



Itsasoko eta kostako txostena
Informe marino-costero

Klima-aldaketa gure itsas ekosistemak mugarri puntuetara eramaten ari da?

Klima-aldaketaren adierazleen joera eta bilakaera, eta ekosistemetako mugarri-puntuen analisisa

¿Está el cambio climático provocando puntos de no retorno en nuestros ecosistemas marinos?

Análisis de tendencias y evolución de indicadores de cambio climático y análisis de puntos de no retorno en ecosistemas

1. Sarrera	4	1. Introducción	4
1.1. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisia	6	1.1. Análisis de series temporales de indicadores de cambio climático	6
1.2. Klimako eta ekosistemetako . mugarri-puntuen (<i>tipping points</i>) eta erregimen-aldaketaren analisia	8	1.2. Análisis de los puntos de no retorno (<i>tipping points</i>) y cambios de régimen en el clima y ecosistemas	8
2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisia	9	2. Análisis de las series temporales de los indicadores de cambio climático	9
2.1. Itsasoko temperatura	9	2.1. Temperatura del mar	9
2.2. Gazitasuna	13	2.2. Salinidad	13
2.3. Estratifikazioa eta nahaste-geruza	15	2.3. Estratificación y capa de mezcla	15
2.4. Itsas maila	16	2.4. Nivel del mar	16
2.5. Olatuak	18	2.5. Oleaje	18
2.6. Kostaldeko higadura hondartzetan	19	2.6. Erosión costera en playas	19
2.7. Azidotzea (pH)	23	2.7. Acidificación (pH)	23
3. Mugarri-puntuen (<i>tipping points</i>) analisia	28	3. Análisis de puntos de no retorno (<i>tipping points</i>)	28
3.1. <i>Tipping point</i> ak aztertzeko metodologia	30	3.1. Metodología para el análisis de <i>tipping points</i>	30
4. Azterketa-kasuetako aplikazioak	35	4. Aplicaciones a casos de estudio	35
4.1. Antxoaren tamaina murriztea	35	4.1. Reducción del tamaño de la anchoa	35
4.2. <i>Gelidium corneum</i> biomasaren . beherakada	37	4.2. Decrecimiento de la biomasa de . <i>Gelidium corneum</i>	37
4.3. Ekosistemak tenperaturari emandako . erantzunaren simulazioa	39	4.3. Simulación de la respuesta del . ecosistema a la temperatura	39
5. Ondorioak	44	5. Conclusiones	44
Glosarioa	48	Glosario	48
Erreferentziak	52	Referencias	52



1. Sarrera

Ozeanoek funtsezko zeregina betetzen dute klima globalaren erregulazioan, karbono-hustuleku, tenperatura-modulatuzaile eta ziklo hidrológicoaren erregulatuzaile gisa jarduten baitute. Baina klima-aldaketa sakonki ari da funtzio horiek eraldatzen. Klima-aldaketaren efektu nagusien artean, hauek aipa daitezke: uren berotzea, bero-boladen maiztasuna eta intentsitatea handitzea, itsas maila igotzea, desoxigenazioa eta azidotzea, itsaslasterrak aldatzea eta biodibertsitatea galtzea. Eraldaketa horiek mehatxu garrantzitsuak dira bai itsasoko ekosistema kalteberenentzat, bai kostaldeko komunitateentzat; izan ere, kostaldeko azpiegiturak, natura-ingurunea eta ekonomia ozeanoaren egoera onaren mende baitaude zuzen-zuzenean (IPCC, 2019; 2021; 2022).

Aldaketa horietako asko bizkortzen eta areagotzen ari dira azken urteotan. Klima-aldaketaren adierazleek errekor-balioak markatu dituzte azken bi urteetan (2023an eta 2024an), eta horrek nabarmen eragin dio ozeanoaren egoerari eta aldakortasunari. 2023an, itsasoaren gainazaleko tenperaturak aurrekaririk gabeko balioetara iritsi zen Atlantikoan. Urte horretako ekainetik irailera bitartean, Ipar Atlantikoaren gainazaleko tenperaturaren hileko anomaliak, latitude subtropikalen eta subpolarren artean, ohiko klimatologia baino +1,5 °C altuagoak izan ziren (Carton et al., 2025). Tenperaturaren igoera horrekin batera, errekor berriak etorri dira itsasoaren batezbestekoan, itsasoko bero-boladetan eta ozeanoaren azidotze-prozesuan. Aldaketa horiek inpaktu zuzenak izan dituzte itsasoko ekosistemetan. Adibidez, 2023ko ekaineko itsasoko bero-boladan, ipar-ekialdeko Atlantikoan murrizketa nabarmena ikusi zen klorofila-kontzentrazioan, % 50–60 arteko murrizketekin. Murrizketa horrek lotura estua du eskualdean gertatzen ari zen itsasoko bero-boladarekin (Copernicus Marine Service, 2023).

Inpaktu horietako asko mugarri-puntu kritikoe-tara (*tipping point* izenekoetara) eramaten ari dira itsas ekosistemak (Heinze et al., 2020). Atalase horiek trantsizio bortitz eta atzeraezinak markatzen dituzte sistemen egoera ekologikoan, hala nola habitatak galtzea eta arrain-populazioak kolapsatzea.

1. Introducción

Los océanos desempeñan un papel fundamental en la regulación del clima global, actuando como sumideros de carbono, moduladores de la temperatura y reguladores del ciclo hidrológico. Sin embargo, el cambio climático está alterando profundamente estas funciones. Entre los efectos más relevantes del cambio climático se encuentran el calentamiento de las aguas, el aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, la subida del nivel del mar, la desoxigenación y acidificación, los cambios en las corrientes oceánicas y la pérdida de biodiversidad. Estas transformaciones suponen amenazas significativas tanto para los ecosistemas marinos más vulnerables como para las comunidades costeras, cuyas infraestructuras, medio natural y economía dependen directamente del buen estado del océano (IPCC, 2019; 2021; 2022).

Muchos de estos cambios se están acelerando e intensificando en los últimos años. Los indicadores del cambio climático han marcado valores de récord durante los dos últimos años, 2023 y 2024, lo que ha afectado significativamente al estado y variabilidad del océano. En 2023, la temperatura superficial del mar en el Atlántico alcanzó valores sin precedentes. Entre junio y septiembre de dicho año, las anomalías mensuales de temperatura superficial en el Atlántico Norte, entre las latitudes subtropicales y subpolares, superaron los +1,5 °C respecto a la climatología habitual (Carton et al., 2025). Este aumento de la temperatura se ha asociado también con nuevos récords en el nivel medio del mar, olas de calor marinas y el proceso de acidificación oceánica. Estos cambios han tenido impactos directos en los ecosistemas marinos. Por ejemplo, durante la ola de calor marina de junio de 2023 en el Atlántico Noreste se observó una disminución significativa en la concentración de clorofila, con reducciones de hasta un 50–60 %. Esta disminución está estrechamente relacionada con la ola de calor marina que afectaba a la región (Copernicus Marine Service, 2023).

Muchos de estos impactos están conduciendo a los ecosistemas marinos hacia puntos críticos de no retorno, conocidos como *tipping points* (Heinze

Atalase hori gaindituz gero, ekosistema erabat aldatu daiteke, funtsezko funtzioak galduz eta haren susperraldia zailduz edo eragotziz.

Agertoki horren aurrean, funtsezkoa da klima-aldaketak ozeanoetan dituen efektuei aurrea hartzea eta haiek ulertzea. Horretarako, ezinbestekoa da prozesu ozeanikoak beren konplexutasunean karakterizatzea, epe laburrera eta epe luzera nola eboluzionatzen duten aztertuz eta klima-aldaketak behatutako aldakortasunean duen zeregin espezifikoak identifikatuz. Diziplina anitzeko behatokitatik datozen ozeanoko aldagaien epe luzeko denbora-serieak funtsezko tresnak dira ozeanoaren egungo egoera, aldakortasun naturala, joera emergenteak eta aldaketen azpiko kausak ulertzeko. Informazio hori funtsezkoa da sistemaren barneko aldakortasun naturala eta behartze antropogenikoa bereizteko. Ozeanoa etengabe monitorizatzeak ezagutza sendoa garatzeko aukera ematen du, ebidentzia zientifikoetan oinarritua, egokitzapenaren eta arintzearen arloan erabakiak hartzeko funtsezkoa, itsasoko ekosistemak eta haien mendeko giza komunitateak babesteko eta kontserbatzeko helburuarekin.

Testuinguru horretan garatzen da *Gipuzkoako Itsasoko eta Kostako Behatokia*. Gure itsasertzen egoeraren eta klima-aldaketaren 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 agertokiak eguneratu eta hobetu ahal izango dira. Hori guztia funtsezkoa da arriskuei aurrea hartzeko eta Gipuzkoako klima-aldaketaren aurrean duen erresilientzia hobetuko duten egokitzapen-irizpideak definitzeko, horrela Gipuzkoako Klima Aldaketaren Aurkako Borroka Estrategiaren (Gipuzkoa Klima 2050) helburuak lortzen lagunduz.

Txosten honek bi helburu ditu: (1) Gipuzkoako itsasertzerako klima-aldaketaren adierazle adierazgarrienen jarraipena eta analisia egiten jarraitzea -2022. urteari dagokion Behatokiaren txostenean definitu ziren adierazle horiek (Naturklima, 2022)-, horretarako haien denbora-bilakaera ebaluatuz tokiko klima-aldaketaren testuinguruan; eta (2) Bizkaiko golkoko kliman eta ekosistemetan mugari-puntuak (*tipping points*) eta erregimen-aldaketak analizatzea.

et al., 2020). Estos umbrales marcan transiciones abruptas e irreversibles en el estado ecológico de un sistema como puede ser la pérdida de hábitats o el colapso de poblaciones de peces. Una vez superado ese umbral, el ecosistema puede cambiar radicalmente, perdiendo funciones esenciales y dificultando o impidiendo su recuperación.

Ante este escenario, es crucial anticipar y comprender los efectos del cambio climático en los océanos. Para ello, es indispensable caracterizar los procesos oceánicos en su complejidad, observando cómo evolucionan tanto a corto plazo como a largo plazo, e identificando el papel específico que el cambio climático juega en la variabilidad observada. Las series temporales de largo plazo de variables oceánicas provenientes de observatorios multidisciplinares son herramientas clave para entender el estado actual del océano, su variabilidad natural, las tendencias emergentes y las causas subyacentes de los cambios. Esta información es esencial para distinguir entre la variabilidad natural interna del sistema y el forzamiento antropogénico. Este monitoreo continuo del océano permite desarrollar conocimiento robusto y basado en evidencias científicas, fundamental para la toma de decisiones en materia de adaptación y mitigación, con el objetivo de proteger y conservar tanto los ecosistemas marinos como las comunidades humanas que dependen de ellos.

En este contexto se desarrolla el *Observatorio marino-costero de Gipuzkoa*. Este es un sistema integrado de seguimiento del estado y 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 y mejora de los escenarios de cambio climático. 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 para el litoral de Gipuzkoa, definidos en el Informe del Observatorio correspondiente al año 2022 (Naturklima, 2022), evaluando para ello su evolución temporal en el contexto del cambio climático local; y (2) el análisis



1.1. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa

Joeren analisiaren helburua da Gipuzkoako itsasertzarako definitutako klima-aldaketaren adierazle fisiko-kimikoen eta biologikoen bilakaera aztertzea (Naturklima, 2022). Horrela, adierazle horien aldakortasunari eta tokiko klima-aldaketak behatutako joerekin duten harremanei buruzko ezagutzak zabaltzen eta hobetzen jarraitu nahi da. Klima-aldaketaren adierazle adierazgarrienetako zazpiren joerak aztertu dira: itsasoko tenperatura, 14 °C-ko isoterma, gazitasuna, itsas maila, higadura eta kostalerra, muturreko olatuak eta pH-a.

Adierazleen kalkulua plataforma kontinentalean egindako behaketa-multzo zabal batean oinarritzen da. Behaketa horietan sartzen dira mareografoek eta buiek etengabe egindako neurketak, bai eta kanpaina ozeanografikoetan hartutako neurketak puntualak ere, hala nola 'Aldaketak' (AZTI) proiektuari lotutakoak, 2024an jarraipena izan zutenak Behatokiaren eta EAEko trantsizio-uren eta itsasertzeko uren egoera ekologikoaren jarraipena egiteko sarearen (URA¹) esparruan. Ohar horiek satelite bidezko irudiekin eta Itsasertzeko Bideometria Foru Sareak emandako irudiekin osatzen dira².

de los puntos de no retorno (tipping points) y cambios de régimen en el clima y ecosistemas del golfo de Vizcaya.

1.1. Análisis de series temporales de indicadores de cambio climático

El objetivo del análisis de tendencias es estudiar la evolución de indicadores fisicoquímicos y biológicos del cambio climático definidos para el litoral de Gipuzkoa (Naturklima, 2022). Con esto se pretende seguir extendiendo y mejorando nuestro conocimiento sobre la variabilidad de dichos indicadores y la relación de las tendencias observada con el cambio climático local. Se han analizado tendencias para siete de los indicadores de cambio climático más representativos: temperatura del mar, isoterma de 14 °C, salinidad, nivel del mar, erosión y línea de costa, oleaje extremal y pH.

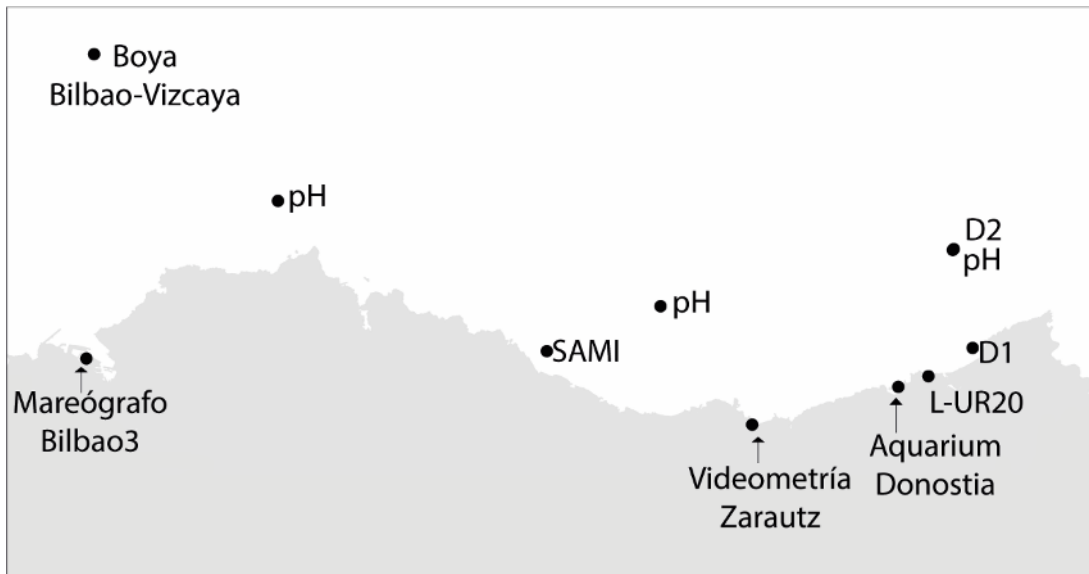
El cálculo de los distintos indicadores se basa en un amplio conjunto de observaciones realizadas sobre la plataforma continental. Estas incluyen medidas en continuo realizadas por mareógrafos y boyas, así como medidas puntuales recogidas en campañas oceanográficas, como las asociadas al proyecto 'Variaciones' (Aztí) que continuaron en 2024 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' (URA¹). Estas observaciones se completan con imágenes satelitales y las imágenes proporcionadas por la Red Foral de Videometría Litoral².

¹ UBEGI. EAEko ur-masen egoerari buruzko informazioa.

² Bideometria Foru Sarea - Ingurumena - Gipuzkoako Foru Aldundia

¹ UBEGI. Información sobre el estado de las masas de agua de la CAPV.

² Red de Videometría Foral - Medio Ambiente - Diputación Foral de Gipuzkoa OBSERVATIONS_010_001/description



1. ird. EAEko itsasertzean aldagai fisiko-kimikoen eta biologikoen jarraipen-programak eratzen dituzten laginketa-puntuen sarea.

1. Fig. Red de puntos de muestreo que cofiguran los programas de seguimiento de variables fisicoquímicas y biológicas en el el litoral vasco.

Klima-aldaketaren adierazleen joeren analisiak 2022ko Itsasoko eta Kostako Txostenean azaldutako metodologia berari jarraitzen dio (Naturklima, 2022). Analisia 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, behatutako aldakuntzak 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.

El análisis de tendencias de los indicadores de cambio climático sigue la misma metodología que la expuesta en el Informe del Observatorio de 2022 (Naturklima, 2022). El análisis 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, la posible relación de la variación observada con el cambio climático se ha establecido como una tendencia lineal en el tiempo. El análisis de tendencias se ha basado en técnicas estadísticas desarrolladas en Chust et al. (2022). De forma resumida, se han utilizado dos metodologías: (1) un filtro para retirar la variabilidad de periodo 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. Klimako eta ekosistemetako mugarri-puntuen (tipping points) eta erregimen-aldaketaren analisia

Klima-aldaketa eta biodibertsitatearen galera mehatxu kritikoak dira, ekosistemak mugarri-puntuetara (*tipping points*) eramateko modukoak. puntu kritiko horiek atalaseak markatzen dituzte, eta, atalase horietatik aurrera, ekosistemek oso alterazio sakonak jasaten dituzte, beren autorregulazio-ahalmena galtzen dute, eta, ondorioz, egoera ekologiko berrietarantzko eraldaketa bortitzak eragiten dira. Egoera berri horiek ekar dezakete biodibertsitatea nabarmen galtzea, funtsezko funtzio ekologikoak degradatzea edo giza ongizaterako funtsezkoak diren ekosistema-zerbitzuak galtzea. Ingurumen-presioek –hala nola tenperaturaren igoerak, habitat-galerak edo kutsadurak– areagotzen jarraitzen badute, litekeena da erregimen-aldaketa horiek maizago eta intentsitate handiagoarekin gertatzea, ozeanoaren sistemaren erresilientzia oro har arriskuan jarriz (Drijfhout et al., 2015; Rocha et al., 2015; Steffen et al., 2018).

Azterlan honetan, Bizkaiko golkoko klimaren eta itsas ekosistemaren mugarri-puntuak edo erregimen-aldaketak aztertu dira. Zehazki, hiru kasu aztertu dira: (1) Bizkaiko golkoko antxoaren (*Engraulis encrasicolus*) tamainaren murrizketa, (2) Gipuzkoako kostaldeko *Gelidium corneum* biomasaren murrizketa, eta (3) Bizkaiko golkoko itsas ekosistemak tenperaturaren igoeraren aurrean izandako erantzuna.

1.2. Análisis de los puntos de no retorno (tipping points) y cambios de régimen en el clima y ecosistemas

El cambio climático y la pérdida de biodiversidad constituyen amenazas críticas que podrían llevar a los ecosistemas hacia puntos de no retorno o 'tipping points'. Estos puntos críticos marcan umbrales a partir de los cuales los ecosistemas sufren alteraciones tan profundas que pierden su capacidad de autorregulación, dando lugar a transformaciones abruptas hacia nuevos estados ecológicos. Estos nuevos estados pueden implicar una pérdida significativa de biodiversidad, la degradación de funciones ecológicas clave o la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano. Si las presiones ambientales – como el aumento de la temperatura, la pérdida de hábitat o la contaminación – continúan intensificándose, es probable que estos cambios de régimen ocurran más a menudo y con mayor intensidad, comprometiendo la resiliencia del sistema oceánico en su conjunto (Drijfhout et al., 2015; Rocha et al., 2015; Steffen et al., 2018).

En este estudio se han analizado los puntos de no retorno o cambios de régimen en el clima y ecosistema marino del golfo de Vizcaya. En concreto, se han analizado tres casos de estudio: (1) reducción de tamaño de la anchoa (*Engraulis encrasicolus*) del golfo de Vizcaya, (2) disminución de la biomasa de *Gelidium corneum* en la costa de Gipuzkoa, y (3) respuesta ecosistema marino del golfo de Vizcaya al aumento de temperatura.

2. Klima-aldaketaren adierazleen denbora-serieen analisisa

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

2.1. Itsasoko temperatura

Itsasoaren gainazaleko temperaturaren eskualde-aldaketen jarraipena/monitorizazioa funtsezkoa da klima-aldakortasuna eta eskualde-inpaktuak ebaluatzeko. Ozeanoen eskualde-beroketa ez da homogeneoa, eta identifikatu da 20° eta 50° N bitarteko Ipar Atlantikoa dela berotze-tasa bortitz eta ezohikoek eragindako eskualdeetako bat, ozeano globalaren gainerakoarekin alderatuta (Cheng et al., 2022); berotze-tasek bikoiztu egin dute munduko batez besteko joera (batez beste $+0,25 \pm 0,08$ °C hamarkada bakoitzeko, 1982az geroztik).

Urte anitzeko eta hamarkadetako aldaketa handiak nagusi dira ozeanoaren berotzean ipar-ekialdeko Atlantikoaren eta ondoko itsasoaren batezbestekoan, bai eta Iberia-Bizkaia-Irlanda eskualdean ere; bertan, berotze-tasa $0,24 \pm 0,02$ °C-koa da hamarkada bakoitzeko (von Schuckmann et al., 2024).

Bizkaiko golkoaren eskalan, satelite-neurketek (OSTIA sentsorea) gainazaleko temperaturaren goranzko joera esanguratsua adierazten dute, $+0,22 \pm 0,034$ °C-ko tasarekin hamarkada bakoitzeko 1981–2023 aldian. Beste sentsore batek (MODIS/Aqua) 2003–2023 aldian erregistratutakoa baino zertxobait txikiagoa da, honen igoera-neurketa baita $+0,25 \pm 0,031$ °C-koa hamarkada bakoitzeko.

Kostaldekotik uretan, Donostiako Aquariumeko itsasoko gainazaleko temperaturaren denbora-seriearen analisiak adierazten du temperaturak joera positiboa duela 1946–2023 aldian $+0,08 \pm 0,02$ °C-koa hamarkada bakoitzeko. Berotze-tasa hori areagotu egingen da 1980tik aurrera, eta puntu horretatik aurrera temperaturaren joera-aldaketa ikusten da: (1) 1946tik 1980ra bitartean beheranzko joera ikusten da, $-0,19 \pm 0,06$ °C-koa hamarkada bakoitzeko, eta (2) 1980tik 2023ra bitartean; aldiz, goranzko joera, $+0,28 \pm 0,031$ °C-koa da hamarkada bakoitzeko, Bizkaiko golko oso-rako aurkitutakoa baino zertxobait handiagoa.

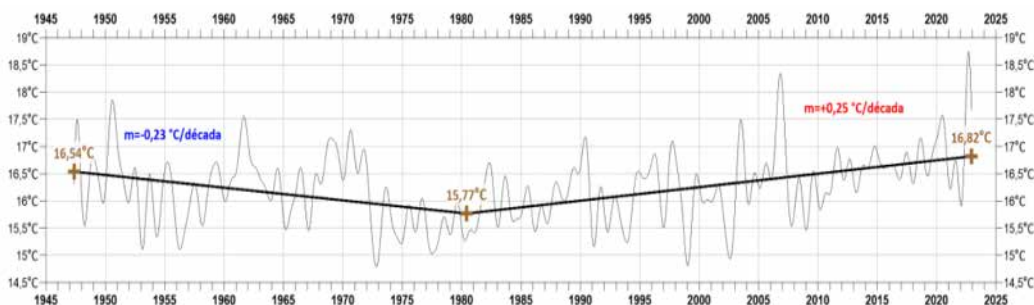
2.1. Temperatura del mar

El seguimiento / monitorización de los cambios regionales de temperatura superficial del mar es esencial para evaluar la variabilidad climática y sus impactos regionales. El calentamiento regional de los océanos no es homogéneo, y el Atlántico Norte entre 20° y 50° N ha sido identificada como una de las regiones que se ve afectada por fuertes y poco usuales tasas de calentamiento en comparación con el resto del océano global (Cheng et al., 2022); las tasas de calentamiento duplican la tendencia media mundial, en promedio $+0,25 \pm 0,08$ °C por década desde 1982.

Grandes variaciones multianuales y decadales dominan el calentamiento del océano en la media del Atlántico nororiental y los mares adyacentes, así como en la región Iberia-Vizcaya-Irlanda, en la que la tasa de calentamiento es de $0,24 \pm 0,02$ °C por década (von Schuckmann et al., 2024).

A escala del golfo de Vizcaya las medidas satelitales (sensor OSTIA) indican una tendencia creciente y significativa de la temperatura superficial con una tasa de $+0,22 \pm 0,034$ °C por década en el periodo 1981–2023. Esta es ligeramente inferior a la registrada en el periodo 2003–2023 por otro sensor (MODIS/Aqua), $+0,25 \pm 0,031$ °C por década.

En las aguas costeras, el análisis de la serie temporal de temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia/San Sebastián indica que la temperatura tiene una tendencia positiva en el periodo 1946–2023 de $+0,08 \pm 0,02$ °C por década. Esta tasa de calentamiento se intensifica a partir de 1980, punto a partir del cual se observa un cambio de tendencia en la temperatura: (1) de 1946 a 1980 se observa una tendencia decreciente de $-0,19 \pm 0,06$ °C por década, y (2) de 1980 a 2023, en cambio, una tendencia creciente de $+0,28 \pm 0,031$ °C por década, ligeramente superior a la encontrada para el golfo de Vizcaya en su conjunto.

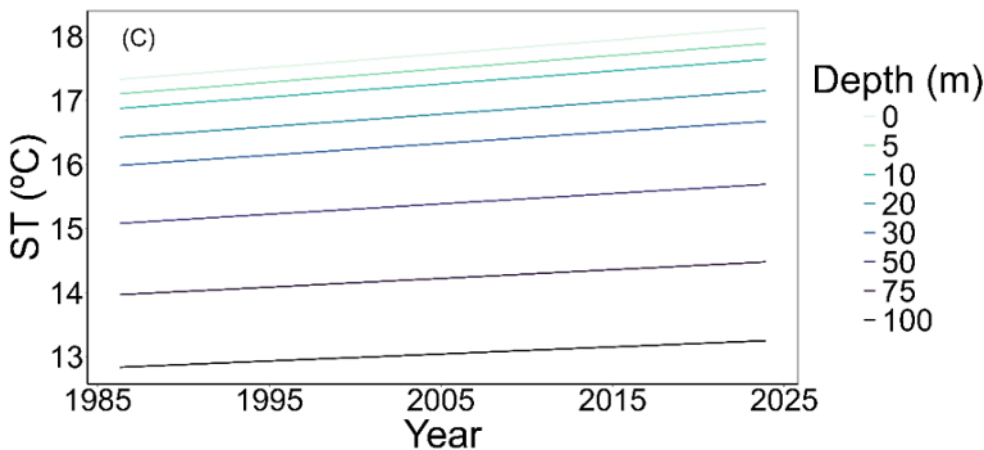


2. ird. Donostiako Aquariumaren gainazaleko tenperatura 1946–2022 aldian, eta joera-aldaketa nabarmenaren analisisa.

2. Fig. Temperatura superficial del Aquarium de Donostia/San Sebastián en el periodo 1946–2022 y análisis de cambio abrupto de tendencia.

Ur-zutabearen lehen 100 metroetan, golkoaren hego-ekialdean dagoen D2 laginketa-estazioan (Pasaiatik 13,1 km ingurura) ikusten da sakonera desberdinetako tenperaturak goranzko joera esanguratsua duela batez beste, $+0,18 \pm 0,034 \text{ °C}$ -ko tasa hamarkada bakoitzeko, 1986–2023 aldian.

En los primeros 100 m de la columna de agua, en la Estación de muestreo D2 situada en el sureste del golfo (aproximadamente a 13,1 km de Pasai), se observa que la temperatura a diferentes profundidades tiene en promedio una tendencia creciente significativa a una tasa de $+0,18 \pm 0,034 \text{ °C}$ por década en el periodo 1986–2023.



3. ird. Itsasoko tenperaturaren joera linealak sakonera bakoitzetarako.

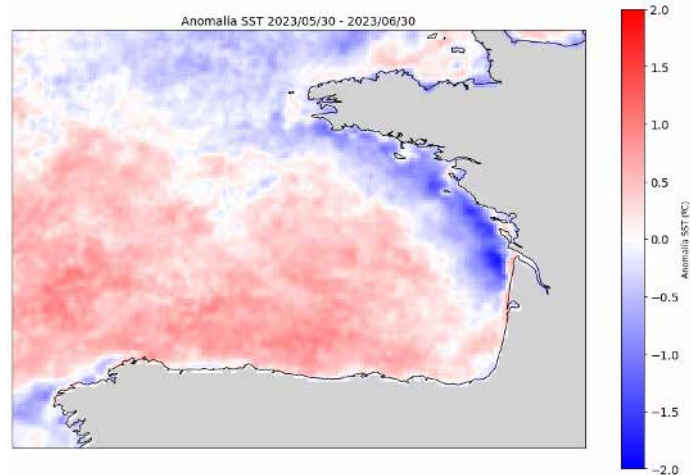
3. Fig. Tendencias lineales de la temperatura del mar para cada profundidad.

Azken urteotan, ozeanoko tenperaturaren igoeira gradualarekin batera, bero-bolada gero eta intentsitate handiagoak, luzeagoak eta ohikoagoak ari dira gertatzen itsasoan (Xu et al. 2022). Bolada horiek ondorio dramatikoak izan ditzakete itsasoko ekosistemetan, hala nola ekoizpen primarioaren murrizketa, espezie endemikoen migrazioa edo murrizketa, beste eskualde batzuetatik datozen espezieak agertzea eta organismoak masiboki hiltzea (Oliver et al., 2019; Smith et al., 2023).

Durante los últimos años el incremento gradual de la temperatura del océano se asocia a olas de calor marinas cada vez más intensas, largas y frecuentes (Xu et al. 2022). Estas, pueden tener efectos dramáticos en los ecosistemas marinos como la reducción de la producción primaria, la migración o reducción de especies endémicas, la aparición de especies procedentes de otras regiones y la mortalidad en masa de organismos (Oliver et al., 2019; Smith et al., 2023).

Al igual que en el océano mundial, la frecuencia, intensidad y duración de los eventos de ola de calor marinas ha aumentado en los últimos años en el atlántico nororiental y mares adyacentes. En 2022 y 2023 el 91% y 93%, respectivamente, de la superficie oceánica en el océano atlántico nororiental y mares adyacentes se vieron afectados por al menos una ola de calor marina moderada (von Schuckmann et al., 2024). En 2023, la región del Atlántico Nordeste, se desarrollaron varias olas de calor marinas a principios del verano y en otoño, con por ejemplo anomalías de hasta +5 °C por encima de lo normal al norte de Irlanda en junio de 2023 (Berthou et al., 2024).

Al igual que en el océano mundial, la frecuencia, intensidad y duración de los eventos de ola de calor marinas ha aumentado en los últimos años en el atlántico nororiental y mares adyacentes. En 2022 y 2023 el 91% y 93%, respectivamente, de la superficie oceánica en el océano atlántico nororiental y mares adyacentes se vieron afectados por al menos una ola de calor marina moderada (von Schuckmann et al., 2024). En 2023, la región del Atlántico Nordeste, se desarrollaron varias olas de calor marinas a principios del verano y en otoño, con por ejemplo anomalías de hasta +5 °C por encima de lo normal al norte de Irlanda en junio de 2023 (Berthou et al., 2024).



4. ird. Uraren gainazaleko tenperaturaren anomalia 2023ko ekainean, 1991-2020 aldiarekiko. Datuak: Copernicus Marine ODYSSEA ATL Sea Surface Temperature.

4. Fig. Anomalia de la temperatura superficial del agua durante la ola de calor de junio de 2023 respecto al periodo 1991-2020. Datos: Copernicus Marine ODYSSEA ATL Sea Surface Temperature.

En este contexto, se han analizado las olas de calor marinas en 2023 en la costa (estación Aquarium) y en el golfo de Vizcaya (satélite) utilizando la metodología de Hobday et al. (2016, 2018³). Se registraron un total de 10 olas de calor, superando las 6 ocurridas en 2022. La ola de mayor duración se produjo a finales de mayo y se extendió durante todo junio, con 32 días de duración. Le siguieron la ola de finales de septiembre, que duró 22 días, y la de la segunda decena de noviembre, con una duración de 20 días. Las temperaturas más elevadas se registraron durante la ola de calor de junio.

En este contexto, se han analizado las olas de calor marinas en 2023 en la costa (estación Aquarium) y en el golfo de Vizcaya (satélite) utilizando la metodología de Hobday et al. (2016, 2018³). Se registraron un total de 10 olas de calor, superando las 6 ocurridas en 2022. La ola de mayor duración se produjo a finales de mayo y se extendió durante todo junio, con 32 días de duración. Le siguieron la ola de finales de septiembre, que duró 22 días, y la de la segunda decena de noviembre, con una duración de 20 días. Las temperaturas más elevadas se registraron durante la ola de calor de junio.

3 Bero-bolada baten ezaugarria da eguneko tenperaturak behaketa klimatologikoen 90 pertzentiletik gorakoak izatea, gutxienez ondoz ondoko 5 egunetan (Hobday et al., 2018).

3 Una ola de calor se caracteriza por temperaturas diarias superiores al percentil 90 de las observaciones climatológicas durante al menos 5 días consecutivos (Hobday et al., 2018).



Hasiera Inizio	Hasiera Fin	Iraupena (egunak) Duración (días)	Gehieneko intentsitatea Intensidad máxima (°C)	Batez besteko intentsitatea Intensidad media (°C)	Intentsitatearen desbideratzea Desviación intensidad (°C)	Intentsitate metatua Intensidad acumulada (°C)
01-01-2023	17-01-2023	17	1,94	1,62	0,24	27,54
29-04-2023	08-05-2023	10	2,29	1,90	0,25	18,98
30-05-2023	30-06-2023	32	3,12	2,59	0,32	82,88
11-07-2023	16-07-2023	6	2,09	1,95	0,11	11,71
19-08-2023	27-08-2023	9	2,55	2,16	0,30	19,41
07-09-2023	22-09-2023	16	2,71	2,22	0,35	35,46
29-09-2023	20-10-2023	22	2,94	2,40	0,36	52,81
29-10-2023	02-11-2023	5	1,54	1,45	0,06	7,25
11-11-2023	30-11-2023	20	2,24	1,82	0,33	36,36
04-12-2023	18-12-2023	15	2,32	1,66	0,33	24,92

1. taula. Donostiako Aquariumeko estazioan detektatutako itsasoko bero-boladen metrikak: iraupena, gehieneko intentsitatea, batez besteko intentsitatea, desbideratzea eta intentsitate metatua.

1. Tabla. Métricas descriptivas de las olas de calor marinas detectadas en la estación del Aquarium de Donostia/San Sebastián: duración, intensidad máxima, intensidad media, desviación e intensidad acumulada.

2.2. Gazitasuna

Ozeanoaren gazitasuna funtsezko faktorea da ozeanoaren dinamikan. Tenperaturarekin batera, itsasoko uraren dentsitatea zehazten du; horrela, ozeano zirkulazioa eta estratifikazio bertikala bezalako prozesuak kontrolatzen ditu, eta, horrekin batera, atmosferaren eta ozeano gainazaleko geruzaren arteko interakzioak. Klima-aldaketari dagokionez, ziklo hidrologikoko (lurruntzea, prezipitazioak eta desizoztea) alterazioek gazitasunari eragiten diote. Adibidez, berotze globalaren ondorioz lurruntzea handitzen den eskualdeetan, gazitasunak gora egiten du. Aldiz, eremu polarren desizozteak eta prezipitazioen igoerak gazitasuna murrizten dute. Beraz, ozeanoaren gazitasuna ozeanoaren eta klimaren adierazle garrantzitsua da, eta hura monitorizatzeko aukera ematen du klima-aldaketak itsasoko eta atmosferako sistemetan dituen efektuak hobeto ulertzeko.

Aurreikusten da eskualde subpolarretan, prezipitazio handiegia izango denez, gazitasuna murriztu egongo dela ziklo hidrologikoa areagotzean. Aldiz, eskualde subtropikaletan, gehiegizko lurrunketa izango denez, gazitasunaren igoera aurreikusten da, eta datu globaletan behatzen hasi da patroia hori (Durack et al., 2012). Hala ere, ereduak zailtasunak planteatzen dituzte tarteko latitude epeletan, eta epe luzera emaitza kontraesankorrak ematen dituzte (Russell et al., 2015).

Bizkaiko golkoan ikusten da gazitasuna jaitsi egin dela 2014az geroztik Ipar Atlantikoko ur modalean (ENACW ingelesezko sigletan), hau da, 300–500 m inguruko sakoneran, atmosferaren eta ozeanoaren tokiko interakzioaren eraginik gabekoan. Aurretik, 1990eko hamarkadan gazitasuna egonkor mantendu zen, edo gorabehera txikiekin. 2005ean ur-masa horren gazitasuna azkar handitzen ari zela detektatu zen, eta horrela, maila gaziagoetan, mantendu zen gutxienez hamarkada batean. Aldaketa hori 2005ean eskualdeko neguko muturreko nahasketa baten ondorio izan zen, eta ur ertainak azkar eraldatu zituen. 2014tik aurrera, ENACWren gazitasuna jaisten hasi zen, eta 2019an 2000. urtearen hasieran erregistratutako gazitasun-balio minimoetara iritsi zen, eta murrizten jarraitzen du orduetik (González-Pola et al., 2025). Badirudi gazitasunaren murrizketa hori Ipar Atlantikoko biratze subpolarrean gertatzen ari diren eskala handiko aldaketen parte bat dela (Holliday et al., 2020). Bertan ikusten da

2.2. Salinidad

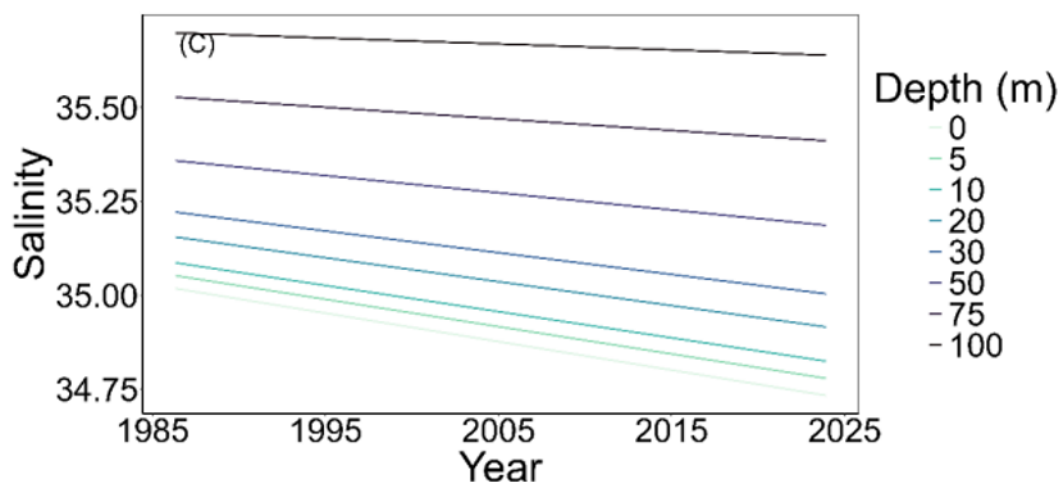
La salinidad del océano es un factor clave en la dinámica oceánica. Junto con la temperatura determina la densidad del agua de mar, controlando procesos como la circulación oceánica y la estratificación vertical y con ello las interacciones entre la atmósfera y capa superficial oceánica. Con respecto al cambio climático, la salinidad se ve afectada por alteraciones en el ciclo hidrológico (evaporación, precipitaciones y deshielo). Por ejemplo, en las regiones donde aumenta la evaporación debido al calentamiento global, la salinidad tiende a aumentar. En cambio, el deshielo de las zonas polares y el aumento de las precipitaciones reduce la salinidad. Por tanto, la salinidad del océano es un indicador importante del océano y clima, y su monitoreo permite entender mejor los efectos del cambio climático en los sistemas marinos y atmosféricos.

Se espera que en las regiones subpolares, con un exceso de precipitaciones, la salinidad disminuya con la intensificación del ciclo hidrológico. Por el contrario, en las regiones subtropicales, con un exceso de evaporación, se espera un aumento, un patrón que comienza a observarse en los datos globales (Durack et al., 2012). Sin embargo, los modelos presentan dificultades en las latitudes templadas medias, arrojando resultados contradictorios a largo plazo (Russell et al., 2015).

En el golfo de Vizcaya se observa un descenso en la salinidad desde 2014 del agua modal del Atlántico Nordeste (ENACW en sus siglas en inglés), ubicada a unos 300–500 m, profundidad no influenciada por la interacción local atmósfera-océano. Previamente, durante la década de 1990 la salinidad se mantuvo estable o fluctuó ligeramente. En 2005, se detectó un rápido incremento de la salinidad de esta masa de agua y se mantuvo así, en niveles más salados, al menos una década. Este cambio se debió a una mezcla invernal extrema a nivel regional en 2005 que transformó rápidamente las aguas centrales. A partir de 2014 la salinidad de ENACW comenzó a descender y en 2019 alcanzó los valores mínimos de salinidad registrados a principios de 2000, y sigue disminuyendo (González-Pola et al., 2025). Esta disminución de la salinidad parece formar parte de los cambios a gran escala que están teniendo lugar en el giro subpolar del Atlántico Norte (Holliday et al., 2020), donde se observa la disminución de la salinidad debido a la esperada

gazitasuna jaitsi egin dela, AMOCren intentsitatea espero bezala jaitsi izanak, ziklo hidrológicoaren aldaketak eta itsas izotzaren murrizketak eraginda (Bindoff *et al.*, 2019).

disminución de la intensidad de la AMOC, los cambios en el ciclo hidrológico y la disminución del hielo marino (Bindoff *et al.*, 2019).



5. ird. (B) Sakonera desberdinetako gazitasunaren joera linealak, 1986–2023 aldirian, D2 estazioan.

5. Fig. (B) Tendencias lineales de la salinidad a distintas profundidades en el periodo 1986–2023 en la estación D2.

D2 estazioan (Pasaia 13,1 km ingurura), 0 eta 100 metro arteko sakonerako batez besteko gazitasuna, 1986–2023 aldirian, nabarmen jaisten ari da $-0,054 \pm 0,006$ hamarkada⁻¹-eko tasan. Bai ipar-ekialdeko Atlantikotik gazitasun txikiko anomaliak zabaltzeak eta baita gehiegizko prezipitazioak ere, ur-zutabeko gazitasunaren murrizketa hori azal lezakete. Hala ere, azpimarratu behar da, 100 m-ko zutabearen lodierarako, ozeanoaren propietateen aldaketek hobeto islatzen dituztela ur gezaren tokiko trukeak atmosfera-ozeano interfazearen bidez. Beraz, prezipitazioaren eragina garrantzitsuagotzat jo daiteke. Gainera, 100 m-ko sakoneran nekez lortzen da $27,1 \text{ kg m}^{-3}$ -ko dentsitate-balioa, hau da, jatorri subpolarra duten ur ertainen (ENACW) seinalea motelduta dagoela dirudi. Datu gehiago ez egoteak mugatu egiten du ur ertainen garraio adbertiboari eta klima-aldaketarekin lotutako eskala globaleko prozesuei buruzko emaitzen interpretazioa. Zaila da D2 estazioan behatutako gazitasunaren murrizketa klima-aldaketarekin lotutako eskala globaleko prozesuekin lotzea, hala nola Ipar Atlantikoko latitude altuetako eta Artikoko arko gazitasunaren murrizketarekin (Bindoff *et al.*, 2019).

La salinidad media de 0 a 100 m de profundidad en la estación D2 (aproximadamente a 13,1 km de Pasaia) en el periodo 1986–2023 está descendiendo significativamente a una tasa de $-0,054 \pm 0,006$ década⁻¹. Tanto la propagación de anomalías de baja salinidad desde el Atlántico Noreste y el exceso de precipitación, podrían explicar esta disminución de la salinidad en la columna de agua. Sin embargo, cabe destacar que, para un espesor de columna de 100 m, los cambios en las propiedades del océano reflejan mejor los intercambios locales de agua dulce a través de la interfaz atmósfera-océano. Por tanto, el efecto de la precipitación puede considerarse más importante. Además, a 100 m de profundidad difícilmente se alcanza el valor de densidad de $27,1 \text{ kg m}^{-3}$, es decir, la señal de las aguas centrales de origen subpolar (ENACW) parece amortiguada. La falta de datos a mayor profundidad limita la interpretación de los resultados sobre el transporte advectivo de las aguas centrales y los procesos de escala global relacionados con el cambio climático. Por tanto, es difícil asociar la disminución de la salinidad observada en la estación D2 con procesos a escala global relacionados con el cambio climático, como la disminución de la salinidad a latitudes altas del Atlántico norte y la cuenca del Ártico (Bindoff *et al.*, 2019).

2.3. Estratifikazioa eta nahaste-geruza

Klima-aldaketaren ondorioz ozeanoko geruza azalekoenak berotzearekin batera gertatu ohi da ur-zutabearen estratifikazio handiagoa, eta, beraz, nahaste-geruzaren sakonera txikiagoa (Li et al., 2020; Sallée et al., 2021). Horrek murriztu egiten du gainazaleko uren eta geruza sakonagoen arteko nahasketa bertikala, eta, horren ondorioz, ekoizpen primarioarako mantengugaien eskuragarritasuna mugatu daiteke, eta gainazaleko geruzetako oxigeno-kontzentrazioa murriztu. Bizkaiko golkoan, 2000–2010 hamarkadan, estratifikazioa nabarmen higatu zuten nahaste-gertakari oso gogorrek gertatu ziren (2005, 2006, 2009 eta 2010eko neguetan), eta, espero zenaren kontra, nahaste-geruza sakontzea eragin zuten (Somavilla et al., 2017). 2010az geroztik, 2018n bakarrik gertatu da nahaste-gertakari anormalki sakona, nahaste-geruzaren sakontze hori geldiaraziz (Valencia et al., 2019; Chust et al., 2022).

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

D2 estazioko 14 °C-ko isotermaren denbora-seriearen joera-analisiaren emaitzek adierazten dute dagoen sakonera ez dela nabarmen aldatzen 1986–2023 aldian; edonola ere, joera-balioa (hamarkada bakoitzean –2,27 m) negatiboa da (isotermak sakontzeko joera du), ur-zutabearen 100 m-ko berotzearekin bat etorritik.

2.3. Estratificación y capa de mezcla

El calentamiento de las capas más superficiales del océano debido al cambio climático suele asociarse con una mayor estratificación de la columna de agua, y por tanto una menor profundidad de la capa de mezcla (Li et al., 2020; Sallée et al., 2021). Esto reduce la mezcla vertical entre las aguas superficiales y las capas más profundas, lo que puede limitar la disponibilidad de nutrientes para la producción primaria y reducir la concentración de oxígeno en las capas más superficiales. En el Golfo de Vizcaya, durante la década 2000–2010 se sucedieron distintos eventos de mezcla excepcionalmente intensos (inviernos 2005, 2006, 2009 y 2010) que erosionaron fuertemente la estratificación provocando, en contra de lo esperado, una profundización de la capa de mezcla (Somavilla et al., 2017). Desde 2010 solamente se ha producido un episodio de mezcla anormalmente profundo, en 2018, deteniendo dicha profundización de la capa de mezcla (Valencia et al., 2019; Chust et al., 2022).

El seguimiento de la profundidad de una determinada isoterma es un método 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 evolución de la profundidad de la isoterma de 14 °C (Valencia et al., 2004, 2019).

Los resultados del análisis de tendencia de la serie temporal de la isoterma de 14 °C en la estación D2 indican que la profundidad a la que se encuentra no varía significativamente en el periodo 1986–2023, si bien el valor de tendencia (–2,27 m por década) es negativo (la isoterma tiende a profundizarse) en concordancia con el calentamiento observado en los 100 m de la columna de agua.



2.4. Itsas maila

Itsasoaren batez besteko mailaren aldaketa klimaren bilakaeraren funtsezko adierazle bat da; izan ere, alde batetik, ozeanoaren hedapen termikoa islatzen du, berotzearen ondorioz gertatua, eta, bestetik, glaziarrek eta izotz-geruzak desizoztearen ondorioz ozeanoko masa handitzen ari dela erakusten du. 1970az geroztik, behatutako itsas mailaren igoeraren % 70 inguru da behartze antropogenikoa (Slangen et al., 2016).

Itsasoaren batez besteko maila globala 1,73 [1,28–2,17] cm-ko tasan igotzen ari da hamarkada bakoitzeko XX. mendearen hasieratik (IPCC, 2023), azken hiru milurtekoetakoa baino erritmo handiagoan (Kopp et al., 2014). Igoera horren ia % 40 ozeanoen hedapen termikoari egotzen zaio, bero ozeanikoa xurgatzearen ondorioz, beste % 40 glaziarretako izotza urtzeari, eta % 25 Groenlandiako izotza urtzeari; ekarpen txikiak egiten dituzte, berriz, Antartikako izotz-geruzak eta lurreko uren deposituetako aldaketek (negatiboek) (IPCC, 2023). Gainera, igoera hori bizkortzen joan da 1960ko hamarkadatik aurrera (Dangendorf et al., 2019), eta hamarkada bakoitzeko 3,7 cm-ko baliora iritsi da 2006–2018 aldian. 1990eko hamarkadaz geroztik, azeleraziorik berriena izotz-geruzaren masa-galaren tasa handiagoak eragin du nagusiki.

Itsas mailaren joera hori ez da uniforme, eskualdearen arabera batez besteko tasa globala baino erritmo azkarragoan edo motelagoan igotzen baita (Cazenave & Moreira, 2022). Arrazoi nagusia ozeanoen hedapen termiko ez-uniformea da, haizeak behatutako ozeanoko zirkulazioen zein atmosfera-ozeano bero-fluxuen aldaketei lotuta. Aldaketa horiek aldatu egiten dituzte tenperatura eta gazitasuna, eta ozeanoko ur-masaren birbanaketa eragiten dute (Meyssignac et al., 2017). Itsasoaren batez besteko mailaren eskualde-aldaketetan eragina duten beste faktore batzuk hauek dira: lehorrean finkatutako izotz-masaren gainazaleko birbanaketa eta depositu hidrologikoak, grabitate-, errotazio- eta deformazio-aldaketak izenekoak (Cazenave & Moreira, 2022).

Ozeano Atlantikoaren ipar-ekialdeko eremu ozeaniko guztiek eta inguruko itsasoek itsas mailaren igoera izan dute azken 30 urteetan. Eskualde mailan, eremu ozeanikoaren % 46an munduko batezbestekoa baino tasa handiagoan igotzen ari da itsas maila

2.4. Nivel del mar

El cambio en el nivel medio del mar es 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. Desde 1970, el forzamiento antropogénico representa aproximadamente el 70 % del aumento del nivel del mar observado (Slangen et al., 2016).

El nivel medio global del mar aumenta a una tasa de 1,73 [1,28–2,17] cm por década desde principios del siglo XX (IPCC, 2023), un ritmo superior al de los últimos tres milenios (Kopp et al., 2014). Casi el 40% de este aumento se atribuye a la expansión térmica de los océanos debido a la absorción de calor oceánico, otro 40% a la fusión del hielo de los glaciares y el 25% a la fusión del hielo de Groenlandia, con pequeñas contribuciones de la capa de hielo de la Antártida y de cambios (negativos) en los depósitos de agua terrestres (IPCC, 2023). Además, este aumento se ha ido acelerando desde la década de 1960 (Dangendorf et al., 2019), alcanzando un valor de 3,7 cm por década durante el período 2006–2018. La aceleración más reciente, desde la década de 1990, ha sido impulsada principalmente por una mayor tasa de pérdida de masa de la capa de hielo.

Esta tendencia del nivel del mar no es uniforme, con regiones en las que aumenta a un ritmo más rápido o lento que la tasa media global (Cazenave & Moreira, 2022). La principal causa es la expansión térmica no uniforme de los océanos asociada a cambios tanto en la circulación oceánica forzada por el viento como los flujos de calor atmósfera-océano, que modifican la temperatura y salinidad y provocan asimismo la redistribución de la masa de agua oceánica (Meyssignac et al., 2017). Otros factores que influyen en los cambios regionales del nivel medio del mar son la redistribución superficial de la masa de hielo asentada en tierra y los depósitos hidrológicos, los denominados cambios de gravedad, rotación y deformación (Cazenave & Moreira, 2022).

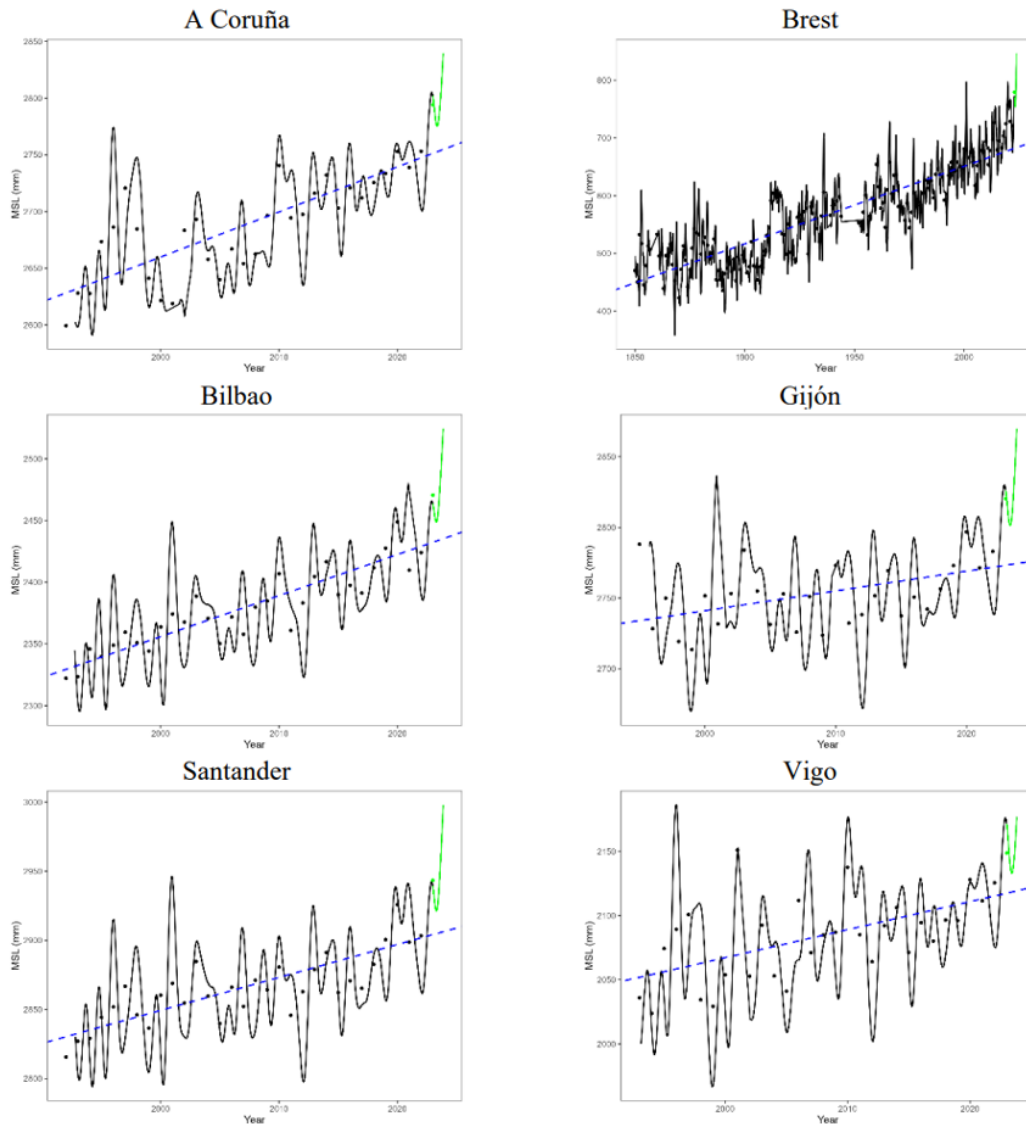
Todas las zonas oceánicas del noreste del océano Atlántico y los mares adyacentes han experimentado un aumento del nivel del mar en los últimos 30 años. A nivel regional, el nivel del mar en el 46% de la zona oceánica está aumentando a una tasa superior a la media mundial (3,4 cm por década en el

(hamarkada bakoitzeko 3,4 cm 1993–2023 aldian) (von Schuckmann *et al.*, 2024). Iberia-Bizkaia-Irlanda eskualdean, urtean $4,00 \pm 0,08$ cm-koa da igoera (Copernicus Marine Service, 2025a).

Azterketa honetan, Bizkaiko golkoko itsas mailaren igoera aztertu da, sateliteen bidez kalkulatu, 1993–2023 aldirako. Emaitzek $+3,18 \pm 0,38$ cm-ko igoera-tasa esanguratsua adierazten dute hamarkada bakoitzeko.

periodo 1993–2023) (von Schuckmann *et al.*, 2024). En la región Iberia-Vizcaya-Irlanda el ascenso es de $4,00 \pm 0,08$ cm por año (Copernicus Marine Service, 2025a).

En este estudio se ha analizado la subida del nivel del mar en el golfo de Vizcaya estimada a partir de satélites para el periodo 1993–2023. Los resultados indican una tasa de ascenso significativa de $+3,18 \pm 0,38$ cm por década.



6. ird. Itsas mailaren batez besteko denbora-serieak, Bizkaiko golkoko mareografoetan 2023ko datuak berdez erakusten dira.

6. Fig. Series temporales del nivel medio del mar en mareógrafos del golfo de Vizcaya. Los datos correspondientes a 2023 se muestran en verde.



Kostaldean, itsas mailaren aldaketa eta ozeano irekiko itsas mailaren igoera desberdina izan daitezke; izan ere, kostaldetik gertu, eskala txikiko prozesuak gainjarri egiten zaizkie batezbesteko globalari eta itsas mailaren eskualde-osagaiei (Woodworth et al., 2019). Azterlan honetan, Bizkaiko golkoko kostaldean dauden mareografo guztietan erregistratutako itsas mailaren denbora-serieak aztertu dira, eta guztiek igoera nabarmena erakusten dute. Igoera-tasak bitarte hauetan daude: $1,35 \pm 0,05$ cm hamarkada bakoitzeko (Brest 1846–2023) eta $3,97 \pm 0,54$ cm hamarkada bakoitzeko (Coruña 1992–2023). Oro har, tasarik altuenak azken aldiei dagozkie (1990eko hamarkadatik aurrera). Hala egiaztatzen da Bresteko seriea aztertuz gero, non 1992tik 2023ra bitarteko igoera-tasa ($3,30 \pm 0,42$ cm hamarkada bakoitzeko) handiagoa den seriearen aldi osokoaren bikoitza baino.

Beraz, kostaldeko puntu desberdinetan eta ozeano irekian aztertutako serie guztiek adierazten dute Bizkaiko golkoko itsasoaren batez besteko maila 1,3 eta 3,9 cm arteko tasarekin igotzen ari dela hamarkada bakoitzeko (2,6 cm hamarkada bakoitzeko, batez beste) 1990eko hamarkadaz geroztik. Tasa hori aldi bererako tasa globala baino apur bat txikiagoa da ($3,4 \pm 0,3$ cm hamarkada bakoitzeko, 1993–2023; Copernicus Marine Service, 2025b). Hala ere, kontuan hartu behar da itsas mailaren igoera ez dela planeta osoan homogenea izan (Cazenave & Moreira, 2022). Horrela, Atlantikoaren ipar-ekialdean eta, zehazkiago, Bizkaiko golkoaren ekialdean, batezbesteko globala baino igoera txikiagoa ikusi da (von Schuckmann et al., 2024). Beraz, ondoriozta daiteke detektatutako igoera bat datorrela maila globaleko igoerarekin. Gainera, behatutako igoera bizkortzen ari da eremuan azken hiru hamarkadetan, XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta, aldi luzeagoak aztertu dituzten azterlanekin bat etorritik (Woppelmann et al., 20006, Dangendorf et al., 2019).

2.5. Olatuak

Olatuak elementu erabakigarria dira kostaldeko morfodinamika-prozesuetan, hala nola kostaldeko higaduran, eta itsas mailaren muturrei ekarpena egiten diete denbora-eskala askotan (Melet et al., 2018; Melet et al., 2020). Hala, eragina izan dezakete kostaldeko komunitateetan, ekosistemetan eta azpiegituretan. Klima-aldaketak aldatu egin ditzake

En la costa, el cambio en el nivel del mar puede ser diferente del aumento del nivel del mar en océano abierto ya que, cerca de la costa los procesos a pequeña escala se superponen a la media global y a los componentes regionales del nivel del mar (Woodworth et al., 2019). En este estudio se han analizado las series temporales del nivel del mar registrado en todos los mareógrafos ubicados en las costas del golfo de Vizcaya, mostrando todos ellos un ascenso significativo. Las tasas de ascenso oscilan entre $1,35 \pm 0,05$ cm por década (en Brest 1846–2023) y $3,97 \pm 0,54$ cm por década (en A Coruña 1992–2023). En general, las tasas más elevadas corresponden a los periodos más recientes (desde los años 90), como se comprueba al analizar la serie de Brest, en la que en el periodo 1992–2023 la tasa de ascenso ($3,30 \pm 0,42$ cm por década) es más del doble que en el periodo completo de la serie.

Por tanto, todas las series analizadas en los diferentes puntos de la costa y en el océano abierto indican que el nivel medio del mar en el golfo de Vizcaya está ascendiendo a una tasa de entre 1,3 y 3,9 cm por década (en promedio 2,6 cm por década) desde los años 90. Esta tasa es ligeramente inferior a la tasa global para el mismo periodo ($3,4 \pm 0,3$ cm década⁻¹ 1993–2023; Copernicus Marine Service, 2025b). No obstante, hay que tener en cuenta que el ascenso del nivel del mar no ha sido homogéneo en todo el planeta (Cazenave & Moreira, 2022). Así, en el NE Atlántico y más concretamente en el este del golfo de Vizcaya, se ha observado un ascenso menor al promedio global (von Schuckmann et al., 2024). Por tanto, se puede concluir que el ascenso detectado es consistente con el ascenso a nivel global. Además, el ascenso observado se está acelerando en la zona en las últimas tres décadas respecto al ascenso medio en el siglo XX, en coherencia con estudios que analizan periodos más largos (Woppelmann et al., 20006, Dangendorf et al., 2019).

2.5. Oleaje

El oleaje es determinante en los procesos de morfodinámica costera, como la erosión costera, y contribuye también 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. El cambio climático puede modificar el clima de las

olatuen ezaugarriak, olatuen sorkuntzarekin eta hedapenarekin zuzenean lotutako aldagaiak aldatzearen ondorioz; izan ere, haize-patroiak aldatu ditzake gainazalean, energia edo hedapen-norabidea edo -distantzia aldaraziz (Reguero et al., 2019).

Eskualde mailan, Ulazia et al.-en azterlanak (2017) aukera eman du 1900etik Bizkaiko golkoko olatu-altuera adierazgarriaren (Hs) igoera karakterizatzen, Hs-ren urteko +0,40 cm-ko igoerarekin. 1970–2000 aldiari dagokionez, Paris et al.-ek (2014) Hs-ren igoera handiagoa (urtean +0,50 cm, batez besteko baldintzetan) eta olatuen muturreko baldintzak (Hs90, olatu-altuera adierazgarriaren 90 pertzentila, eta +3,00 cm arteko igoera udazkeneko hilabeteetan) identifikatu zituzten. 1993–2021 aldian, berranalisi-datuetan oinarrituta, muturreko olatuen adierazlearen (balio klimatologikoarekiko Hs90 gairatzen den aldien ehunekoa) igoera-tasa ez-esanguratsua ikusten da: $+0,17 \pm 0,0654$ cm-ko tasa hamarkada bakoitzeko (Copernicus Marine Service, 2025). Bizkaiko golkoko Hs-ren aldakortasunak harremana du Ipar Atlantikoko Oszilazioaren (NAO) klima-aldakortasunaren adierazleekin eta Mendebaldeko Europaren gaineko Presio Anomalian (WEPA) oinarritutako adierazlearekin (Castelle et al., 2017).

Azterlan honetan egindako analisisiek adierazten dute Bilbo-Bizkaiko buian erregistratutako Hs-k goranzko joera duela, baina ez esanguratsua: 1991–2023 aldian, hamarkada bakoitzeko $+1,473 \pm 2,559$ cm. Aldiz, olatu-altuera adierazgarriaren hileko muturrek (Hs90, olatu-altuera adierazgarriaren hileko 90 pertzentila) Hs90en igoera nabarmena adierazten dute: $15,675 \pm 6,385$ cm-ko tasa hamarkada bakoitzeko, aldi horretan bertan.

2.6. Kostaldeko higadura hondartzetan

Kostaldekoko aldaketa morfologikoak prozesu naturalen eta antropogenikoen arteko interakzio konplexuen emaitza dira, eta hainbat espazio- eta denbora-eskalatan gertatzen dira (Ruggiero et al., 2005; Crapoulet et al., 2015; Jackson & Short, 2020; Short & Jackson, 2021). Denbora-eskala laburretan, hondartzen morfodinamika eta olatuen intzidenteen energia erlaxatuta daude, eta ohikoa da ekaitzek kostaldeko higadura azkarra eragitea; olatu

olas al modificar las variables directamente relacionadas con su generación y propagación, esto es, cambios en los patrones de vientos, en la superficie en la que pueden cambiar la energía, dirección y/o distancia de propagación (Reguero et al., 2019).

A nivel regional, en el golfo de Vizcaya, el estudio de Ulazia et al. (2017) ha permitido caracterizar un aumento de la altura de ola significativa (Hs) desde 1900, a un aumento de Hs de +0,40 cm por año. Sobre el periodo 1970–2000, Paris et al. (2014) identificaron un aumento de Hs mayor (+0,50 cm por año en condiciones medias) y un aumento de las condiciones extremas del oleaje (Hs90, percentil 90 de altura de ola significativa) de hasta +3,00 cm por año en los meses de otoño. En el periodo 1993–2021, se observa, a partir de datos de reanálisis, una tasa de ascenso no significativa del indicador de oleaje extremo (porcentaje de veces que se supera Hs90 respecto al valor climatológico) a una tasa de $+0,17 \pm 0,0654$ cm por década (Copernicus Marine Service, 2025). La variabilidad de Hs en el golfo de Vizcaya se ha 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).

Los análisis realizados en este estudio indican que la Hs registrada en la boya de Bilbao-Vizcaya presenta una tendencia creciente, aunque no significativa, de $+1,473 \pm 2,559$ cm por década en el periodo 1991–2023. En cambio, los extremos mensuales de altura de ola significativa (Hs90, percentil 90 mensual de la altura de ola significativa) indican un aumento significativo de Hs90 con una tasa de $15,675 \pm 6,385$ cm por década para el mismo periodo.

2.6. Erosión costera en playas

Los cambios morfológicos en la zona costera son el resultado de complejas interacciones entre procesos naturales y antropogénicos que tiene lugar en múltiples escalas espaciales y temporales (Ruggiero et al., 2005; Crapoulet et al., 2015; Jackson & Short, 2020; Short & Jackson, 2021). En escalas de tiempo cortas, la morfodinámica de playas y la energía del oleaje incidente están correlacionadas, siendo común que las tormentas provoquen una erosión



leunekin, aldiz, hondartza berreskuratzeko prozesua motelagoa da (Davis & Fox, 1972; Wright & Short, 1984; Castelle & Harley, 2020). Denbora-escala handiagoetan, itsas mailaren igoerak kosta-lerroa atzeratzen ere laguntzen du. Eskala globalean, kostalde hareatsu gehienak higatzen ari dira jada (Bird, 1985; Luikendijk et al. 2018; Mentaschi et al., 2018), eta egoera larriagotu egin liteke klima-aldaketaren ondorioz (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe, 2016).

Kostaldearen atzeraldiari edo akrezioari dagokionez gehien erabiltzen den adierazlea kosta-lerroaren mugimendua da (Hanslow, 2007). Lerro horrek aldakortasun handia du, eta epe laburreko zein epe luzeko mugimenduei lotuta dago. Denbora-escala guztietan lortzen dira hondartzen higadura-/akrezio-zikloak, eta hondartzen higadura monitorizatzeko aukera ematen dute. Tokiko eskalan, faktore askok higadura-/akrezio-tasak zehazten dituzte, hala nola kostaldearen igoera, kostaldearen malda, kostaldeko elementuak eta ezaugarriak eta aldaketa-tasa historikoak.

Azterlan honetan, Zarauzko hondartzako mareaz gaindiko eta marearteko eremuaren denbora-seriea aztertu da, 2010–2023 aldian. Itsasertzeko Bideo-metria Foru Sareak emandako serierik luzeena da, eta, beraz, hori erabiltzen da hondartzetako higaduraren bilakaera historikoa aztertzeko. Hondartza horretako mareaz gaindiko eremuak urtaro-ziklo markatua du: oro har, txikitu egiten da energia gehieneko hilabeteetan (urria-martxoa), sedimentua hondartzaren goialdetik behealdera garraiatzearen ondorioz (higadura), eta handitu egiten da energia gutxieneko hilabeteetan zehar (apirila-iraila), hondartzaren behealdetik goialdera garraiatzearen ondorioz (akrezioa). Marearteko eremuak nolabaiteko urtarokotasuna erakusten du, mareaz gaindiko eremuaren alderantzizkoa eta ez hain argia.

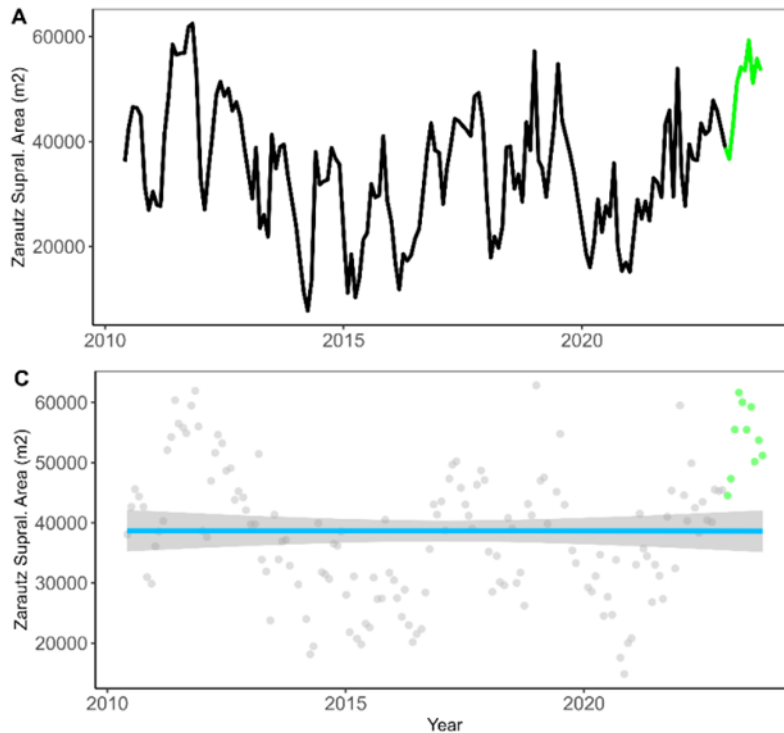
2010–2023 aldirako denbora-seriearen analisiak mareaz gaindiko eremua murrizteko joera adierazten du, $-1.408,7 \pm 5.170,6 \text{ m}^2$ -ko tasarekin hamarkada bakoitzeko, baina ez da esanguratsua. Aldiz, marearteko eremuaren igoera lineala ikusten da, baina hori ere ez oso esanguratsua: $+1.494,8 \pm 8.320,6 \text{ m}^2$ hamarkada bakoitzeko. Denbora-serieak erakusten duenaren arabera, badirudi Zarauzko hondartzak 2014a baino lehenagoko aldiaren antzeko oreka-egoera lortu duela. Hau da, harea-bolumen osoa edo zati handi bat sedimentu-sistemara itzuli da 2014ko higadura handiaren ondoren.

costera rápida, mientras que la recuperación de la playa con oleajes suaves es más lenta (Davis & Fox, 1972; Wright & Short, 1984; Castelle & Harley, 2020). A escalas temporales mayores, el incremento del nivel del mar también contribuye al retroceso de la línea de costa. A escala global, gran parte de las costas arenosas ya están erosionándose (Bird, 1985; Luikendijk et al. 2018; Mentaschi et al., 2018), y su situación podría agravarse por el cambio climático (Hinkel et al., 2013; Ranasinghe, 2016).

El movimiento de la línea de costa es el indicador de recesión o acreción costera más utilizado (Hanslow, 2007). Esta línea presenta una gran variabilidad, estando asociada tanto a movimientos de corto plazo como de largo plazo. En todas las escalas temporales se obtienen los ciclos de erosión/acreción de las playas, que permiten monitorizar la erosión de las playas. A la escala local, numerosos factores determinan las tasas de erosión/acreción, como la elevación costera, pendiente de la costa, los elementos y características de la costa y las tasas históricas de cambio.

En este estudio se ha analizado la serie temporal del área supramareal e intermareal de la playa de Zarautz en el periodo 2010–2023. Es la serie más larga proporcionada por la Red Foral de Videometría Litoral y por tanto la que se utiliza para el análisis de la evolución histórica de la erosión en playas. El área supramareal de dicha playa presenta un ciclo estacional bien marcado: en general, disminuye en los meses de mayor energía (octubre-marzo) debido al transporte de sedimento de la zona alta a la zona baja de la playa (erosión), y aumenta a lo largo de los meses de menor energía (abril-septiembre) debido al transporte de la zona baja a la zona alta de la playa (acreción). El área intermareal presenta cierta estacionalidad, inversa y menos clara que la del área supramareal.

El análisis de la serie temporal para el periodo 2010–2023 indica una tendencia a la disminución del área supramareal a una tasa de $-1.408,7 \pm 5.170,6 \text{ m}^2$ por década, pero no significativa. En cambio, se observa un aumento lineal del área intermareal, aunque tampoco significativo de $+1.494,8 \pm 8.320,6 \text{ m}^2$ por década. La serie temporal parece indicar que la playa de Zarautz ha alcanzado un estado de equilibrio similar al periodo anterior a 2014. Esto es, todo o gran parte del volumen de arena ha vuelto al sistema sedimentario después de la fuerte erosión del año 2014.

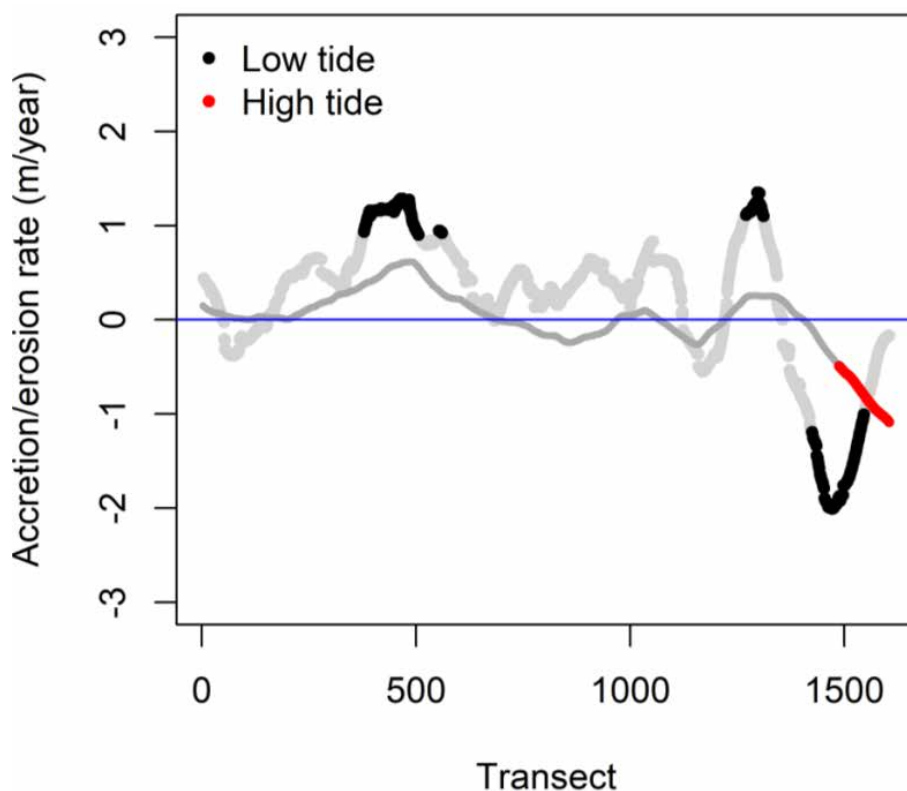


7. ird. A. Zarautzko mareaz gaindiko eremuaren denbora-seriea 2010–2023 aldian. C. Denbora-serieko hondakin partzialak eta joeraren osagaia (urdina). 2023ko datuak berdez erakusten dira.

7. Fig. A. Serie temporal del área supramareal de Zarautz en el periodo 2010–2023. C. Residuos parciales de la serie temporal y componente de la tendencia (azul). Los datos correspondientes a 2023 aparecen en verde.

Hondartzaren batez besteko zabalera kostaldearekiko nahiko perpendikularrean dagoen distantzia garbitik abiatuta estimatu da, kostaldean zehar hainbat trantsektutan. Emaitzek erakusten dute profil gehienetan itsasgora-lerroa orekan dagoela; soilik hondartzaren ekialdeko muturrean egin du nabarmen atzera, urtean $-1,5$ m-ko tasan. Higadura-tasa handiagoa jasateko aukera ematen duen harea-erreserba handiago bat (duna) eta ibaia egoteagatik gertatzen da hori. Mendebaldeko eremuan dagoen horma batek mugatu egiten du higadura hori. Itsasbehera-lerroak, aldiz, urtean $+1,0$ m-ko aurrerapen-eremu zentral txiki bat erakusten du itsasorantz, eta atzerapen-eremu bat ekialdean (urtean $-1,5$ m). 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. Beraz, analisiak adierazten du bi kosta-lerroak, batez beste, orekan daudela.

La anchura de la playa se ha estimado a partir de la distancia neta en dirección sensiblemente perpendicular a la costa en diferentes transectos a lo largo de la misma. Los resultados indican que, en la mayoría de los perfiles, la línea de pleamar se encuentra en equilibrio, solamente retrocede significativamente en el extremo este de la playa, a una tasa de $-1,5$ m por año. Esto es debido a la presencia de una mayor reserva de arena (duna) y la presencia del río 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 pequeña zona central de avance hacia el mar de $+1,0$ m por año y una zona este de retroceso ($-1,5$ m por año). Esta modulación longitudinal en 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. Por tanto, el análisis indica que, en promedio, ambas líneas de costa se encuentran en equilibrio.



8. ird. Kosta-lerroaren akrezioa (balio positiboak) eta higadura (balio negatiboak) itsasgoran eta itsasbeheran, trantsektuaren joeratik abiatuta kalkulaturik (mendebaldetik: 0 ekialdera: 1500), 2010–2023 aldian. Malda ez-esanguratsuen balioa ($p < 0,05$) grisez adierazten da.

8. Fig. Acreción (valores positivos) y erosión (valores negativos) de la línea de osta en la pleamar y la bajamar estimada a partir de la tendencia del transecto (de oeste:0 a este: 1500) en el periodo 2010–2023. El valor de la pendiente no significativa ($p < 0,05$) se indica en gris.

Beraz, aztertutako adierazleek ez dute 2010–2023 aldian Zarauzko hondartzan higadura-joerarik erakusten, eta 2014a baino lehenagoko aldian zeukan antzeko oreka-egoera lortu du hondartzak. Horrek adierazten du aztertutako 14 urteetan hondartzaren bilakaera nagusiki itzulera-korronteen eta barren luzetarako modulazioaren eraginpean dagoela. Aipatzekoa da, halaber, adierazle horiek behar bezala interpretatu ahal izateko, garrantzitsua dela analisi-aldian egin diren birgaitze artifizialeko jarduketak kontuan hartzea. Jarduketa aipagarri bakarra 2014ko maiatzan egindakoa da, non 100.000 m³ harea injektatu ziren (Trantsizio Ekologikorako eta Erronka Demografikorako Ministerioa), urte hartako lehen hilabeteetan izandako ekaitzen ondorioak arintzeko helburuarekin. Higadura-tasen aldakortasun handia dela-eta, aztertutako aldia laburra da oraindik, hondartzak klima-aldaketari lotutako itsas mailaren pixkanakako igoerari eman dion erantzuna detektatu ahal izateko.

Por tanto, los indicadores analizados no muestran tendencias de erosión en el periodo 2010–2023 en la playa de Zarautz, habiendo alcanzado un estado de equilibrio similar al periodo anterior a 2014. Esto indica que en los 14 años analizados la evolución de la playa está principalmente influenciada por la modulación longitudinal de corrientes de retorno y barras. Cabe matizar también, que para una correcta interpretación de estos indicadores es importante tener en cuenta las actuaciones de regeneración artificial realizadas en el periodo de análisis. La única reseñable es la inyección de 100.000 m³ de arena en mayo de 2014 (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico), con el objetivo de paliar las consecuencias de los temporales de los primeros meses del dicho año. Debido a la gran variabilidad de las tasas de erosión, el periodo analizado es todavía corto para detectar la respuesta de la playa al gradual ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático.

2.7. Azidotzea (pH-a)

Ozeanoen azidotzea ozeanoak atmosferatik eratorritako CO₂ gehiegi xurgatzearen ondorioa da. Ozeanoek 2011tik 2020ra bitartean askatutako CO₂ antropogeniko osoaren % 26 inguru xurgatu dute (Friedlingstein et al., 2025). Beraz, eskala globalean, ozeano irekiaren gainazaleko pH-a urtean 0,0018 pH-unitateko tasara jaisten ari da (Lauvset et al., 2015). Hala ere, ozeanoa azidotzearen progresioa ez da globalki homogenea, eta oso lotura estua du testuinguru geografikoarekin (Bates et al., 2014).

Batez beste, eskala globalean behatutako joera berari jarraitzen dio Ozeano Atlantikoaren ipar-ekialdean eta ondoko itsasoetan ozeanoaren azidotzeak: gainazaleko pH-aren beherakada nabarmena erakusten du 1985az geroztik, -0,020 eta -0,012 pH-unitate arteko batez besteko tasarekin. Hau da, hamarkada bakoitzeko, batez beste 0,017 ± 0,001 pH-unitateko joera globalaren ingurukoa (von Schuckmann et al., 2024). Ozeano irekian, eskualdeko ozeanoaren gainazaleko pH-aldaketaren motor nagusia CO₂-ren kontzentrazio atmosferikoaren gorakada da (Gehlen et al., 2020). Kostaldean, industria- edo nekazaritza-jatorriko faktore estresatzaile gehigarriak eta prozesu ozeanikoen gorabehera naturalak (adibidez, zirkulazioa, kostaldeko azalera) pH-aren aldakuntzei ere laguntzen diete. Beraz, kostaldean pH-aren aldakortasuna eta joera ulertzeko, funtsezkoak dira aldagai horren neurketa erregularrak. 2021era arte, neurri puntualak ezarrita egon arren, ez zegoen euskal kostaldean pH-a etengabe monitorizatzeko ekiporik. 2021ean, lehenengo ekipa bat (SAMI) erosi zen, eta harrezkero hura ezartzen ari dira. 2023an, sei hilabetez mantendu ahal izan zen ekipoa ainguratuta.

2.7. Acidificación (pH)

La acidificación de los océanos es una consecuencia de la absorción por el océano de un exceso de CO₂ procedente de la atmósfera. Los océanos han absorbido alrededor de un 26 % del total de CO₂ antropogénico liberado entre 2011 y 2020 (Friedlingstein et al., 2025). En consecuencia, a escala global el pH de la superficie del océano abierto está disminuyendo a una tasa de 0,0018 unidades de pH al año (Lauvset et al., 2015). Sin embargo, la progresión de la acidificación oceánica no es globalmente homogénea y está muy ligada al contexto geográfico (Bates et al., 2014).

En promedio, la acidificación del océano en el noreste del océano Atlántico y mares adyacentes sigue la misma tendencia observada a escala global, mostrando un pronunciado descenso del pH superficial desde 1985, a una tasa promedio de entre -0,020 y -0,012 unidades de pH. Esto es, del orden de la tendencia global promedio de 0,017 ± 0,001 unidades de pH por década (von Schuckmann et al., 2024). En el océano abierto el principal motor del cambio de pH de la superficie oceánica regional es el aumento de la concentración atmosférica de CO₂ (Gehlen et al., 2020). En la costa, factores estresantes adicionales de origen industrial o agrícola y fluctuaciones naturales de los procesos oceánicos (ej. circulación, afloramiento costero) contribuyen también a las variaciones del pH. Por tanto, con el objetivo de entender la variabilidad y tendencia del pH en la zona costera, son esenciales las mediciones regulares de dicha variable. Hasta 2021, a pesar de contar con medidas puntuales, no se disponía de un equipo que permitiera monitorizar en continuo el pH en la costa vasca. En 2021 se adquirió un primer equipo (SAMI) y desde entonces se está trabajando en su implementación. Durante 2023 se pudo mantener el equipo fondeado durante 6 meses.



Aldagaia Variable	Urtaro Estación	Batezbestekoa ± SD Promedio ± SD
ph	Negua / Invierno	8,18 ± 0,07
	Udaberria / Primavera	8,14 ± 0,07
	Uda / Verano	8,14 ± 0,09
	Udazkena / Otoño	8,16 ± 0,05
Temperatura Temperatura	Negua / Invierno	12,57 ± 0,50
	Udaberria / Primavera	13,25 ± 1,18
	Uda / Verano	15,11 ± 3,71
	Udazkena / Otoño	15,25 ± 2,04
Chl-a	Negua / Invierno	0,56 ± 0,73
	Udaberria / Primavera	0,48 ± 0,64
	Uda / Verano	0,38 ± 0,42
	Udazkena / Otoño	0,38 ± 0,41
Oxigenoa Oxígeno	Negua / Invierno	5,86 ± 0,32
	Udaberria / Primavera	5,58 ± 0,46
	Uda / Verano	5,27 ± 0,48
	Udazkena / Otoño	5,33 ± 0,32

2. taula. PH-aren batezbestekoa eta desbideratze estandarra urtaro bakoitzerako 2002-2023an zehar, EAeko trantsizio-uren eta itsasertzeko uren egoera ekologikoaren jarraipena egiteko sarearen laginketa-puntuetan.

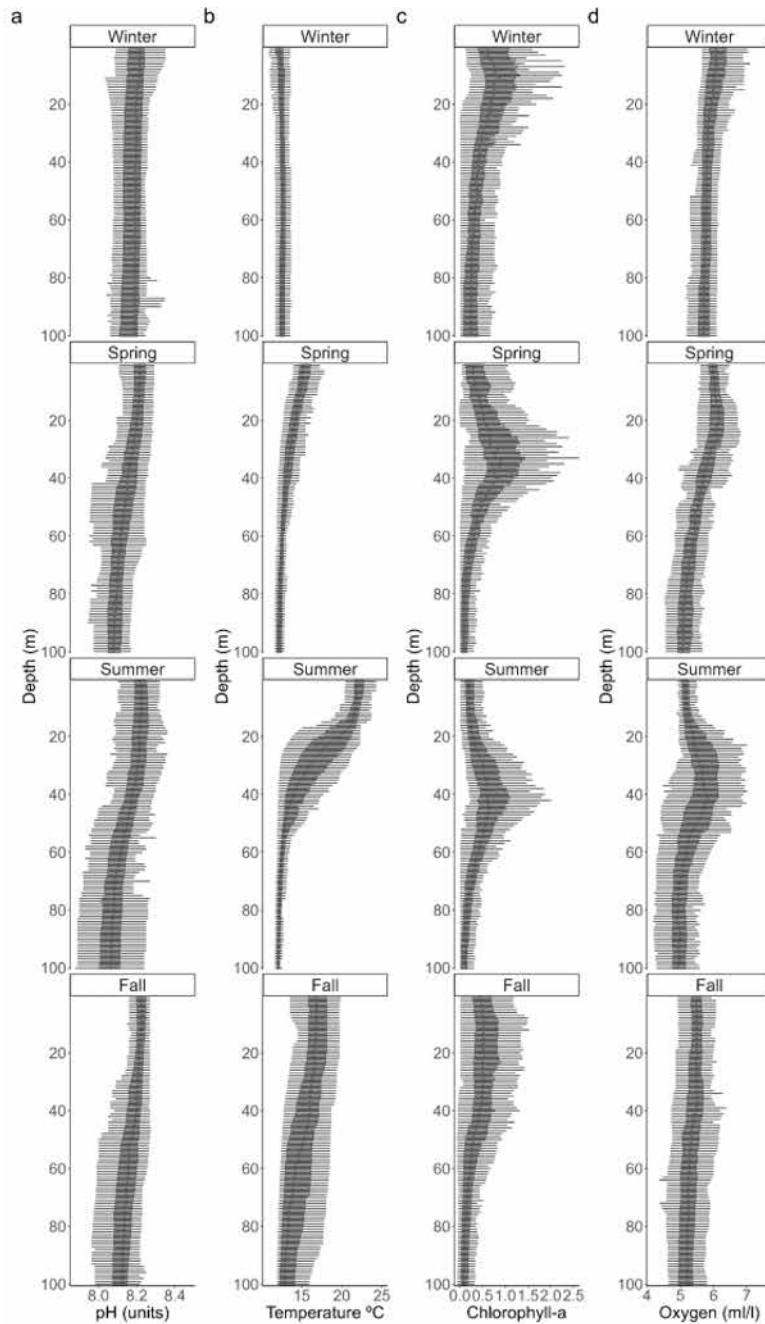
2. Tabla. Media y desviación estándar del pH para cada estación del año durante 2002-2023 en los puntos de muestreo de la Red de Seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costera de la CAP.

Gure itsasertzean azidotzeko joera posible bat ebaluatzeko, pH-aren aldakortasuna eta joera aztertu dira EAeko trantsizio-uren eta itsasertzeko uren egoera ekologikoaren jarraipena egiteko sarearen esparruan (L-RF10, L-RF20 eta L-RF30 estazioak) 2002-2023 aldian egindako behaketan, CTD doita-sun txikiko pH-sentsore batekin.

Aztertutako urtaro guztietan pH-gradiente bat ikusten da azaleratik hondoraino aztertutako al-dian. pH-balioak murriztu egiten dira gainazaletik (0-20 m: L-RF10 = 8,20 ± 0,05; L-RF20 = 8,21 ± 0,05; L-RF30 = 8,21 ± 0,04) beheko geruzetaraino (80-100 m: L-RF10 = 8,10 ± 0,08; L-RF20 = 8,10 ± 0,07; L-RF30 = 8,11 ± 0,07).

Con el objetivo de evaluar una posible tendencia a la acidificación en nuestro litoral, se ha analizado la variabilidad y tendencia del pH en las observaciones realizadas de forma puntual en el marco de la Red de Seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costera de la CAP (estaciones L-RF10, L-RF20 y L-RF30) durante el periodo 2002-2023 con un sensor de pH de baja precisión en CTD.

En todas las estaciones analizadas se observa un gradiente de pH desde la superficie a fondo durante el periodo analizado. Los valores de pH disminuyen desde la superficie (0-20 m: L-RF10 = 8,20 ± 0,05; L-RF20 = 8,21 ± 0,05; L-RF30 = 8,21 ± 0,04) hasta las capas inferiores (80-100 m: L-RF10 = 8,10 ± 0,08; L-RF20 = 8,10 ± 0,07; L-RF30 = 8,11 ± 0,07).



9. ir. Euskal kostaldeko ur-zutabeko (0–100 m) pH-aren, tenperaturaren, klorofilaren eta oxigenoaren urtaroko aldakuntza, kutxa-diagrama batean irudikatua. Koadroaren beheko eta goiko aldeko beheko kuartila (Q1) eta goiko kuartila (Q3) dira, eta koadroaren barruko banda, berriz, mediana. Biboteak kutxaren kuartil arteko tartea (Q3–Q1) halako 1,5 arte zabaltzen dira.

9. Fig. Variación estacional del pH, temperatura, clorofila y oxígeno en la columna de agua (0–100 m) de la costa vasca representado en un diagrama de caja. La parte inferior y superior del cuadro corresponden al cuartil inferior (Q1) y superior (Q3), y la banda dentro del cuadro es la mediana. Los bigotes se extienden hasta 1,5 veces el rango intercuartil (Q3–Q1) desde la caja.



pH-ak ur-zutabeen (0,5–100 m) duen urtarokotasunari dagokionez, maximoak neguan ($8,18 \pm 0,07$) eta minimoak udan ($8,14 \pm 0,05$) gertatzen dira, batez besteko urtaro-amplitudea 0,04 pH-unitate ingurukoa izanik. Sakoneko aldaketari dagokionez, ez da pH-aren aldaketarik ikusten neguan eta udazkenean zehar; udan eta udaberrian, aldiz, nabarmenak dira. Aztertutako gainerako aldagaiek (tenperatura, klorofila eta oxigenoa) ere urtaro-patroi argia erakutsi zuten, udaberrian eta udan garatutako termoklina nabarmena izanik.

Denbora-serieen analisiaren emaitzek adierazten dute pH-aren beherakada nabarmena izango dela hiru urtaroetan sakonera guztietan 2002–2022 aldirako. Gainazalean (0,5 m), beherakada nabarmen handiagoa ikusten da L-RF10en ($-0,041 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹), L-RF20ekin ($-0,027 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹) eta L-RF30ekin aldekatuta ($-0,022 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹). Tasa horiek, nolana ere, txikiagoak dira sakonerako aldaketa-tasak baino: urtaro guztietan, pH-aren jaitziera-abiadura handiagoa da geruza sakonagoetan. Adibidez, 100 m-ko sakoneran, pH-a $-0,074 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹eko erritmoan murriztu zen L-RF10en. Estazio horrek jaitziera-tasa handiagoak ditu L-RF20k ($-0,061 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹) eta L-RF30ek baino ($-0,056 \pm 0,002$ unitate hamarkada⁻¹). Denbora-seriearen hasieran jaitziera-abiadura motelagoak ikusten dira ($-0,0009$ unitate hamarkada⁻¹ 2002an) amaieran baino ($-0,001$ unitate hamarkada⁻¹ 2022an).

Euskal itsasertzean behatutako pH-aren aldaketa-tasak handiagoak dira ozeano irekiko batezbesteko globalarenak baino, baina kostaldeko beste eskualde batzuetan aurkitutakoen antzekoak (Flecha et al., 2022). Aztertutako laginketa-estazioak dauden moduko kostaldeko eremuetan eta sakonera txikienetan, normalean produktiboagoak dira, eta itsaso irekikoez bestelako prozesu konplexuek eta dinamikoek eragiten diete, hala nola ibaien deskargak, jarduera biologikoak edo tenperaturaren aldakortasunak (Carstensen et al., 2019). Beraz, kostaldeko eremuetan, gainazaleko pH-aren aldaketa-tasak handiagoak izan daitezke (Bates et al., 2014; Flecha et al., 2022).

En cuanto a la estacionalidad del pH en la columna de agua (0,5–100 m), los máximos se dan en invierno ($8,18 \pm 0,07$) y mínimos en verano ($8,14 \pm 0,05$), con una amplitud estacional media de aproximadamente 0,04 unidades de pH. Respecto al cambio en profundidad, no se observan variaciones de pH con la profundidad durante el invierno y otoño, mientras que son marcadas durante el verano y la primavera. El resto de variables analizadas (temperatura, clorofila y oxígeno) también mostraron un patrón estacional claro, con una marcada termoclina desarrollada en primavera y verano.

Los resultados del análisis de las series temporales indican una disminución significativa del pH en todas las profundidades en las tres estaciones para el periodo 2002–2022. En la superficie (0,5 m) se observa una disminución significativamente más fuerte en L-RF10 ($-0,041 \pm 0,002$ unidades década⁻¹) en relación con L-RF20 ($-0,027 \pm 0,002$ unidades década⁻¹) y L-RF30 ($-0,022 \pm 0,002$ unidades década⁻¹). Sin embargo, estas son menores que las tasas de cambio en profundidad, en todas las estaciones la velocidad de disminución del pH es mayor en las capas más profundas. Por ejemplo, a una profundidad de 100 m, el pH disminuyó a un ritmo de $-0,074 \pm 0,002$ unidades década⁻¹ en L-RF10, estación que también presenta mayores tasas de disminución en comparación con L-RF20 ($-0,061 \pm 0,002$ unidades década⁻¹) y L-RF30 ($-0,056 \pm 0,002$ unidades década⁻¹). Se observan velocidades de disminución más lentas al inicio ($-0,0009$ unidades década⁻¹ en 2002) en relación con el final de la serie temporal ($-0,001$ unidades década⁻¹ en 2022).

Las tasas de cambio del pH observadas en el litoral vasco son superiores a las del promedio global en el océano abierto, pero del orden de las encontradas en otras regiones costeras (Flecha et al., 2022). En las zonas costeras y menos profundas como en las que se encuentran las estaciones de muestreo analizadas, son normalmente más productivas y están afectadas por procesos complejos y dinámicas diferentes a las del mar abierto, como es la descarga de los ríos, la actividad biológica o la variabilidad de la temperatura (Carstensen et al., 2019). En consecuencia, las tasas anuales de cambio del pH en superficie en las zonas costeras pueden ser un orden de magnitud mayor (Bates et al., 2014; Flecha et al., 2022).

Puntua Punto	Sakonera (m) Profundidad (m)	Aldi baterako tasa (unitate hamarkada ⁻¹) Tasa temporal (unidades década ⁻¹)
L-RF10	0,5	-0,041 ± 0,0016
L-RF20	0,5	-0,027 ± 0,0018
L-RF30	0,5	-0,022 ± 0,0018
L-RF10	100	-0,074 ± 0,0016
L-RF20	100	-0,061 ± 0,0018
L-RF30	100	-0,056 ± 0,0018

3. taula. pH-aldaketak denboran zehar eta sakonera desberdinetan, 2002-2022 aldian.

3. Tabla. Cambios de pH a lo largo del tiempo y para distintas profundidades en el periodo 2002-2022.

Laburbilduz, pH-a etengabe ari da murrizten ur-zutabe osoan (0-100 m) 2002-2023 aldian Bizkaiko golkoko kostaldeko hiru laginketa-estazioetan. Epe luzeko pH-aren patroiak maila globalean CO₂ kontzentrazioaren igoerak bultzatuta daude; urtaroko patroiak eta eredu bertikalak, berriz, ingurumen-faktoreen efektuari lotuta daudela dirudi, termoklinaren garapenarekin eta ur-zutabeen zehar jarduera biologikoen gertatzen diren desberdintasunekin batera.

Azidotzea mehatxu garrantzitsua da itsasoko ekosistemarako, eta inpaktu konplexuak ditu hainbat espezieren fisiologian eta, beraz, haien metabolismoan (Nilsson et al., 2012; Kroeker et al., 2013); gainera, ondorio ugari ditu organismoan, murriztu egiten baititu hazkundera, lokomozioa, ugaltze-gaitasuna eta homeostasia, kaltzifikazio-baldintzak kontrolatzeko gai ez badira (Hendriks et al., 2015). Efektu horiek ustekabeko beste efektu-kate bat ekar dezakete, eta horrek eragina izan dezake ekosistemen egitura eta funtzioetan, bai eta eskaintzen dituzten ekosistema-zerbitzuetan ere (Zunino et al., 2021). Horregatik guztiagatik, funtsezkoa da gure itsasertzeko pH-aren bilakaera monitorizatzen jarraitzea.

En resumen, el pH muestra una disminución constante en toda la columna de agua (0-100 m) en el periodo 2002-2023 en tres estaciones de muestreo en la costa del golfo de Vizcaya. Los patrones de pH a largo plazo están impulsados por el aumento de la concentración de CO₂ a nivel global, mientras que los patrones estacionales y verticales parecen estar más ligados al efecto de factores ambientales junto con el desarrollo de la termoclina y las diferencias en la actividad biológica a lo largo de la columna de agua.

La acidificación es una amenaza importante para los ecosistemas marinos, con impactos complejos en la fisiología de diferentes especies y, por tanto, en su metabolismo (Nilsson et al., 2012; Kroeker et al., 2013), con numerosas consecuencias a nivel de organismo, como la disminución en el crecimiento, locomoción, capacidad reproductiva y de homeostasis si no son capaces de controlar las condiciones de calcificación (Hendriks et al., 2015). Estos efectos pueden dar lugar a otros efectos inesperados en cascada que afecten a la estructura y las funciones de los ecosistemas, así como a los servicios ecosistémicos que ofrecen (Zunino et al., 2021). Por todo ello, es fundamental seguir monitorizando la evolución del pH en nuestro litoral.



3. Mugarri-puntuen (*tipping points*) analisia

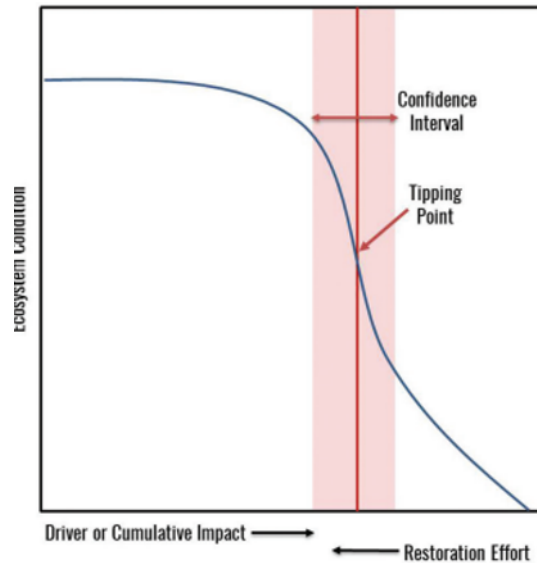
Klima-aldaketaren testuinguruan, hauxe da mugarri-puntua (*tipping point*): «sistemaren propietateetan izandako aldaketa-maila bat; maila horretatik harago, sistema berrantolatu egiten da, askotan modu ez-linealean, eta ez da hasierako egoerara itzultzen, ezta aldaketaren faktore bultzatzaileei aurre egiten zaienean ere. Klima-sistemari dagokionez, terminoak atalase kritiko bati egiten dio erreferentzia, non klima globala edo eskualdekoa egoera egonkor batetik beste egoera egonkor batera aldatzen den» (IPCC, 2019). *Tipping point*ak klima-sistema osoan, ekosistemetan, izotz-geruzetan eta ozeanoaren eta atmosferaren zirkulazioan daude.

Mugarri-puntu edo *tipping point* batek, beraz, atalase kritiko bati egiten dio erreferentzia; atalase horretatik aurrera, presio gehigarri bat egotean, sistemak erresilientzia galtzen du eta kualitatiboki desberdina den egoera batera aldatzen da. Duela gutxi egindako azterlan batek giza ongizatean inpaktu potentzial handia zuten 16 *tipping point* identifikatzea lortu du (Armstrong McKay et al., 2022). Horien artean, hauek nabarmentzen dira: itsas mailaren igoera nabarmena, izotz-geruzen kolapsoak eragina, Atlantiko hegoaldeko iraulketa-zirkulazio (AMOC) kolapsoa, hainbat biomaren heriotza atzerakorra (hala nola oihan amazoniarra edo ur tropikaletako koralak), eta permafrosta desizoztearen ondorioz karbonoa askatzea. Horietatik sei oso gertagarriak dira 2 °C-ko edo gutxiagoko aldaketa-agertokietan.

3. Análisis de puntos de no retorno (*tipping points*)

En un contexto de cambio climático, los puntos de no retorno (*tipping points*) se refieren a 'un nivel de cambio en las propiedades del sistema más allá del cual un sistema se reorganiza, a menudo de manera no lineal, y no regresa al estado inicial, incluso si los factores impulsores del cambio son abordados. Para el sistema climático, el término se refiere a un umbral crítico en el que el clima global o regional cambia de un estado estable a otro estado estable' (IPCC, 2019). Los *tipping points* se encuentran en todo el sistema climático, en los ecosistemas, las capas de hielo y a circulación del océano y la atmósfera.

Un punto de no retorno o *tipping point* se refiere por tanto a un umbral crítico a partir del cual una presión adicional provoca que el sistema pierda resiliencia y experimente un cambio hacia un estado cualitativamente diferente. Un estudio reciente logró identificar un total de 16 *tipping points* con un alto impacto potencial sobre el bienestar humano (Armstrong McKay et al., 2022). Entre ellos, destacan el aumento sustancial del nivel del mar debido al colapso de las capas de hielo, el colapso de la circulación de vuelco meridional del Atlántico (AMOC), la muerte regresiva de distintos biomas como la selva amazónica o los corales de aguas tropicales, y la liberación de carbono por el deshielo del permafrost. De ellos, 6 tienen un alto riesgo de suceder ante escenarios de cambio de 2 °C o menos.



10. ir. Faktore bultzatzailearen mailaren eta ekosistemaren egoeraren arteko erlazioa (kurba urdina). Inflexio-puntuak (marra gorria) kurba ez-linealean aldaketa-lekurik nabarmenena adierazten du; bi alboetako konfiantza-tarteak (itzal arrosa), berriz, mugarri-puntuaren kokapen zehatzaren inguruko ziurgabetasun-eremua. Iturria: Martone et al. (2017).

10. Fig. Relación entre el nivel del factor impulsor y el estado del ecosistema (curva azul). El punto de inflexión (línea roja) representa el lugar de cambio más pronunciado en la curva no lineal, con un intervalo de confianza (sombreado rosado) a cada lado que representa la zona de incertidumbre en torno a la ubicación exacta del punto de no retorno. Fuente: Martone et al. (2017).

Testuinguru ekologiko batean, hau da inflexio-puntu bat: ekosistema bat egoera egonkor batetik beste egoera egonkor batera aldatzen den unea, aldaketa nabarmenak dakartzana biodibertsitatean eta hark ematen dituen ekosistema-funtzio eta -zerbitzuetan (GBO, 2014). Inflexio-puntua gurutzatzeak ekosistema osoari sakon eragiten badio, erregimen-aldaketa esaten zaio. Mugarri-puntuak itsasoko eta kostaldeko ekosistema askotan gertatzen dira, klima-aldaketaren eta beste presio antropogeniko batzuen ondorioz (hala nola gehiegizko arrantza edo kutsadura), eta horrek habitata, espezieak eta biodibertsitatea nabarmen galtzea ekarri du (Cox et al., 2000; McCarty et al., 2001).

En un contexto ecológico, un punto de inflexión es una condición en la que un ecosistema experimenta un cambio de un estado estable a un nuevo estado estable, con cambios significativos en la biodiversidad, y las funciones y servicios ecosistémicos que proporciona (GBO, 2014). Si el cruce del punto de inflexión afecta profundamente a todo el ecosistema, se denomina cambio de régimen. Los puntos de no retorno ocurren en una amplia variedad de ecosistemas marinos y costeros debido al cambio climático y otras presiones antropogénicas, como la sobrepesca o contaminación, lo que ha dado lugar a una pérdida significativa de hábitat, especies y biodiversidad (Cox et al., 2000; McCarty et al., 2001).

Itsas mailaren igoerak ondorio garrantzitsuak izango lituzkeen inflexio-puntu baten adibide bat Barnard et al.-en azterlana (2021) da. Itsas mailaren igoeraren eta datozen hamarkadetakako proiektatutako muturreko gertakarien arteko interakzioak, kostaldeko garapenarekin eta azpiegiturekin batera, presio handiagoa izango du kostaldeko sistema fisikoetan, ekologikoetan eta giza sistemetan. Kostaldeko sistema horietako asko mugarri-puntuetara irits litezke; kasu horietan, arriskuekiko esposizioa nabarmen handituko litzateke, eta komunitate,

Un ejemplo de un punto de inflexión a partir del cual el ascenso del nivel del mar tendría consecuencias importantes es el estudio de Barnard et al. (2021). La interacción de la subida del nivel del mar y los eventos extremos proyectada para las próximas décadas, combinada con el desarrollo y las infraestructuras costeras ejercerá una mayor presión sobre los sistemas físicos, ecológicos y humanos a lo largo de la costa. Muchos de estos sistemas costeros podrían alcanzar puntos de no retorno, en los que la exposición a los peligros aumenta sustancialmente



azpiegitura eta ekosistemen egungo forma, funtzioa eta bideragarritasuna mehatxatuta geratuko lirateke.

Ekosistemen kasuan, mugarri-puntuaren adibide bat Nerbioi ibaiaren estuarioko uraren kalitatea aldatu zenekoa izan liteke (Borja et al., 2010). Lurrak erreklamatu, dragatu eta industrializatu ondoren, eta hondakin-urak isurita, XX. mendearan lehen erdialdean oso azkar degradatu zen estuarioa, 1980ko hamarkadaren amaierara arte. Isurketaren presioa jaistean gertatu zen berreskuratzea; neurri batean, hondakin-uren tratamenduari esker. Kasu honetan, uraren kalitate biogeokimikoa berreskuratu arren, jatorrizko biodibertsitatea ez da berreskuratu, eta Nerbioiko estuariorako egoera berri bat ematen duen histeresi posible islatzen du horrek.

Azterlan honetan, Bizkaiko golkoko klimaren eta itsas ekosistemaren mugarri-puntuak edo erregimen-aldaketak aztertu dira. Zehazki, aldagai fisikoen presioei (batez ere, tenperaturaren igoera) denboran emandako erantzun biologikoa aztertu da hiru azterketa-kasutarako: (1) Bizkaiko golkoko antxoaren (*Engraulis encrasicolus*) tamainaren murrizketa, (2) Gipuzkoako kostaldeko *Gelidium corneum* biomasaren murrizketa, eta (3) Bizkaiko golkoko itsas ekosistema.

3.1. Tipping pointak aztertzeko metodologia

Ekosistemek sistema dinamikoko konplexu gisa funtzionatzen dute, eta atzeraelikadura-bukle eta ez-linealtasun ugari izaten dituzte perturbazioei ematen dizkieten erantzunetan. Testuinguru horretan, espero da egoera egonkorreko aldaketak adarkatze ez-linealari jarraitzea, denboran zehar ekosistemaren gaineko presio-metaketak bultzatuta, eta horrek pixkanaka higitzen du erresilientzia, presioaren igoera gehigarri txiki bat nahikoa izan arte ekosistemaren egoeran aldaketa bat eragiteko (Scheffer et al., 2001; Folke et al., 2004). Ekosistema bat egoera egonkor alternatibo batera igarotzen denean, oso konplexu eta luzea izaten da aurreko erreferentzia-egoerara itzultzea (Hemraj et al., 2017; Moreno-Mateos et al., 2020).

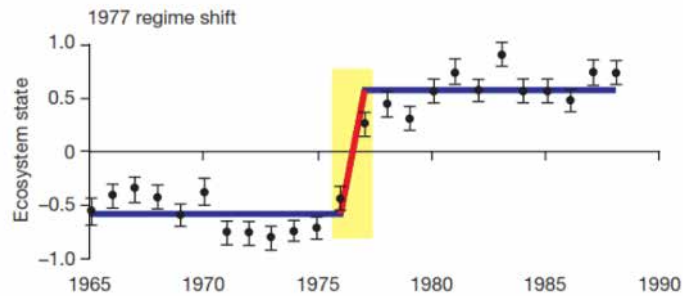
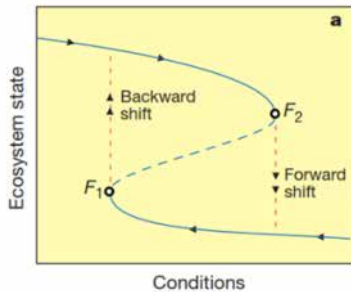
y amenaza la forma, función y viabilidad actuales de las comunidades, infraestructuras y ecosistemas.

En el caso de los ecosistemas, un ejemplo de punto de no retorno podría considerarse los cambios en la calidad del agua del estuario del río Nervión (Borja et al., 2010). Tras la reclamación de tierras, el dragado, la industrialización y el vertido de aguas residuales, el estuario se degradó rápidamente durante la primera mitad del siglo XX y hasta finales de la década de 1980. La recuperación se produjo al decrecer la presión por los vertidos, en parte por el tratamiento de aguas residuales. Este caso, a pesar de la recuperación de la calidad biogeoquímica del agua, la biodiversidad original no se ha recuperado, reflejando una posible histéresis que proporciona un nuevo estado para el estuario del Nervión.

En este estudio se han analizado los puntos de no retorno o cambios de régimen en el clima y ecosistema marino del golfo de Vizcaya. En concreto, se han analizado la respuesta biológica en el tiempo a presiones de variables físicas (principalmente aumento de la temperatura) para tres casos de estudio: (1) Aplicación a la reducción del tamaño de la anchoa (*Engraulis encrasicolus*) del golfo de Vizcaya, (2) Aplicación a la disminución de la biomasa de *Gelidium corneum* en la costa de Gipuzkoa, y (3) Aplicación en el ecosistema marino del golfo de Vizcaya.

3.1. Metodología para el análisis de tipping points

Los ecosistemas funcionan como sistemas dinámicos complejos, caracterizados por múltiples bucles de retroalimentación y no linealidades en sus respuestas a las perturbaciones. En este contexto, se espera que el cambio en el estado estable siga una bifurcación no lineal impulsada por la acumulación de presión sobre el ecosistema a lo largo del tiempo, lo que erosiona gradualmente la resiliencia hasta que un pequeño aumento adicional en la presión es suficiente para causar un cambio en el estado del ecosistema (Scheffer et al., 2001; Folke et al., 2004). Una vez que un ecosistema ha pasado a un estado estable alternativo, la recuperación al estado de referencia anterior tiende a ser muy compleja y prolongada (Hemraj et al., 2017; Moreno-Mateos et al., 2020).



11. ird. Aldaketa bortitzak ekosistemetan. Iturria: Scheffer et al. (2001).

11. Fig. Cambios abruptos en los ecosistemas. Fuente: Scheffer et al. (2001).

Oraindik gutxi dira ekosistemetan mugari-puntuak atzematera edo iragartzera berariaz bideratutako teknikak, interakzio ez-linealak konbinatuz ekosistemetako hainbat osagai eta presio ugarirekin. Presioen intentsitateen eta ekosistema-osagai gehiago sartu ondorengo konplexutasun gero eta handiagoaren arteko interakzio konplexuei lotutako erronkak kontuan hartuta, zaila da metodo batek modu integralean identifikatzea edo aurreikustea tipping pointak ikuspegi ekologiko espazialek edo denbora-ikuspegitik.

Todavía son pocas las técnicas específicamente orientadas a detectar o predecir puntos de no retorno en los ecosistemas mediante la combinación de interacciones no lineales entre múltiples componentes y presiones de los ecosistemas. Teniendo en cuenta los desafíos vinculados a las interacciones complejas entre las intensidades de las presiones y la complejidad cada vez mayor tras la inclusión de más componentes del ecosistema, es difícil que un mismo método identifique o prediga de manera integral y precisa los tipping points desde el punto de vista ecológico espacial o temporal.

Lau teknika-multzo nabarmenduko ditugu mugari-puntuak detektatzeko:

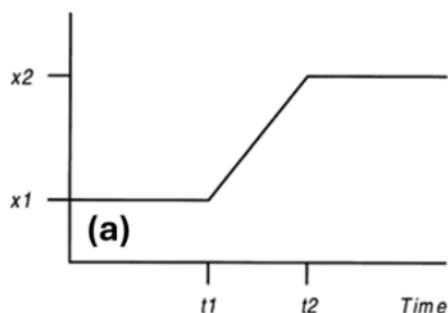
Destacamos cuatro grupos de técnicas de detección de los puntos de no retorno:

1. Puntu bortitzak edo joera-aldaketak detektatzea

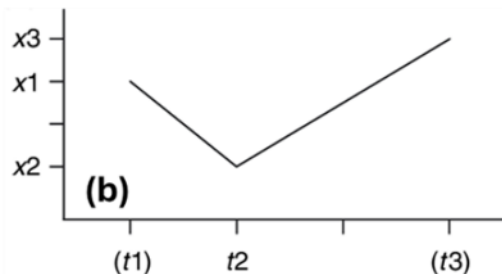
1. Detección de puntos abruptos o cambios de tendencia

Teknika honen helburua denbora-serieetan puntu bortitzak edo joera-aldaketak detektatzea da. Puntu horiek ingurumen-aldagai edo aldagai ekologiko batek bere portaeran (batezbestekoan, maldan, bariantzan edo beste ezaugarri estatistiko batean) aldaketa nabarmenak jasaten dituzten uneak irudikatzen dituzte. Puntu horiek trantsizio kritikoak identifika ditzakete ekosistemaren funtzionamenduan. Puntu horiek detektatzeko, denbora-serieen analisia egiten da, eta datu-egituraren hausturaren ebidentzia bilatzen. Teknika horien adibide dira metodologia parametrikokoak, hala nola arrapala (Mudelsee, 2000) eta iskin-ereduak (Mudelsee, 2009) edo datu-serieak iragazteko teknika ez-parametrikoa (Kolmogorov-Zurbenko Adaptatiboa, KZA), datu-serieetako etenak edo joera-aldaketak detektatzeko aukera ematen duena (Zurbenko et al., 1996).

El objetivo de esta técnica es detectar puntos abruptos o cambios de tendencia en series temporales. Estos puntos representan momentos en los que una variable ambiental o ecológica sufre una alteración significativa en su comportamiento, ya sea en su media, pendiente, varianza u otra característica estadística. Estos puntos pueden identificar transiciones críticas en el funcionamiento del ecosistema. La detección de esos puntos se basa en el análisis de series temporales y la búsqueda de evidencia de ruptura de la estructura de datos. Ejemplos de estas técnicas son las metodologías paramétricas como los modelos de rampa (Mudelsee, 2000) y de quiebro (Mudelsee, 2009) o la técnica no paramétrica de filtrado de series de datos Kolmogorov-Zurbenko Adaptativo (KZA) que permite detectar discontinuidades o cambios de tendencia en series de datos (Zurbenko et al., 1996).



12. ird. (a) Arrapala-eredua (Mudelsee, 2000) eta (b) iskin-eredua (Mudelsee, 2009).



12. Fig. (a) Modelo rampa (Mudelsee, 2000) y (b) modelo quiebro (Mudelsee, 2009).

2. Atalaseen analisia

Atalaseen analisiak ekosistemaren presio-aldagaien (adibidez, tenperatura, mantenugaiak) eta ekosistemaren baldintza-aldagaien (adibidez, biomasa, aberastasuna) arteko erlazio ez-linealak identifikatzea du ardatz, ekosistema nola aldatzen den eta aldaketa-atalase posibleak identifikatzeko. Atalase bat erantzun-espazioaren eskualde bat da, non presio-aldagaiaren aldaketa txiki batek aldaketa bortitz, neurrigabe edo azeleratua eragiten duen erantzun-aldagaiaren (Sonderegger et al., 2009). Patroiak detektatzeko metodologietako bat eredu gehigarri orokorrak (GAMak) erabiltzea da. Haiei esker, funtzio ez-linealak doitu daitezke iragarle bakoitzerako (presio-aldagaia), eta horrek erantzun-aldagaiaren doitasuna hobetzen du (ekosistema-baldintza). Inflexio-atalaseak edo -puntuak gerora identifika daitezke, bigarren deribatuak edo aldaketa-puntuaren analisiak erabiliz. GAMen eremu batzuek, hala nola atalase-detekziodun GAMEk, erantzunaren hausturak esplizituki modelatzeko aukera ematen dute, puntu kritikoaren kokapena estimatuz eta aldaketaren esanahiari buruzko inferentziak emanez.

3. Erresilientziaren Anlisi Integratua (IRA)

Metodo honek estimatzen ditu kanpoko presio-faktoreei (adibidez, tenperatura) erantzunez sortzen den sistemaren dinamika eta sistemaren egituraren eta funtzionaltasunean eragindako aldaketa-mekanismoak, erresilientziaren, egonkortasunaren eta erantzun ez-linealaren ebaluazioa integratuz esparru analitiko komun baten barruan. IRA azalpen-aldagaien (presioak) eta erantzun-aldagaien (ekosistemaren osagaiak) arteko erlazioetatik

2. Análisis de umbrales

El análisis de umbrales se centra en identificar relaciones no lineales entre variables de presión (p.ej. temperatura, nutrientes) y variables de condición del ecosistema (p.ej. biomasa, riqueza), con el fin de identificar cómo cambia el ecosistema y los posibles umbrales de cambio. Un umbral se define como una región del espacio de respuesta en el cual un pequeño cambio en la variable de presión produce un cambio abrupto, desproporcionado o acelerado en la variable de respuesta (Sonderegger et al., 2009). Una de las metodologías para detectar los patrones es el uso de modelos aditivos generalizados (GAMs). Estos permiten ajustar funciones no lineales a cada predictor (variable de presión), lo que mejora la precisión de la variable respuesta (condición ecosistema). Los umbrales o puntos de inflexión pueden identificarse posteriormente utilizando derivadas segundas o análisis de puntos de cambio. Algunas extensiones de los GAM como los GAM con detección de umbral permiten modelar explícitamente rupturas en la respuesta, estimando la localización del punto crítico y proporcionando inferencias sobre la significación del cambio.

3. Análisis Integrado de Resiliencia (IRA)

Este método estima la dinámica del sistema y los mecanismos de cambio en la estructura y funcionalidad del sistema en respuesta a los factores de presión externos (p. ej. temperatura), integrando la evaluación de resiliencia, estabilidad y respuesta no lineal dentro de un marco analítico común. El IRA parte de las relaciones entre variables explicativas (presiones) y variables respuesta (componentes del ecosistema), empleando GAMs para detectar

abiatzen da, GAMak erabiliz harreman ez-linealak eta denborazko dinamikak detektatzeko. Gainera, atalasedun GAMak ditu, sistemaren erantzun-mekanismoan aldaketa bortitzak edo trantsizioak detektatzeko, inflexio ekologikoko puntuen erantzunak izan daitezkeenak (Ciannelli et al., 2004). IRA inplementatzeak erresilientzia- eta egonkortasun-kontzeptuak aplikatzen ditu, askotariko GAMak konbinatzen baititu sistemaren egitura eta denbora-bilakaera modelatzeko, atalaseak identifikatzeko segmentazioaren edo bitartekako doikuntzen bidez eta egitura-erresilientzia ebaluatzeko (Vasilakopoulos et al., 2017).

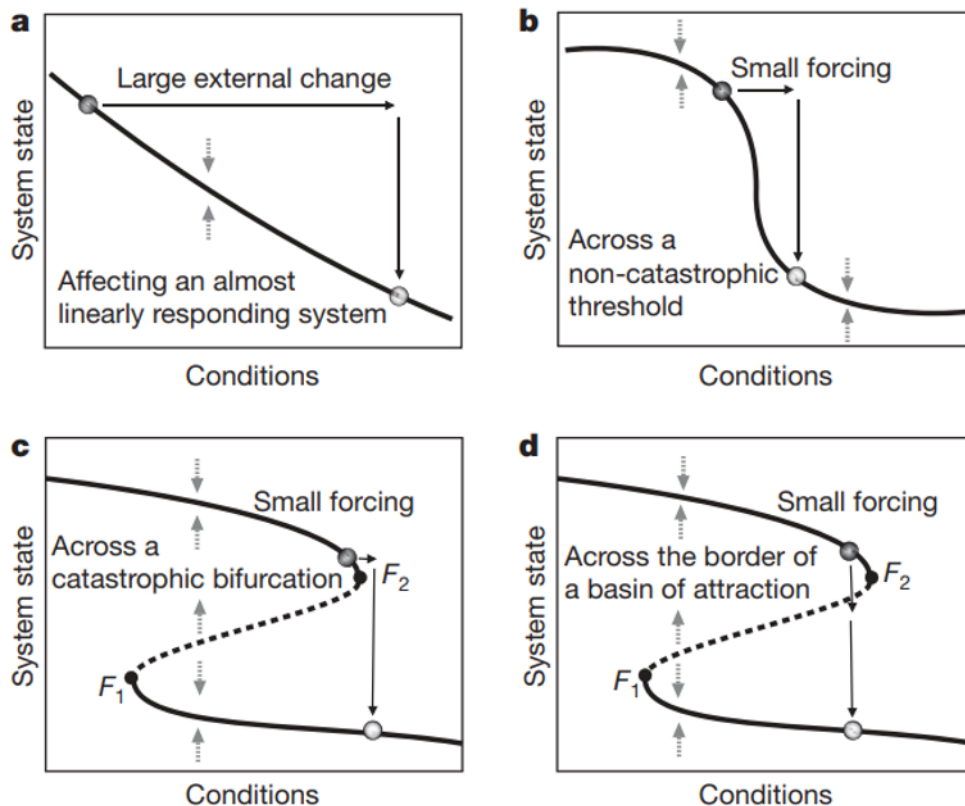
4. Gailur estokastikoaren eredua (SCM)

Hondamendien teorian oinarritutako metodoa (Thom, 1977). Sistema dinamiko ez-linealen teoriaren adar bat da hau, kontrol-baldintzen aldaketa txiki batek sistema baten egoeran aldaketa bortitzak eragin ditzakeela deskribatzen duena. Gailurra hondamendien teoriaren oinarritzko zazpi elementu geometrikoetako bat da, eta sistema konplexuetan (hala nola ekosistemetan) trantsizio bortitzak, multiegonkortasuna eta histeresia modelatzeko erabiltzen da. Eredua aukera ematen du, adarkatze-baldintza jakin batzuetan, sistema batek hainbat egoera egonkor izan ditzan presio-balio (multiegonkortasun) berarentzat, edo erantzun desberdina izan dezan aldaketa-norabidearen (histeresia) arabera.

relaciones no lineales y dinámicas temporales. Además, incorpora GAMs con umbrales para detectar cambios abruptos o transiciones en el mecanismo de respuesta del sistema, que pueden responder a puntos de inflexión ecológicos (Ciannelli et al., 2004). La implementación del IRA aplica conceptos de resiliencia y estabilidad al combinar GAMs multivariados para modelar la estructura del sistema y su evolución temporal, identificación de umbrales mediante segmentación o ajustes por tramos y la evaluación de la resiliencia estructural (Vasilakopoulos et al., 2017).

4. Modelo de cúspide estocástica (SCM)

Método basado en la teoría de las catástrofes (Thom, 1977), una rama de la teoría de sistemas dinámicos no lineales que describe como pequeñas variaciones en las condiciones de control pueden provocar cambios abruptos en el estado de un sistema. La cúspide es uno de los siete elementos geométricos básicos de la teoría de catástrofes y se utiliza comúnmente para modelar transiciones abruptas, multiestabilidad e histéresis en sistemas complejos como los ecosistemas. El modelo permite que, bajo ciertas condiciones de bifurcación, un sistema tenga múltiples estados estables para un mismo valor de presión (multiestabilidad) o que responda de forma distinta según la dirección de cambio (histéresis).



13. ird. Sistema batek baldintzak aldatzean (adibidez, temperatura, mantenugaiak...) eman ditzakeen erantzunak. c eta d paneletan, baldintza jakin baterako oreka-egoera desberdinen aukera erakusten da. Sistema inflexio-puntu batetik (F_1 eta F_2) oso gertu bada, baldintzan aldaketa txiki batek trantsizio handia eragin dezake. Perturbazio txikiek ere aldaketa handiak eragin ditzakete, baldin eta sistema oso sentikorra bada baldintza-tarte jakin batean (b panela). Sistemaren aldaketa bat-bateko kanpo-indar handi baten ondorio ere izan daiteke (a panela). Iturria: Sheffer et al. (2009).

13. Fig. Posibles respuestas de un sistema a cambios en las condiciones (p.ej. temperatura, nutrientes). En los paneles c y d se muestran la posibilidad de distintos estados de equilibrio para una condición dada. Si el sistema está muy cerca de un punto de inflexión (F_1 y F_2), un pequeño cambio en la condición puede provocar una gran transición. Las pequeñas perturbaciones también pueden causar grandes cambios siempre que el sistema sea muy sensible en cierto rango de condiciones (panel b). Un cambio en el sistema también puede deberse a una gran fuerza externa repentina (panel a). Fuente: Sheffer et al. (2009).

4. Azterketa-kasuetako aplikazioak

4.1. Antxoaren tamaina murriztea

Espezie bakoitzak tenperatura-leiho optimoa (nitxoa) du bere funtzionamendu fisiologikorako (Dahlke et al., 2020). Tenperaturari emandako erantzun fisiologikoak 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).

Bizkaiko golkoko Europako antxoaren (*Engraulis encrasicolus*) kasuan, 1990–2021 denbora-seriean, adinaren arabera pisuaren eta luzeraren murrizketa ikusten da 2000. urteaz geroztik, eta hori lotuta egon liteke, beste ingurumen-faktore batzuen artean, itsasoaren berotzearekin eta populazioaren ugartasunarekin (Taboada et al., 2023). Azterlan honetan, antxoaren tamainan inflexio-punturik ba ote dagoen aztertu da. Horretarako, puntu bortitzak edo joera-aldaketak detektatzeko metodoa erabiliz, antxoaren luzera- eta pisu-serieak aztertu dira, adinaren arabera (1–3 urte), 1990–2023 aldirako. Zehazki, ebaketa-puntuaren analisia aplikatu da, erregresio-ereduen estimazioan eta inferentzian oinarrituta, bitartekako erlazio linealekin (segmentatutako erregresio-eredu izena ere ematen zaio). Ikuspegi horri esker, denbora-seriean inflexio-puntu bat edo gehiago identifika daitezke, bai aurrez definituak, bai datuetatik abiatuta hautatuak (Muggeo, 2003). Hori bereziki balagarria da denboran zehar espeziearen ezaugarri biologikoetan trantsizio esanguratsuak detektatzeko.

Emaitzek erakusten dutenez, 2002–2003an joeren trantsizio-puntu bat detektatu da antxoaren tamainan. Antxoaren adinaren arabera pisua eta pisua nahiko konstante mantendu ziren hasierako aldiran (1990etik 2002–2003ra arte), eta, ondoren, antxoaren tamainaren bi adierazleak pixkanaka

4. Aplicaciones a casos de estudio

4.1. Reducción del tamaño de la anchoa

Cada especie tiene una ventana de temperatura óptima (nicho) para su funcionamiento fisiológico (Dahlke et al., 2020). 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).

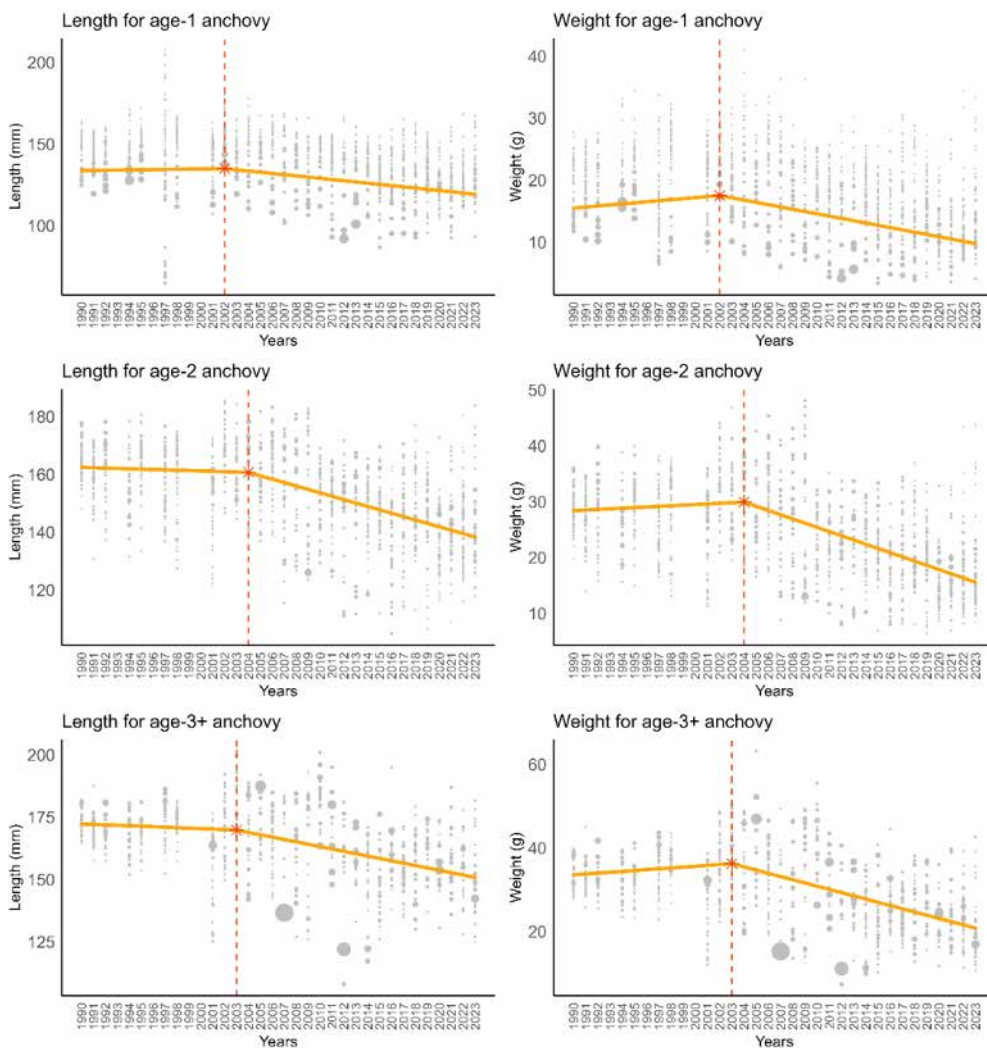
En el caso de la anchoa europea (*Engraulis encrasicolus*) en el golfo de Vizcaya, en la serie temporal 1990–2021, se observa desde el año 2000 una disminución del peso y longitud por edad que podría estar asociada, entre otros factores ambientales, al calentamiento del mar y a la abundancia de la población (Taboada et al., 2023). En este estudio se ha analizado la posible existencia de un punto de inflexión en el tamaño de la anchoa. Para ello, se han analizado las series de longitud y peso de la anchoa por edad (años 1 a 3) para el periodo 1990–2023 empleando el método de detección de puntos abruptos o cambios de tendencia. En concreto, se ha aplicado el análisis de puntos de corte basado en una estimación e inferencia de modelos de regresión con relaciones lineales por tramos, también conocida como modelos de regresión segmentada. Este enfoque permite identificar uno o varios puntos de inflexión en la serie temporal, ya sea predefinidos o seleccionados a partir de los datos (Muggeo, 2003), lo que resulta especialmente útil para detectar transiciones significativas en las características biológicas e la especie a lo largo del tiempo.

Los resultados muestran la detección de un punto de transición de tendencias en el tamaño de la anchoa en 2002–2003. Tanto la longitud como el peso de la anchoa por edad se mantuvieron bastante constantes en el periodo inicial (1990 hasta



jaisten joan ziren 2002-2003 aldian.

2002-2003), y posteriormente ambos indicadores del tamaño de la anchoa disminuyen gradualmente en el periodo 2002-2003 a 2023.



14. ird. Europako antxoaren adin-motaren eta sare-botaldiaren araberako luzeraren (mm) eta pisuaren (g) joera-aldaketako puntuaren analisia Bioman kanpainetan⁴ 1990etik 2023ra. Batez besteko luzera eta pisua sare-botaldiaren ordezkaragarritasunaren arabera haztatu ziren. Haztapena puntuaren tamainak adierazten du. Joerak laranja erakusten dira, eta denbora-serieko aldaketak marra gorri etenez.

14. Fig. Análisis de los puntos de cambio de tendencia de la longitud (mm) y peso (g) medios por lance por clase de edad de la anchoa europea durante las campañas Bioman⁴ 1990 a 2023. La longitud y el peso medios se ponderaron en función de la representatividad del lance. La ponderación está representada por el tamaño del punto. Las tendencias aparecen en naranja y los cambios en la serie temporal como línea roja discontinua.

4. Azti-k, antxoaren biomasa estimatzeko, urtero egindako kanpaina zientifikoak. <https://www.azti.es/campaigns/bioman/>

4 Campañas científicas anuales realizadas por Azti en las que se estima la biomasa de la anchoa. <https://www.azti.es/campaigns/bioman/>

4.2. *Gelidium corneum* biomasaren beherakada

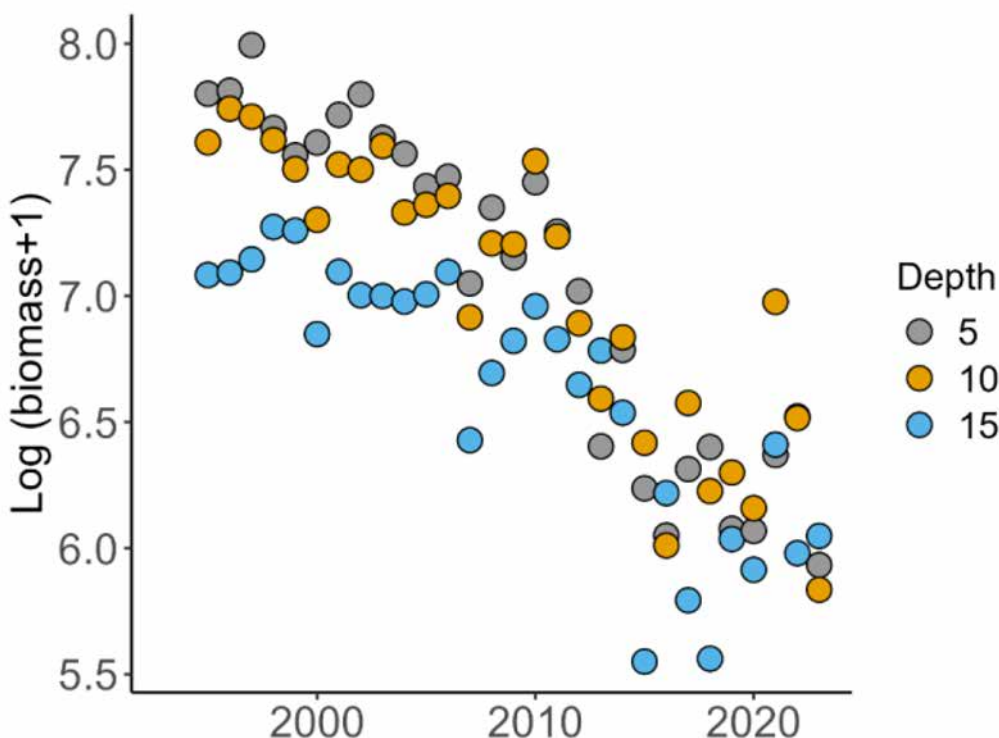
Goi-errezela osatzen duten makroalgak marear-teko eta giro sublitoraleko itsas ekosistemen osagai garrantzitsuak dira, eta kostaldeko habitatetako ekosistema-zerbitzu kritikoen oinarria dira (Duffy *et al.*, 2019). Azken hamarkadetan, alga horien etengabeko murrizketa detektatu da, ozeanoen berotzearekin eta giza presioekin lotuta (Harley *et al.*, 2012; Crowe *et al.*, 2013; Strain *et al.*, 2014; Arriaga *et al.*, 2024; Chust *et al.*, 2024; Wernberg *et al.*, 2024).

Bizkaiko golkoko euskal kostaldean aldaketa handiak ikusten dira klima-erregimenean, baita itsasoko biodibertsitatearen birbanaketa garrantzitsua ere, azken lau hamarkadetan (Chust *et al.*, 2022). Ozeanoaren propietateen aldaketa handi horiek (muturreko olatu-gertakarien maiztasuna handitzea edo eguzki-orduak murriztea barne) *Gelidium corneum* makroalgaren biomasaren murrizketa nabarmena eragin dute Bizkaiko golkoaren hego-ekialdean (Borja *et al.*, 2018). 1993–2024 aldian, biomasaren eta estalduraren beherakada handia ikusten da aztertutako hiru sakoneretan (5, 10 eta 15 m). Murrizketa hori areagotu egin da 2010–2015 aldian 1993–2010 aldiarekin alderatuta, eta, geroztik, gutxieneko mailetan mantentzen da. Jaitsieraren tamaina eta berreskuratze-falta kontuan hartuz, denbora-seriean mugarri-puntu edo *tipping point* bat egon ote daitekeen planteatu daiteke, seguru asko ingurumen-estresatzaile multzo baten metatze-inpaktuaren ondorioz (Hemraj & Carstensen, 2025).

4.2. Decrecimiento de la biomasa de *Gelidium corneum*

Las macroalgas que forman dosel son componentes importantes de los ecosistemas marinos en ambientes intermareales y submareales y son la base de servicios ecosistémicos críticos en hábitats costeros (Duffy *et al.*, 2019). Durante las últimas décadas, se ha detectado una disminución constante de estas algas ligada al calentamiento de los océanos, así como a las presiones humanas (Harley *et al.*, 2012; Crowe *et al.*, 2013; Strain *et al.*, 2014; Arriaga *et al.*, 2024; Chust *et al.*, 2024; Wernberg *et al.*, 2024).

En la costa vasca del golfo de Vizcaya se observan fuertes cambios en el régimen climático y una importante redistribución de la biodiversidad marina durante las últimas cuatro décadas (Chust *et al.*, 2022). Estos grandes cambios en las propiedades del océano, incluyendo el aumento en la frecuencia de eventos de oleaje extremo o la reducción de horas de sol, han resultado en una disminución sensible en los niveles de biomasa de la macroalga *Gelidium corneum* en el sureste del golfo de Vizcaya (Borja *et al.*, 2018). En el periodo 1993–2024 se observa una fuerte disminución de la biomasa y cobertura en las tres profundidades analizadas (5, 10 y 15 m), disminución que se intensifica en el periodo 2010–2015 en relación al periodo 1993–2010 y que se mantiene después en niveles mínimos. La magnitud del descenso y la falta de recuperación plantean la cuestión de la existencia de un posible punto de no retorno o *tipping point* en la serie temporal, posiblemente debido al impacto acumulativo de un conjunto de estresores ambientales (Hemraj & Carstensen, 2025).



15. ird. *G. corneum*en biomasaren joerak (log gr m⁻²) 1993–2024 aldian, hiru sakoneratan (5, 10 eta 15 m). Puntu bakoitzak urteko batez besteko biomasara adierazten du aztertutako trantsektu guztietarako.

15. Fig. Tendencias de la biomasa (log gr m⁻²) de *G. corneum* en el periodo 1993–2024 a tres profundidades (5, 10 y 15 m). Cada punto indica la biomasa media anual para el conjunto de transectos analizados.

Azterlan honetan, *G. corneum*en denbora-seriean mugarrizko puntu edo *tipping point*ik ba ote dagoen aztertu da, teknika batzuk konbinatuz. Hemen, Erresilientziaren Análisi Integratuaren (IRA metodoa) emaitzak erakusten dira. Sistemaren erresilientziaren dinamika ebaluatu da, bai eta ekosistemaren trantsizio posibleak ere, erregimen batetik batera, klimak bultzatuta (zehazki, uraren gainazaleko tenperatura).

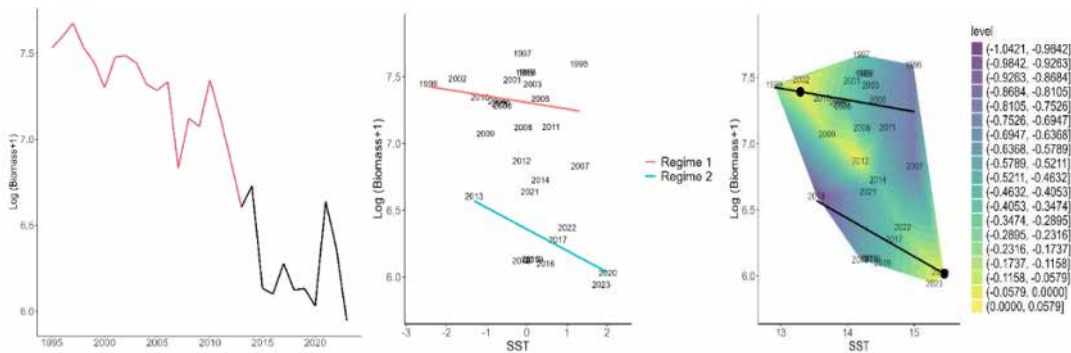
Emaitzek bi erregimen desberdin erakusten dituzte (1993–2012 eta 2012–2024) *G. corneum*en denbora-seriean, SSTrekin lotutakoak, ondo definitutako adarkatzearekin. Hala ere, erresilientziari dagokionez (16c irudia), egonkortasun-paisaia eta erakarpin-arroen mugak ez datoz bat detektatutako bi erregimenen amaierarekin eta hasierarekin (Scheffer *et al.*, 2001). *Tipping point* bakoitzera hurbildu ahala, sistemaren erresilientzia murriztu egingo dela espero da. Alde horretatik, baliteke itsasoaren gainazaleko tenperatura ez izatea *G. corneum*en erresilientzia mugatzen duen bultzatzaile bakarra, eta oraindik

En este estudio se ha analizado la posible existencia de puntos de no retorno o ‘tipping points’ a lo largo de la serie temporal de *G. corneum* combinando una serie de técnicas. Aquí se muestran los resultados del Análisis Integrado de Resiliencia (método IRA). Se ha evaluado la dinámica de la resiliencia en el sistema, así como las posibles transiciones del ecosistema, de un régimen a otro impulsadas por el clima, en concreto de la temperatura superficial del agua.

Los resultados muestran dos regímenes distintos (1993–2012 y 2012–2024) en la serie temporal de *G. corneum* relacionados con la SST con una bifurcación bien definida. Sin embargo, en términos de resiliencia (Fig. 16,c), el paisaje de estabilidad y los límites de las cuencas de atracción no coinciden con el final y el comienzo de los dos regímenes detectados (Scheffer *et al.*, 2001). Se espera que la resiliencia del sistema disminuya a medida que nos acercamos a cada tipping point. En este sentido,

aztertu gabeko beste faktore batzuk ere –olatuen energia, esate baterako– behatutako patroiak moldatzen aritzea.

puede que la temperatura superficial del mar no sea el único impulsor que limite la resiliencia de *G. corneum*, y que otros factores aún no explorados como puede ser la energía del oleaje, estén determinando los patrones observados.



16. ir. a-b) ird. GAM atalasearen doikuntza, zeinak itsasoaren gainazaleko tenperaturaren (SST) gorabehereri *G. corneum*en biomasa emandako erantzun etena erakusten duena (ekosistemaren egoeraren adierazle gisa erabiltzen da). c) *G. corneum* ekosistemaren dinamikarako estimatutako egonkortasun eta erresiliencia erlatiboko paisaia. Egonkortasun-paisaia tolestuak bi erakarpen-arro eta bi inflexio-puntu ditu. Linea beltz jarraituek erakarleak adierazten dituzte, eta puntuek, berriz, inflexio-puntuaren hasiera.

16. Fig. a-b) Ajuste del umbral GAM que muestra la respuesta discontinua de la biomasa de *G. corneum*, utilizada como indicador del estado del ecosistema, a las fluctuaciones de la temperatura superficial del mar (SST). C) Paisaje de estabilidad y resiliencia relativa estimada para la dinámica del ecosistema de *G. corneum*. El paisaje de estabilidad plegado se muestra con dos cuencas de atracción y dos puntos de inflexión. Las líneas negras continuas indican los atractores y los puntos indican el inicio del punto de inflexión.

4.3. Ekosistemak tenperaturari emandako erantzunaren simulazioa

Klima-aldaketaren testuinguruan, itsasoko ekosistemazako mehatxu nagusietako bat ozeanoko tenperaturaren igoera da. Itsasoa berotzeak nabarmen aldatu ditzake harreman trofikoak, espezieen banaketa eta ekosistemaren dinamika oro har. Txosten honen 2.1 atalean adierazten den bezala, Bizkaiako golkoan jadanik ikusten da tenperatura igo egin dela, eta, klima-aldaketaren agertokiek erakusten dutenez, datozen hamarkadetan igotzen jarraituko du berotze globaleko agertoki desberdinetan (Naturklima, 2023). Sistema horiek berotze-maila desberdinen aurrean nola erantzuten duten ulertzea funtsezkoa da balizko inpaktuei aurrea hartzeko eta egokitzapen-kudeaketako estrategiak garatzeko.

4.3. Simulación de la respuesta del ecosistema a la temperatura

En el contexto del cambio climático, el aumento de la temperatura del océano representa una de las principales amenazas para los ecosistemas marinos. El calentamiento del mar puede alterar de forma significativa las relaciones tróficas, la distribución de especies y la dinámica del ecosistema en su conjunto. Como se indica en el apartado 2.1. de este Informe, ya se observa el aumento de la temperatura en el golfo de Vizcaya, y los escenarios de cambio climático proyectan que dicho incremento continuará en las próximas décadas para los distintos escenarios de calentamiento global (Naturklima, 2023). Comprender cómo responden estos sistemas ante distintos niveles de calentamiento es esencial para anticipar posibles impactos y desarrollar estrategias de gestión adaptativa.

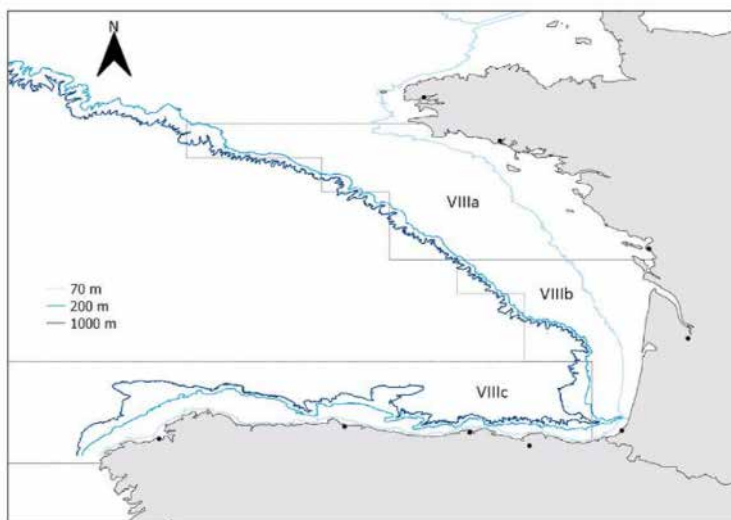


Azterketa-kasu honetan, itsasoa berotzeak Bizkaiko golkoko itsas ekosistemari modu bortitzean eragin ote diezaiokeen ebaluatu da. Horretarako, hainbat tenperatura-agertoki simulatu dira Bizkaiko golgorako garatutako sare trofikoko eredu batean: *Ecopath with Ecosim* (EwE) [Corrales et al., 2022].

Bizkaiko golkoko EwE ereduak Brest hiriaren (Bretainia, Frantzia) eta Finisterre lurmuturraren (Galizia, Espainia) arteko eremua hartzen du barnean, plataforma kontinental eta goi-ezponda barne, 0 eta 1.000 m arteko sakoneran. Ereduek zonako talde funtzional gehienak hartzen ditu –guztira 52 talde–, garapen-fase desberdinak dituztenak (adibidez, gazteak eta helduak), ezaugarri ekologikoak partekatzen dituzten espezieak edo espezie-taldeak (adibidez, ekologia trofikoak eta habitata), barnean hartuz lehen mailako ekoizleak eta harrapatzaile handiak, eta 13 arrantza-espezie biltzen ditu (Corrales et al., 2022). *Ecopath* modulu estatikoan oinarrituta, *Ecosim* denbora-modulu dinamikoa kalibratu eta 2003tik 2019ra bitarteko datu-serieetara egokitu da, kontuan hartuz arrantzaren efektua (arrantza-efortzua eta arrantza-gatik heriotza-tasak) eta ingurumen-baldintzak (itsas tenperatura eta ekoizpen primarioa).

En este caso de estudio se ha evaluado si el calentamiento del mar puede afectar de forma abrupta el ecosistema marino del golfo de Vizcaya. Para ello, se han simulado diferentes escenarios de temperatura en un modelo de red trófica desarrollado para el golfo de Vizcaya, *Ecopath with Ecosim* (EwE) [Corrales et al., 2022].

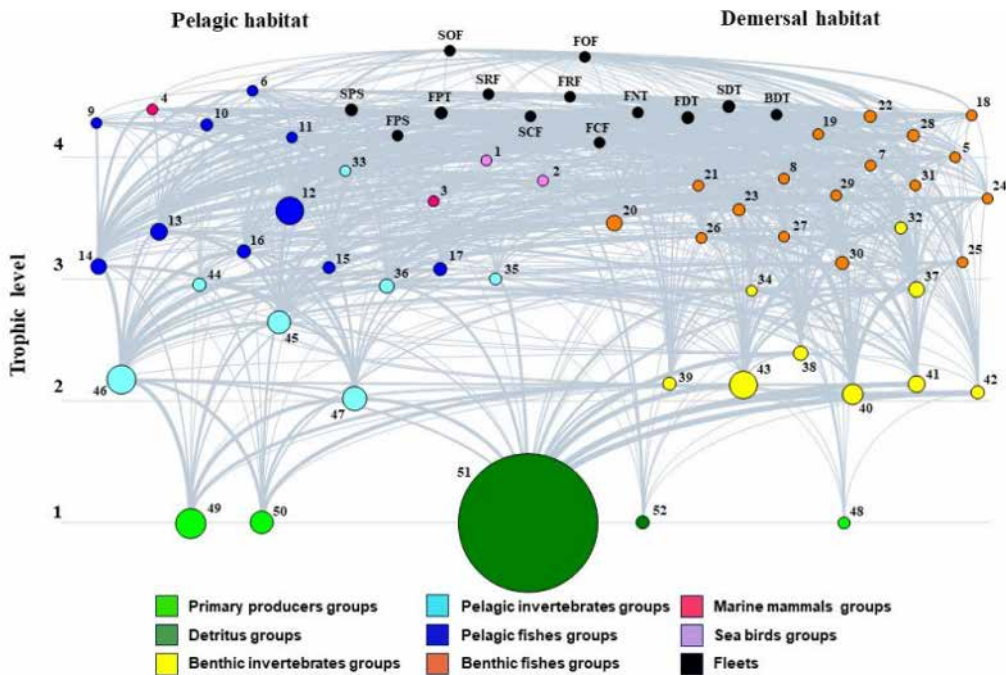
El modelo EwE del golfo de Vizcaya abarca el área desde Brest (Bretaña, Francia) hasta el Cabo de Finisterre (Galicia, España), incluyendo la plataforma continental y el talud superior, entre 0 y 1000 m de profundidad. El modelo incluye gran parte de los grupos funcionales de la zona, un total de 52 grupos, que consisten en distintas fases de desarrollo (p.ej. juveniles y adultos), especies o grupos de especies que comparten características ecológicas (p.ej., ecología trófica y hábitats), incluyendo desde productores primarios hasta grandes depredadores e incluye 13 especies pesqueras (Corrales et al., 2022). Basándose en el módulo estático *Ecopath*, el módulo dinámico temporal *Ecosim* se ha calibrado y ajustado a series temporales de datos entre 2003 y 2019 considerando el efecto de la pesca (esfuerzo pesquero y mortalidades por pesca), y las condiciones ambientales (temperatura del mar y producción primaria).



17. ird. Bizkaiko golkoko EwE ereduaren eremua.

17. Fig. Área del modelo EwE del golfo de Vizcaya.





18. ir. Bizkaiko Golkoko ereduaren fluxu-diagrama. Flotak: SDT= Arraste demertsal espainiarra; BDT = Euskal arraste demertsala; SPS = Inguraketa espainiarra; SCF = Itsasbazerreko arrantza espainiarra; SOF = Alturako arrantza espainiarra; FDT = Arraste demertsal frantsesa; FNT = Zigalarako arraste frantsesa; FPS = Inguraketa frantsesa; FCF = Itsasbazerreko arrantza frantsesa; FOF = Alturako arrantza frantsesa; SRF = Aisialdiko arrantza espainiarra; FRF = Aisialdiko arrantza frantsesa. Zenbakiak ereduaren talde funtzionalak identifikatzen dituzte, zirkuluaren tamaina talde funtzionalaren biomasaerikiko proportzionala da, eta marren zabalera talde funtzionalen arteko fluxuen magnitudearekiko proportzionalak dira.

18. Fig. Diagrama de flujo del modelo del golfo de Vizcaya. Flotas: SDT= Arrastre demersal español; BDT = Arrastre demersal vasco; SPS = Cerco español; SCF = Pesquería costera española; SOF = Pesca de altura española; FDT = Arrastre demersal francés; FNT = Arrastre para cigala francesa; FPS = Cerco francés; FCF = Pesca costera francesa; FOF = Pesca de altura francesa; SRF = Pesca recreativa española; FRF = Pesca recreativa francesa. Los números identifican los grupos funcionales del modelo, el tamaño del círculo es proporcional a la biomasa del grupo funcional y la anchura de las líneas son proporcionales a la magnitud de los flujos entre los grupos funcionales.

Itsasoaren tenperaturaren 15 agertoki simulatu dira guztira, 2019tik 2050era proiektatuta. Agertoki guztietan, kalibratuta erabili da Ecosim ereduaren jatorrizko konfigurazioa, arrantzaren efektuak konstante mantenduz. Hala ere, arrantzagatiko heriotza-tasa ezarri da hegalaburrarentzat; izan ere, arrantzagatiko heriotza-tasa 2019tik etorkizunera proiektatzean, lortzen zen biomasaaren areagotzea ez zen oso errealista. Erreferentziatzko agertoki bat hartu da, eta bertan 2050. urtera arte konstante mantendu dira 2019ko ingurumen-aldagaiak. Gainerako agertokietarako, gainazaleko (SST) eta hondoko (SBT) tenperaturaren balio desberdinak simulatu dira 2019tik 2050era bitartean. SST balioak 12 °C eta 25 °C bitartekoak dira, eta SBT balioak kalkulatu dira kontuan hartuz nola aldatzen den SBT 2003-2019 denbora-seriean eta aldakuntza hori

Se han simulado un total de 15 escenarios de temperatura del mar, los cuales se proyectan desde el año 2019 hasta 2050. En todos los escenarios se ha utilizado la configuración original del modelo Ecosim calibrado, manteniendo constantes los efectos de la pesca. Sin embargo, se ha establecido una mortalidad por pesca para el atún rojo ya que al proyectar la mortalidad por pesca de 2019 a futuro se obtenía un aumento de biomasa poco realista. Se ha considerado un escenario de referencia en el cual se han mantenido constantes las variables ambientales del año 2019 hasta el año 2050. Para el resto de los escenarios, se han simulado distintos valores de temperatura superficial (SST) y de fondo (SBT) desde el año 2019 a 2050. Los valores de SST oscilan entre 12 °C y 25 °C y los valores de SBT se han estimado teniendo en cuenta como varía la



SST simulatuen balioetara estrapolatuz. Agertoki guztietan, ekoizpen primarioa konstante mantendu da 2019arekiko.

SBT respecto a SST en la serie temporal 2003-2019 y extrapolando esta variación a los valores de SST simulados. En todos los escenarios, la producción primaria se ha mantenido constante respecto al año 2019.

Agertokia Escenario	SST	SBT
1	15,46	11,58
2	12,00	10,0
3	13,00	10,50
4	14,00	11,01
5	15,00	11,51
6	16,00	12,01
7	17,00	12,51
8	18,00	13,01
9	19,00	13,51
10	20,00	14,01
11	21,00	14,52
12	22,00	15,02
13	23,00	15,52
14	24,00	16,02
15	25,00	16,52

4. taula. Simulatutako agertoki bakoitzean kontuan hartutako gainazaleko tenperaturaren (SST) eta hondoko tenperaturaren (SBT) balioak.

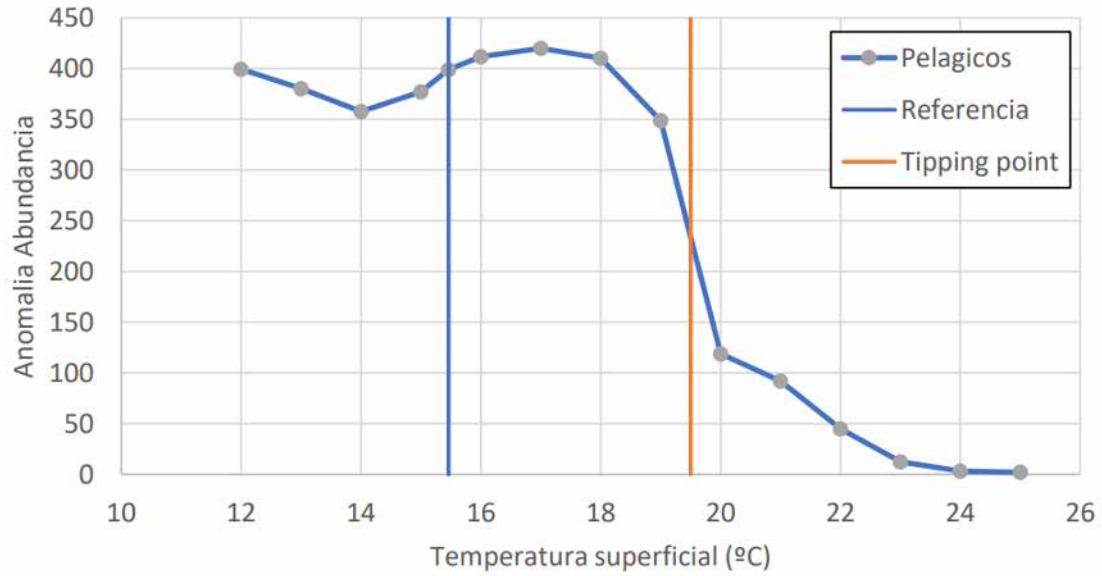
4. Tabla. Valores de temperatura superficial (SST) y de fondo (SBT) considerados en cada uno de los escenarios simulados.

Kontuan hartutako agertoki guztietan, agertoki horretako ugaritasunaren eta erreferentziazko agertokiaren arteko diferentzia kalkulatu da, Bizkaiko golkoko interes komertzialeko lau espezie pelagiko nagusientzat (berdela, txitxarroa, antxoa eta sardina). Azkenik, ugaritasun-diferentzia horiek batu dira, lau espezieen ugaritasun orokorrak tenperaturaren eraginez izan duen igoeraren edo murrizketaren adierazle bakarra lortzeko.

Ereduaren emaitzek *tipping point* bat erakusten duite 19 °C-ko gainazaleko tenperaturan; hortik aurrera, arrain pelagiko horien ugaritasuna bortizki murrizten da, eta 22 °C-ko tenperaturatik aurrera kolapsatu egiten da.

En todos los escenarios considerados se ha estimado la diferencia entre la abundancia en dicho escenario respecto al escenario de referencia para cuatro especies de pelágicos principales de interés comercial en el golfo de Vizcaya (verdel, chicharro, anchoa y sardina). Finalmente se han sumado estas diferencias de abundancia para obtener un único indicador del aumento o disminución de la abundancia general de las cuatro especies por efecto de la temperatura.

Los resultados del modelo muestran un tipping point a la temperatura superficial de 19 °C, a partir de la cual la abundancia de estos peces pelágicos disminuye de forma abrupta, colapsando a partir de la temperatura de 22 °C.



19. ird. Agertoki bakoitzeko ugaritasunaren eta erreferentziako agertokiaren (15,46 °C) arteko diferentziaren batukaria, Bizkaiko golkoko lau espezie pelagiko nagusientzat (berdela, txitxarroa, an-txoa eta sardina). 19 °C-ko tipping point bat ikusten da gainazaleko tenperaturan; hortik aurrera, arrain pelagiko horien ugaritasuna modu bortitzean murrizten da.

19. Fig. Sumatorio de la diferencia entre la abundancia entre cada escenario y el escenario de referencia (15,46 °C) para cuatro especies de pelágicos principales en el golfo de Vizcaya (verdela, chicharro, anchoa y sardina). Se aprecia un tipping point a la temperatura superficial de 19 °C, más allá de la cual la abundancia de estos peces pelágicos disminuye de forma abrupta.



5. Ondorioak

- **Itsasoaren berotzea:** Bizkaiko golkoan, itsasoaren berotzea atzeman da 1980ko hamarkadatik hona, tasa hauekin: 0,18 °C hamarkada bakoitzeko lehen 100 m-etan (D2 estazioa, Pasaia-aren aurrean); 0,28 °C hamarkada bakoitzeko gainazaleko tenperaturan (Donostiako Aquarium-aren aurrean) eta 0,22 °C hamarkada bakoitzeko golko osoko gainazaleko geruzan. Tasa horiek bat datoz lehenago egindako azterketekin eta azterketa horietan egindako serie berberen estimazioekin (Naturklima et al., 2022; Chust et al., 2022). Bizkaiko golkoan behatutako itsasoaren berotzea lotuta egongo litzateke Atlantikoaren ipar-ekialdeko berotzearekin, klima-aldaketari lotutako ozeano-atmosfera interakzio-patroiekin lotuta dagoenarekin.
- **Itsasoaren gazitasuna:** D2 estazioko ur-zutabearen lehen 100 metroetako gazitasunak joera negatiboa du 1986tik 2023ra bitartean. Egindako neurketen ezaugarriak direla-eta, oraindik goiz da behatutako murrizketa soilik klima-aldaketarekin lotutako eskala globaleko prozesuekin erlazionatzeko.
- **Itsas mailaren igoera:** Bizkaiko golkoan aztertutako sei mareografoen serieek adierazten dute golkoko kostaldeko itsasoaren batez besteko maila 1,3 eta 3,9 cm arteko tasan igotzen ari dela 1990etik 2023ra bitarteko hamarkada bakoitzeko. Urruneko sentsoreek golkoaren eremu osorako egindako neurketetan, 3,2 cm-ko igoera-tasa ikusten da hamarkada bakoitzeko. Era berean, igoera hori azeleratu egin dela ikusten da azken hiru hamarkadetan, XX. mendeko batez besteko igoerarekin alderatuta. Emaitza horiek igoera globaleko tasen antzekoak dira. Ondoriozta daiteke, beraz, Bizkaiko golkoko kostaldean eta itsasoan detektatutako igoera bat datorrela maila globaleko igoerarekin.

5. 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 0,18 °C por década para los primeros 100 m en la estación D2 frente a Pasaia, 0,28 °C por década en la superficie frente al Aquarium de Donostia, y 0,22 °C por década para la capa superficial de todo el golfo. Estas tasas son consistentes con estudios previos y con las estimaciones de las mismas series realizadas en estudios previos (Naturklima et al., 2022; Chust et al., 2022). Este calentamiento observado en el golfo de Vizcaya estaría asociado al calentamiento del Atlántico noreste, ligado a los patrones de interacción océano-atmósfera, asociados al cambio climático.
- **Salinidad del mar:** La salinidad en los primeros 100 m de la columna de agua en la estación D2 tiene una tendencia negativa en el periodo 1986 a 2023. Debido a las características de las mediciones realizadas, es aún prematuro asociar la disminución observada únicamente a procesos de escala global relacionados con el cambio climático.
- **Ascenso del nivel del mar:** Las series de los 6 mareógrafos del golfo de Vizcaya analizadas indican que el nivel medio del mar en la costa del golfo está ascendiendo a una tasa de entre 1,3 y 3,9 cm por década desde los años 90 a 2023. Las medidas realizadas por sensores remotos para toda el área del golfo indican una tasa de ascenso de 3,2 cm por década. Asimismo, se observa una aceleración de dicho ascenso en las últimas 3 décadas respecto al ascenso medio en el siglo XX. Estos resultados son similares a las tasas de ascenso global. Por tanto, se puede concluir que el ascenso detectado en la costa y mar del golfo de Vizcaya es consistente con el ascenso a nivel global.

- **Olatuak:** Azken 30 urteetan (1991–2023), ez da joerarik ikusten olatuen batez besteko baldintzetan, baina bai muturreko baldintza jakin batzuen igoera (Hs90en 15,67 cm-ko igoera hamarkada bakoitzeko).
- **Hondartzetako higadura:** Zarauzko hondartzak ez du bere higaduran joera berezirik erakusten 2010–2023 aldian; horrek erakusten du 2014a baino lehenagoko aldiaren antzeko oreka-egoera lortu duela. Hau da, harea-bolumenaren zati osoa edo zati handi bat sedimentu-sistemara itzuli da 2014ko higadura handiaren ondoren. Beraz, aztertutako 14 urteko epe laburrean, badirudi itzulera-korronteen eta barren luzetarako modulazioak eragina izan duela hondartzaren bilakaeran. Higadura-tasen aldakortasun handia dela-eta, aztertutako aldia oraindik laburra da hondartzek itsas mailaren pixkanakako igoerari ematen dizkieten erantzunak detektatzeko.
- **Ozeanoaren azidotzea (pH-a):** Aztertutako kostaldeko hiru kokalekuetan, pH-ak sakonera-geruza guztietan (0,5–100 m) behera egin du 2002–2023 aldian. Jaitsiera-tasak $-0,041$ eta $-0,022$ pH-unitate artean daude hamarkada bakoitzeko gainazalean, eta $-0,076$ eta $-0,056$ pH-unitate artean hamarkada bakoitzeko 100 m-ko sakoneran. Tasa horiek zertxobait handiagoak dira eskala globalean behatutakoak baino ($-0,02$ pH-unitate hamarkada bakoitzeko), bai eta Ozeano Atlantikoan ($-0,013$ pH-unitate hamarkada bakoitzeko) eta Bizkaiko golkoko mendebaldeko kostaldean behatutakoa baino ($-0,016$ pH-unitate hamarkada bakoitzeko). Eraitza horrek adierazten du euskal kostaldean behatutako azidotze-prozesua ozeano globalaren azidotze-prozesuari lotuta egon daitekeela. Edonola ere, beharrezkoa da pH-aren aldakuntzari buruzko analisisan sakontzea (ekoizpen primarioa bezalako faktoreak kontuan hartuz, besteak beste).
- **Oleaje:** En los últimos 30 años (1991–2023), no se observa una tendencia en las condiciones medias el oleaje, aunque sí un aumento en ciertas condiciones extremas del oleaje (aumento de Hs90 de 15,67 cm por década).
- **Erosión en playas:** La playa de Zarautz no muestra tendencias en su erosión en el periodo 2010–2023, lo que indica que ha alcanzado un estado de equilibrio similar al periodo anterior a 2014. Esto es, toda o gran parte del volumen de arena ha vuelto al sistema sedimentario después de la fuerte erosión del año 2014. Por tanto, en el corto periodo de 14 años analizados la evolución de la playa parece que está influenciada por la modulación longitudinal de corrientes de retorno y barras. Debido a la gran variabilidad de las tasas de erosión, el periodo analizado es todavía corto para detectar las respuestas de las playas al ascenso gradual del nivel del mar.
- **Acidificación del océano (pH):** El pH presenta una tasa descendente en el periodo 2002–2023 en todas las capas de profundidad (0,5–100 m) en los tres emplazamientos costeros analizados. Las tasas de disminución oscilan entre $-0,041$ y $-0,022$ unidades de pH por década en superficie y $-0,076$ y $-0,056$ unidades de pH por década a 100 m de profundidad. Estas tasas son ligeramente superiores a las observadas a escala global ($-0,02$ unidades de pH por década), en el océano Atlántico ($-0,013$ unidades de pH por década) y la costa occidental del golfo de Vizcaya ($-0,016$ unidades de pH por década). Este resultado indica 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 ahondar en el análisis de la variación del pH por otros factores como la producción primaria.



• **Mugarri-puntuen (tipping points) analisia:**

Ekosistema batean, inflexio-puntu bat izango litzateke ekosistema bat egoera egonkor bate-tik beste egoera egonkor batera aldatzen den unea, aldaketa nabarmenak eraginez bai biodi-bertsitatean, bai hark ematen dituen funtzio eta zerbitzu ekosistemikoetan (GBO, 2014). Bizkaiko golkoko ekosisteman egindako azterketa biolo-gikoen kasuan, emaitzek hau adierazten dute:

- o Bi erregimen desberdin *Gelidium corneum* (1993–2012 eta 2012–2024), biomasak 2010etik 2015era bitartean izandako behe-rakada handiaren ondorioz. Erregimen-aldake-ta hori itsasoko tenperaturaren igoerarekin lotuta egon liteke, ondo definitutako adar-katze batekin. Hala ere, oraingoz aztertu gabe daude beste faktore batzuk ere (adibidez, ola-tuen energia) inplikaturik egon litezke.
- o Europako antxoaren (*Engraulis encrasicolus*) tamainako joeren trantsizio-puntua Bizkai-ko golkoan, 2002–2003an. Antxoaren luzera eta pisua nahiko konstante mantendu ziren aldi baten ondoren (1990etik 2002–2003ra), 2002–2003tik 2023ra behera egin zuen pixkanaka.
- o Bizkaiko golkoko itsasoaren etorkizuneko tenperatura-igoerak Bizkaiko golkoan interes komertziala duten lau espezie pelagikoren (berdela, txitxarroa, antxoa eta sardina) uga-ritasun orokorra modu bortitzean murriztea eragin lezake 19 °C-ko itsasoaren gainazaleko tenperaturatik aurrera (*tipping point*), eta ko-lapsoa 22 °C-tik aurrera.

• **Análisis de puntos de no retorno (tipping points):**

Un punto de inflexión en un ecosistema es una condición en la que un ecosistema experimenta un cambio de un estado estable a un nuevo estado estable, con cambios significativos en la biodiversidad, y las funciones y servicios ecosistémicos que proporciona (GBO, 2014). Para los casos de estudio biológicos del ecosistema del golfo de Vizcaya realizados los resultados indican:

- o Dos regímenes distintos para *Gelidium corneum* (1993–2012 y 2012–2024), cambio experimentado tras la fuerte caída de la biomasa entre 2010 y 2015. Este cambio de régimen podría estar relacionado con el aumento de la temperatura del mar, con una bifurcación bien definida. No obstante, otros factores aún no explorados (p.ej. la energía del oleaje) podrían estar también involucrados.
- o Punto de transición de tendencias en el tamaño de la anchoa europea (*Engraulis encrasicolus*) en el golfo de Vizcaya en 2002–2003. Tras un periodo (1990 a 2002–2003) en el que se mantuvieron bastante constantes tanto la longitud como el peso de la anchoa, desde 2002–2003 y hasta 2023 se observa una disminución gradual.
- o El incremento futuro de la temperatura del mar en el golfo de Vizcaya podría provocar una disminución abrupta de la abundancia general de cuatro especies de pelágicos de interés comercial en el golfo de Vizcaya (verdel, chicharro, anchoa y sardina) a partir de la temperatura superficial del mar de 19 °C (*tipping point*), y un colapso a partir de 22 °C.

Alderazlea Indicador	Deskribapena Descripción	Estazioa/Eremua Estación/Zona	Unitatea Unidad	Aldia Periodo	Joera (hamarkada) Tendencia (década)	p balioa p-value
Itsasoko temperatura Temperatura del mar	SST Aquarium	Aquarium	°C	1946–2023	0,0805 ± 0,0151	0,0000
	SST Aquarium	Aquarium	°C	1980–2023	0,2830 ± 0,0308	0,0000
	SST satelite AQUA	Golfo Bizkaia	°C	2003–2023	0,2452 ± 0,0312	0,0000
	SST satelite OSTIA	Golfo Bizkaia	°C	1981–2023	0,2157 ± 0,0339	0,0000
Gazitasuna Salinidad	En la columna 0–100 m zutabeen	D2	°C	1986–2023	0,1779 ± 0,0336	0,0000
	En la columna 0–100 m zutabeen	D2		1986–2023	-0,0538 ± 0,0064	0,0000
Nahaste-geruza eta estratifikazioa Capa de mezcla y estratificación	14 °C-ko isotermaren sakonera (m) Profundidad isoterma 14 °C	D2	m	1993–2023	-2,2737 ± 1,7961	0,2069
	NMM Vigo	Vigo2	cm	1993–2023	2,1855 ± 0,5676	0,0006
	NMM Gijón 2	Gijón 2	cm	1995–2023	1,3999 ± 0,5021	0,0096
	NMM Santander 2	Santander2	cm	1992–2023	2,3817 ± 0,3177	0,0000
	NMM Brest	Brest	cm	1846–2023	1,3473 ± 0,0546	0,0000
	NMM Brest	Brest	cm	1992–2023	3,3017 ± 0,4242	0,0000
	NMM Coruña	Coruña 2	cm	1992–2023	3,9730 ± 0,5363	0,0000
	NMM Coruña	Coruña	cm	1943–2023	2,0655 ± 0,1934	0,0000
	NMM Bilbao3	Bilbao3	cm	1992–2023	3,3212 ± 0,3009	0,0000
	NMM satelite	Golfo Bizkaia	cm	1993–2023	3,1769 ± 0,3769	0,0000
Olatuak Oleaje	Hs	Boya Bilbao-Vizcaya buia	cm	1991–2023	1,4227 ± 2,5992	0,5710
	Hs90	Boya Bilbao-Vizcaya buia	cm	1991–2023	15,6747 ± 6,3854	0,0146
Kosta-lerroa Línea de costa	Itsasbehera-lerroa / Línea de Bajamar	Zarautz	m	2010–2023	2,0102 ± 7,2906	0,0000
	Itsasgora-lerroa / Línea de Pleamar	Zarautz	m	2010–2023	0,1076 ± 3,1654	0,0000
Hondartzen higadura Erosión playas	Mareaz gaindiko eremua / Área supramareal	Zarautz	m ²	2010–2023	1,4087 ± 5,170,6	0,7857
	Marearteko eremua / Área intermareal	Zarautz	m ²	2010–2023	1,494,8 ± 8,320,5	0,8577



Glosarioa

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

Antropogenikoa: giza jarduerak sortua edo haien ondoriozkoa.

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

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 espezifikoko batean.

Estratifikazioa: itsasoko ura dentsitate desberdineko geruza horizontaletan antolatzeke prozesua, batez ere tenperaturaren eta gazitasunaren aldaketen ondoriozkoa. Dentsitate-desberdintasun horrek eragotzi egiten du geruzen arteko nahasketa bertikala, eta ondo bereizitako eremuetan bereizten du ozeanoa. Gainazaleko estratifikazioa indartzeak, normalean, gainazaleko ur beroagoak eta azidotzea eragiten ditu geruza horretan, eta uretako oxigeno-mailak murriztea geruza sakonagoetan.

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

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

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 CO₂ 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.

Antropogénico: resultante o producido por actividades humanas.

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.

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 aldatzearen ondorioz (adibidez, glaziarren eta izotz-geruzak urtzearen ondorioz), (2) ozeanoaren bolumenaren aldaketak, ozeanoko uraren dentsitatean izandako aldaketen ondorioz (espantsioa baldintza beroagoetan), (3) aldaketak ozeanoko arroetan, eta aldaketak Lurraren grabitazio- eta errota-zio-eremuetan, eta (4) lurraren subsidentziak edo goratzeak.

Itsasoko bero-bolada: itsasoaren gainazaleko muturreko tenperaturaren aldi luzea, gutxienez 5 egunekoa, tenperaturak banaketa klimatologikoaren 90 perzentila baino beroagoak direnean gutxienez bost egunez jarraian (Hobday et al., 2016).

Itsasoko bero-boladaren intentsitatea: kontuan hartutako aldirako klimatologiaren gaintik dauden tenperatura-anomalia (klimatologiaren 90 perzentila).

Itsasoko bero-boladen intentsitate metatua: eguneko intentsitate guztien batura; hau da, egun horietarako 90 perzentil historikoaren gaintik dauden gradu-kopurua, itsasoko bero-boladak irauten duen bitartean.

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.

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 gorabeheren ondoriozkoa (barne-aldakortasuna), edota estrintsekoa, kanpoko behartze natural edo antropogenikoaren aldaketen ondoriozkoa (aldakortasun behartua).

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 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.

Capa de mezcla: capa superficial del océano donde la temperatura, salinidad y densidad son relativamente uniformes debido a la mezcla vertical causada por el viento, las olas y las corrientes.

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 por el cual el agua de mar se organiza en capas horizontales de diferente densidad, principalmente debido a variaciones en la temperatura y salinidad. Esta diferencia de densidad impide la mezcla vertical entre capas, separando el océano en zonas bien diferenciadas. 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.

Intensidad ola de calor marina: anomalía de temperatura por encima de la climatología para el periodo considerado (percentil 90 de la climatología).



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

Kostaldea: itsasotik gertu dagoen lurra. 'Kostaldeko' terminoak erreferentzia egin diezaiok lehorreko zatiari edo lehorreko prozesuen eragin handia duen itsas ingurunearen zatiari. Kostaldea, oro har, ez da oso sakona izaten, eta lurretik gertu egoten da.

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

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

Nahaste-geruza: ozeanoaren gainazaleko geruza, non temperatura, gazitasuna eta dentsitatea nahiko uniformeak diren, haizeak, olatuek eta korronteek eragindako nahasketa bertikalaren ondorioz.

Oinarri-lerroa: hondartzaren goialdean dauden ingerada zurrunen bidez eta 'iraunkortzat' jotzen diren elementuen posizioaren bidez definitutako erreferentzia-lerroa, hala nola duna-oina, pasabideak edo perimetroko urbanizazioko beste elementu batzuk.

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 CO₂ 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.

Intensidad acumulada de olas de calor marinas: suma de todas las intensidades diarias, que son el número de grados por encima del percentil 90 histórico para esos días, durante la duración de la ola de calor marina.

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.

Ola de calor marina: periodo prolongado, al menos 5 días, de temperatura extrema en la superficie del mar, cuando las temperaturas son más cálidas que el percentil 90 de la distribución climatológica durante al menos cinco días consecutivos (Hobday et al., 2016).

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.

Tipping point (punto de no retorno): un nivel de cambio en las propiedades de un sistema más allá del cual un sistema se reorganiza, a menudo de manera no lineal, y no regresa al estado inicial incluso si los factores que impulsan el cambio se reducen. Para el sistema climático, el término se refiere a un umbral crítico en el que el clima global o regional cambia de un estado estable a otro estado estable.

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.

pH-a: azidotasunaren neurri adimentsionala, hidrogeno ioien (H^+) kontzentrazioaren araberakoa. 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 handitzeari dagokio.

Tiping point (mugarri-puntua): sistema baten propietateetan izandako aldaketa-maila bat; maila horretatik aurrera sistema berrantolatu egiten da, askotan modu ez-linealean, eta ez da hasierako egoerara itzultzen, ezta aldaketa eragiten duten faktoreak murrizten badira ere. Klima-sistemari dagokionez, terminoak atalase kritiko bati egiten dio erreferentzia, non klima globala edo eskualdekoa egoera egonkor batek beste egoera egonkor batera aldatzen den.

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

Armstrong McKay, D.I., Staal, A., Abrams, J.F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S.E., Rockström, J., & Lenton, T.M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377, 6611.

Arriaga, O., Wawrzynkowski, P., Muguerza, N., Díez, I., González, J., Gorostiaga, J., Quintano, E., & Becerro, M.A. (2024). Thermal refugia reinforce macroalgal resilience against climate change in the southeastern Bay of Biscay. *Global Change Biology*, 30, e17481.

Barnard, P.L., Dugan, J.E., Page, H.M., Wood, N.J., Finzi Hart, J.A., Cayan, D.R., Erikson, L.H., Hubbard, D.M., Myers, M.R., Melack, J.M., & Iacobellis, S.F. (2021). Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems. *Scientific Reports*, 11, 15560.

Bates, N.R., Astor, Y.M., Church, M.J., Currie, K., Dore, J.E., González-Dávila, M., Lorenzoni, L., Muller-Karger, F., Olafsson, J., & Santana-Casiano, J.M. (2014). A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO₂ and ocean acidification. *Oceanography*, 27(1), 126–141.

Berthou, S., Renshaw, R., Smyth, T., Tinker, J., Grist, J.P., Wihsgott, J.U., Jones, S., Inall, M., Nolan, G., Bex, B., Arnold, A., Blunn, L.P., Castillo, J.M., Cotterill, D., Daly, E., Dow, G., Gómez, B., FraserLeonhardt, V., Hirschi, J. J.M., Lewis, H.W., Mahmood, S., & Worsfold, M. (2024). Exceptional atmospheric conditions in June 2023 generated a northwest European marine heatwave which contributed to breaking land temperature records. *Communications Earth & Environment*, 5, 287.

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. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447–587.

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

Borja, A., Chust, G., Fontan, A., Garmendia, J.M., & Uyarra, M.C. (2018). Long-term decline of the canopy-forming algae *Gelidium corneum*, associated to extreme wave events and reduced sunlight hours, in the southeastern Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 152–160.

Borja, Á., Dauer, D.M., Elliott, M., & Simenstad, C.A. (2010). Medium- and Long-term Recovery of Estuarine and Coastal Ecosystems: Patterns, Rates and Restoration Effectiveness. *Estuaries and Coasts*, 33, 1249–1260.

Carstensen, J., & Duarte, C.M. (2019). Drivers of pH Variability in Coastal Ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 53, 4020–4029.

Carton, J.A., Chepurin, G.A., Hackert, E.C., & Huang, B. (2025). Remarkable 2023 North Atlantic Ocean warming. *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL112551.

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. *Geophysical Research Letters*, 44, 1384–1392.

Castelle, B., & Harley, M. (2020). Extreme events: impact and recovery. In: *Sandy Beach Morphodynamics*. [Jackson, A., & Short, A (eds.)]. Elsevier, Amsterdam.

Cazenave, A., & Moreira, L. (2022). Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. *Proceedings of the Royal Society, A mathematical, physical and engineering sciences*, 478, 20220049.

Cheng, L., von Schuckmann, K., Abraham, J.P., Trenberth, K.E., Mann, M.E., Zanna, L., England, M.H., Zika, J.D., Fasullo, J.T., Yu, Y., Pan, Y., Zhu, J., Newsom, E.R., Bronselaer, B., & Lin, X. (2022). Past and future ocean warming. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 776–794.

Chust, G., Gonzalez, M., Fontan, A., Revilla, M., Alvarez, P., Santos, M., Cotano, U., Chifflet, M., Borja, A., Muxika, I., Sagarminaga, 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.

Chust, G., Villarino, E., McLean, M., Mieszkowska, N., Benedetti-Cecchi, L., Bulleri, F., Ravaglioli, C., Borja, A., Muxika, I., Fernandes-Salvador, J.A., Ibaibarriaga, L., Uriarte, A., Revilla, M., Villate, F., Iriarte, A., Uriarte, I., Zervoudaki, S., Carstensen, J., Somerfield, P.J., Queirós, A.M., McEvoy, A.J., Auber, A., Hidalgo, M., Coll, M., Garrabou, J., Gómez-Gras, D., Linares, C., Ramírez, F., Margarit, N., Lepage, M., Dambrine, C., Lobry, J., Peck, M.A., de la Barra, P., van Leeuwen, A., Rilov, G., Yeruham, E., Brind'Amour, A., & Lindegren, M. (2024). Cross-basin and cross-taxa patterns of marine community tropicalization and deborealization in warming European seas. *Nature Communications*, 15, 2126.

Cianelli, L., Chan, K., Bailey, K.M., & Stenseth, N.C. (2004). Nonadditive effects of the environment on the survival of a large marine fish population. *Ecology*, 85, 3418–3427.

Copernicus Marine Service. (2023). The 2023 Northern Hemisphere Summer Marks Record-Breaking Oceanic Events. [Internet]. <https://marine.copernicus.eu/news/2023-northern-hemisphere-summer-record-breaking-oceanic-events>

Copernicus Marine Service. (2025a). Atlantic Iberian Biscay Mean Sea Level time series and trend from Observations Reprocessing. [Internet]. <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/atlantic-iberian-biscay-mean-sea-level-time-series-and>

Copernicus Marine Service. (2025b). Global Ocean Mean Sea Level time series and trend from Observations Reprocessing. [Internet]. <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/time-series-mean-sea-level-anomalies-over-global-ocean-and-associated-trend>

Copernicus Marine Service. (2025c). Iberia Biscay Ireland Strong Wave Incidence index from Reanalysis. [Internet]. <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/iberia-biscay-ireland-strong-wave-incidence-index>

Corrales, X., Preciado, I., Gascuel, D., Lopez de Gamiz-Zearra, A., Hervann, P. Y., Mugerza, E., Louzao, M., Velasco, F., Doray, M., López-López, L., Carrera, P., Cotano, U., & Andonegi, E. (2022). Structure and functioning of the Bay of Biscay ecosystem: A trophic modelling approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 264, 107658.

Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A. & Totterdell, I.J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184–187.

Crapoulet, A., Héquette, A., Levoy, F., & Bretel, P. (2015). Évaluation de l'évolution du trait de côte et du bilan sédimentaire littoral en baie de Wissant (Nord de la France) par LiDAR aéroporté. *Geomorphologie*, 21(4), 313–330.

Crowe, T., Cusson, M., Bulleri, F., Davoult, D., Arenas, F., Aspden, R., Benedetti-Cecchi, L., Bevilacqua, S., Davidson, I., Defew, E., Frascchetti, S., Golléty, C., Griffin Migné, J., Herkül, K., Kotta, J., Migné, A., Molis, M., Nicol, S., Noël, L. L., Sousa Pinto, I., Valdivia, N., & Jenkins, S. (2013). Large-scale variation in combined impacts of canopy loss and disturbance on community structure and ecosystem functioning. *PLoS ONE*, 8 (9), e66238.

Dahlke F.T., Wohlrab, S., Butzin, M., & Pörtner, H.-O. (2020). Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. *Science*, 369(6499), 65–70.

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.

Davis, R.A., & Fox, W.T. (1972). Coastal processes and nearshore sand bars. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42, 402–412.

Drijfhout, S., Bathiany, S., Beaulieu, C., Brovkin, V., Claussen, M., Huntingford, C., Scheffer, M., Sgubin, G., & Swingedouw, D. (2015). Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112 (43), E5777–E5786.

Duffy, J.E., Benedetti-Cecchi, L., Trinanés, J., Muller-Karger, F.E., Ambo-Rappe, R., Boström, C., Buschmann, A.H., Byrnes, J., Coles, R.G., Creed, J., Cul-



Ien-Unsworth, L.C., Diaz-Pulido, G., Duarte, C.M., Edgar, G.J., Fortes, M., Goni, G., Hu, C., Huang, X., Hurd, C.L., Johnson, C., Konar, B., Krause-Jensen, D., Krumhansl, K., Macreadie, P., Marsh, H., McKenzie, L.J., Mieszkowska, N., Miloslavich, P., Montes, E., Nakaoka, M., Norderhaug, K.M., Norlund, L.M., Orth, R.J., Prathep, A., Putman, N.F., Samper-Villarreal, J., Serrao, E.A., Short, F., Pinto, I.S., Steinberg, P., Stuart-Smith, R., Unsworth, R.K.F., van Keulen, M., van Tussenbroek, B.I., Wang, M., Waycott, M., Weatherdon, L.V., Wernberg, T., & Yaakub, S.M. (2019). Toward a Coordinated Global Observing System for Seagrasses and Marine Macroalgae. *Frontiers in Marine Science*, 6.

Durack, P.J., Wijffels, S.E., & Matear, R.J. (2012). Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification During 1950 to 2000. *Science*, 336,455–458.

Flecha, S., Giménez-Romero, À., Tintoré, J., Péres, F.F., Alou-Font, E., Matías, M.A., & Hendriks, I.E. (2022). pH trends and seasonal cycle in the coastal Balearic Sea reconstructed through machine learning. *Scientific Reports*, 12, 12956.

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C.S. (2004). Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35,557–581.

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Lujikx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Arneth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Berghoff, C. F., Bittig, H. C., Bopp, L., Cadule, P., Campbell, K., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Colligan, T., Decayeux, J., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Duran Rojas, C., Enyo, K., Evans, W., Fay, A. R., Feely, R. A., Ford, D. J., Foster, A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A. K., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Lan, X., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Liu, Z., Liu, J., Ma, L., Maksyutov, S., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P. C., Metzl, N., Monacci, N. M., Morgan, E. J., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Niwa, Y., Nützel, T., Olivier, L., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Qin, Z., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan, T. M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Smallman, T. L., Smith, S. M., Sospedra-Alfonso, R., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tilbrook, B., Torres, O., Tourigny,

E., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G., Wanninkhof, R., Wang, X., Yang, D., Yang, X., Yu, Z., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, N., & Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17, 965–1039.

GBO (2014). Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Global Biodiversity Outlook (GBO). Convention on Biological Diversity, Montréal, 155 pp.

Gehlen, M., Chau, T.T.T., Conchon, A., Denvil-Sommer, A., Chevallier, F., Vrac, M., & Mejia, C. (2020). Ocean acidification. In: *Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4. Journal of Operational Oceanography*, 13, 64–66.

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.

González-Pola, C., Somavilla, R., Graña, R., Vitoria, A., & Ibáñez-Tejero, L. (2025). A decade-long flow reversal in the intergyre region of the eastern north Atlantic. *Progress in Oceanography*, 231, 103406.

Hanslow, D. J. (2007). Beach Erosion Trend Measurement: A Comparison of Trend Indicators. *Journal of Coastal Research*, 588–593.

Harley, C.D.G., Anderson, K.M., Demes, K.W., Jorve, J.P., Kordas, R.L., Coyle, T.A., & Graham, M.H. (2012). Effects of climate change on global seaweed communities. *Journal of Phycology*, 48, 1064–1078.

Heinze, C., Blenckner, T., Martins, H., Rusiecka, D., Döscher, R., Gehlen, M., Gruber, N., Holland, E., Hov, Ø., Joos, F., Matthews, J.B.R., Rødven, R., & Wilson, S. (2021). The quiet crossing of ocean tipping points. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118 (9), e2008478118.

Hemraj, D.A., & Carstensen, J. (2025). Towards ecosystem-based techniques for tipping point detection. *Biological Reviews*, 100, 892–919.

Hemraj, D.A., Hossain, A., Ye, Q., Qin, J.G., & Leterme, S.C. (2017). Anthropogenic shift of planktonic food web structure in a coastal lagoon by freshwater flow regulation. *Scientific Reports*, 7, 44441.

Hendriks, I.E., Duarte, C.M., Olsen, Y.S., Steckbauer, A., Ramajo, L., Moore, T.S., Trotter, J.A., & McCulloch, M. (2015). Biological mechanisms supporting adaptation

to ocean acidification in coastal systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 152, A1–A8.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganapolski, 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., Benthuyzen, 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., Benthuyzen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N., Moore, P., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. (2018). Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography*, 31.

Holliday, N.P., Bersch, M., Berx, B., Chafik, L., Cunningham, S., Florindo-López, C., Hátún, H., Johns, W., Josey, S.A., Larsen, K.M.H., Mulet, S., Oltmanns, M., Reverdin, G., Rossby, T., Thierry, V., Valdimarsson, H., & Yashayev, I. (2020). Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic. *Nature Communications*, 11, 585.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, 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. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckhe, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. 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. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp.

Jackson, D.W.T., & Short, A.D. (Eds.) 2020. *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, Amsterdam.

Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D.J., Strauss, B.H., & Tebaldi C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2, 8, 383–406.

Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., & Gattuso, J.-P. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19, 1884–1896.

Lauvset, S. K., Gruber, N., Landschützer, P., Olsen, A., & Tjiputra, J. (2015). Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades. *Biogeosciences*, 12, 1285–1298.

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.

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

Martone, R., Kappel, C., Scarborough, C., Erickson, A., & Weiss, K. (2017). *Ocean Tipping Points Guide: Science for Managing a Changing Ocean*. Stanford, California: The Woods Institute for the Environment, Stanford University, and the University of California Santa Barbara.

McCarty, J.P. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology*, 15, 320–331.

Melet, A., Almar, R., Hemer, M., Le Cozannet, G., Meyssignac, B., & Ruggiero, P. (2020). Contribution of wave setup to the 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., Vousedoukas, M.I., Pekel, J.F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8, 12876.

Meyssignac, B., Slangen, A.B.A., Melet, A., Church, J.A., Fettweis, X., Marzeion, B., Agosta, C., Ligtenberg, S.R.M., Spada, G., Richter, K., Palmer, M.D., Roberts, C.D., & Champollion, N. (2017). Evaluating Model Simulations of Twentieth-Century Sea-Level Rise. Part II: Regional Sea-Level Changes. *Journal of Climate*, 30, 8565–8593.

Moreno-Mateos, D., Alberdi, A., Morriën, E., van der Putten, W.H., Rodríguez-Uña, A., & Montoya, D. (2020). The long-term restoration of ecosystem complexity. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 676–685.

Mudelsee, M. (2000). Ramp function regression: a tool for quantifying climate transitions. *Computers & Geosciences*, 26, 293–307.

Mudelsee, M. (2009). Break function regression. *The European Physical Journal Special Topics*, 174, 49–63.

Mudelsee, M. (2010). Climate time series analysis. Classical statistical and bootstrap methods. 2nd ed. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 454 pp.

Muggeo, V.M.R. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, 22, 3055–3071.

Munday, P.L., Dixon, D.L., Donelson, J.M., Jones, G.P., Pratchett, M.S., Devitsina, G.V., & Døving, (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (6) 1848–1852.

Nilsson, G.E., Dixon, D.L., Domenici, P., McCormick, M.I., Sørensen, C., Watson, S.-A., & Munday, P.L. (2012). Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function. *Nature Climate Change*, 2, 201–204.

Naturklima. (2022). Informe marino-costero. Tendencia y evolución de indicadores de cambio climático y proyecciones futuras. <https://www.naturklima.eus/informe-del-observatorio-marino-costero.htm>

Naturklima. (2023). Tendencia y evolución de indi-

cadores de cambio climático y análisis del efecto de las olas de calor marinas en especies potencialmente afectadas.

Oliver, E.C.J., Burrows, M.T., Donat, M.G., Sen Gupta, A., Alexander, L.V., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Benthuysen, J.A., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Thomsen, M.S., Wernberg, T., & Smale, D.A. (2019). Projected Marine Heatwaves in the 21st Century and the Potential for Ecological Impact. *Frontiers in Marine Science*, 6, 481127.

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*, 64, 1247–1267.

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.

Rocha, J. C., Peterson, G., Bodin, Ö., & Levin, S. (2018). Cascading regime shifts within and across scales. *Science*, 362, 1379–1383.

Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G., & Voigt, B. (2005). Seasonal to Interannual Morphodynamics along a High-Energy Dissipative Littoral Cell. *Journal of Coastal Research*, 213, 553–578.

Russell, J., Benway, H., Bracco, A., Deutsch, C., Ito, T., Kamenkovich, I., & Patterson, M. (2015). Ocean's Carbon and Heat Uptake: Uncertainties and Metrics. US CLIVAR report 2015–3, p33.

Sallée, J.B., Pellichero, V., Akhoudas, C., Pauthenet, E., Vignes, L., Scridtko, S., Naveira Garabato, A., Sutherland, P., & Kuusela, M. (2021). Summertime increases in upper-ocean stratification and mixed-layer depth. *Nature*, 591, 592–598.

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E.H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461, 53–59.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591–596.

Short, A.D., & Jackson, D.W.T. (2021). Beach Morphodynamics. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. Amsterdam

Slangen, A.B.A., Church, J.A., Agosta, C., Fettweis, X., Marzeion, B., & Richter, K. (2016). Anthropogenic forcing dominates global mean sea-level rise since 1970. *Nature Climate Change*, 6, 701–705.

Smith, K.E., Burrows, M.T., Hobday, A.J., King, N.G., Moore, P.J., Sen Gupta, A., Thomsen, M.S., Wernberg, T., & Smale, D.A. (2023). Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annual Reviews of Marine Science*, 15, 119–145.

Somavilla, R., González-Pola, C., & Fernández-Díaz, J. (2017). The warmer the ocean surface, the shallower the mixed layer. How much of this is true? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 7698–7716.

Sonderogger, D.L., Wang, H., Clements, W.H., & Noon, B.R. (2009). Using SiZer to detect thresholds in ecological data. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 190–195.

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H.J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (33), 8252–8259.

Strain, E.M.A., Thomson, R.J., Micheli, F., Mancuso, F.P., & Airoidi, L. (2014). Identifying the interacting roles of stressors in driving the global loss of canopy-forming to mat-forming algae in marine ecosystems. *Global Change Biology*, 20, 3300–3312.

Taboada, F.G., Chust, G., Santos Mocochoa, M., 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.

Thom, R. (1977). Catastrophe theory. *Nature*, 270, 658.

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.

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. In: *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country* [Borja, A. and Collins, M. (Eds.)]. Elsevier Oceanography Series, 70, pp 159–194.

Vasilakopoulos, P., Raitzos, D.E., Tzanatos, E., & Maravelias, C.D. (2017). Resilience and regime shifts in a marine biodiversity hotspot. *Scientific Reports*, 7, 13647.

von Schuckmann, K., Moreira, L., Cancet, M., Gues, F., Autret, E., Aydogdu, A., Castrillo, L., Ciani, D., Cipollone, A., Clementi, E., Cossarini, G., de Pascual-Collar, A., De Toma, V., Gehlen, M., Giesen, R., Drevillon, M., Fanelli, C., Hodges, K., Jandt-Scheelke, S., Jansen, E., Juza, M., Karagali, I., Lagema, P., Lien, V., Lima, L., Lyubartsev, V., Maljutenko, I., Masina, S., McAdam, R., Miraglio, P., Morrison, H., Panteleit, T. R., Pisano, A., Pujol, M.-I., Raudsepp, U., Raj, R., Stoffelen, A., Van Genip, S., Veillard, P., & Yang, C. (2024). The state of the ocean in the northeastern Atlantic and adjacent seas. In: *8th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR8)* [von Schuckmann, K., Moreira, L., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J., & Neukermans, G. (ed.)]. Copernicus Publications, State Planet, 4-osr8, 2.

Wernber, T., Thomsen, M.S., Baum, J.K., Bisop, M.J., Bruno, J.F., Coleman, M.A., Filbee-Dexter, K., Gagnon, K., He, Q., Murdiyars, D., Rogers, K., Silliman, B.R., Smale, D.A., Starko, S., & Vanderklift, M.A. (2024). Impacts of climate change on marine foundation species. *Annual Review of Marine Science*, 16, 247–282.

Woodworth, P.L., Melet, A., Marcos, M., Ray, R.D., Wöppelmann, G., Sasaki, Y.N., Cirano, M.M Hibbert, A., Huthnance, J.M., Monserrat, S., & Merrifield, M.A. (2019). Forcing Factors Affecting Sea Level Changes



at the Coast. *Surveys in Geophysics*, 40, 1351–1397.

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.

Wright, L.D., & Short, A.D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56, 93–118.

Xu, T., Newman, M., Capotondi, A., Stevenson, S., Di Lorenzo, E., & Alexander, M.A. (2022). An increase in marine heatwaves without significant changes in surface ocean temperature variability. *Nature Communications*, 13, 7396.

Zunino, S., Libralato, S., Melaku Canu, D., Prato, G., & Solidoro, C. (2021). Impact of Ocean Acidification on Ecosystem Functioning and Services in Habitat-Forming Species and Marine Ecosystems. *Ecosystems*, 24, 1561–1575.

Zurbenko, I., Porter, P.S., Gui, R., Rao, S.T., Ku, J.Y., & Eskridge, R.E. (1996). Detecting Discontinuities in Time Series of Upper-Air Data: Development and Demonstration of an Adaptive Filter Technique. *Journal of Climate*, 9, 3548–3560.

