015). Gazte-faseak bereziki sentikorrek dira aldaketa horien aurrean. Beraz, itsasoko ekosistemetan klimak bultzatutako aldaketen adierazle onak izan daitezke (Peck et al., 2013).

Bizi-estadio goiztiarretan (arrautzak, larba eta gazteak) izandako ingurumen-baldintzak funtsezkoak dira, etapa horietako hazkundeak eta biziraupenak zuzenean eragiten diotelako errekrutamentuari; hau da, populazioaren barruan erruten duten banakoen kopuruari (Houde, 1987). Beraz, litekeena da aldi konkurrenteetan gertatzen diren ozeanografia- eta klima-gertakariak eragin handia izatea populazioaren dinamikaren gain.

Uraren tenperaturak larben hazkunde-tasa eta beste funtsezko prozesu batzuk arautzen ditu, hala nola larba-fasearen iraupena edo antxoaren gertakari metamorfikoa (Green & Fisher, 2004; Spies & Steele, 2016). Tenperaturari emandako erantzun fisiologikoa kupula-itxurako erlazio bati jarraitu ohi dio; hala, maximo bat lortzen da hazkunde-tasak tenperaturarekin igotzen diren heinean; baina erantzunak murriztu egiten dira, baldin eta tenperaturak tenperatura-optimoa gainditzen badu (leiho termikoa deiturikoa; Pörtner & Knust, 2007; Munday et al., 2009). Hau da, tenperaturaren igoerak hazkunde-tasa handiagoak eragiten ditu (Takasuka & Aoki, 2006; Arula et al., 2015). Nolanahi ere, uraren tenperaturak espeziearen leiho termikoa gainditzen duenean, heriotza-tasa gerta daiteke. Antxoaren estadio goiztiarren kasuan, hazkundearen eta uraren tenperaturaren arteko erlazioak ere kupula-itxurako erlazioari jarraitzen dio: tenperaturaren efektua positiboa da 20 °C-tik 24 °C-ra bitartean, baina berehala negatibo bihurtzen da tenperatura altuagoetan (Maynou et al., 2020). Halaber, ugaritasun txikiak erregistratu dira oso tenperatura altuko urteetako estadio goiztiarretan (Basilone et al., 2013; Patti et al., 2020). Tenperaturak altuak direnean, erabilgarritasun trofikoa mugatzailea izatera irits daiteke. Baliabideak nahikoak badira, tenperatura

3.2.2. Análisis de la respuesta en el crecimiento de los juveniles de anchoa

El objetivo de este análisis es entender mejor el efecto de la temperatura sobre el crecimiento de los juveniles de anchoa europea (*Engraulis encrasicolus*). La dinámica de los pequeños pelágicos suele estar relacionada con las fluctuaciones medioambientales (Borja et al., 2008; Checkley et al., 2009) y responde rápidamente a la variabilidad climática (Montero-Serra et al., 2015). Las fases juveniles son especialmente sensibles a estos cambios. Por lo tanto, pueden ser buenos indicadores de los cambios impulsados por el clima en los ecosistemas marinos (Peck et al., 2013).

Las condiciones medioambientales durante el desarrollo de los estadios tempranos de vida (huevos, larva y juveniles) son cruciales porque el crecimiento y la supervivencia durante estas etapas afectan directamente al reclutamiento, es decir, al número de individuos que desovan dentro de la población (Houde, 1987). Por consiguiente, es probable que los acontecimientos oceanográficos y climáticos que se producen en periodos concurrentes afecten profundamente a la dinámica de la población.

La temperatura del agua regula la tasa de crecimiento de las larvas y otros procesos clave como la duración de la fase larvaria o el suceso metamórfico de la anchoa (Green & Fisher, 2004; Spies & Steele, 2016). La respuesta fisiológica a la temperatura suele seguir una relación en forma de cúpula, en la que se alcanza un máximo a medida que las tasas de crecimiento aumentan con la temperatura, pero las respuestas disminuyen si la temperatura supera el óptimo térmico (denominada ventana térmica; Pörtner & Knust, 2007; Munday et al., 2009). Esto es, el aumento de la temperatura se traduce en mayores tasas de crecimiento (Takasuka & Aoki, 2006; Arula et al., 2015); sin embargo, cuando la temperatura del agua supera la ventana térmica de la especie, se puede producir mortalidad. En el caso de los estadios tempranos de la anchoa, la relación entre crecimiento y temperatura del agua sigue también una relación en forma de cúpula, donde el efecto de la temperatura es positivo entre 20 °C y 24 °C, pero se vuelve rápidamente negativo a temperaturas más altas (Maynou et al., 2020). También se registran bajas abundancias en estadios tempranos en años caracterizados por temperaturas muy altas

beroek hazkundera bultzatzen dute; baina hain produktiboak ez diren eremuetan, berriz, tenperatura altuek heriotza-tasa handia eragiten dute (Fernández-Corredor et al., 2021). Horrenbestez, tenperatura gero eta beroagoek, muturreko fenomenoekin batera, antxoaren estadio gazteen hazkundera mugatu dezakete, eta horrek ondorioak eragin ditzake epe luzera populazioetan.

Bizkaiko golkoan, adinaren arabera pisu- eta luzera-murritzeta detektatu da antxoaren kasuan 2000az geroztik. Badirudi murritzeta hori lotuta dagoela, bestelako ingurumen-faktore batzuen artean, itsasoko uraren berotzearekin eta populazioaren ugartasunarekin (Taboada et al., 2023). Taboada et al.-en azterketan (2023), 1990-2021 aldiaren murritzetak detektatu ziren luzera osoan –eta, batez ere, pisuan– adin-tarte guztietan. Azterketa horretan, antxoa-ugartasun handiagoaren eta gazteen neurri txikiagoaren arteko lotura estua zehaztu zen; baina badirudi adin handiagoan tenperaturak inpaktu handiagoa duela neurri helduaren jaitsieran. Gainera, hazkunde-eredu batean oinarritutako analisi teorikoek iradoki zuten behatutako patroiak koherenteak direla tenperaturaren igoerak hazkunde goiztiarraren azelerazioari eta neurri helduaren murritzetari dagokionez duen aldibereko eta kontrako efektuarekin.

Hezur arrainen larben eta gazteen hazkundera eta adina (tamaina edozein dela ere) otolitoen⁷ mikroegituren analitik abiatuta kalkula daiteke, otolitoetan banda zeharrargiak eta opakak txandaka jalkitzen direlako (otolito-gehikuntza deiturikoak). Gehikuntza horiek egunero jalkitzen dira, eta hazkunde-tasak ondorioztatzeko aukera ematen dute tamainaren eta adin estimatuaren arteko erlaziotik abiatuta (May & Jenkins, 1992).

Tenperaturak antxoa gazteen hazkundera duen inpaktua aztertzeko, Bizkaiko golkoko hego-ekialdean JUVENA kanpainan harrapatutako aleak erabili dira (Boyra et al., 2013). Laginketak abuztuan eta urrian egin ziren, antxoa gazteak metamorfosiaren ondoren agertzen direnean, 7 urtetan: 2004an (09/19-10/19), 2005ean (09/12-10/07), 2006an (09/13-10/14), 2009an (08/26-09/25),

(Basilone et al., 2013; Patti et al., 2020). Cuando las temperaturas son altas, la disponibilidad trófica puede llegar a ser limitante. Si los recursos son suficientes, las temperaturas cálidas impulsan el crecimiento mientras que, en las zonas menos productivas las altas temperaturas provocan una elevada mortalidad (Fernández-Corredor et al., 2021). En consecuencia, las temperaturas cada vez más cálidas, combinadas con la ocurrencia de fenómenos extremos, pueden limitar el crecimiento de los estadios jóvenes de anchoa, lo que podría tener consecuencias a largo plazo para las poblaciones.

En el golfo de Vizcaya se ha detectado una disminución del peso y longitud por edad en la anchoa desde 2000, disminución que parece estar asociada, entre otros factores ambientales, al calentamiento del agua de mar y a la abundancia de la población (Taboada et al., 2023). En el estudio de Taboada et al. (2023) se detectaron reducciones en la longitud total y sobre todo en el peso en todas las clases de edad en el periodo 1990-2021. En dicho estudio se determinó una fuerte asociación entre una mayor abundancia de anchoa y una menor talla de los juveniles, pero a mayor edad parece que la temperatura tiene un mayor impacto en la disminución de la talla adulta. Además, los análisis teóricos basados en un modelo de crecimiento sugirieron que los patrones observados son coherentes con un efecto simultáneo y opuesto del aumento de la temperatura sobre la aceleración del crecimiento temprano y la disminución de la talla adulta.

El crecimiento de las larvas y juveniles, así como la edad (independiente del tamaño) de los peces óseos puede estimarse a partir del análisis de las microestructuras de los otolitos⁷. Esto se debe a que en los otolitos se depositan bandas alternas traslúcidas y opacas conocidas como incremento del otolito. Estos incrementos se depositan con una periodicidad diaria y permiten inferir las tasas de crecimiento a partir de la relación entre el tamaño y la edad estimada (May & Jenkins, 1992).

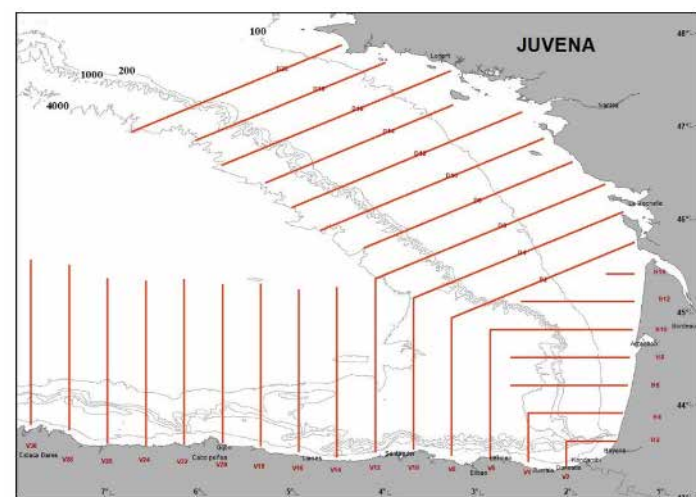
Para analizar el impacto de la temperatura en el crecimiento de los juveniles de anchoa, se han utilizado ejemplares capturados en la zona sureste del

⁷ Hezur-arrainen barneko belarrian dagoen egitura kaltzifikatua. Forma oboidea du, eta kaltzio karbonatoz osatuta dago nagusiki.

⁷ Estructura calcificada presente en el oído interno de los peces óseos. Tiene forma ovoide y está compuesta principalmente de carbonato de calcio.

2013an (09/01-09/30), 2014an (09/01-09/30) eta 2022an (08/17-10/03). Laginketa horietan, gazteen banaketa-eremu potentziala estali zen Espainiako kostaldearen eta plataforma kontinentalaren artean Garona ibaiaren aurrean (Irigoien et al., 2007). Ondoren, harrapatutako antxoa-laginak laborategian aztertu ziren, haien tamaina eta pisua neurtzeko, baita otolitoak erazteko ere. Otolitoak makroskopioki aztertu ziren, antxoaren adina urteko eskalan zehazteko. Eguneko hazkundea kalkulatzeko, banako gazteak (0 adina) hautatu ziren otolitoen mikroegituraren analititik abiatuta. Gehikuntzen eguneko jalkipena bai larbetarako (Aldanondo et al., 2008) eta bai gazteetarako (Cermeño et al., 2003) balidatu denez, gehikuntza-kopurua adinaren proxytzat hartu zen (egunetan).

golfo de Vizcaya en la campaña JUVENA (Boyra et al., 2013). Los muestreos se llevaron a cabo durante los meses de agosto y octubre (cuando aparecen los juveniles de anchoa tras la metamorfosis) para 7 años (19/09-19/10/2004, 12/09-07/10/2005, 13/09-14/10/2006, 26/08-25/09/2009, 01/09-30/09/2013, 01/09-30/09/2014 y 17/08-03/10/2022) cubriendo el área potencial de distribución de los juveniles entre la costa española y la plataforma continental frente al río Garona (Irigoien et al., 2007). Las muestras de anchoa capturadas se analizaron posteriormente en el laboratorio para determinar su talla, peso y para la extracción de los otolitos. Los otolitos se analizaron macroscópicamente para determinar la edad de las anchoas a escala anual. Para estimar el crecimiento diario, a partir del análisis de la microestructura de los otolitos, se seleccionaron los individuos juveniles (edad 0). Como la deposición diaria de incrementos ha sido validada tanto para larvas (Aldanondo et al., 2008) como para juveniles (Cermeño et al., 2003), el número de incrementos se consideró un proxy de la edad en días.

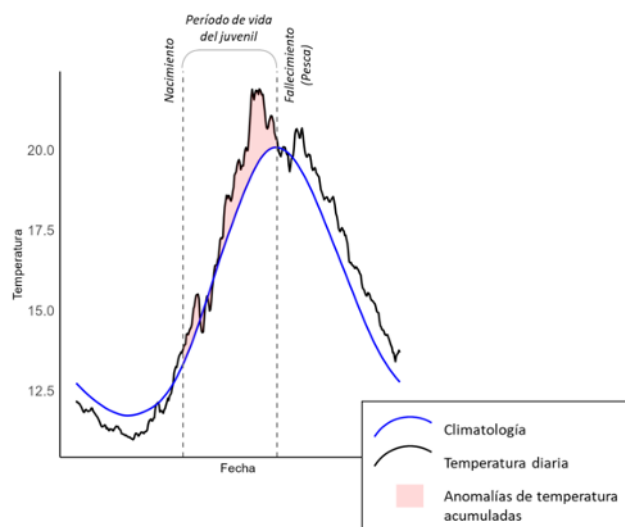


21. ird. Azterketa-eremuaren kokapen orokorra Bizkaiko golkoan, JUVENA kanpainaren oinarritzko eskema erakusten duena.

21. Fig. Localización general de la zona de estudio en el Golfo de Vizcaya donde se muestra el esquema básico de la campaña JUVENA.

Tenperaturari buruzko datuak JUVENA kanpaina ozeanografikoko antxoak gazteen laginketa-eremuko itsasoko gainazaleko tenperaturaren eguneko satellite-neurketei dagozkie. Eguneko temperatura horietatik abiatuta, jaiotzatik heriotza-datara (arrantzara) arteko batez besteko tenperaturak lotu ziren aztertutako antxoak gazte bakoitzarekin. Era berean, banako bakoitzaren bizitzan zehar eguneko tenperaturaren eta klimatologiaren (eguneko batez besteko temperatura 1981-2022) arteko aldea batu zen, banakoek jasandako temperatura-anomaliak irudikatzeko. Analisi-aldian, gainazaleko tenperaturaren goranzko joera esanguratsua ikusten da laginketa-eremuan ($+0,212\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,037\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ko tasa hamarkada bakoitzeko).

Los datos de temperatura corresponden a medidas satelitales diarias de temperatura superficial del mar promediados en la zona de muestreo de juveniles de la campaña oceanográfica JUVENA. A partir de esas temperaturas diarias, se asociaron temperaturas medias desde el nacimiento hasta la fecha de fallecimiento (pesca) a cada uno de los juveniles de anchoa analizados. Igualmente, a lo largo de la vida de cada individuo se sumó la diferencia entre la temperatura diaria y la climatología (temperatura media diaria 1981-2022) para representar las anomalías de temperatura soportadas por los individuos. En el periodo de análisis se observa una tendencia creciente significativa de la temperatura superficial sobre la zona de muestreo, con una tasa de $+0,212\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,037\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década.



22. ird. Anomalien kalkulua. Banako bakoitzaren bizitzan zehar, eguneko batez besteko tenperaturaren eta klimatologiaren arteko aldea batzen da, banakoek jasaten dituzten anomaliak zehazteko.

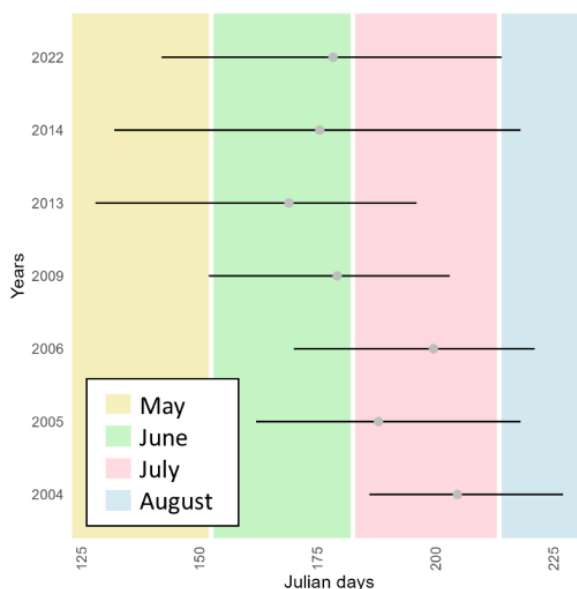
22. Fig. Cálculo de anomalías. A lo largo de la vida de cada individuo se suma la diferencia entre la temperatura media diaria y la climatología para determinar las anomalías soportadas por los individuos.

2004, 2005 eta 2006an banakoak geroago jaio ziren (ekainaren erditik aurrera). Gainerako urteetan, jaiotza-aldia lehenago hasi zen (maiatzetik aurrera) eta denbora gehiago iraun zuen. Hala ere, errunaldi-/jaiotza-aldi orokorra konstante mantentzen da urtero, baina banakoen biziraupena ez da konstantea denboraldian zehar. Adibidez, 2004an, 2005ean eta 2006an goiz jaiotako banakoak hil egingo lirake, eta urrian lagindutako gazteak aurreko

En 2004, 2005 y 2006 los individuos nacieron más tarde (a partir de la mitad de junio). En el resto de años, el periodo de nacimiento empezó antes (a partir de mayo) y duró más tiempo. Sin embargo, el periodo global de puesta/nacimiento se mantiene constante cada año, pero la supervivencia de los individuos no es constante a lo largo de la temporada. Por ejemplo, los individuos nacidos tempranamente en 2004, 2005 y 2006 habrían muerto

errunaldietatik bizirik iraun zutenak izango lirateke (Aldanondo et al., 2010). Baliteke fenomeno hori gertatzea korrante ozeanikoek banakoak modu pasiboan garraiatzen dituztelako eremu desegokietara (harraparien presentziarekin edo ingurumen-baldintza ez hain optimoekin) (Albaina et al., 2015). Litekeena da, halaber, ozeanoan gertatzen ari diren aldaketak antxoaren fase gazteen biziraupenerako ingurumen-baldintzak hobetzen aritzea, batez ere temperaturari eta baliabide trofikoei dagokienez (Boëns et al., 2023).

y los juveniles muestreados en octubre serían los supervivientes de puestas anteriores (Aldanondo et al., 2010). Este fenómeno podría explicarse porque los individuos son transportados pasivamente por las corrientes oceánicas a zonas desfavorables (presencia de depredadores o condiciones ambientales subóptimas) (Albaina et al., 2015). También podría ser que los cambios que se están produciendo en el océano estén mejorando las condiciones ambientales para la supervivencia de las fases jóvenes de la anchoa, sobre todo en relación a la temperatura y los recursos tróficos (Boëns et al., 2023).



23. ird. Antxoa-banakoen jaiotza-aldia urteko.

23. Fig. Periodo de nacimiento de los individuos de anchoa por año.

505 antxoa gazte aztertu dira guztira, maiatzetik abuztura bitartean jaiotakoak. Urte guztiak kontuan hartuta, aztertutako antxoek $8,12 \pm 2,87$ cm-ko batez besteko tamaina dute (gutxienez 2,85 cm eta gehienez 14,68 cm bitartekoa). Batez besteko pisua $4,34 \pm 4,22$ g-koa da (gutxienez 0,05 g eta gehienez 18,93 g bitartekoa). Fulton-en K egoera-faktorea (pisuaren arabera erlazio bolumetrikoa⁸) $0,52 \pm 0,10$ da batez beste, eta gutxienez 0,13 eta gehienez 0,96 bitartekoa.

Se han analizado un total de 505 juveniles de anchoa, que nacieron entre mayo y agosto. Considerando todos los años, las anchoas analizadas tienen un tamaño promedio de $8,12 \pm 2,87$ cm, que oscila entre un tamaño mínimo de 2,85 cm y máximo de 14,68 cm. El peso promedio es de $4,34 \pm 4,22$ g, que oscila entre un mínimo de 0,05 g y un máximo de 18,93 g. El factor de condición de Fulton K (relación volumétrica en función del peso⁸) promedio es de $0,52 \pm 0,10$, oscilando entre un mínimo de 0,13 y un máximo de 0,96.

⁸ Fulton-en K egoera-faktorea = $\text{Peso}/\text{Longitud}^3 \times 100$

⁸ Factor de condición K de Fulton = $\text{Peso}/\text{Longitud}^3 \times 100$

Urtea Año	N	Jaiotza-aldia Periodo de nacimiento		Tamaina (cm) Tamaño (cm)		Pisua (g) Peso (g)		Fulton-en K K de Fulton	
		Hasiera Inicio	Amaiera Fin	Batezbestekoa Promedio	±	Batezbestekoa Promedio	±	Batezbestekoa Promedio	±
2004	54	07/04	08/14	8,66	2,70	4,79	4,02	0,55	0,07
2005	112	06/11	08/06	8,41	2,71	4,27	3,87	0,51	0,09
2006	81	06/19	08/09	8,12	2,74	3,96	4,11	0,50	0,08
2009	47	06/01	07/22	7,83	2,04	3,28	2,65	0,54	0,12
2013	66	05/08	15/07	8,61	2,99	5,44	4,14	0,58	0,09
2014	105	05/12	08/06	7,92	3,40	4,27	4,61	0,50	0,10
2022	40	05/22	08/02	6,68	2,47	-	-	-	-

2. taula. Otolitoak erauzi zitzaizkion antxoak-kopurua (N), jaiotza-aldiaren hasiera eta amaiera eta (±) tamainaren (cm), pisuaren (g) eta Fulton-en K egoera-faktorearen batezbestekoa eta desbideratze estandarra urteko.

2. Tabla. Número de anchoas de las que se extrajeron otolitos (N), inicio y fin del período de nacimiento y media y desviación estándar (±) del tamaño (cm), peso (g) y factor de condición K de Fulton por año.

Urtearen arabera, batez besteko tenperaturak 18 °C-tik 20,1 °C-ra bitartekoak izan ziren 2013an eta 2006an, hurrenez hurren. Anomaliak kontuan hartuta (tenperaturaren desbideratzea klimatologia-rekiko), 2013a izan zen anomalia gutxieneko urtea (-15,5 °C), urte tipikotik gertuago, eta 2022a, berriz, desbideratze handienekoa.

Según el año, las temperaturas medias oscilaron entre 18 °C y 20,1 °C en 2013 y 2006, respectivamente. Teniendo en cuenta las anomalías (la desviación de la temperatura respecto a la climatología), 2013 es el año con menor anomalías (-15,5 °C), acercándose más a un año típico, mientras que 2022 es el año con mayor desviación.

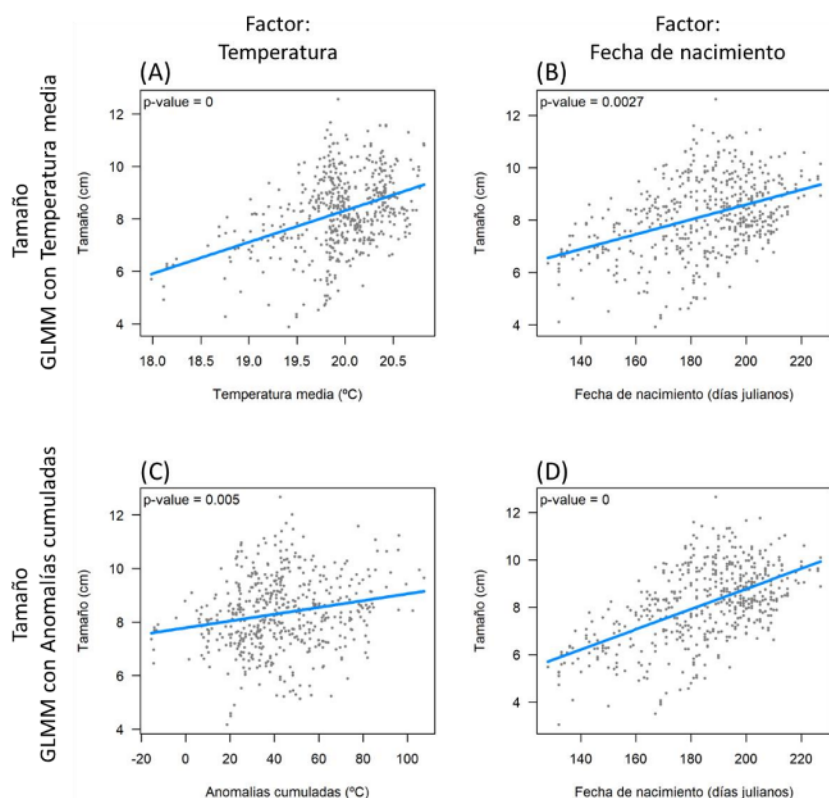
Urtea Año	Aldia Periodo		Tenperatura (°C) Temperatura (°C)	
	Hasiera Inicio	Amaiera Fin	Batezbestekoa Promedio	Metatutako anomaliak Anomalías acumuladas
2004	04/07	06/10	19,6	28,1
2005	11/06	07/10	19,6	70,2
2006	19/06	09/10	20,1	108,0
2009	01/06	22/09	19,2	48,6
2013	08/05	24/09	18,0	-15,5
2014	12/05	29/09	18,9	88,3
2022	22/05	01/10	19,4	123,0

3. taula. JUVENA eremuan erregistratutako gainazaleko tenperaturak urtean. Tenperaturen batezbestekoa egin zen, eta anomaliak batu ziren interes-aldian zehar, arrautzen errunaldiaren hasieratik laginketaren amaierara arte.

3. Tabla. Temperaturas superficiales registradas en la zona JUVENA por año. Las temperaturas se promediaron y las anomalías se sumaron a lo largo del período de interés, desde el inicio de la puesta de huevos hasta el final del muestreo.

Emaitzek adierazten dute itsasoko uraren berotzeak efektu positibo adierazgarria duela antxoaren tamainan. 1°C -ko tenperatura-igoerak $+1,20 \pm 0,28$ cm-ko handitzea eragiten du. Tenperatura-anomalien metaketak ere efektu positiboa du banakoen tamainan. Anomalia metatuak 1°C handitzearen ondorioz, tamaina $+0,01 \pm 0,004$ cm handitu da. Bi kasuetan, jaiotza-datak eragin nabarmena du banakoen tamainan. Denboraldiaren hasieran jaiotakoak txikiagoak ziren denboraldiaren amaieran jaiotakoak baino. Estadio gazteak (arrautzak eta larbak) garatzeko tenperaturarik onena $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ ingurukoa da (Peck et al., 2013; Maynou et al., 2020), eta tenperatura horiek oso gutxitan gainditu ziren Bizkaiko golkoan aztertutako aldiaren.

Los resultados indican que el calentamiento del agua de mar tiene un efecto positivo significativo sobre el tamaño de las anchoas. Un aumento de la temperatura de 1°C induce un aumento del tamaño de $+1,20 \pm 0,28$ cm. La acumulación de las anomalías de temperatura también ejerce un efecto positivo significativo en el tamaño de los individuos. Un aumento de las anomalías acumuladas de 1°C se traduce en un aumento del tamaño de $+0,01 \pm 0,004$ cm. En ambos casos, la fecha de nacimiento influye significativamente en el tamaño de los individuos. Los nacidos al principio de la temporada eran más pequeños que los nacidos al final de la temporada. La temperatura óptima para el desarrollo de los estadios jóvenes (huevos y larvas) se sitúa alrededor de los $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ (Peck et al., 2013; Maynou et al., 2020), temperaturas éstas que rara vez se superaron en el golfo de Vizcaya en el periodo analizado.

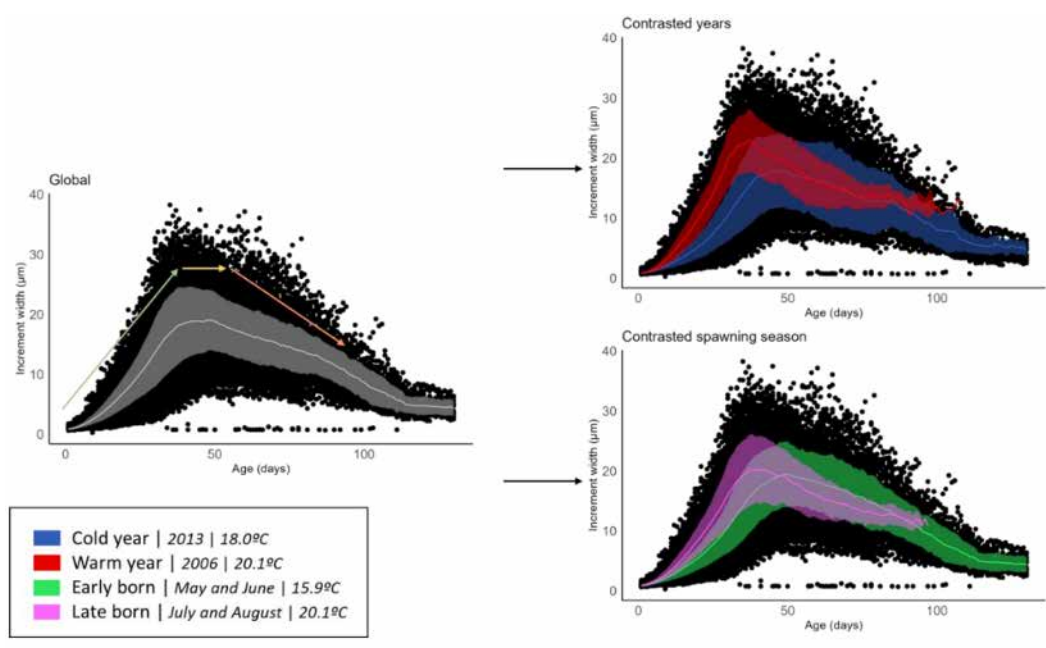


24. ird. Efektua banakoen tamainan: (A) batez besteko tenperatura; (B) jaiotza-data; (C) tenperatura-anomaliak; eta (D) jaiotza-data kontuan hartuta. Lerro urdinek joerak adierazten dituzte.

24. Fig. Efecto de (A) la temperatura media, (B) la fecha de nacimiento, (C) anomalías de temperatura y considerando (D) la fecha de nacimiento en el tamaño de los individuos. Las líneas azules presentan tendencias.

Otolitoen gehikuntzen zabalera hazkunde-adierazletzat erabil daiteke. Hazkunde-analisian, bi fase bereiz daitezke: alde batetik, hasierako aldi bat, non otolitoen banden gehikuntzen zabalera azkar handitzen den, hazkunde azkarreko aldi batekin parekagarria (gezi berdea, 25. ird.); eta bigarren aldi bat, non gehikuntzen zabalera geratu edo are murriztu egiten den, hazkunde-aldi geldoago batekin parekagarria (gezi horiak eta laranjak, 25. ird.). Badirudi egonkortze hori azkarrago lortzen dela urte beroetan edo geroago jaiotako banakoetan. Tenperaturak, beraz, bai hazkunde-tasan eta bai hazkunde-aldia-aren iraupenean eragina duela dirudi.

La anchura de los incrementos de los otolitos puede ser utilizada como indicador de crecimiento. En el análisis de crecimiento se pueden distinguir dos fases: un periodo inicial durante el cual la anchura de los incrementos de las bandas de los otolitos aumenta rápidamente, asimilable a un periodo de crecimiento rápido (flecha verde, Fig. 25) y un segundo periodo durante el cual la anchura de los incrementos se estanca o incluso disminuye, asimilable a un periodo de crecimiento más lento (flechas amarilla y naranja, Fig. 25). Esta estabilización parece alcanzarse más rápidamente en los años cálidos o en los individuos nacidos más tarde. La temperatura parece, por tanto, afectar a la tasa de crecimiento, así como a la duración del periodo de crecimiento rápido.



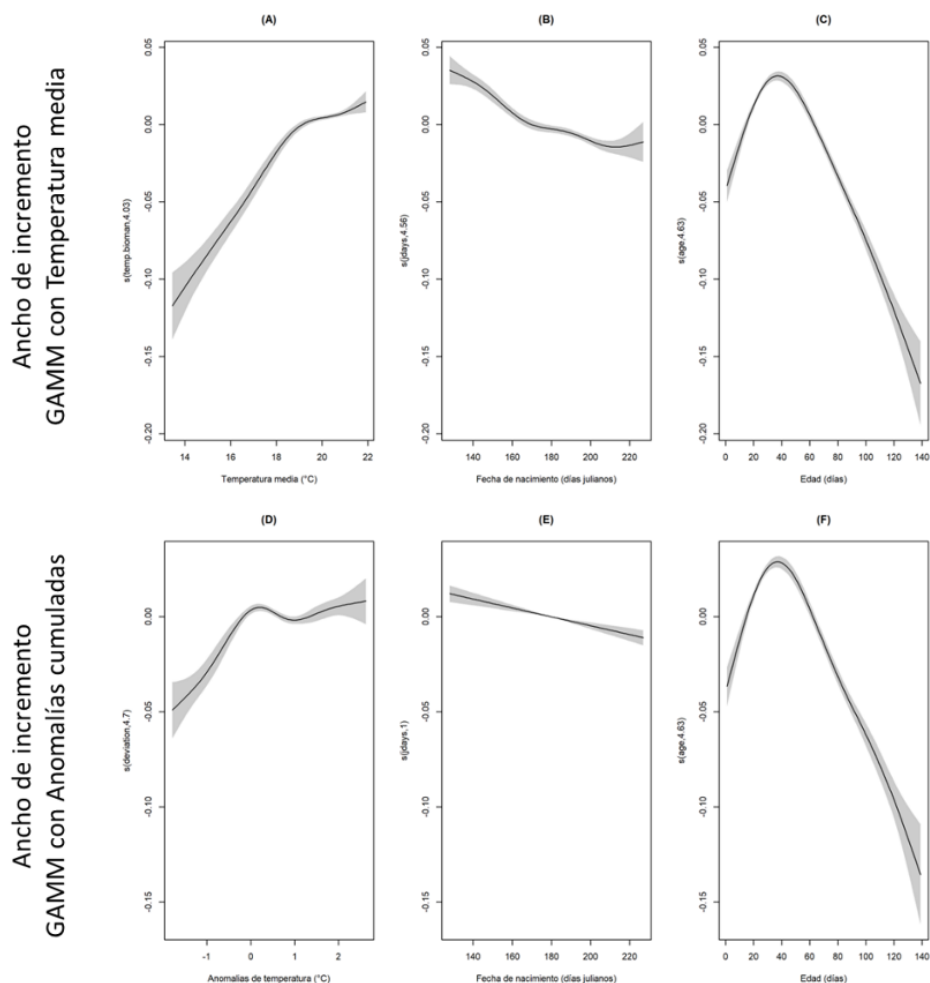
25. ird. Antxo gazteen otolitoen irakurketa-datuak. Gehikuntzen zabalera (μm) adinaren arabera (egunak) irudikatzen da banako guztientzat ('Global'), tenperatura kontrastatueta urteetarako ('Contrasted years': urte hotza, 2013a, urdinez; urte beroa 2016a, gorritz) eta jaiotza-aldi desberdinetarako (Contrasted spawning season': aldiaren hasiera berdez eta aldiaren amaieran arrosaz). Lerro solidoak batezbestekoa adierazten du, eta zati opakak, berriez, desbideratze estandarra.

25. Fig. Datos de lecturas de otolitos de juveniles de anchoa. Se representa la anchura de los incrementos (μm) en función de la edad (días) para todos los individuos ('Global'), para años con temperaturas contrastadas (Contrasted years': año frío, 2013, en azul y año caliente 2016, en rojo) y para diferentes épocas de nacimiento ('Contrasted spawning season': inicio de la época en verde y final de la época en rosa). La línea sólida representa la media y la parte opaca la desviación estándar.



Tenperatura altuenek –bai eguneko tenperaturan bai eguneko anomalietan– antxo gazteen hazkundera azkarragoari lagundu zioten. Eguneko tenperaturaren efektu handia ikusten da 20 °C-ra arte, edo 1 °C-tik beherako eguneko anomaliek dardenean. Tenperatura edo anomalia handiagoen kasuan, dezelerazioa edo ia egonkortzea gertatzen da. Aldiz, jaiotza-datak efektu negatiboa du. Emaiza horrek erakusten du, beste azterketa batzuek bezala, urtean goiz jaiotako banakoen otolitoen irakurketetan oinarritutako hazkunde-tasa handiagoa dela geroago jaiotako banakoena baino (Aldanondo et al., 2016), baina baliteke azterketa honetan tamainari dagokionez lortutako emaitzekiko kontraesana sortzea. Alderdi horrek azterketa gehigarriak eskatzen ditu otolitoen tamainaren eta hazkundearen arteko erlazioa ezartzeko. Hazkunderen adina eta zabalera ere nabarmen lotuta daude. Hazkunderen zabalera 40 egun inguru handitzen da banakoaren bizitzaren hasieran, eta jaitsi egiten da adin horretatik aurrera.

Las temperaturas más elevadas, tanto en la temperatura diaria como en las anomalías diarias, favorecieron un crecimiento más rápido de los juveniles de anchoa. Se observa un fuerte efecto de la temperatura diaria hasta los 20 °C, o en el caso de anomalías diarias inferiores a 1 °C. Para mayores temperatura o anomalías se produce una desaceleración, o casi una estabilización. En cambio, la fecha de nacimiento tiene un efecto negativo. Este resultado concuerda con otros estudios que muestran que la tasa de crecimiento basada en las lecturas de los otolitos de los individuos nacidos tempranos en el año es superior a la tasa de crecimiento de los individuos nacidos más tarde (Aldanondo et al., 2016), pero podría contradecir los resultados obtenidos en cuanto al tamaño en este estudio. Este aspecto requiere estudios adicionales para establecer la relación entre el tamaño y el crecimiento de los otolitos. La edad y la anchura de los incrementos también están significativamente relacionadas. La anchura de los incrementos aumenta al principio de la vida del individuo, hasta alrededor de los 40 días, y disminuye a partir de esa edad.



26. ird. Efektua gehikuntzen zabalaren gain: (A) batez besteko tenperatura; (B) jaiotza-data; eta (C) adina. Beste alde batetik, efektuak gehikuntzen gain: (D) tenperatura-anomaliak; (E) jaiotza-data; eta (F) adina.

26. Fig. Efecto de (A) la temperatura media, (B) la fecha de nacimiento, (C) y edad sobre la anchura de los incrementos. Independientemente, efectos de (D) las anomalías de temperatura, (E) fecha de nacimiento y (F) edad sobre los incrementos.

Azterketa horrek berresten du antxoa gazteen hazkundeak tenperaturak eragindako bi fase desberdin barnean hartzen dituela, baina bi fase horiek lotura estua dute. Tenperatura altuenak banakoak 'zaharragoak' direnean (50 egun baino gehiago dituztenean) gertatzen dira, hazkunde-faserik moteleanean, eta horrek azaldu dezake tenperatura altuek efektu ez hain markatua izatea. Era berean, kontuan hartu behar da bi bizi-aldi horiek, batera hartuta, jaiotza-dataren efektua ezkuta lezaketela. Izan ere, badirudi hasieran azkarrago hazten diren banakoen hazkundeak bizkorrago moteltzen dela gehikuntzen zabalatasun-gailurraren ondoren.

Este análisis confirma que el crecimiento de los juveniles de anchoa incluye dos fases distintas influidas por la temperatura, aunque ambas están intrínsecamente relacionadas. Las temperaturas más elevadas ocurren cuando los individuos son más 'viejos' (más de 50 días), en la fase de crecimiento más lento, lo que podría explicar el efecto menos marcado de las temperaturas elevadas. Asimismo, hay que considerar que estos dos periodos vitales simultáneamente también podrían enmascarar el efecto de la fecha de nacimiento. De hecho, los individuos que crecen más rápidamente al principio parecen desacelerar más rápidamente su crecimiento después del pico de amplitud de los incrementos.

4. Ondorioak

- **Itsasoaren berotzea:** Bizkaiko golkoan, itsasoaren berotzea atzeman da 80ko hamarkadatik hona, tasa hauekin: $+0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko lehen 100 m-etako tenperatura kontuan hartzean (D2 estazioa); $+0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko gainazaleko tenperaturaren Donostiako Aquariumaren aurrean; eta $+0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko golko osoko gainazalean. Bero-muturrak ere handitu egin direla ikusten da. Behatutako Bizkaiko golkoaren mailako itsasoaren berotzea lotuta egongo litzateke lpar-ekialdeko Atlantikoaren berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano/atmosfera interakzio-patroiekin bat.
- **Bero-boladak eta itsasoko hotz-boladak:** Ozeanoaren berotzearen ondorioz, errazagoa da itsasoko bero-boladak egotea eta zailagoa hotz-boladak egotea. Gertakari horiek 1980–2022 aldian izandako bilakaera aztertu da, Donostiako Aquariumean neurtutako itsasoko uraren gainazaleko tenperaturaren datuetan oinarrituta. Epe luzeko joera eta itsasoko bero-boladak kontuan hartzean, ikusten da nabarmen handitu direla bero-boladen kopurua ($+0,91 \pm 0,19$ olatu hamarkada bakoitzeko), batez besteko iraupenak ($+2,98 \pm 0,90$ egun hamarkada bakoitzeko) batez besteko intentsitateak ($+0,39 \pm 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko), intentsitate maximoa ($+0,67 \pm 0,90\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko) eta intentsitate metatua ($+25,28 \pm 7,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko). Aldiz, hotz-boladei dagokienez, halakoen kopuruaren beherakada nabarmena detektatu da ($-0,65 \pm 0,22$ olatu hamarkada bakoitzeko). Batez besteko iraupenak beheranzko joera du, baina aldaketa ez da esanguratsua ($-1,61 \pm 0,93$ egun hamarkada bakoitzeko). Bestalde, murrizketa esanguratsua ikusi da hotz-boladen batez besteko intentsitateetan ($-0,37 \pm 0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko), intentsitate maximoan ($-0,38 \pm 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ hamarkada bakoitzeko) eta intentsitate metatuetan ($-12,31 \pm 5,09$

4. Conclusiones

- **Calentamiento del mar:** En el golfo de Vizcaya se aprecia un calentamiento del mar a partir de los años 80, con tasas que oscilan entre $+0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década al integrar la temperatura en los primeros 100 m (estación D2), $+0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década de la temperatura superficial frente al Aquarium de Donostia / San Sebastián, y $+0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década para la superficie de todo el golfo. También se observa un incremento de los extremos de calor. El calentamiento del mar a nivel del golfo de Vizcaya observado estaría asociado al calentamiento del Atlántico noreste, ligado a patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático.
- **Olas de calor y olas de frío marinas:** El calentamiento del océano provoca que las olas de calor marinas sean más probables y menos probables las olas de frío. Se ha analizado la evolución de estos episodios en el periodo 1980–2022 a partir de los datos de temperatura superficial del agua de mar medida en el Aquarium de Donostia / San Sebastián. Al considerar tanto la tendencia de largo plazo como las olas de calor marinas, se observa un aumento significativo del número de olas de calor ($+0,91 \pm 0,19$ olas por década), de sus duraciones medias ($+2,98 \pm 0,90$ días por década) y de sus intensidades media ($+0,39 \pm 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década), intensidad máxima ($+0,67 \pm 0,90\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década) e intensidad acumulada ($+25,28 \pm 7,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década). En cambio, se detecta una disminución significativa del número de olas de frío ($-0,65 \pm 0,22$ olas por década), duración media que tiende a disminuir, aunque el cambio no es significativo ($-1,61 \pm 0,93$ días por década) y la reducción significativa de sus intensidades medias ($-0,37 \pm 0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década), máxima ($-0,38 \pm 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década) y acumuladas ($-12,31 \pm 5,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ acumulados por década). No se han registrado olas de frío desde 2016.

°C hamarkada bakoitzeko). Ez da hotz-boladarik erregistratu 2016az geroztik.

- **Itsas mailaren igoera:** Bizkaiko golkoko kostaldeko itsasoaren batez besteko maila, golkoko kostaldean zehar mareografoetan erregistratua, +1,1 eta +3,42 cm arteko tasan igotzen ari da hamarkada bakoitzeko. Golkorearen eremu osoan, urruneko sentsoreek jasotako neurriek +2,81 cm-ko igoera adierazten dute hamarkada bakoitzeko. Tasa horiek zertxobait handiagoak dira, baina bat datoz Behatokiaren aurretiazko azterketetan serie beretarako zenbatetsitakoekin. Detektatutako igoera bat dator maila globaleko igoerarekin. Egindako analisiak berresten du, halaber, itsas mailaren igoera bizkortzen ari dela eremuan azken hiru hamarkadetan XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aurretiko azterketekin bat etorritik.
- **Olatuak:** Azken 30 urteetan (1991–2022), ez da joerarik ikusten olatuen batez besteko baldintzetan, baina bai muturreko baldintza jakin batzuen igoera (olatu-altuera adierazgarriaren igoera esanguratsua: +14 cm hamarkada bakoitzeko). Igoera hori zertxobait murriztu da 1991–2019 serieko analisiarekiko.
- **Hondartzen higadura:** Zarauzko hondartzak nolabaiteko higadura-maila du, 2010–2022 aldian kosta-lerroaren barrualderanzko atzerakada esanguratsuan islatzen dena. Seriea oraindik laburra denez, ezin da erabaki joera horiek itsas mailaren igoerarekin edo klima-aldaketaren beste efektu batzuekin lotura duten ala ez.
- **Ozeanoaren azidotzea:** Kostaldeko uretan egindako neurketa puntualetatik abiatuta egindako pH-aren aldakortasunaren analisiak aukera ematen du itsasoko uraren pH-aren jaitsiera-tasa (0,05 eta 0,07 pH-unitate bitartekoa) detektatzeko 2002–2022 aldian. Tasa hori zertxobait handiagoa da eskala globalean behatutakoa baino (–0,02 unitate hamarkada bakoitzeko), bai eta ozeano Atlantikoan (–0,013 unitate hamarkada bakoitzeko) eta Bizkaiko golkoko mendebaldeko kostaldean behatutakoa baino (–0,016 unitate hamarkada bakoitzeko). Horrek adierazten du Euskadiko kostaldean behatutako azidotze-prozesua ozeano globalaren azidotze-prozesuari lotuta egon daitekeela. Edonola ere, beharrezkoa da pH-aren aldakuntzari

- **Ascenso del nivel del mar:** El nivel medio del mar en la costa del golfo de Vizcaya, registrado en los mareógrafos a lo largo de la costa del golfo, está ascendiendo a una tasa de entre +1,1 y +3,42 cm/década. En toda el área del golfo, las medidas a partir de sensores remotos indican un ascenso de +2,81 cm/década. Estas tasas son ligeramente superiores, si bien consistentes con las estimadas para las mismas series en estudios previos del Observatorio. El ascenso detectado es consistente con el ascenso a nivel global. El análisis realizado también confirma que el ascenso del nivel del mar se está acelerando en la zona en las 3 últimas décadas respecto al ascenso medio en el siglo XX, en coherencia con estudios previos.
- **Oleaje:** En los últimos 30 años (1991–2022) no se observa una tendencia en las condiciones medias del oleaje, pero sí un aumento en ciertas condiciones extremas (aumento significativo de la altura de ola significativa en +14 cm por década). Este aumento se ha reducido ligeramente respecto al análisis para la serie 1991–2019.
- **Erosión de playas:** La playa de Zarautz está siendo sujeta a un cierto grado de erosión reflejado en un retroceso significativo hacia el interior de la línea de costa en el periodo 2010–2022. Siendo esta serie aún corta, no es posible todavía asociar o descartar estas tendencias al ascenso del nivel del mar u otros efectos del cambio climático.
- **Acidificación del océano:** El análisis de la variabilidad del pH a partir de medidas puntuales realizadas en las aguas costeras permite detectar una tasa de descenso del pH del agua de mar de entre 0,05 y 0,07 unidades de pH por década en el periodo 2002–2022. Esta tasa es ligeramente superior a la observada en el océano global (–0,02 unidades por década), en el océano Atlántico (–0,013 unidades por década) y en la costa occidental del golfo de Vizcaya (–0,016 unidades por década). Esto sugiere que el proceso de acidificación observado en la costa vasca podría estar asociado en gran parte al proceso de acidificación oceánica global, si bien es necesario profundizar en el análisis de la variación del pH por otros factores como la producción primaria.

buruzko analisisan sakontzea (ekoizpen primarioa bezalako faktoreak kontuan hartuz, besteak beste).

- **Bero-boladen efektuaren analisia:** Itsasoko bero-boladak uraren berotze-gertakari diskretu, luze eta anomaloak dira. Donostiako Aquariumean erregistratutako gainazaleko tenperaturaren datuetan oinarrituta, ikusten da 1980-2022 aldian nabarmen handitu zirela bero-boladen kopurua, batez besteko iraupena eta intentsitatea. Muturreko gertakari horiek ondorio biologikoak eta ekologikoak eragin ditzakete.

- Planktoneko mikrobio-komunitatearen erantzuna: Udako itsasoko bero-boladen ondoren, ez da aldaketarik ikusi fluxu-zitometriaren bidez bereiz daitezkeen hiru plankton-talde ugarienen (bakterioplankton heterotrofoa, *Synechococcus* spp. generoko zianobakterioak eta pikofitoplankton eukariotoa) hileroko ugaritasunean. Badirudi *Synechococcus* spp.-ren ugaritasuna batezbestekoa baino txikiagoa dela, baina joera hori ezin izan da estatistikoki egiaztatu, azterketa-aldiak iraupen laburra duelako.

- Antxoa gazteen hazkundearen erantzuna: Emaitez erakusten dutenez, batez besteko tenperaturaren eta metatutako anomalia termikoen (klimatologiaren desbideratzeen) igoerak gazteen tamaina handitzea dakar. Emaiza hori bat dator zera adierazten duten beste azterketa batzuekin: tenperaturak hasierako hazkundera bizkortzen du ur hotzagoetan garatzen diren kideen aldean, baina bizitza helduan zehar lortzen duten gehieneko neurria txikiagoa da. Ildo horretan, 2000 urteaz geroztik antxoa helduetan adinaren arabera behatutako pisuaren eta luzeraren murrizketa koherentea da azterketa hone-tan antxoa gazteen neurriari buruz lortutako emaitzekin, itsasoaren berotzearekin eta populazioaren ugaritasunarekin lotuta dagoela dirudiena.

- **Análisis del efecto de las olas de calor:** Las olas de calor marinas son episodios discretos, prolongados y anómalos de calentamiento del agua. A partir de los datos de temperatura superficial registrados en el Aquarium de Donostia / San Sebastián, se observa para el periodo 1980-2022 un aumento significativo del número de olas de calor, de sus duraciones medias y de su intensidad. Estos eventos extremos pueden tener importantes repercusiones biológicas y ecológicas.

- Respuesta de la comunidad microbiana del plancton: No se han observado cambios en la abundancia mensual de los tres grupos de plancton más abundantes que se pueden distinguir mediante citometría de flujo (bacterioplankton heterótrofo, cianobacterias del género *Synechococcus* spp. y picofitoplancton eucariota) después de las olas de calor marinas estivales. La abundancia de *Synechococcus* spp. parece ser inferior a la media, aunque esta tendencia no ha podido ser verificada estadísticamente dada la corta duración del periodo de estudios.

- Respuesta en el crecimiento de los juveniles de anchoa: Los resultados indican que el aumento de la temperatura media y de las anomalías térmicas acumuladas (es decir, desviaciones de la climatología) inducen un aumento del tamaño de los juveniles. Este resultado es acorde con otros estudios que indican que la temperatura acelera el crecimiento inicial con respecto a los congéneres que se desarrollan en aguas más frías, pero la talla máxima que alcanzan a lo largo de su vida adulta es menor. En este sentido, la disminución del peso y longitud por edad observada en las anchoas adultas desde 2000, y que parece estar asociado al calentamiento del mar y la abundancia de la población, es coherente con los resultados obtenidos en este estudio para la talla de los juveniles.

Adierazlea Indicador	Deskribapena Descripción	Estazioa/Eremua Estación/Zona	Unitatea Unidad	Aldia Período	Joera (/hamarkada) Tendencia (/década)	p balioa p-valor
Itsasoko tenperatura Temperatura del mar	SST Aquarium	Aquarium	°C	1946–2022	$0,0674 \pm 0,0151$	0,0000
	SST Aquarium	Aquarium	°C	1980–2022	$0,2559 \pm 0,0316$	0,0055
	SST satelitea AQUA	Bizkaiko golkoa	°C	2003–2022	$0,1469 \pm 0,0319$	0,0000
	SST satelitea OSTIA	Bizkaiko golkoa	°C	1981–2022	$0,1995 \pm 0,0344$	0,0000
	T sak. 0–100 m	D2	°C	1993–2022	$0,1360 \pm 0,0349$	0,0000
Nahaste-geruza eta estratifikazioa Capa de mezcla y estratificación	14 °C-ko isotermaren sakonera (m)	D2	m	1993–2022	$-2,2065 \pm 1,6606$	0,1854
Itsas maila Nivel del mar	IBBM Vigo	Vigo2	cm	1993–2022	$1,7189 \pm 0,5474$	0,0046
	IBBM Gijón 2	Gijón 2	cm	1995–2022	$1,0094 \pm 0,4886$	0,0489
	IBBM Santander 2	Santander2	cm	1992–2022	$2,1280 \pm 0,3012$	0,0000
	IBBM Brest	Brest	cm	1846–2022	$1,2892 \pm 0,0537$	0,0000
	NMM Brest	Brest	cm	1992–2022	$2,9323 \pm 0,4100$	0,0000
	IBBM Coruña	Coruña 2	cm	1992–2022	$3,4164 \pm 0,8051$	0,0003
	IBBM Coruña	Coruña	cm	1943–2022	$2,0215 \pm 0,1903$	0,0000
	IBBM Bilbo3	Bilbo3	cm	1992–2022	$3,0758 \pm 0,2839$	0,0000
	IBBM Pasaia	Pasaia	cm	2007–2020	$4,8900 \pm 0,8700$	0,0000
	IBBM satelitea	Bizkaiko golkoa	cm	1993–2022	$2,8171 \pm 0,3505$	0,0000
Olatuak Oleaje	Hs	Bilbo-Bizkaiko buia	cm	1991–2022	$1,4257 \pm 2,7302$	0,6015
	Hs90	Bilbo-Bizkaiko buia	cm	1991–2022	$14,7026 \pm 6,6636$	0,0280
Kosta-lerroa Línea de costa	Itsasbehera	Zarautz	m	2010–2020	$-0,8920 \pm 9,6419$	
	Itsasgora	Zarautz	m	2010–2020	$-3,6106 \pm 4,3895$	
Hondartzen higadura Erosión playas	Mareaz gaildiko eremua	Zarautz	m ²	2010–2021	$-3,482,0 \pm 5,354,0$	0,5170
	Marearteko eremua	Zarautz	m ²	2010–2021	$1,503,0 \pm 9,520,0$	0,8750

Glosarioa

Ozeanoaren azidotzea: ozeanoaren pH-a murriztea, beste aldaketa kimiko batzuekin batera gertatzen dena –batez ere karbonato- eta bikarbonato-ioien mailenak–, epe luze batean –normalean hamarkada batzuetan edo luzaroago–, atmosferako CO_2 atzitzeak eragindakoa nagusiki, baina substantzia kimiko batzuk ozeanora gehitzearen edo bertatik kentzearen ondorioz ere gerta daitekeena. Ozeanoaren azidotze antropogenikoak giza jarduerak eragindako pH-aren murrizketaren osagaiari egiten dio erreferentzia.

Hondartzaren batez besteko zabaleria: kosta-leerroaren puntu bakoitzaren eta oinarri-leerroaren artean kostaldearekiko nahiko perpendikularrean dagoen distantzia garbia.

Anomalia: aldagai baten desbideratzea batez besteko balioarekiko erreferentzia-aldi batean.

Biodibertsitatea: edo dibertsitate biologikoa. Organismo bizien eta horiek kide diren konplexu ekologikoen arteko aldakortasuna, barnean hartuz espezieen barneko, espezie arteko eta ekosistemen arteko dibertsitatea.

Biomasa: materia organikoaren masa eremu espeziфикo batean.

Berotze globala: munduko gainazalaren batez besteko tenperaturaren igoeraren batezbestekoa, 30 urteko aldi bati dagokiona, edo urte edo hamarkada jakin batean zentratutako 30 urteko aldiari, industriaurreko mailekin alderatuta adierazia.

Klima-aldaketa: klimaren egoeraren aldaketa, batezbestekoaren aldaketen edo bere propietateen aldakortasunaren bidez identifika daitekeena (adibidez, estatistikoak erabiliz), eta epe luze batean irauten duena, hamarkadetan edo luzaroago.

Glosario

Acidificación del océano: reducción del pH del océano, acompañada de otros cambios químicos (principalmente en los niveles de iones de carbonato y bicarbonato), durante un periodo prolongado, normalmente décadas o más, que es causada principalmente por la captación de CO_2 de la atmósfera, pero también puede ser causada por otras adiciones químicas o sustracciones del océano. La acidificación antropogénica se refiere a la componente de reducción del pH causada por la actividad humana.

Anchura media de la playa: distancia neta en dirección sensiblemente perpendicular a la costa, entre cada punto de la línea de costa y la línea base.

Anomalía: desviación de una variable de su valor promediado durante un periodo de referencia.

Biodiversidad: o diversidad biológica. Variabilidad entre los organismos vivos de todas las fuentes y de los complejos ecológicos de los que forman parte; esto incluye la diversidad dentro de las especies, entre especies y ecosistemas.

Biomasa: masa de materia orgánica en una zona específica.

Calentamiento global: aumento de la temperatura media de la superficie mundial promediado durante un periodo de 30 años, o el periodo de 30 años centrado en un año o una década determinados, expresado en relación con los niveles preindustriales.

Cambio climático: cambio en el estado del clima que puede ser identificado (ej. utilizando estadísticos) mediante cambios en la media o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado, décadas o más.

Cambio del nivel del mar (aumento/descenso del nivel del mar): cambios en la altura del nivel del mar, tanto a nivel mundial como local en

Itsas mailaren aldaketa (itsas mailaren igoe-ra/jaitsiera): itsas mailaren altueran izandako aldaketak, mundu mailan nahiz tokiko mailan izandakoak urtaro-eskaletan, urtekoetan edo denbora luzeagokoetan, honako faktore hauen ondorioz: (1) ozeanoaren bolumenaren aldaketa, ozeanoko ur-masa aldatzeagatik (adibidez, glaziarrek eta izotz-geruzak urtzearen ondorioz); (2) ozeanoaren bolumenaren aldaketak, ozeanoko uraren dentsitatean izandako aldaketengatik (espantsioa baldintza beroagoetan); (3) aldaketak ozeanoko arroetan, eta aldaketak Lurraren grabitazio- eta errotazio-eremuetan; eta (4) lurraren subsidentzia edo goratzea.

Kostaldea: itsasotik gertuko lurra. 'Kostaldeko' terminoak erreferentzia egin diezaioke lehorreko zatia edo lehorreko prozesuen eragin handia duen itsas ingurunearen zatia. Horrela, kostaldea ez da oso sakona izaten, eta lurretik gertu egoten da.

Estratifikazioa: ura nahasteko hesi gisa jarduten duten zenbait propietate –hala nola gazitasuna, dentsitatea eta ur-zutabeko tenperatura– dituzten ozeanoko ur-geruza horizontalak sortzeko prozesua. Gainazaleko estratifikazioa indartzeak, normalean, azaleko ur beroagoak eta azidotzea eragiten ditu geruza horretan, eta uretako oxigeno-mailak murriztea geruza sakonagoetan.

Klima-muturra (edo muturreko gertakaria): klima-aldagai baten balioa aldagaiaren balio-tarte behatuen goiko (edo beheko) muturretatik gertu dagoen atalase-balio baten gainetik (edo azpitik).

Muturreko gertakari meteorologikoa: urteko leku eta denbora jakin batzuetan arraroa den gertakaria. 'Arraro' kontzeptua modu batera baino gehiagotara defini daiteke, baina, normalean, muturreko gertaera meteorologiko baten 10 edo 90 pertzentilak bezain arraroa izango litzateke, behaketetatik abiatuta kalkulaturako probabilitate-dentsitatearen funtzioari dagokionez.

Isoterma: tenperatura bera duten puntuak konektatzen dituzten lerroa, itsasoko gainazalean nahiz geruza sakonetan.

Oinarri-lerroa: hondartzaren goialdean dauden ingerada zurrunen bidez eta 'iraunkortzat' jotzen

escalas estacionales, anuales o de tiempo más largo debido a (1) un cambio en el volumen del océano como resultado de un cambio en la masa del agua en el océano (ej. debido a la fusión de glaciares y capas de hielo), (2) cambios en el volumen del océano como resultado de cambios en la densidad del agua del océano (expansión en condiciones más cálidas), (3) cambios en la forma de las cuencas oceánicas y cambios en los campos gravitacionales y rotacionales de la Tierra, y (4) subsidencia o elevación de la tierra.

Costa: tierra cerca del mar. El término 'costero' puede referirse a la parte terrestre o la parte del medio marino que está fuertemente influenciada por procesos terrestres. Así, la zona costera es generalmente poco profunda y cercana a tierra.

Estratificación: proceso de formación de capas horizontal de agua oceánica con diferentes propiedades, como salinidad, densidad y temperatura en la columna de agua, que actúan como barrera para la mezcla de agua. El fortalecimiento de la estratificación superficial generalmente da lugar a aguas superficiales más cálidas y acidificación en esta capa y disminución de los niveles de oxígeno en el agua en las capas más profundas.

Extremo climático (o evento extremo): valor de una variable climática por encima (o por debajo) de un valor umbral cerca de los extremos superior (o inferior) del intervalo de valores observados de la variable.

Evento meteorológico extremo: evento que es raro en un lugar y tiempo particulares del año. Las definiciones de 'raro' varían, pero un evento meteorológico extremo normalmente sería tan raro como el percentil 10 o 90 de una función de densidad de probabilidad estimada a partir de las observaciones.

Isoterma: línea que conecta puntos con igual temperatura, ya sean en la superficie del mar como en capas profundas.

Línea base: línea de referencia definida por medio de los contornos rígidos existentes en la parte alta de la playa, así como por la posición de los elementos considerados 'permanentes' como puede ser el pie de duna, pasarelas u otros elementos de urbanización perimetral.

diren elementuen posizioaren bidez definitutako erreferentzia-lerroa, hala nola duna-oina, pasabideak edo perimetroko urbanizazioko beste elementu batzuk.

Itsasoko bero-bolada: itsasoaren gainazalaren muturreko tenperatura-aldia, egunak nahiz hila-beteak iraun ditzakeena eta milaka kilometrotaraino zabaltu daitekeena.

Mareaz gairikoa eremua: batez besteko itsasgora-kotaren gainetik dagoen hondartza-eremua. Lortutako kosta-lerroak eta oinarri-lerro esaten zaion erreferentziako lerroak mugatzen dute.

Marearteko eremua: batez besteko itsasgora- eta itsasbehera-koten artean dagoen hondartza-eremua.

pH-a: azidotasunaren neurri adimentsionala, hidrogeno ioien (H^+) kontzentrazioa ren arabera. pH-a neurtzeko, eskala logaritmiko bat erabiltzen da, non $pH = -\log_{10}(H^+)$. Horrela, pH-aren unitate bateko murrizketa H^+ -en kontzentrazioa edo azidotasuna 10 aldiz handitzea dagokio.

Ekoizpen primarioa: landareek eta mikroorganismoek konposatu organikoak sintetizatzea, lurrean eta ozeanoan, nagusiki fotosintesi bidez, argia eta CO_2 energia- eta karbono-iturri gisa erabiliz, hurrenez hurren.

Klima-aldakortasuna: aldagaien desbideratzeak batez besteko egoera jakin batekin alderatuta (muturreko kasuak eta abar barne), banakako gertakari meteorologikoetatik haragoko espazio- eta denbora-eskala guztietan. Aldakortasuna intrintsekoa izan daiteke, klima-sistemako barne-prozesuen gorabeherak direla-eta (barne-aldakortasuna), edo estrintsekoa, kanpoko behartze natural edo antropogenikoaren aldaketan ondoriozkoa (aldakortasun behartua).

Ola de calor marina: periodo de temperatura extrema en la superficie del mar que persiste de días a meses y que puede extenderse hasta miles de kilómetros.

Superficie supramareal: área de la playa que se encuentra por encima de la cota de pleamar media, y está limitado por el contorno definido por la línea de costa obtenida y la línea de referencia llamada línea de base.

Superficie intermareal: área de la playa que se encuentra entre las cotas de pleamar y bajamar medias.

pH: medida adimensional de la acidez dada por la concentración de iones de hidrógeno (H^+). El pH se mide en una escala logarítmica donde $pH = -\log_{10}(H^+)$. Así, una disminución del pH de 1 unidad corresponde a un aumento de 10 veces en la concentración de H^+ , o acidez.

Producción primaria: síntesis de compuestos orgánicos por plantas y microorganismos, en tierra y océano, principalmente mediante fotosíntesis utilizando luz y CO_2 como fuentes de energía y carbono, respectivamente.

Variabilidad climática: desviaciones de variables respecto a un estado medio determinado (incluidos los casos extremos, etc.) en todas las escalas espaciales y temporales, más allá de eventos meteorológicos individuales. La variabilidad puede ser intrínseca, debido a fluctuaciones de los procesos internos al sistema climático (variabilidad interna), o extrínseca, debido a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad forzada).

Erreferentziak / Referencias

Chust, G., M. González, A. Fontán, M. Revilla, M. Chifflet, A. Borja, I. Muxika, Y. Sagarminaga, A. Caballero, I. De Santiago, I. Epelde, P. Liria, A. Abalia, A. Lanzén, L. Alonso, L. Rincon, L. Ibaibarriaga, R. Garnier, J. Franco, E. Villarino, M. Valle, U. Cotano, J. Larreta, L. Cuesta, E. Arevalo, D. Essel, N. Aldanondo (2023). Servicios de Asistencia técnica para el seguimiento y análisis de indicadores físico-químicos y biológicos del cambio climático en el litoral de Gipuzkoa en relación a la evolución de dichos indicadores, así como posibles escenarios, impactos y adaptación futuros. Informe final elaborado por AZTI para Naturklima. 96 pp.

Aldanondo, N., Cotano, U., Etxebeste, E., Irigoien, X., Álvarez, P., Martínez de Murguía, A., & Herrero, D.L. (2008). Validation of daily increments deposition in the otoliths of European anchovy larvae (*Engraulis encrasicolus* L.) reared under different temperature conditions. *Fisheries Research*, 93, 257–264.

Aldanondo, N., Cotano, U., Goikoetxea, N., Boyra, G., Ibaibarriaga, L., & Irigoien, X. (2016). Interannual differences in growth and hatch-date distributions of early juvenile European anchovy in the Bay of Biscay: implications for recruitment. *Fisheries Oceanography*, 25, 147–163.

Albaina, A., Irigoien, X., Aldalur, U., Cotano, U., Santos, M., Boyra, G., & Estonba, A. (2015). A real-time PCR assay to estimate invertebrate and fish predation on anchovy eggs in the Bay of Biscay. *Progress in Oceanography*, 131, 82–99.

Amaya, D., Jacox, M., Fewings, M., Saba, V., Malte, F., Rykaczewski, R., Ross, A.C., Stock, C.A., Capotondi, A., Petrik, C.M., Bograd, S.J., Alexander, M.A., Cheng, W., Hermann, A.J., Kearney, K.A., & Powell, B.S. (2023). Marine heatwaves need clear definitions so coastal communities can adapt. *Nature*, 616, 29–32.

Arula, T., Laur, K., Simm, M., & Ojaveer, H. (2015). Dual impact of temperature on growth and mortality of marine fish larvae in a shallow estuarine habitat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167, 326–335.

Basilone, G., Guisande, C., Patti, B., Mazzola, S., Cut-

titta, A., Bonanno, A., & Kallianiotis, A. (2004). Linking habitat conditions and growth in the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *Fisheries Research*, 68, 9–19.

Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L., Kairo, J.G., Arístegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M.S., Levin, L., O'Donoghue, S., Cuicapusa, S.R.P., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., & Williamson, P. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Bird, E.C.F. (1985). *Coastline Changes: a global review*. New York: Wiley & Sons.

Boëns, A., Ernande, B., Petitgas, P., & Lebigre, C. (2023). Different mechanisms underpin the decline in growth of anchovies and sardines of the Bay of Biscay. *Evolutionary Applications*, 16, 1393–1411.

Bond, N.A., Cronin, M.F., Freeland, H., & Mantua, N. (2015). Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophysical Research Letters*, 42, 3414–3420.

Borja, A., Amouroux, D., Anschutz, P., Gómez-Gesteira, M., Uyarra, M.C., & Valdés, L. (2019). The Bay of Biscay. In: *World Seas: an Environmental Evaluation*. pp. 113–152.

Borja, A., Fontán, A., Sáez, J., & Valencia, V. (2008). Climate, oceanography, and recruitment: the case of the Bay of Biscay anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *Fisheries Oceanography*, 17, 477–493.

Boyra, G., Martínez, U., Cotano, U., Santos, M., Irigoien, X., & Uriarte, A. (2013). Acoustic surveys for juvenile anchovy in the Bay of Biscay: abundance estimate as an indicator of the next year's recruitment and spatial distribution patterns. *ICES Journal of Marine Science*, 70, 1354–1368.

Brett, J.R. (1971). Energetic Responses of Salmon to Temperature. A Study of Some Thermal Relations in the Physiology and Freshwater Ecology of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*). *American Zoologist*, 11, 99–113.

Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., & Scott, T. (2017). A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: the West Europe Pressure Anomaly: WEST EUROPE PRESSURE ANOMALY. *Geophysical Research Letters*, 44.

Cavaleri, L., Fox-Kemper, B., & Hemer, M. (2012). Wind Waves in the Coupled Climate System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1651–1661.

Cazenave, A., Palanisamy, H., & Ablain, M. (2018). Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? What are the new challenges?. *Advances in Space Research*, 62, 1639–1653.

Cermeño, P., Uriarte, A., Morales-Nin, B., Cotano, U., & Álvarez, P. (2008). Setting up interpretation criteria for ageing juvenile european anchovy otoliths. *Scientia Marina*, 72, 733–742.

Checkley, D., Alheit, J., Oozeki, Y., Roy, C. Ed. (2009). *Climate Change and Small Pelagic Fish*. Cambridge University Press.

Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K.E., Boyer, T., Mann, M.E., Zhu, J., Wang, F., Yu, F., Locarnini, R., Fasullo, J., Zheng, F., Li, Y., Zhang, B., Wan, L., Chen, X., Wang, D., Feng, L., Song, X., Liu, Y., Reseghetti, F., Simoncelli, S., Gouretski, V., Chen, G., Mishonov, A., Reagan, J., Von Schuckmann, K., Pan, Y., Tan, Z., Zhu, Y., Wei, W., Li, G., Ren, Q., Cao, L., & Lu, Y. (2024). New Record Ocean Temperatures and Related Climate Indicators in 2023. *Advances in Atmospheric Sciences*, 41, 1068–1082.

Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K.E., Fasullo, J., Boye, T., Mann, M.E., Zhu, J., Wang, F., Locarnini, R., Li, Y., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Feng, L., Song, X., Liu, Y., Reseghetti, F., Simoncelli, S., Gouretski, V., Chen, G., Mishonov, A., Reagan, J., & Li, G. (2023). Another Year of Record Heat for the Oceans. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40, 963–974.

Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., & Borja, Á. (2010). Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87, 113–124.

Chust, G., Gonzalez, M., Fontan, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Cotano, U., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarmínaga, Y., Caballero, A., de Santiago, I., Epelde, I., Liria, P., Ibaibarriaga, L., Garnier, R., Franco, J., Villarino, E., Irigoien, X., Fernandes-Salvador, J.A., Uriarte, A., Esteban, X., Orue-Echevarria, D., Figueira, T., & Uriarte, A. (2022). Climate regime shifts and biodiversity redistribution on the Bay of Biscay. *Science of The Total Environment*, 803, 149622.

Costoya, X., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., & Santos, F. (2015). Changes in sea surface temperature seasonality in the Bay of Biscay over the last decades (1982–2014). *Journal of Marine Systems*, 150, 91–101.

Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F., Marcos, M., Piecuch, C., Berk, K., & Jensen, J. (2019). Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, 9.

de Santiago, Camus, P., Gonzalez, M., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., del Campo, A., & Uriarte, A. (2021). Impact of climate change on beach erosion in the Basque Coast (NE Spain). *Coastal Engineering*, 167, 103916.

de Santiago, I., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., & González, M. (2020). Estudio de inundabilidad por Cambio Climático en el entorno de las playas del municipio de Donostia-San Sebastián.

Duarte, L., Viejo, R.M., Martínez, B., deCastro, 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.

Fernández-Corredor, E., Albo-Puigserver, M., Penino, M.G., Bellido, J.M., & Coll, M. (2021). Influence of environmental factors on different life stages of European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and European sardine (*Sardina pilchardus*) from the Mediterranean Sea: A literature review. *Regional Studies in Marine Science*, 41.

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, & Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L.

Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362.

Friedlingstein, P., Andrew, R.M., Rogelj, J., Peters, G.P., Canadell, J.G., Knutti, R., Luderer, G., Raupach, M.R., Schaeffer, M., van Vuuren, D.P., & Le Quéré, C. (2014). Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. *Nature geoscience*, 7, 709–715.

García-Soto, C., & Pingree, R.D. (2012). Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and sea surface temperature in the Bay of Biscay and adjacent regions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 92, 213–234.

Goikoetxea, N., Borja, Á., Fontán, A., González, M., & Valencia, V. (2009). Trends and anomalies in sea-surface temperature, observed over the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research, 100 Years of Research within the Bay of Biscay - XI International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay*, 29, 1060–1069.

González, M., & Fontán, A. (2013) Filtros digitales para suprimir la variabilidad estacional y plurianual en series climáticas de datos. *Revista de Investigación Marina, AZTI-Tecnalia*, 20, 71–76.

Green, B.S., & Fisher, R. (2004). Temperature influences swimming speed, growth and larval duration in coral reef fish larvae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 299, 115–132.

Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, & R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422.

Hanslow, D.J. (2007). Beach Erosion Trend Measure-

ment: A comparison of Trend Indicators. *Journal of Coastal Research*, 50, 588–593.

Harris, R.M.B., Beaumont, L.J., Vance, T.R., Tozer, C.R., Remenyi, T.A., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Mitchell, P.J., Nicotra, A.B., McGregor, S., Andrew, N.R., Letnic, M., Kearney, M.R., Wernberg, T., Hutley, L.B., Chambers, L.E., Fletcher, M.-S., Keatley, M.R., Woodward, C.A., Williamson, G., Duke, N.C., & Bowman, D.M.J.S. (2018). Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change*, 8, 579–287.

He, Q., & Silliman, B.R. (2019). Climate Change, Human Impacts, and Coastal Ecosystems in the Anthropocene. *Current Biology*, 29(19), R1021–R1035.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganopolski, A., & Klein, R.J.T. (2013). A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change*, 111, 150–158.

Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., Benthuyssen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Feng, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227–238.

Hobday, A., Oliver, E., Gupta, A., Benthuyssen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N., Moore, P., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. (2018a). Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography*, 31.

Hobday, A., Oliver, E., Gupta, A., Benthuyssen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N., Moore, P., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. (2018b) Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography*, 31.

Holbrook, N.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Benthuyssen, J.A., Feng, M., Oliver, E.C.J., Alexander, L.V., Burrows, M.T., Donat, M.G., Hobday, A.J., Moore, P.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., & Wernberg, T. (2019). A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nature Communications*, 10.

Houde, E.D. (1987). Fish early life dynamics and recruitment variability. *American Fisheries Society Symposium*, 2, 17–29.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adapta-*

tion, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.

IPCC, 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp.

Irigoién, X., Fiksen, Ø., Cotano, U., Uriarte, A., Alvarez, P., Arrizabalaga, H., Boyra, G., Santos, M., Sagarminaga, Y., Otheguy, P., Etxebeste, E., Zarauz, L., Artetxe, I., & Motos, L. (2007). Could Biscay Bay Anchovy recruit through a spatial loophole?. *Progress in Oceanography*, 74, 132–148.

Izquierdo, P., Rico, J.M., Taboada, F.G., González-Gil, R., & Arrontes, J. (2022). Characterization of marine heatwaves in the Cantabrian Sea, SW Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 274.

Jenkins, S., Smith, C., Allen, M., & Grainger, R. (2023). Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5°C. *Nature Climate Change*, 13, 127–129.

Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Delvallee, E., Desramaut, N., Oliveros, C., & Pedreros, R. (2011). Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. *Journal of Climate*, 24, 641–652.

Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, & T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based

Projections and Near-Term Information. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672.

Li, G., Cheng, L., Zhu, J., Trenberth, K.E., Mann, M.E., & Abraham, J.P. (2020). Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change*, 10, 1116–1123.

Liria, P., Chust, G., Epelde, I., & Caballero, A. (2011). Extreme Wave Flood-Risk Mapping Within the Basque Coast. *Journal of Coastal Research*, 225–229.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8, 6641.

Ma, D., Gregor, L., & Gruber, N. (2023). Four decades of trends and drivers of global surface ocean acidification. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007765.

Martínez, J., Leonelli, F.E., García-Ladona, E., Garabou, J., Kersting, D.K., Bensoussan, N., & Pisano, A. (2023). Evolution of marine heatwaves in warming seas: the Mediterranean Sea case study. *Frontiers in Marine Science*, 10.

May, H.M.A., & Jenkins, G.P. (1992). Patterns of settlement and growth of juvenile flounder *Rhombosolea tapirina* determined from otolith microstructure. *Marine Ecology Progress Series*, 79, 203–204.

Maynou, F., Sabatés, A., & Raya, V. (2020). Changes in the spawning habitat of two small pelagic fish in the Northwestern Mediterranean. *Fisheries Oceanography*, 29, 201–213.

McGovern, E., Schilder, J., Artioli, Y., Birchenough, S., Dupont, S., Findlay, H., Skjelvan, I., Skogen, M.D., Álvarez, M., Büsher, J.V., Chierici, M., Aagaard Christensen, J.P., Diaz, P.L., Grage, A., Gregor, L., Humphreys, M., Järnegen, J., Knockaert, M., Krakau, M., Nogueira, M., Ólafsdóttir, S.R., von Schuckmann, K., Carreiro-Silva, M., Stiasny, M., Walsham, P., Widdicombe, S., Gehlen, M., Chau, T.T.T., Chevallier, F., Savoye, N., Clark, J., Gal-

li, G., Hordoir, R., & Moffat, C. (2022). *Ocean Acidification*. In: OSPAR, 2023: *The 2023 Quality Status Report for the North-East Atlantic*. OSPAR Commission, London.

Melet, A., Almar, R., Hemer, M., Le Cozannet, G., Meyssignac, B., & Ruggiero, P. (2020). Contribution of wave setup to projected coastal sea level changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2020JC016078.

Melet, A., Meyssignac, B., Almar, R., & Le Cozannet, G. (2018). Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise. *Nature Climate Change*, 8, 234–239.

Mentaschi, L., Voudoukas, M.I., Pekel, J.F., Vokouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8, 12876.

Millán, L., Santee, M.L., Lambert, A., Livesey, N.J., Werner, F., Schwartz, M.J., Pumphrey, H.C., Manney, G.L., Wang, Y., Su, H., Wu, L., Read, W.G., & Froidevaux, L. (2022) The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Hydration of the Stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099381.

Montero-Serra, I., Edwards, M., & Genner, M.J. (2015). Warming shelf seas drive the subtropicalization of European pelagic fish communities. *Global Change Biology*, 21, 144–153.

Morán, X.A.G., Alonso-Sáez, L., Nogueira, E., Ducklow, H.W., González, N., López-Urrutia, Á., Díaz-Pérez, L., Calvo-Díaz, A., Arandia-Gorostidi, N., & Huete-Stauffer, T.M. (2015). More, smaller bacteria in response to ocean's warming?. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20150371.

Mudelsee, M. (2010). *Climate time series analysis. Classical statistical and bootstrap methods*. 2nd ed.

Munday, P.L., Crawley, N.E., & Nilsson, G.E. (2009). Interacting effects of elevated temperature and ocean acidification on the aerobic performance of coral reef fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 388, 235–242.

Naturklima. (2022). Informe marino-costero.

Naturklima. (2023). Tendencia y evolución de indicadores de cambio climático y proyecciones futuras.

Oliver, E.C.J., Benthuisen, J.A., Darmaraki, S., Donat,

M.G., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Schlegel, R.W., & Sen Gupta, A. (2021). Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13, 313–342.

Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T., Moore, P.J., Smale, D.A., Alexander, L.V., Benthuisen, J.A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Scannell, H.A., Straub, S.C., & Wernberg, T. (2018b). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications*, 9.

Overland, J.E., Bond, N.A., & Adams, J.M. (2001). North Pacific Atmospheric and SST Anomalies in 1997: Links to ENSO?. *Fisheries Oceanography*, 10, 69–80.

Paris, F., Lecacheux, S., Idier, D., & Charles, E. (2014) Assessing wave climate trends in the Bay of Biscay through an intercomparison of wave hindcasts and reanalyses. *Ocean Dynamics*, 52.

Patti, B., Torri, M., & Cuttitta, A. (2020). General surface circulation controls the interannual fluctuations of anchovy stock biomass in the Central Mediterranean Sea. *Scientific reports*, 10, 1554.

Peal, R., Worsfold, M., & Good, S. (2023). Comparing global trends in marine cold spells and marine heatwaves using reprocessed satellite data. Scientific reports and assessments. In: *7th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR7)*, [von Schuckmann, K., Moreira, L., Le Traon, P.-Y., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karsensen, J., & Neukermans, G.], Copernicus Publications, State Planet, 1-osr7, 3.

Peck, M.A., Reglero, P., Takahashi, M., & Catalán, I.A. (2013). Life cycle ecophysiology of small pelagic fish and climate-driven changes in populations. *Progress in Oceanography*, 116, 220–245.

Pinsky, M.L., Selden, R.L., & Kitchel, Z.J. (2020). Climate-Driven Shifts in Marine Species Ranges: Scaling from Organisms to Communities. *Annual Review of Marine Science*, 12, 153–179.

Pittman, K., Yúfera, M., Pavlidis, M., Geffen, A.J., Koven, W., Ribeiro, L., Zambonino-Infante, J.L., & Tandler, A. (2013). Fantastically plastic: fish larvae equipped for a new world. *Reviews in Aquaculture*, 5, S224–S267.

Pörtner, H.O., & Farrel, A.P. (2008). Physiology and Climate Change. *Science*, 322, 690–692.

Pörtner, H.O., & Knust, R. (2007). Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315, 95–97.

Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160, 320–332.

Reguero, B.G., Losada, I.J., & Méndez, F.J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10, 205.

Schlegel, R.W., Oliver, E.C.J., & Chen, K. (2021). Drivers of Marine Heatwaves in the Northwest Atlantic: The Role of Air–Sea Interaction During Onset and Decline. *Frontiers in Marine Science*, 8.

Sellitto, P., Podglajen, A., Belhadji, R., Boichu, M., Carboni, E., Cuesta, J., Duchamp, C., Kloss, C., Siddans, R., Bègue, N., Blarel, L., Jegou, F., Khaykin, S., Renard, J.B., & Legras, B. (2022). The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of 15th January 2022. *Communications Earth & Environment*, 3, 288.

Spies, B.T., & Steele, M.A. (2016). Effects of temperature and latitude on larval traits of two estuarine fishes in different estuary types. *Marine Ecology Progress Series*, 544, 243–255.

Taboada, F., Aldanondo, N., Fontán, A., Cotano, U., Álvarez, P., Erauskin-Extramiana, M., Irigoien, X., Fernandes-Salvador, J.A., Boyra, G., Uriarte, A., & Ibaibarriaga, L. (2023). Shrinking body size of European anchovy in the Bay of Biscay. *Global Change Biology*, 30, e17047.

Takasuka, A., & Aoki, I. (2006). Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in different waters. *Fisheries Oceanography*, 15: 139–149.

Thompson, R.O.R.Y. (1983). Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1077–1083.

Ulazia, A., Penalba, M., Ibarra-Berastegui, G., Ringwood, J., & Saénz, J. (2017). Wave energy trends over the Bay of Biscay and the consequences for wave energy converters. *Energy*, 141, 624–634.

Ummenhofer, C.C., & Meehl, G.A. (2017). Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philosophical Transactions of the*

Royal Society B: Biological Sciences, 372.

Valencia, V., Fontán, A., Goikoetxea, N., Chifflet, M., González, M., & López, A. (2019). Long-term evolution of the stratification, winter mixing and -S signature of upper water masses in the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 181, 124–134.

Valencia, V., Franco, J., Borja, A., & Fontán, A. (2004). Hydrography of the southeastern Bay of Biscay. Borja, A. and Collins, M. (Eds.) *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country. Elsevier Oceanography Series*, 70, 159–194.

Voerman, S.E., Llera, E., & Rico, J.M. (2013). Climate driven changes in subtidal kelp forest communities in NW Spain. *Marine Environmental Research*, 90, 119–127.

von Schuckmann, K., Minière, A., Gues, F., Cuesta-Valero, F. J., Kirchengast, G., Adusumilli, S., Straneo, F., Ablain, M., Allan, R. P., Barker, P. M., Beltrami, H., Blazquez, A., Boyer, T., Cheng, L., Church, J., Desbruyeres, D., Dolman, H., Domingues, C. M., García-García, A., Giglio, D., Gilson, J. E., Gorfer, M., Haimberger, L., Hakuba, M. Z., Hendricks, S., Hosoda, S., Johnson, G. C., Killick, R., King, B., Kolodziejczyk, N., Korosov, A., Krinner, G., Kuusela, M., Landerer, F. W., Langer, M., Laverigne, T., Lawrence, I., Li, Y., Lyman, J., Marti, F., Marzeion, B., Mayer, M., MacDougall, A. H., McDougall, T., Monselesan, D. P., Nitzbon, J., Otosaka, I., Peng, J., Purkey, S., Roemmich, D., Sato, K., Sato, K., Savita, A., Schweiger, A., Shepherd, A., Seneviratne, S. I., Simons, L., Slater, D. A., Slater, T., Steiner, A. K., Suga, T., Szekely, T., Thiery, W., Timmermans, M.-L., Vanderkelen, I., Wijffels, S. E., Wu, T., & Zemp, M. (2023). Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?. *Earth System Science Data*, 15, 1675–1709.

Wernberg, T., Bennett, S., Babcock, R.C., de Bettignies, T., Cure, K., Depczynski, M., Dufois, F., Fromont, J., Fulton, C.J., Hovey, R.K., Harvey, E.S., Holmes, T.H., Kendrick, G.A., Radford, B., Santana-Garcon, J., Saunders, B.J., Smale, D.A., Thomsen, M.S., Tuckett, C.A., Tuya, F., Vanderklift, M.A., & Wilson, S. (2016). Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem. *Science*, 353, 169–172.

WMO. (2023). State of the Global Climate 2022.

Woppelmann, G., Pouvreau, N., & Simon, B. (2006). Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dynamics*, 56, 487–497.

