

Urklima: impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos, en la cuenca del río Oka

Efectos sobre la concentración de sedimentos en los cursos de aguas superficiales, la tasa de sedimentos exportados desde las cuencas y su dinámica costera





Ihobe, mayo 2025

EDITA

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.^a (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

www.ihobe.eus

EDICIÓN

Mayo 2025

CONTENIDO

Este documento ha sido elaborado por la UPV/EHU, con la colaboración de los siguientes grupos de investigación participantes:

UPV/EHU: I. Antiguiedad, A. Zabaleta; M. Meaurio; J. Arbulu; J. Uriarte

NEIKER: N. Gartzia, A. Arias, J. Uria

AZTI: R. Garnier, I. Epelde, I. de Santiago, A. Abalia, A. del Campo, P. Liria, G. Chust, M. González, I. Townend

BC3-Grupo ARIES: B. Egidazu, S. Balbi, J. Pompeu, Y. Wu

BC3: I. Pérez-Rubio, U. Pascual, I. Etxano

Coordinador del proyecto y de la síntesis: I. Antiguiedad (UPV/EHU)

Índice

| | |
|---|-----------|
| 01. Resumen ejecutivo | 04 |
| 1.1. Objetivos | |
| 1.2. Consideraciones | |
| 1.3. Métodos y conclusiones | |
| 02. Marco geográfico e hidrológico | 08 |
| 03. Funcionalidad hidrológica del territorio | 12 |
| 3.1. Efecto hidrológico de los usos del suelo: caudales | |
| 3.2. Efecto hidrológico de los usos del suelo: sedimentos | |
| 3.3. Monitorización hidrológica forestal: parcela de seguimiento intensivo | |
| 3.4. Modelización integrada de caudal y sedimentos en la cuenca del Oka | |
| 3.5. Modelización de erosión y deposición en escenarios de manejo forestal | |
| 04. Dinámica del estuario en escenarios de cambio climático | 25 |
| 4.1. Aporte marino y cambios morfológicos del estuario inferior | |
| 4.2. Balance sedimentario en el estuario | |
| 05. Marco conceptual y metodológico para la protección de captaciones | 33 |
| 5.1. Marco normativo | |
| 5.2. Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) | |
| 5.3. Zonas de protección de captaciones: metodología URBASO | |
| 06. Propuestas para la territorialización de la adaptación hidrológica | 45 |
| 6.1. Metodología de seguimiento de cambios en demarcaciones hidrográficas | |
| 07. Propuestas para Pago por Servicios Hidrológicos (PSH) | 49 |
| 7.1. Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) | |
| 7.2. Enfoque metodológico para evaluar los PSH | |
| 7.3. Elementos clave para un esquema de PSH en la RBU | |
| 08. Referencias | 59 |

01

Resumen ejecutivo

Este proyecto se enmarca en la iniciativa «KLIMATEK: Proyectos I+D, Innovación y Demostración en Adaptación al Cambio Climático en Euskadi», la cual se puso en marcha en 2016 con el objeto de desarrollar un proceso de carácter innovador de gobernanza e implementación de políticas ambientales en el ámbito de la adaptación al cambio climático.

El presente documento sintetiza de forma transversal los trabajos realizados en el marco del proyecto UrKlima (convocatoria KLIMATEK 2022) que se realizó durante los años 2023 y 2024. El objetivo del proyecto es «llevar a cabo una aproximación integrada a la gestión de cuencas hidrográficas en clave de adaptación al cambio climático mediante la realización de un piloto demostrativo orientado a proponer directrices para la adaptación hidrológica desde el territorio que tengan en cuenta los **servicios hidrológicos**, tanto en agua (disponibilidad, estacionalidad) como en suelo. Se plantea que el piloto demostrativo se desarrolle en el Espacio Urdaibai, que se estructura fundamentalmente en la cuenca del río Oka, y que considere de forma conjunta la parte continental y la parte marino-estuarina».

En ese objetivo han colaborado 4 grupos de investigación del País Vasco (AZTI, BC3, NEIKER y UPV/EHU), cada cual en su dominio de análisis, pero, a la vez, tratando de integrar conocimiento en un

ámbito territorial común: **la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (RBU)**, que viene a corresponder a la Demarcación Hidrográfica del río Oka (cuenca y estuario).

1.1. Objetivos

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

1. Actualizar la información hidrológica disponible en el espacio Urdaibai, incidiendo en los Servicios Hidrológicos del territorio, y usar diferentes modelos para simular distintos escenarios de cambios, tanto en la cuenca como en el estuario.
2. Establecer directrices para la adaptación hidrológica desde el territorio, que consideren los Servicios Hidrológicos (disponibilidad, estacionalidad, cantidad y calidad del recurso Agua); las medidas propuestas se han centrado en el entorno de las captaciones de agua superficiales para abastecimiento.
3. Proponer esquemas de sistemas de Pago por Servicios Hidrológicos.

1.2. Consideraciones

En los contenidos recogidos en esta síntesis se integran aspectos conceptuales, metodológicos y normativos con propuestas dirigidas a la adaptación hidrológica desde el territorio de Urdaibai, teniendo en cuenta que el territorio, continental y estuarino, es un espacio abierto, dinámico, con múltiples **procesos, naturales y antrópicos, interrelacionados** y con diferentes efectos sobre el medio, en espacio y tiempo, del que aún queda mucho por conocer.

En el trabajo desarrollado en este proyecto en el dominio continental (cuena del Oka, la mayor parte de la RBU), se han priorizado, y justificado, las propuestas de incidencia territorial para la **protección de las zonas de captación de aguas superficiales** dirigidas al abastecimiento, que es la actuación más necesaria e inminente para la adaptación hidrológica del territorio. De ahí que se haya desarrollado el concepto de **Espacios de Prioridad Hidrológica**.

Para dotar a las propuestas de un **carácter práctico** ha dado importancia a los aspectos normativos y, en concreto, al Plan Rector de Uso y Gestión de Urdaibai (PRUG), que a priori debe ser revisado en 2026, y a las políticas forestales, de gran trascendencia en este espacio por alterar la funcionalidad hidrológica del territorio y poner en riesgo la protección de las captaciones. Sin olvidar que todos los procesos que se dan en la cuena del Oka condicionan, tanto en términos de caudal como de materia, la evolución temporal de los flujos de entrada al estuario. De ahí, también, la necesidad de una mejor y más extensa **red de seguimiento** de procesos hidrológicos en Urdaibai, con perspectiva temporal. De hecho, la actualmente existente, referenciada en esta síntesis, es en buena parte resultado de proyectos de investigación en marcha, sin una garantía de permanencia futura.

1.3. Métodos y conclusiones

Se ha realizado una investigación multidisciplinar (UPV/EHU, BC3, AZTI, NEIKER) en el territorio de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (cuena del río Oka y estuario) con el objetivo de ofrecer una «aproximación integrada a la gestión de cuencas hidrográficas en clave de adaptación al cambio climático».

Respecto a la información hidrológica, sería recomendable incrementar el número de estaciones de aforo, contándose actualmente con sólo una (río Oka, en Muxika). El resto de puntos de control (captaciones) están gestionados por grupos de investigación, pero sin la necesaria seguridad de mantenimiento futuro. Los modelos necesitan de series de datos hidrológicos para ofrecer escenarios confiables. La ampliación, a puntos representativos del espacio de Urdaibai, del control de, al menos, caudal y turbidez es clave, al ser indicadores de cantidad y calidad del agua (la turbidez, además, informa de la pérdida de suelo, servicio ecosistémico frecuentemente despreciado). En esta línea, como aportación del proyecto, se ha puesto en marcha una parcela forestal para el seguimiento intensivo de los procesos en la relación suelo-planta-atmósfera, que deben aportar conocimiento sobre los flujos de materia y energía.

Se han utilizado varios modelos (SWAT, USPED), de diferente base conceptual y escala espacio-temporal, para simular procesos hidrológicos (generación de caudal, transporte de sedimentos) y de erosión de suelo-deposición de sedimentos en la cuena del Oka. Una vez calibrados y validados, con la limitación de series disponibles, se han usado para generar escenarios futuros. Se han considerado, de forma separada, escenarios de cambio climático y escenarios de cambio en el manejo forestal (actividad prioritaria en el espacio de Urdaibai), ya que ambos cambios afectan, incluso de forma solapada, la dinámica hidrológica de la cuena. El reto a futuro es avanzar en la convergencia de estos modelos, pero eso requiere de una perspectiva temporal no siempre presente en la investigación promovida desde la administración ambiental.

De las proyecciones futuras (2011-2099) se deduce que **el caudal medio anual desciende a lo largo del siglo, y que las estaciones más afectadas van a ser, están siendo, verano y otoño**. Las proyecciones de exportación de sedimentos desde la cuena hacia el estuario muestran una tendencia similar, disminuyendo a lo largo del siglo. La consideración de esta tendencia, con la limitación de series disponibles para calibrar los modelos, en el modelo de balance sedimentario (ASMITA) del estuario indica que supone un impacto reducido en los elementos morfológicos del estuario. Por otro lado, la modelación preliminar mediante USPED de diferentes escenarios de gestión forestal, incluido el *business as usual*, muestra que **el establecimiento de zonas de protección tanto en los márgenes de los cauces como en el entorno de los puntos de captación de agua**, conllevaría una disminución de sedimentos en suspensión en los ríos, y, por tanto, una mayor garantía de uso de las captaciones para fines de abastecimiento.

Como se ha dicho, en este estudio se ha abordado tanto la parte terrestre como la marina de Urdaibai, siendo ésta una aproximación novedosa en la CAPV, dado que estudios previos han abordado solo parcialmente dichos ámbitos. Así, el estudio de dinámica de flujo y de transporte de materia desde la parte continental debe venir acompañado de un estudio paralelo en el estuario, de forma que se considere en su integralidad el concepto de demarcación hidrográfica recogido en la Directiva Marco del Agua (DMA).

Desde esa visión, se han evaluado el aporte marino y los cambios morfológicos del estuario inferior (desembocadura, playa y delta) a partir de datos de imágenes procedentes del sistema de videometría KostaSystem y de ortofotos. A partir de ahí, se estudia el balance sedimentario en todo el estuario mediante el modelo numérico ASMITA, basado en el equilibrio de los flujos entre los elementos del estuario y que integra los resultados de las proyecciones climáticas, los cambios en el aporte sedimentario marino y continental y que, además, puede simular actuaciones antrópicas. Se obtiene que los cambios morfológicos más importantes que se han observado en el estuario en los últimos años se deben principalmente a las actuaciones de dragado y regeneración de la playa de Laida entre 1998 y 2003 y a los procesos de recuperación.

Por otra parte, **del análisis detallado de las normativas hidrológicas**, en lo que a la protección de captaciones se refiere, se desprende que, si bien todas ellas recogen la necesidad de establecer perímetros de protección en captaciones del Registro de Zonas Protegidas, **su puesta en práctica es muy escasa, más aún en las captaciones de agua superficiales**. Los criterios (delimitación espacial y limitación de usos del suelo) a aplicar en la protección son poco concretos y no tienen en cuenta de forma adecuada la afección a la cantidad del recurso (efecto de la evapotranspiración), centrándose exclusivamente en la calidad. Se requiere de un cambio de paradigma en la forma de entender la protección territorial de las captaciones, más aún con la consideración de «enfoque basado en el riesgo» que, como novedad importante, implica la Directiva 2020/2184 y su trasposición mediante el RD 3/2023.

Es en el cambio de paradigma, y con la apuesta por territorializar la adaptación hidrológica, que desde este proyecto **se propone el establecimiento de «Espacios de Prioridad Hidrológica» (EPH)**. El objetivo es la adaptación del territorio desde su funcionalidad hidrológica. EPH: «Aquellas partes del territorio cuya prioridad debe ser garantizar la disponibilidad, en espacio y tiempo, de los recursos hídricos, en cantidad y calidad».

En el caso de captaciones superficiales incluye toda la cuenca de drenaje vertiente a la captación. Dentro de ese EPH, en el entorno de la captación, se propone aplicar la metodología URBASO. **Se trata de delimitar tres Zonas de Protección (especial, intermedia, lejana) más una zona de ribera, y en cada una de ellas con usos permitidos, con limitaciones y con prioridades de gestión.**

Los Espacios de Prioridad Hidrológica y las Zonas de Protección de todas las captaciones de agua superficiales registradas en Urdaibai han sido cartografiados, por municipios, sobre la base del catastro (polígonos y parcelas), con vistas a su consideración en el planeamiento territorial municipal, y, llegado el caso, a su adquisición prioritaria para ampliar el patrimonio público territorial.

Teniendo en cuenta el régimen de propiedad de las parcelas forestales mayoritario en Urdaibai, **se hace necesario buscar esquemas de pagos por servicios hidrológicos**, aspecto al que se ha dado gran trascendencia en este proyecto, ya que condiciona la aplicabilidad de las medidas territoriales propuestas. **El diseño de esquema de Pago por Servicios Hidrológicos (PSH)** que se propone para el espacio Urdaibai se fundamenta en los siguientes lineamientos:

- a) **Un proceso de legitimación normativa** basado en el establecimiento de un acuerdo institucional de gobernanza entre los actores sociales, en torno a una estrategia consensuada de gestión del territorio siguiendo criterios hidrológicos.
- b) **El cálculo de la cuantía económica del esquema de PSH debe incorporar**, a su vez, estos criterios de carácter ecosistémico: (1) Condicionalidad, es decir, el compromiso explícito por parte del beneficiario de implementar el modelo forestal basado en la propuesta de gestión adaptativa del territorio, (2) Adicionalidad, es decir, el impacto positivo neto y efectivo en la provisión de servicios hidrológicos como consecuencia de la presencia de un pago, en comparación con un escenario de línea de base, (3) Aglomeración, es decir, la aplicación de una bonificación al pago base establecido por cada propietario contiguo que se decida a participar en el proyecto que facilite la integración espacial de las parcelas beneficiarias.
- c) **La apertura de un espacio que incorpore, de forma inclusiva, equitativa y participativa, los aspectos identitarios, culturales y socioeconómicos** que conforman el espacio Urdaibai, ya sea aprovechando las estructuras que existen o creando unas nuevas.

Como nota final, lo expuesto en estas conclusiones es una visión simplificada transversal de lo recogido en esta síntesis, que, a su vez, resume los contenidos de los documentos específicos incluidos en el Anexo I. La limitación en el tiempo del proyecto (15 meses) conlleva, obviamente, limitación en los contenidos, al menos, en los que necesariamente se basan en series largas de datos de campo que informen de la evolución temporal de los procesos hidrológicos.

A pesar de ello, con el conocimiento actual, plasmado en las propuestas hechas en el proyecto, se puede, y debe, ir avanzando, pasando del conocimiento científico a su consideración en las normativas correspondientes. En este sentido, tal como se recoge en esta síntesis, **se considera de especial relevancia la revisión del Plan Rector de Uso y Gestión de Urdaibai (PRUG) a llevar a cabo, en principio, en 2026.**

Marco geográfico e hidrológico

«La Reserva de la Biosfera de Urdaibai engloba 22.000 hectáreas y la integra un mosaico de acantilados, montañas, playas, ríos y aguas subterráneas, que nos ofrecen un espectacular paisaje lleno de vida animal y humana. Con objeto, por un lado, de armonizar la conservación de la diversidad biológica, el patrimonio y las manifestaciones culturales, y por otro, el desarrollo económico, así como la relación de las personas con su entorno, en 1984 UNESCO integra a Urdaibai en su programa MaB, a través de su declaración como Reserva de la Biosfera»¹.

«En el territorio de la Reserva de la Biosfera se incluyen 22 municipios, de los cuales 19 pertenecen a la comarca de Busturialdea: Ajangiz, Arratzua, Gautegez-Arteaga, Bermeo, Busturia, Elantxobe, Errigoiti, Ereño, Forua, Gernika-Lumo, Ibarrangelua, Kortezubi, Mendata, Morga, Mundaka, Murueta, Muxika, Nabarniz y Sukarrieta, siendo Ea el único municipio de la comarca que queda fuera de los límites de la Reserva de la Biosfera. De los tres restantes, Amorebieta-Etxano pertenece a la comarca de Durangaldea, Arrieta a Uribe y Munitibar a la comarca de Lea-Artibai»².

El territorio de la Reserva se ajusta a la delimitación espacial de la Unidad Hidrológica (UH) del río Oka,

una de las definidas en la planificación hidrológica del País Vasco³.

Esta UH abarca la totalidad de la cuenca del río Oka y su estuario, y la de los ríos Mape, Olaeta, Muxika, Kanpantxu, Golako y Oma (Figura 1a). Asimismo, comprende las cuencas anexas de los ríos Artigas y Laga. La cuenca principal de la unidad es la del Oka que ocupa 62 de los 219 km² de la UH⁴. La demarcación hidrográfica incluye el estuario, situado en su zona central, con una morfología alargada en dirección norte-sur. La zona estuarina se extiende aguas arriba hasta Gernika-Lumo, y está rodeada por relieves calizos con cotas de 300 - 450 m.

Desde que entrase en vigor la Directiva Marco del Agua (DMA; DIRECTIVA 2000/60/CE) se ha extendido el uso del concepto de **«masa de agua»**, de obligada consideración en la planificación hidrológica. Se diferencian las masas de agua superficial y subterránea, según las siguientes definiciones (Art. 2. Definiciones):

- **«masa de agua superficial»:** una parte diferenciada y significativa de agua superficial, como un lago, un embalse, una corriente, río o canal, parte de una corriente, río o canal, unas aguas de transición o un tramo de aguas costeras; costeras;

¹ <https://www.urdaibai.eus/es/>

² <https://www.urdaibai.eus/es/>

³ https://www.uragentzia.euskadi.eus/webura00-contents/es/contenidos/informacion/mapa_hidrologico_2016/es_docu/index.shtml

⁴ https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/proceso_concertacion/es_def/adjuntos/UH_Oka_DEF_es.pdf

— «masa de agua subterránea»: un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos;

En Urdaibai la planificación considera 6 masas de agua superficiales, 4 en categoría aguas de río (Artigas-A, Mape-A, Oka-A, Golako-A) y 2 en la de aguas de transición (Oka interior, Oka exterior⁵. Considera, además, 4 masas

de agua subterránea (Anticlinorio Norte, Sinclinorio de Bizkaia, Gernika y Ereñozar) relacionadas con las Unidades Hidrogeológicas Ereñozar, Gernika y Oiz, según el Mapa Hidrogeológico del País Vasco⁶. No se insiste más en el tema de las aguas subterráneas ya que el objetivo de este estudio se centra en las aguas superficiales, y, más concretamente, en las captaciones de agua para abastecimiento.

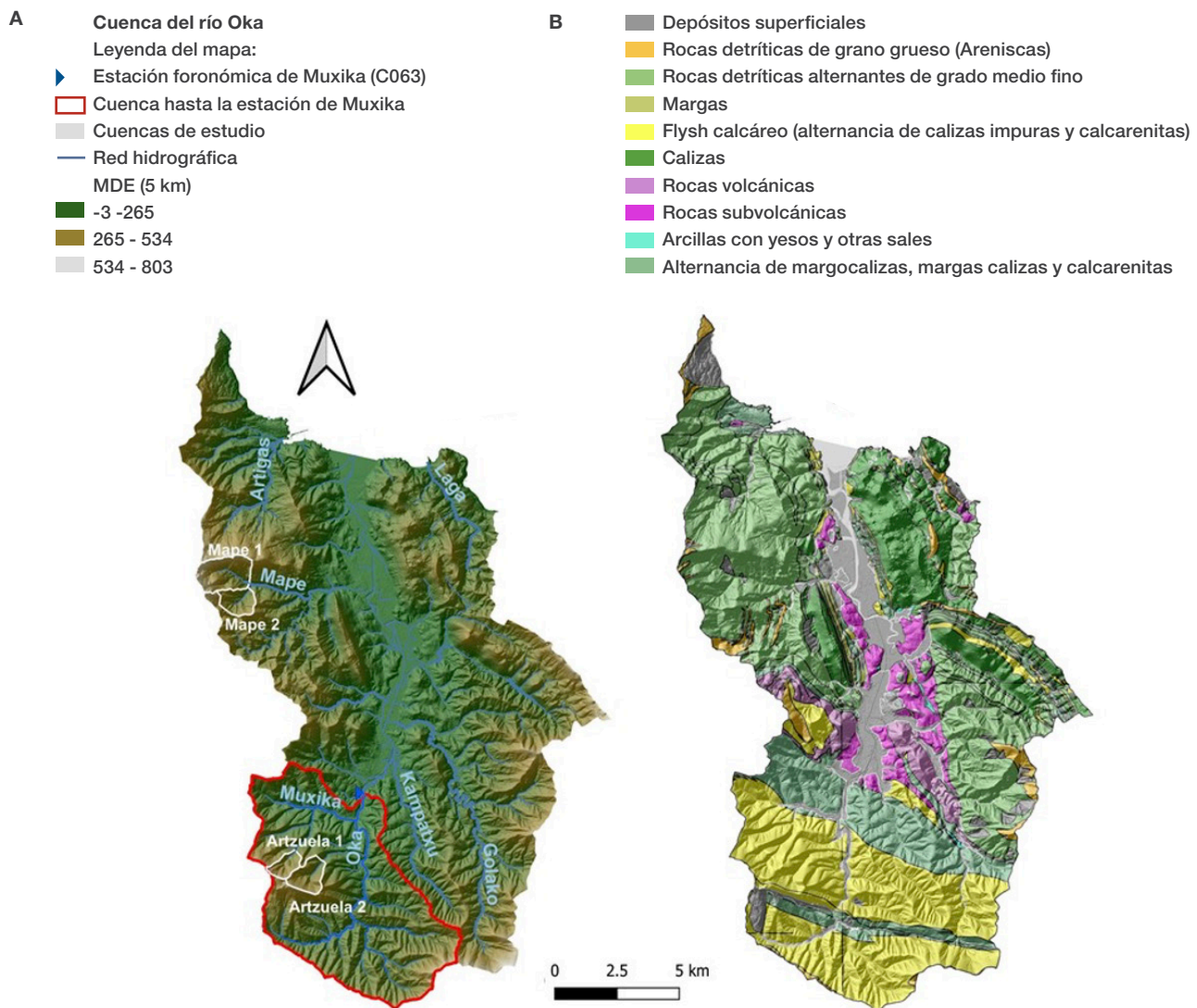


Figura 1. a) Mapa Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Oka (5 m). Se muestra la red hidrográfica con los afluentes principales, la posición de la estación foronómica de Muxika, la cuenca vertiente hasta dicha estación (en rojo) y las cuencas hasta las captaciones de Mape1, Mape 2, Artzuela 1 y Artzuela 2 (en blanco). b) Mapa simplificado de la litología de Urdaibai.⁷

5 https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/plan_hidrologico_2022_2027/es_def/adjuntos/Anejo-14_Fichas-por-masa-de-agua_20230124.pdf
 6 https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/eve_mapa_hidrogeologico/eu_def/adjuntos/Mapa%20Hidrogeol%C3%B3gico%20del%20Pa%C3%ADs%20Vasco%201-100.000.pdf
 7 www.geoeuskadi.eus.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de recursos hídricos para abastecimiento nos interesamos por los Sistemas de Explotación y por el Registro de Zonas Protegidas. En el caso de los **Sistemas de Explotación** «se trata de una división funcional del territorio de la demarcación hidrográfica para la que se establece la asignación y reserva de recursos definida en el Plan Hidrológico de cuenca. Cada sistema de explotación de recursos está constituido por masas de agua superficial y subterránea, obras e instalaciones de infraestructura hidráulica, normas de utilización del agua derivadas de las características de las demandas y reglas de explotación que, aprovechando los recursos hídricos naturales, y de acuerdo con su calidad, permiten establecer los suministros de agua que configuran la oferta de recursos disponibles del sistema de explotación, cumpliendo los objetivos medioambientales» (Real Decreto 907/2007)⁸. En el ámbito de la Demarcación Hidrográfica (DH) del Cantábrico Oriental se han definido 13 sistemas de explotación⁹. Uno de esos sistemas es el Oka, que cubre el total del espacio Urdaibai, de manera que todas las captaciones superficiales objeto de interés en este estudio (pero también las subterráneas, no consideradas) se incluyen en este sistema.

En lo que se refiere al **Registro de Zonas Protegidas (RZP)**, el Plan Hidrológico (2022-2027) diferencia distintas zonas. Las de interés ahora son i) zonas de captación de agua para abastecimiento, y ii) zonas de futura captación de agua para abastecimiento. Para el sistema de explotación del Oka no figuran en el registro zonas de futura captación dentro de la cuenca del Oka (sólo aparece el sondeo Ibarruri-C, en la Unidad Hidrogeológica de Oiz, como apoyo futuro al sistema de explotación del Oka). Se puede acceder al registro de zonas protegidas en el visor de GeoEuskadi¹⁰.

Se consideran **zonas de captación** de agua para abastecimiento «aquellas en las que se realiza una captación de agua destinada a consumo humano, siempre que proporcione un volumen medio de al menos 10 m³/día o abastezca a más de 50 personas, así como, en su caso, los perímetros de protección delimitados. De estas zonas de captación se deben controlar las que proporcionan más de 100 m³/día». «El objetivo de la inclusión en el RZP de las masas de agua utilizadas como captaciones de agua destinadas a consumo humano es preservar la calidad y cantidad del agua como recurso para este uso»¹¹. Acorde con ese

Anejo-04-Zonas Protegidas: «Todas las captaciones destinadas a consumo humano incluidas en el Registro de Zonas Protegidas deberán disponer de su correspondiente perímetro de protección donde se delimiten las áreas a proteger, las medidas de control y se regulen los usos del suelo y las actividades a desarrollar en los mismos para evitar afecciones a la cantidad y calidad del agua de las captaciones».

La Figura 2 muestra los puntos de captación de aguas superficiales del registro y sus cuencas vertientes. Las captaciones de aguas superficiales se reparten en las 4 masas de agua de la categoría de aguas de río (Artigas-A, Mape-A, Oka-A, Golako-A) antes citadas. A señalar que la masa de agua Artigas-A (sector de Bermeo) no se ha considerado en este estudio, por verter directamente al mar Cantábrico (Figura 2), habiéndose considerado las que vierten al río Oka y al estuario.

Contexto geológico

Las rocas aflorantes son sobre todo de carácter sedimentario (Figura 1b), a excepción de un paquete cretácico de naturaleza volcánica en la zona central de la cuenca y afloramientos de rocas subvolcánicas triásicas en ambos márgenes del estuario. En la mayor parte de la cuenca, tanto en su tramo alto como en la ladera oeste y en la mitad sur de la ladera este, predominan materiales flyschoides en su mayoría de origen detrítico y de escasa permeabilidad. Es en la zona central y gran parte de la ladera este donde afloran materiales calizos de mayor permeabilidad. En la zona central, ubicados sobre materiales más antiguos afloran depósitos superficiales como gravas, areniscas y lutitas del cuaternario.

Usos del suelo

En el entorno Urdaibai el uso forestal supone el 73,6 % de la superficie (Figura 2a). En cuanto a tipos de sistemas forestales, las plantaciones son un 55 % mientras que los bosques naturales y de galería ocupan tan solo un 15 %. Las plantaciones de *Pinus radiata* o insignis ocupan 8.585 ha., el 44,2 % de la superficie forestal arbolada total. Los eucaliptos, principalmente *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, alcanzaban en el 2022 una extensión de 4.869 ha., un 25 %. Entre ambas especies ocupan el 69,2 % de la superficie arbolada. Sin embargo, el encinar cantábrico ocupa tan solo el 8,5 %, mientras que los robledales, la vegetación

8 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-13182>

9 https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/plan_hidrologico_2022_2027/es_def/adjuntos/1_MEMORIA_PH_COriental_20230124.pdf

10 <https://www.geo.euskadi.eus/geobisorea>

11 https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/plan_hidrologico_2022_2027/es_def/adjuntos/Anejo-04_Zonas-Protegidas_20230124.pdf

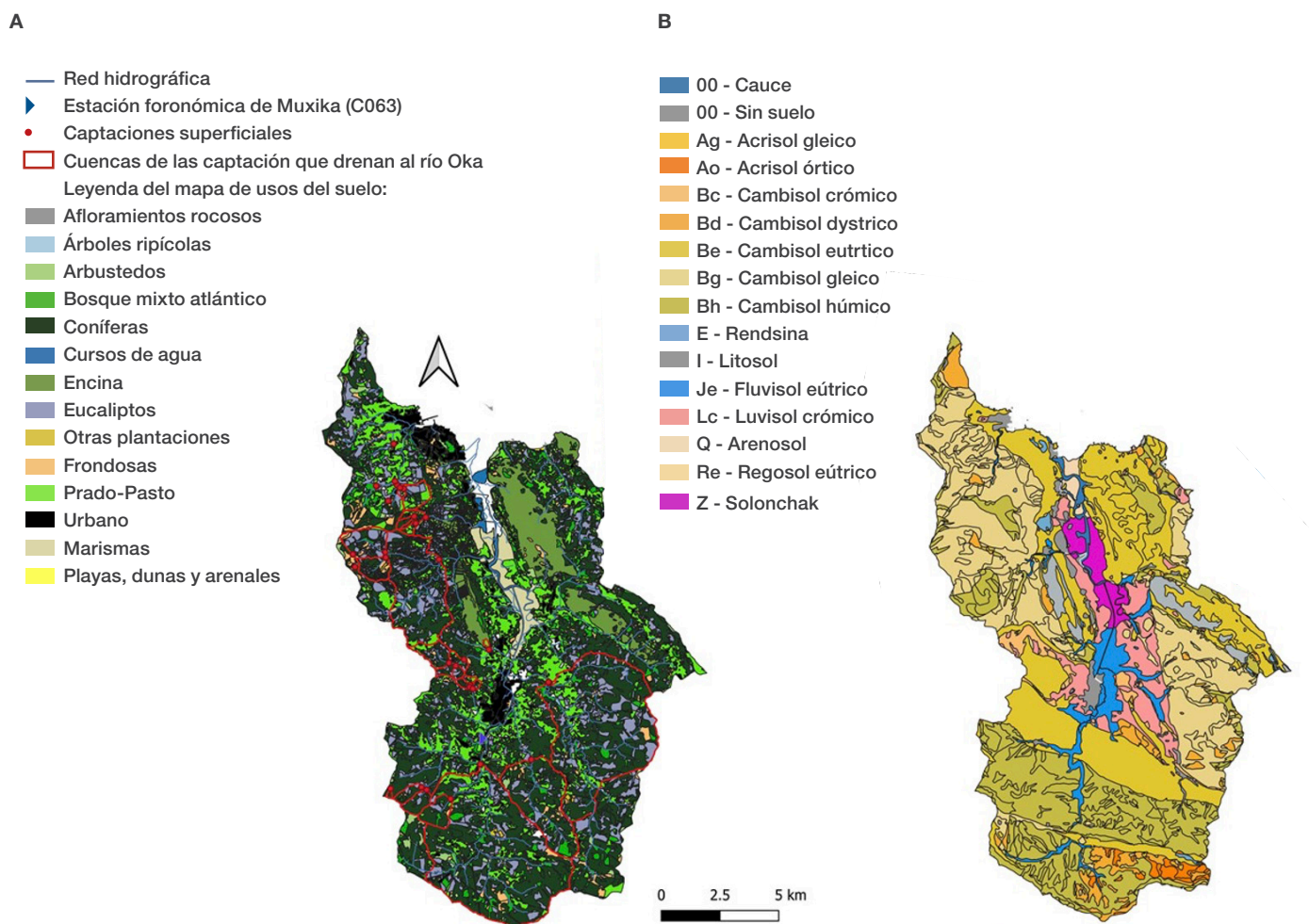


Figura 2. a) Mapa simplificado de usos del suelo de Urdaibai (Mapa Forestal del País Vasco 2022)¹². Se han añadido las captaciones de agua superficial¹³, y su cuenca drenante (rojo). b) Mapa edafológico de Urdaibai.

potencial de gran parte del territorio por su clima templado y húmedo, son escasos (254 ha., el 1,3 %). Si nos fijamos sólo en la superficie de las cuencas drenantes a las captaciones el 47 % está ocupada por coníferas y 21 % por eucaliptos. Respecto a los suelos (Figura 2b) predominan Cambisoles, con presencia también de Fluvisoles, cerca de los cauces, y Luvisoles.

Futuro climático

En cuanto a los efectos del cambio climático, las proyecciones desarrolladas en el proyecto

URBANKLIMA¹⁴ prevén una disminución del 15 % de la precipitación anual en la zona climática templada, como el entorno de Urdaibai, lo que puede suponer hasta un 50 % menos de lluvias estivales para 2100. En este contexto, entender las implicaciones de la ocupación del suelo en los procesos hidrológicos, y, por tanto, en el balance hídrico, es esencial para el desarrollo de políticas de adaptación hidrológica. Este objetivo solo puede lograrse con un conocimiento profundo de las características del medio físico que configuran y condicionan el comportamiento hidrológico del territorio.

¹² <https://opendata.euskadi.eus/catalogo/-/mapa-forestal-del-pais-vasco/>

¹³ www.geoeuskadi.eus

¹⁴ <https://www.urbanklima2050.eu/es/>

Funcionalidad hidrológica del territorio

Los impactos sobre los servicios ecosistémicos relacionados con el agua (**servicios hidrológicos, SH**) requieren un análisis integrado a una escala territorial adecuada que tenga el agua como eje, es decir, la cuenca. Conocer el efecto del territorio en los SH, más allá del efecto del cambio climático, es esencial para una gestión adaptativa del territorio que considere su funcionalidad hidrológica, y que no agrave los impactos del cambio climático, sino que los alivie.

De hecho, la variabilidad climática altera las aportaciones hídricas y la demanda evaporativa, pero los cambios en los usos del suelo afectan a su balance hídrico, modificando la partición de las precipitaciones (intercepción, evaporación, transpiración, reserva de agua, escorrentía, percolación) y, en consecuencia, la generación de caudales (Figura 3), alterando la cantidad, pero también, la calidad y la distribución espacio-temporal de las aguas. La evapotranspiración, suma del agua evaporada del suelo, dosel y hojarasca, y del agua transpirada por la vegetación, es un flujo de agua esencial en el ciclo hidrológico y es la variable clave que conecta la hidrología y los procesos biológicos en los ecosistemas.

3.1. Efecto hidrológico de los usos del suelo: caudales

Aunque la cuenca del río Oka tiene un área total de 183 km², la única estación foronómica existente (Muxika, C063, desde 1998), solo controla 31,5 km² de su parte alta (Figura 1a). La información disponible en esta estación es referencia obligada para el análisis hidrológico-territorial, y para conocer la salida de flujo y materia desde la parte terrestre hacia el estuario. En esta estación, además de variables meteorológicas y del caudal, se registran datos en continuo de parámetros de calidad del agua, entre los cuales se encuentran la CE ($\mu\text{S/cm}$), esencial para interpretar el hidrograma (procedencia de los flujos) y la turbidez (NTU) que aporta información importante sobre los procesos de transporte de sedimentos (materia)¹⁵. El estudio de estas series, y su comparación con los datos en las subcuencas de Mape y Artzuela (más recientes) (Figura 1a), permitirá ir integrando los datos necesarios para posteriores modelizaciones, tanto en la cuenca del Oka como en el estuario.

15 <https://www.euskalmet.euskadi.eus/behaketa/estazioen-datuak/>

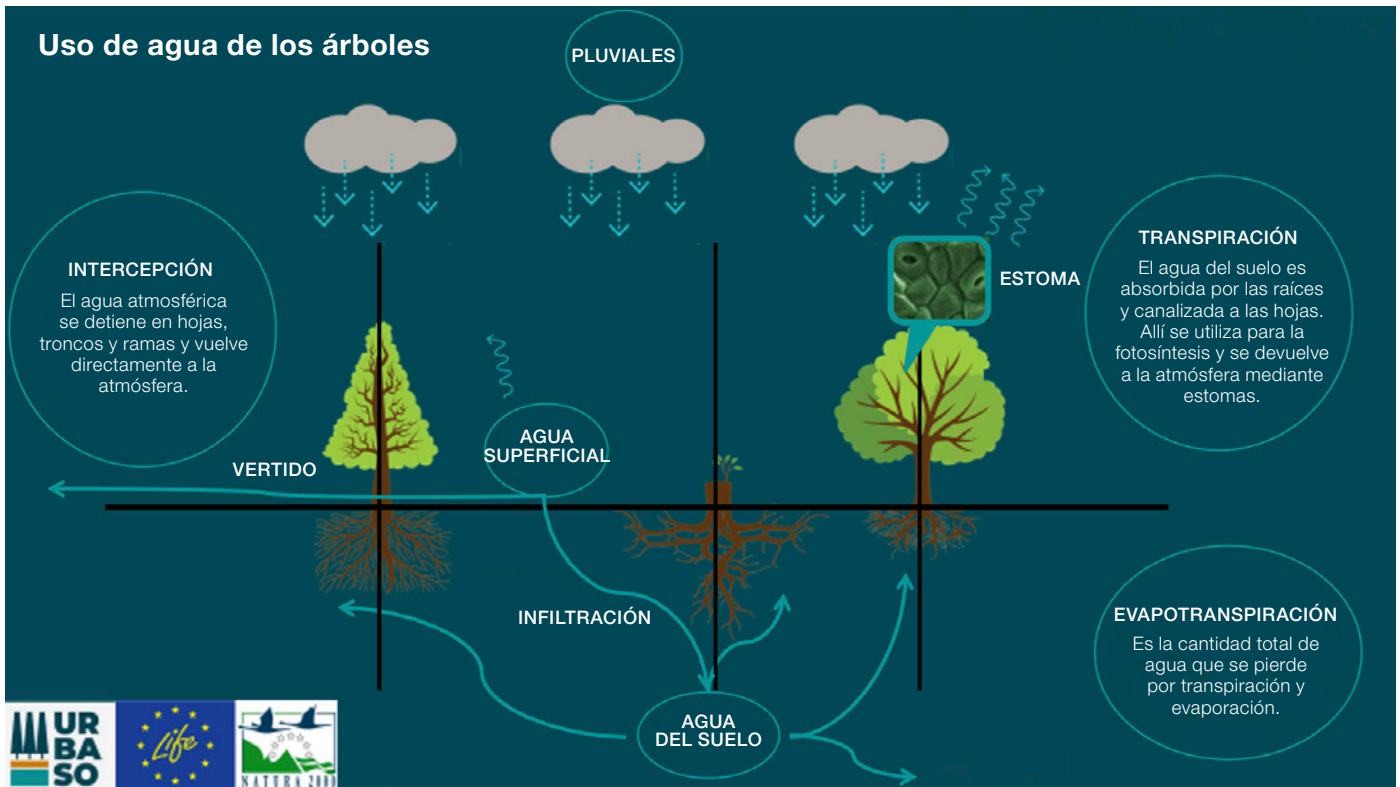


Figura 3. Diferentes estados del agua de lluvia a lo largo del ciclo hidrológico en fase terrestre.

El caudal medio registrado en Muxika entre el 1 de enero 2000 y el 31 de octubre 2023 es de 0,62 m³/s, con un mínimo diario de 0,045 m³/s, a comienzos de octubre 2012, y un máximo de 21,84 m³/s el 9 de diciembre 2021, que supuso un máximo diezminutal de 70,10 m³/s¹⁶. La figura 4 muestra la evolución de los caudales medios diarios de los últimos 5 años hidrológicos. Esta evolución es el resultado de los procesos que tienen lugar en la cuenca a lo largo del tiempo. La respuesta de la cuenca a las precipitaciones, diferente de un año a otro, es muy rápida, al igual que se observa en la mayoría de cuencas de la vertiente cantábrica (Zabaleta, 2008). Un análisis detallado indica que tiene dos componentes. Una es un flujo rápido hacia la salida de la cuenca, y la otra uno más lento procedente de las partes de la cuenca con capacidad reguladora (suelos, acuíferos), que son las que aseguran los caudales en periodos entre lluvias, y en estiaje.

En función del desfase temporal con el que el agua de las precipitaciones alcance el cauce su composición química va a variar, debido a los distintos caminos

seguidos por el agua; cuanto mayor sea el desfase mayor la cantidad de solutos en el agua. Estudios previos de la UPV/EHU (Martínez *et al.*, 2014) a partir de los datos de conductividad eléctrica (CE) del agua en Muxika, mostraban que en momentos de crecida casi un tercio del caudal era agua previa, que procedía de zonas de regulación de la cuenca. Hechos similares se han observado en cuencas forestadas próximas (Zabaleta y Antigüedad, 2013), y son un ejemplo de la capacidad reguladora de partes del territorio que con frecuencia no son tenidas en cuenta en la planificación hidrológica, pero que son relevantes en la gestión adaptativa hidrológica del territorio.

Por otro lado, hay que señalar que la **vulnerabilidad hídrica tiene una componente claramente estacional**, más aún a futuro. Así, en el proyecto EGHILUR (KLIMATEK 2016¹⁷ ya establecimos, a partir de largas series de caudales diarios en numerosas estaciones de aforo del Golfo de Bizkaia, que la época de estiaje se estaba alargando hacia el inicio del otoño, siendo octubre el mes donde más se evidenciada la disminución de caudales.

¹⁶ <https://www.uragentzia.euskadi.eus/visor-de-estaciones-de-aforo/webura00-minima/es/>

¹⁷ https://www.etxebide.euskadi.eus/contenidos/documentacion/eghilur/es_def/adjuntos/02KLIMATEK.pdf

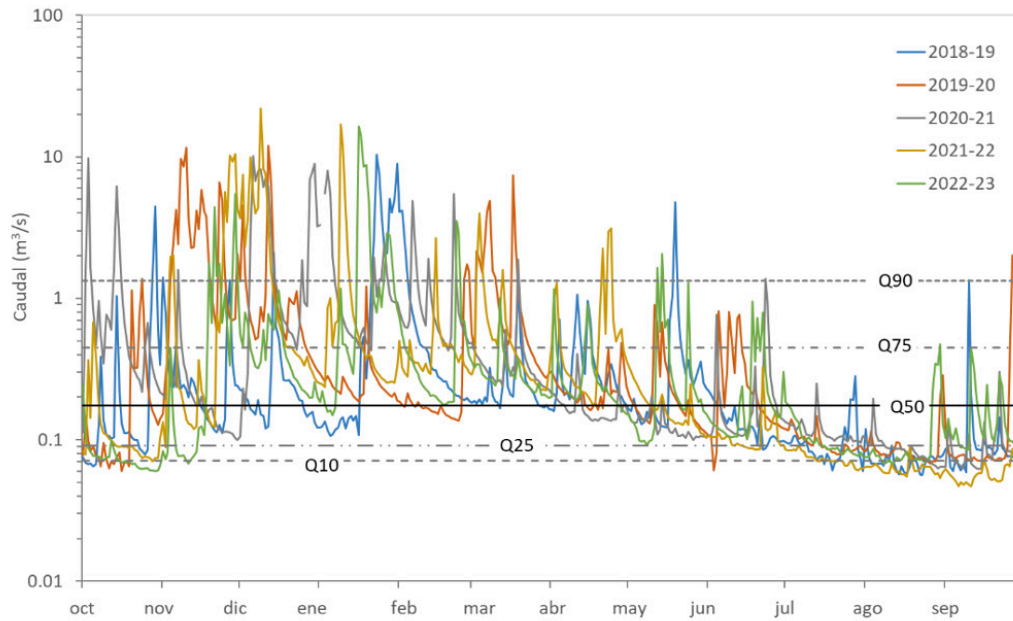


Figura 4. Caudales medios diarios registrados en la estación foronómica de Muxika durante los últimos cinco años hidrológicos (2018-2019 a 2022-2023). Se señalan los percentiles de la serie.

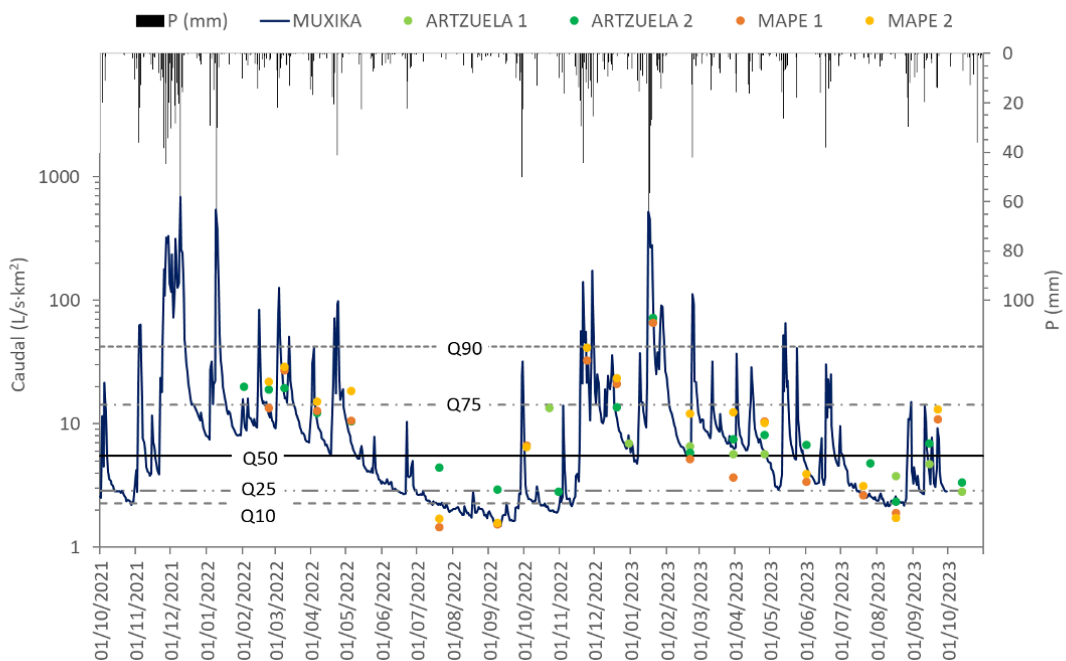


Figura 5. Caudal medio diario, en l/s·km², y precipitación diaria, mm, en la estación de Muxika entre el 1 de octubre 2021 y el 30 de octubre 2023. Se indican los valores característicos del hidrograma para el periodo 2010-2023, percentiles 10, 25, 50, 75 y 90. Se incluyen los valores de caudal específico, en l/s·km², de afloros manuales en las cuencas Artzuela 1 y 2, Mape 1 y 2 (proyectos URLUR y URBASO).

Con interés en conocer mejor la dinámica hidrológica en las épocas de caudales bajos, algunos socios del presente proyecto (UPV/EHU, NEIKER) trabajan en la monitorización de cuencas de captaciones de agua en Urdaibai, desde inicios de 2022. En la cuenca del Oka es el caso de Mape (1 y 2) y de Artzuela (1 y 2) (Figura 1a). Se trata de pequeñas cuencas forestadas, con ocupación masiva de plantaciones, sobre todo de pino en Artzuela y de gran presencia de eucalipto en Mape (mayoritaria en Mape 1). Los suelos son de tipo cambisol gleico y las pendientes abruptas, lo que hace que la erosividad del suelo sea significativamente alta. Aunque los materiales subyacentes son diferentes, más margosos en Artzuela y asociados al flysch detrítico en Mape, la permeabilidad de los materiales es baja en ambos casos.

En la Figura 5 se comparan los caudales específicos ($l/s \cdot km^2$) de estas cuencas (aforos manuales) con los de la estación de Muxika, para los años hidrológicos 2021-2022 y 2022-2023. Como era de esperar hay buena concordancia en caudales altos y bajos, pero con significativas diferencias, más acusadas en estiaje. De las subcuencas, son las de Mape las que muestran mayor amplitud de caudales específicos (muy evidente en los bajos caudales del notable estiaje de 2022), reflejo de una menor capacidad de regulación, lo que les confiere mayor vulnerabilidad hídrica que a las de Artzuela. Evidentemente, las características de la cuenca, inherentes como geología o relieve y cambiantes como vegetación y usos del suelo, influyen en esas diferencias,

si bien no es posible con el nivel de información disponible especificar esa influencia. Es necesario un control más extendido en el tiempo en las redes de monitorización.

3.2. Efecto hidrológico de los usos del suelo: sedimentos

Un indicador clave de la dinámica hidrológica de una cuenca es la turbidez (T), o la concentración de sedimentos en suspensión (CSS), de las aguas, cuyo seguimiento temporal informa no solo de la calidad del agua sino también de la pérdida de suelo (erosión), sea natural o por inadecuada gestión del suelo (Zabaleta et al., 2016). La figura 6 muestra valores estadísticos de precipitación (P), caudal (Q), turbidez (T) y conductividad eléctrica (CE) de los datos diezminutales registrados en la estación de Muxika en los 2 últimos años hidrológicos (2021-2023); los datos de Q y T están en escala logarítmica. Se observa notable variabilidad en la turbidez. Solo el 10 % de los datos sobrepasa los 28 NTU, que es un valor relativamente bajo, y solo el 1 % supera los 213 NTU. En breve se va a instalar ahí un turbidímetro con bastante mayor rango de medida que el existente, muy limitado en los valores altos; se cuenta ya con el permiso de la Agencia Vasca del Agua URA.

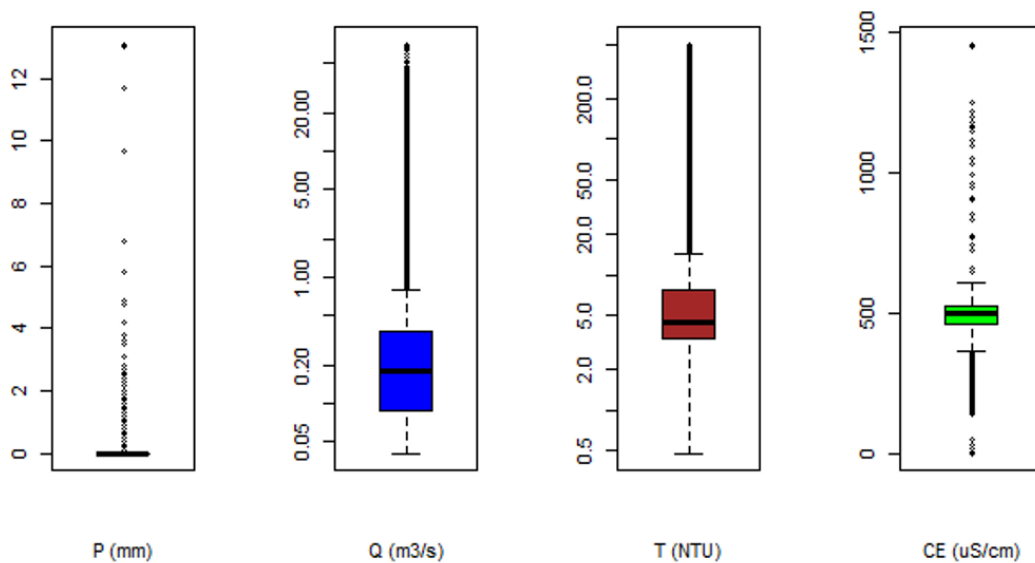


Figura 6. Boxplots de datos diezminutales de precipitación (P, mm), caudal (Q, m^3/s), turbidez (T, NTU) y conductividad eléctrica (CE, $\mu S/cm$) en la estación de Muxika (C063) de octubre 2021 a octubre 2023.

La Figura 7 muestra, como comparación, la evolución diezminutal reciente de la turbidez en la estación de Muxika y en las cuencas Artzuela 1 y Mape 2 (Figura 2a). Se evidencia gran similitud en la respuesta, al menos en lo referente a los momentos de aumento de turbidez, que coinciden con los momentos de crecida. Sin embargo, Artzuela y Mape muestran valores superiores en esas situaciones, lo que resulta lógico ya que en cuencas pequeñas hay menos posibilidad de depósito de los sedimentos arrastrados por la corriente. De esta comparación se deduce, también, que se da una mayor exportación de sedimentos en Mape 2, mayor pérdida de suelo, que en Artzuela 1. Ya se ha comentado (Figura 5) que las cuencas de Mape muestran mayor variabilidad de caudales y menor capacidad de regulación, lo que influye negativamente sobre la resiliencia hidrológica de la cuenca. Aumentar la resiliencia pasa por mantener o aumentar la capacidad de regulación, disminuyendo la pérdida de suelo, lo cual debe venir de la mano de una gestión sostenible de los suelos de estas cuencas forestales.

3.3. Monitorización hidrológica forestal: parcela de seguimiento intensivo

Actualmente se utilizan modelos de interacción entre diferentes componentes (agua, suelo, vegetación) como los utilizados en este proyecto (SWAT, USPED, USLE, etc.) u otros (TOPMODEL, HBV, MIKESH) para conocer el efecto que el uso del suelo puede tener en la cantidad y calidad del agua en la cuenca. Son modelos empíricos, conceptuales o físicos, con amplio conocimiento científico en su desarrollo, lo que hace que sean robustos, con mayor o menor dificultad de aplicación. Sin embargo, los parámetros hidrológicos del suelo son necesarios en las aplicaciones de estos modelos de simulación para que se puedan calibrar y validar de manera adecuada, y la interacción suelo-agua-planta y la función hidrológica del suelo es poco conocida en Euskadi.

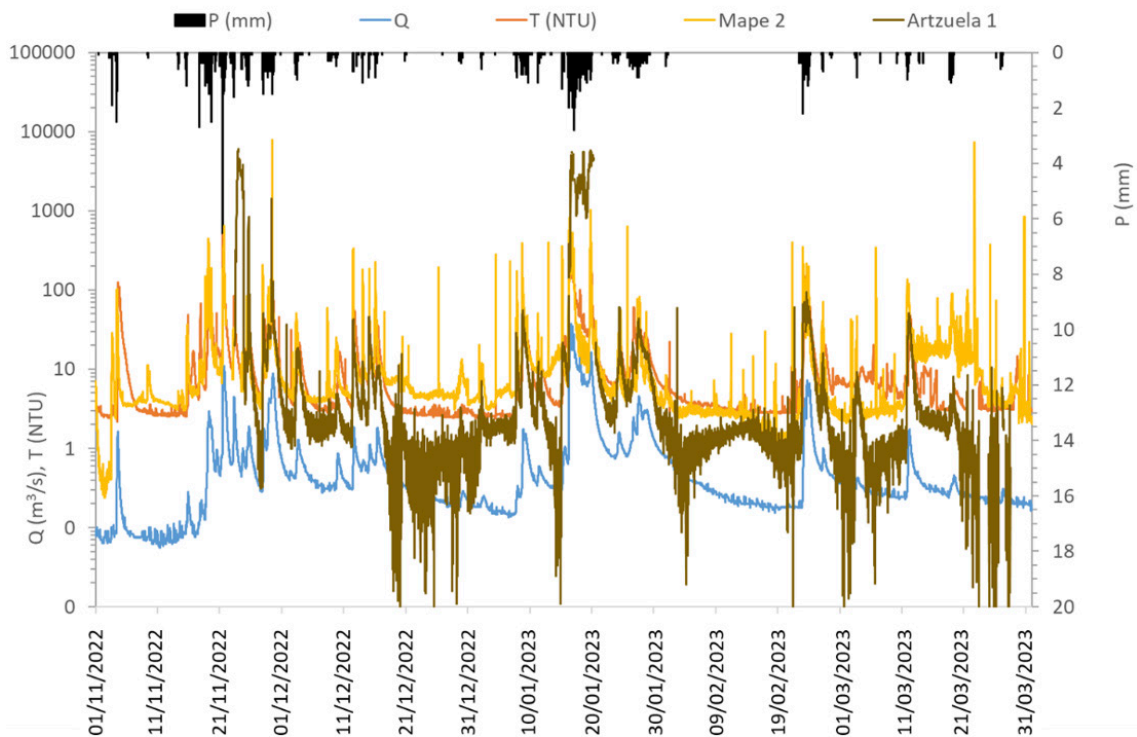


Figura 7. Caudal (Q, m³/s), turbidez (T, NTU) y precipitación (P, mm) diezminutales registrados en la estación de Muxika entre el 1 de noviembre 2022 y el 31 de marzo 2023. Se incluyen los datos de turbidez diezminutales registrados en las cuencas de Artzuela 1 y Mape 2 (proyecto URBASO).

Surge así la necesidad de **generar conocimiento sobre los flujos de materia y energía en suelo-planta-atmósfera**, con objeto de recopilar datos consistentes que sean útiles para implementar los modelos hidrológicos a nivel territorial, y facilitar la toma de decisiones informadas. Con este fin, en este proyecto se ha establecido una parcela forestal de seguimiento intensivo. La parcela, denominada ICP Forest Euskadi, se basa en la metodología ICP Forests¹⁸, iniciativa de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para

Europa (UNECE), surgida en los 80 en el marco del Convenio de Ginebra para la monitorización del efecto de la contaminación del aire en los bosques europeos; sin embargo, a lo largo del tiempo las redes de seguimiento forestal de ICP-Forests se han convertido en uno de los sistemas de bioseguimiento más amplios del mundo, proporcionando datos a la comunidad científica internacional y colaborando con sus resultados a numerosos informes tanto a nivel nacional como internacional.

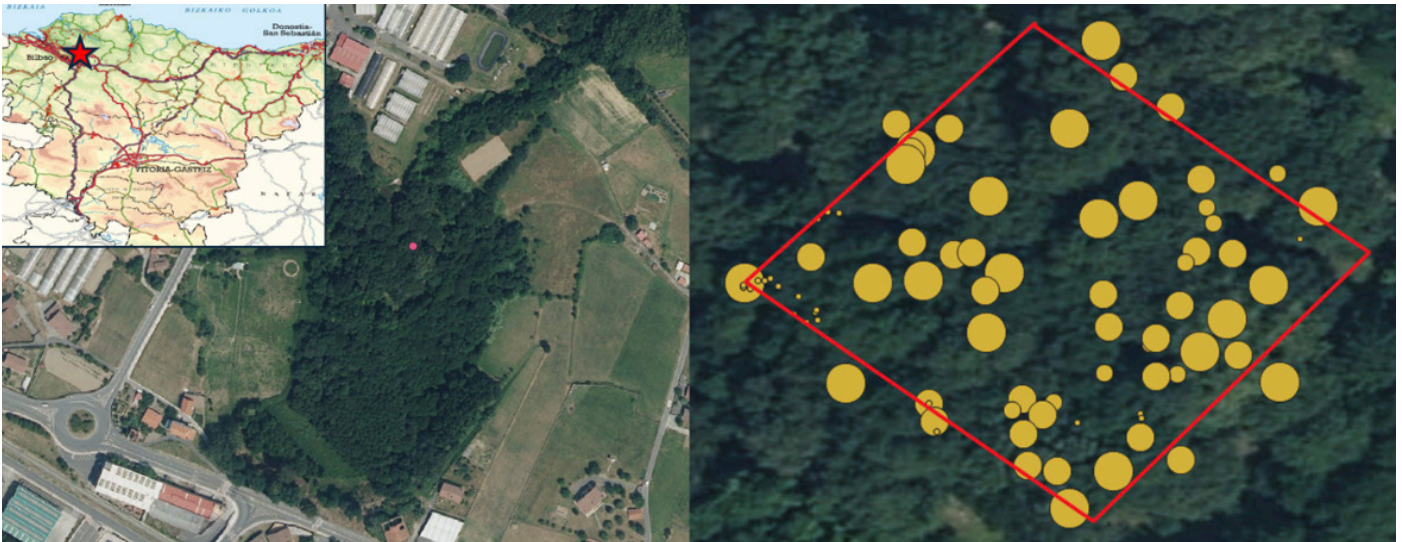


Figura 8. Localización de la parcela experimental ICP Forest Euskadi (izda.). Mapa de localización espacial de los árboles de la parcela permanente 50x50 m (dcha.). Cada punto amarillo corresponde a un individuo y a su diámetro del tronco a la altura del pecho.



Figura 9. Colectores de hojarasca y de deposición colocados en la parcela ICP Forest Euskadi.

¹⁸ <http://icp-forests.net/>

La Red de Seguimiento Intensivo de Nivel II ICP Forests consta de más de 600 parcelas en Europa de las cuales 14 están en la península. La parcela ICP Forest Euskadi se incorporará a la red de seguimiento intensivo y continuo de los ecosistemas forestales de la Red Europea de Nivel II. La parcela, en Derio, propiedad de la Diputación Foral de Bizkaia, tiene una extensión de 3,75 ha. y alberga un roble-dal de *Quercus robur* (Figura 8). En ella se han instalado: I) colectores de hojarasca, muestreadores de deposición (Figura 9), sensores de humedad de suelo y muestreadores de agua de suelo que permitirán conocer los flujos de materia y energía, y II) dendrómetros en todos los pies mayores de 5 cm presentes en la parcela que se utilizarán para medir la variación de crecimiento del diámetro del tronco, que permitirá relacionar la utilización del agua por parte de los árboles y su crecimiento con cambios en el clima. El objetivo principal de esta parcela es que sea **un ejemplo demostrativo a largo plazo** sobre los efectos del Cambio Climático en los ciclos de materia y flujos de energía en los ecosistemas forestales de Euskadi.

3.4. Modelización integrada de caudal y sedimentos en la cuenca del Oka

El cambio de escala de las cuencas pequeñas (Mape, Artzuela) a la cuenca del Oka requiere la tarea complementaria de la modelización, nunca sustitutoria de los datos de campo. A tal efecto, el grupo UPV/EHU ha venido utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment)¹⁹. Su calibración y validación, con las series de datos disponibles, permite la modelización de los procesos hidrológicos en la cuenca del Oka, y, a futuro, su consideración como herramienta de gestión adaptativa territorial ante los cambios en marcha.

SWAT es un modelo semi-distribuido que simula a escala de cuenca y a escala de tiempo continuo (anual, mensual, diario, subdiario). Fue desarrollado por el Servicio de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y es uno de los modelos hidrológicos más utilizados habiendo obtenido resultados satisfactorios en cuencas muy diferentes.

Ha sido utilizado en la cuenca del río Oka para evaluar el transporte de contaminantes asociados a los sedimentos

(Peraza-Castro et al., 2015) y para estudiar el impacto del cambio climático y los usos del suelo en la hidrología y la calidad de las aguas (Peraza-Castro et al., 2018).

Los datos de entrada para la construcción del modelo son: mapa digital de elevación (MDE), mapa de usos del suelo, mapa de suelos y datos meteorológicos^{20 21}. SWAT combina los tres mapas y usa una base de datos de distintos parámetros para realizar los cálculos. En cuanto a los parámetros relacionados con la edafología, decir que son de gran importancia para la modelización del caudal y de la exportación de sedimentos. Sin embargo, esa base no tiene datos de los suelos existentes en Urdaibai. Así, hemos utilizado los obtenidos en el proyecto URLUR, con análisis de suelos en distintas parcelas de Urdaibai, para derivar algunos de los parámetros. Otros parámetros, como el agua disponible para las plantas (AWC) y la conductividad hidráulica (Ks), se han obtenido a partir de la textura utilizando el modelo SPAW²² desarrollado también por el USDA.

Una vez construido el modelo se introducen los datos meteorológicos. En este caso, datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima de la estación de Muxika desde el 1/1/2005 al 31/12/2022, que incluye los periodos de calibración y validación. La calibración se ha realizado para el caudal (m³/s) y para la exportación de sedimentos (CSS), pero la validación solo se ha hecho para el caudal, debido a la limitada longitud de la serie de datos de CSS en esa estación. La Figura 10 muestra los resultados gráficos y estadísticos en la calibración del caudal (2009-2012). Se ajusta bien a lo observado ya que los índices estadísticos son satisfactorios. Respecto a la validación del caudal tanto los métodos gráficos como los estadísticos indican que al menos es satisfactoria, lo que permite su aplicación en proyecciones futuras.

En la calibración de los sedimentos la CSS simulada en los picos de crecida está por debajo de la observada, aunque se mantiene cierto tiempo. Puede que esto ocurra porque SWAT utiliza la ecuación USLE (Universal Soil Loss Equation, de USDA) para simular la erosión del suelo, que no considera la deposición de los sedimentos, por lo que todo lo erosionado exportado, también en el momento posterior a la crecida. La deposición sí es tenida en cuenta en otros modelos,

19 <https://swat.tamu.edu/>

20 <https://www.geo.euskadi.eus/>

21 <https://opendata.euskadi.eus/catalogo/>

22 <https://www.ars.usda.gov/>

como USPED (Unit Stream Power Erosion and Deposition, de USDA) que ha sido aplicado en este proyecto por el BC3 desde una perspectiva complementaria. Aun así, la simulación con SWAT de la CSS ha resultado satisfactoria, a la vista de los índices estadísticos; en el periodo de calibración (1/10/2009-31/09/2012) la exportación de sedimento anual simulada y observada es prácticamente la misma (87,7 T/km² observada y 88,1 T/km² simulada). Estos datos (estación Muxika) suponen una aproximación a los aportes de sedimentos en suspensión que llegan al estuario, por lo que han sido considerados por AZTI como entrada en su modelo (apartado 4.2).

Una vez calibrado y validado el modelo SWAT se han realizado proyecciones de caudal y CSS, con las limitaciones comentadas para esta última. Se han utilizado los datos de las 12 proyecciones climáticas que ofrece URBANKLIMA²³ para la cuenca del río Oka, todas para

RCP 8.5; el uso de un amplio rango de proyecciones climáticas ofrece una mejor estimación de la incertidumbre asociada. Los datos climáticos de estas proyecciones son para el periodo histórico 1971-2016 y para el periodo futuro 2011-2099.

De las proyecciones futuras (2011-2099) se deduce que **el caudal medio anual desciende a lo largo del siglo**, así como el máximo y mínimo. La figura 11 muestra el porcentaje de cambio estacional del caudal proyectado a futuro respecto al simulado con las proyecciones históricas (1971-2016). Los mayores descensos se esperan en el futuro lejano (2071-2099), el de mayor incertidumbre. La estación con mayores descensos es verano, 9% en el futuro cercano (2011-2040), 32 % en el medio (2041-2070) y 46 % en el lejano, seguida de otoño con 10 %, 19 % y 26 % respectivamente. Se proyectan descensos menores en invierno y primavera, aunque en este caso son notables a final de siglo.

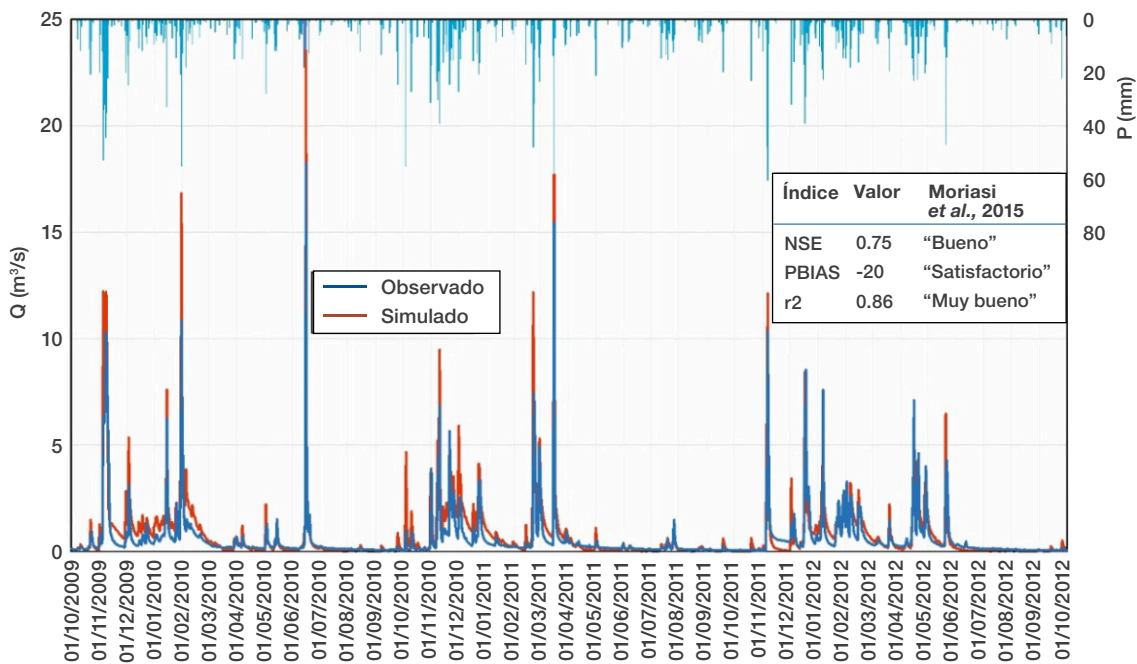


Figura 10. Caudal (m³/s) observado (azul), simulado (rojo) y precipitación (azul claro) para el periodo 1/10/2009-31/09/2012. Se han incluido los índices estadísticos de la calibración y su calificación.

23 <http://escenariosklima.lhobe.eus>

Las proyecciones de **exportación de sedimento muestran tendencia similar, disminuyendo en el tiempo.** Parece lógico, ya que una disminución de los caudales se traduce en disminución de la energía para el transporte de sedimentos. Sin embargo, hay que considerar que la modelización se ha hecho con datos medios diarios, y el aumento de intensidad de las lluvias que prevén los modelos climáticos puede influir de forma importante en la exportación a escala sub-diaria. Además, hay que

tener en cuenta que la gestión del suelo es otro factor determinante en la erosión y consiguiente exportación-deposición de los sedimentos. La figura 12 muestra el porcentaje de cambio estacional de la exportación de sedimentos a futuro respecto a la simulada con las proyecciones históricas (1971-2016). En el futuro cercano la exportación proyectada para la cuenca del Oka es de unas 4335 t/año, en el medio 4183 T/año y de 3575 T/año en el lejano.

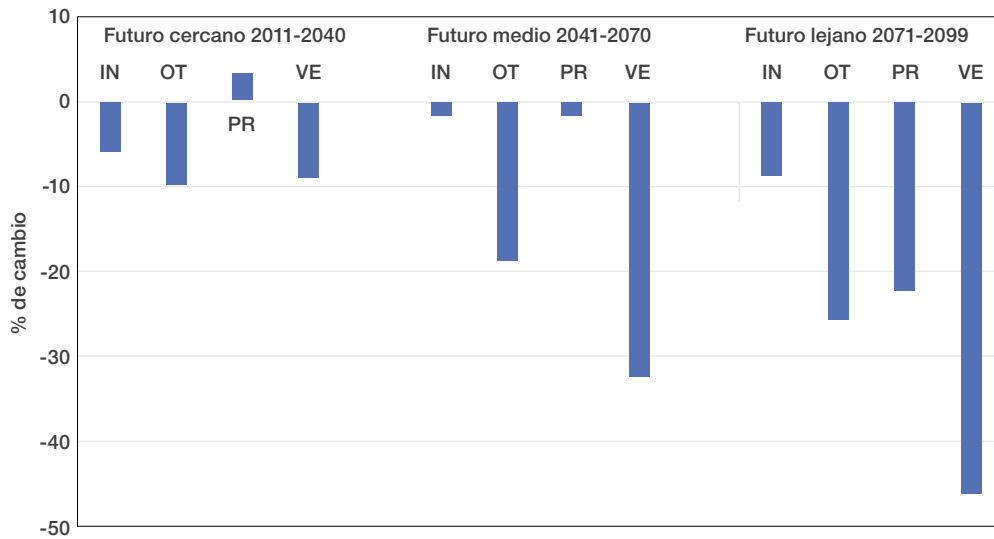


Figura 11. % de cambio estacional (INvierno, OToño, PR Primavera, VE verano) de los caudales proyectados respecto a los simulados con las proyecciones históricas (1971-2016).

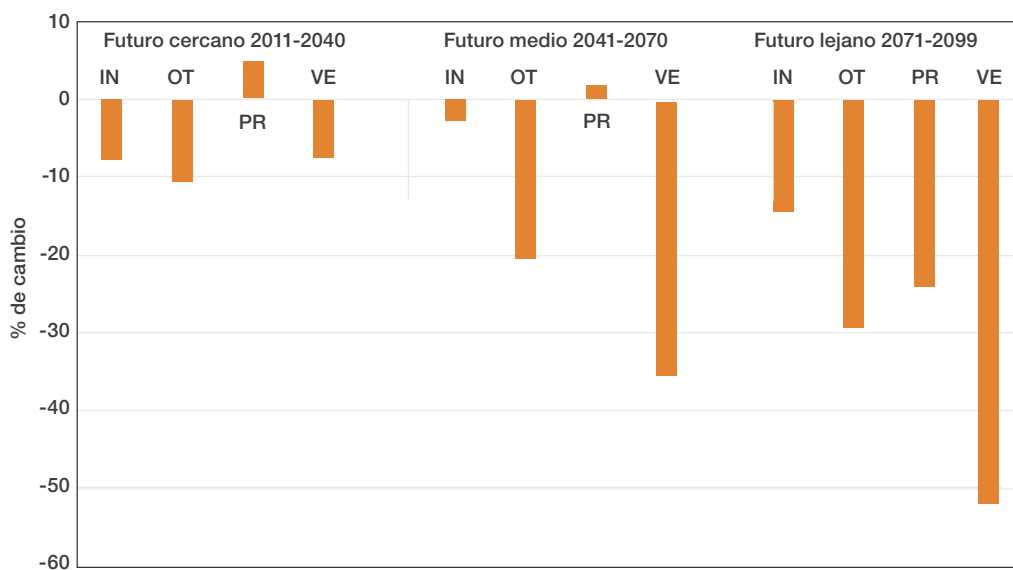


Figura 12. % de cambio estacional (INvierno, OToño, PR Primavera, VE verano) de la exportación de sedimento proyectada respecto a la simulada con las proyecciones históricas (1971-2016).

3.5. Modelización de erosión y deposición en escenarios de manejo forestal

En el marco del presente proyecto BC3 ha utilizado el modelo USPED (Unit Stream Power based Erosion Deposition) para simular la erosión del suelo y la deposición de sedimentos en la cuenca del río Oka, atendiendo a tres escenarios de gestión forestal. El objetivo es comparar la erosión y deposición en esos diferentes escenarios para guiar las actuaciones de conservación del suelo. Se pretende profundizar en la modelización del servicio ecosistémico de protección, debido a que las metodologías existentes presentaban limitaciones, en particular, los efectos derivados de las especies y el estado de masa forestal.

La pérdida de suelo es un fenómeno de especial relevancia por su impacto en el medio ambiente y en las economías locales, ya que reduce la capa fértil de los suelos y disminuye su capacidad de retener agua, entre otros efectos. En la erosión actúan dos factores principales: la ruptura de los agregados del suelo y el transporte de las partículas finas resultantes. Además de la pérdida de suelo las partículas pueden ser vectores de contaminación a través del transporte de metales pesados y plaguicidas. Se trata de un proceso natural que se ha visto aumentado por la influencia humana, en buena parte por la reducción de las coberturas vegetales permanentes. El cambio climático se presenta como amenaza adicional, afectando la intensidad de las lluvias, lo que podría aumentar su erosividad (el factor R en el modelo clásico denominado RUSLE).

Son varias las actuaciones encaminadas a preservar el suelo y las masas de agua asociadas donde los modelos matemáticos se presentan como herramientas útiles que sirven de guía en las actuaciones de conservación. En este sentido, el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) es uno de los más utilizados para simular la pérdida de suelo, que ha sido aplicado en un amplio abanico de contextos geográficos. Sus limitaciones están en la incapacidad de simular la deposición del material perdido, conllevando la sobreestimación de la erosión (Zabaleta *et al.*, 2016). Por ello, en este proyecto se ha decidido implementar nuevas metodologías (siempre con criterios ontológicos) que superan las limitaciones de RUSLE. Se han dedicado los esfuerzos en la implementación del modelo USPED, que considera tanto la erosión como la deposición de sedimentos, lo que permite simular la pérdida de suelo de manera más realista, atendiendo a las especies vegetales y estados

de masa.

El modelo USPED es un modelo bidimensional de erosión del suelo, que asume que la erosión y la deposición dependen principalmente de la capacidad de transporte de sedimentos de la escorrentía superficial. Su implementación USPED se realiza en base a los parámetros RUSLE, obteniendo una estimación relativa de la erosión neta y la deposición a través de la capacidad de transporte de sedimentos (T): $T = R \times K \times CP \times LS$

El factor R es el índice de erosividad, que considera las dos características más importantes de una tormenta: cantidad de precipitación e intensidad máxima sostenida durante un periodo prolongado. Los mapas de alta resolución (10 m) del factor R fueron proporcionados por NEIKER. Se ha utilizado el escenario de cambio climático RCP 8.5 como referencia para simular la erosión y deposición en el futuro.

El factor K es el índice de erosionabilidad del suelo, que representa tanto la susceptibilidad del suelo a la erosión como la tasa de escorrentía, medida en condiciones de parcela unitaria estándar (kg /ha*año). Tiene en cuenta el porcentaje de arcilla, limo, arena y materia orgánica en la capa superficial del suelo. Los valores más bajos de K (0.05-0.15) se dan en suelos ricos en arcilla, resistentes al desprendimiento. Los suelos de textura gruesa, como los arenosos, aunque se desprenden fácilmente también tienen K bajos (0,05 - 0,2), debido a su escasa escorrentía. Los suelos con alto contenido en limo son los más erosionables (K > 0.4), desprendiéndose fácilmente debido a su alta escorrentía y tendiendo a formar costras. La materia orgánica, por su parte, reduce la erosionabilidad del suelo, al disminuir su susceptibilidad al desprendimiento y aumentar la infiltración.

El factor C tiene en cuenta la influencia de la cobertura y el uso del suelo en la tasa de erosión de la lluvia. Según Panagos *et al.* (2015a), se trata del único factor que puede ser modificado por políticas públicas, aplicando prácticas de manejo agrícola para la conservación del suelo, que reducen el valor del factor y la pérdida de suelo. Las prácticas de apoyo (factor P) también son importantes en la conservación del suelo. La tendencia en Europa es implementar prácticas de apoyo en las regiones más susceptibles a la erosión (Panagos *et al.*, 2015b), siendo una solución complementaria a la cobertura y usos del suelo. En este proyecto se han establecido valores de este factor para varias especies (pinus, eucalyptus, fagus, quercus...) y estados de masa (monte bravo, latizal, fustal) en Urdaibai.

La simulación de la evolución de las especies y el estado de masa se ha basado en el inventario forestal del año 2020²⁴, donde se definen los taxones dominantes en cada parcela, y el Decreto Foral, 69/2022, (Diputación Foral de Bizkaia, 2022), donde se obtienen los ciclos de tala de cada especie. Con esta información, y la localización de los ríos (Geoeskadi), se simulan los escenarios de evolución de las especies y el estado de masa para cada uno de los escenarios forestales propuestos²⁵. El lapso temporal de las simulaciones es de 95 años para cada uno de los escenarios, desde el año de partida (2020), hasta cumplir un ciclo total de la especie *Quercus robur*. La asociación del estado de masa con la edad de cada taxón ha sido realizada por NEIKER a través de inventarios forestales e imágenes satelitales.

Por último, el factor L considera el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión. Esta longitud es la distancia desde el origen del flujo superficial, a lo largo de su trayectoria, hasta el lugar de concentración del flujo

o de deposición. El factor S representa el efecto de la inclinación de la pendiente. La pérdida de suelo aumenta más rápidamente con la inclinación de la pendiente que con su longitud. Estos dos factores suelen considerarse conjuntamente.

Los tres escenarios de gestión forestal considerados en la simulación son: 1) *'Business as usual'*: se mantiene el monocultivo existente y la matarrasa se realiza con la edad del aprovechamiento (según los taxones descritos). 2) *'Riparian Buffer'*: se establece una zona de protección de 25 m alrededor del río. 3) *'URBASO'*: se establecen 3 zonas de protección alrededor del punto de captación, además de la zona de protección incluida en el escenario *'Riparian Buffer'* (estas zonas se recogen en la metodología URBASO, que se presenta posteriormente). La primera zona de protección se sitúa en los primeros 100 m del punto de captación; la segunda entre 100 y 200 m, y la tercera entre 200 y 400 m (Figura 13).

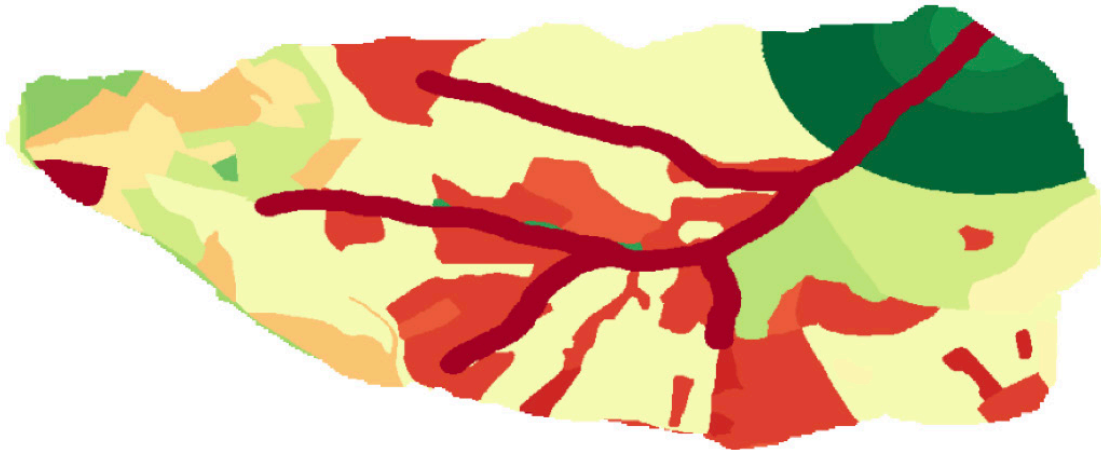


Figura 13. Ejemplo de cobertura de suelo en el escenario 'URBASO'.

24 <https://www.geo.euskadi.eus/hasiera/>

25 <https://data.integratedmodelling.org/>

Resultados claves en escenarios futuros. La Figura 14 muestra los potenciales patrones de erosión y deposición medias en la cuenca del Oka, teniendo en cuenta los años 2025, 2050 y 2100, en el escenario 'Business as Usual'. La mayoría de la cuenca presenta magnitudes de erosión y deposición pequeñas (los valores negativos indican erosión y los positivos deposición), concentrando los valores más altos en los alrededores de la ribera de los ríos. La Figura 15 muestra los mismos potenciales patrones, pero en el escenario 'URBASO'. La mayoría de la cuenca presenta magnitudes de erosión y deposición pequeñas, concentrando los valores más altos en los alrededores de la ribera de los ríos, como en el anterior caso, pero presentando patrones distintos, como se observa en el área destacada.

Como conclusión de esta modelización preliminar, y atendiendo a los resultados del modelo USPED para los tres escenarios de manejo forestal considerados, se prevé que el establecimiento de zonas de protección tanto alrededor de los ríos, escenario 'Riparian Buffer', como de los puntos de captación, escenario 'URBASO', disminuye el valor agregado de erosión y deposición. Por consiguiente, conllevaría una disminución de sólidos en suspensión en los ríos, y un aumento del número de días hábiles en los puntos de captación. El análisis indica que no hay diferencias significativas entre los escenarios 'URBASO' y 'Riparian Buffer'. Esto puede ser debido a la naturaleza del flujo de agua laminar, donde el área que drena a cada zona de protección define su eficacia o ineficacia.

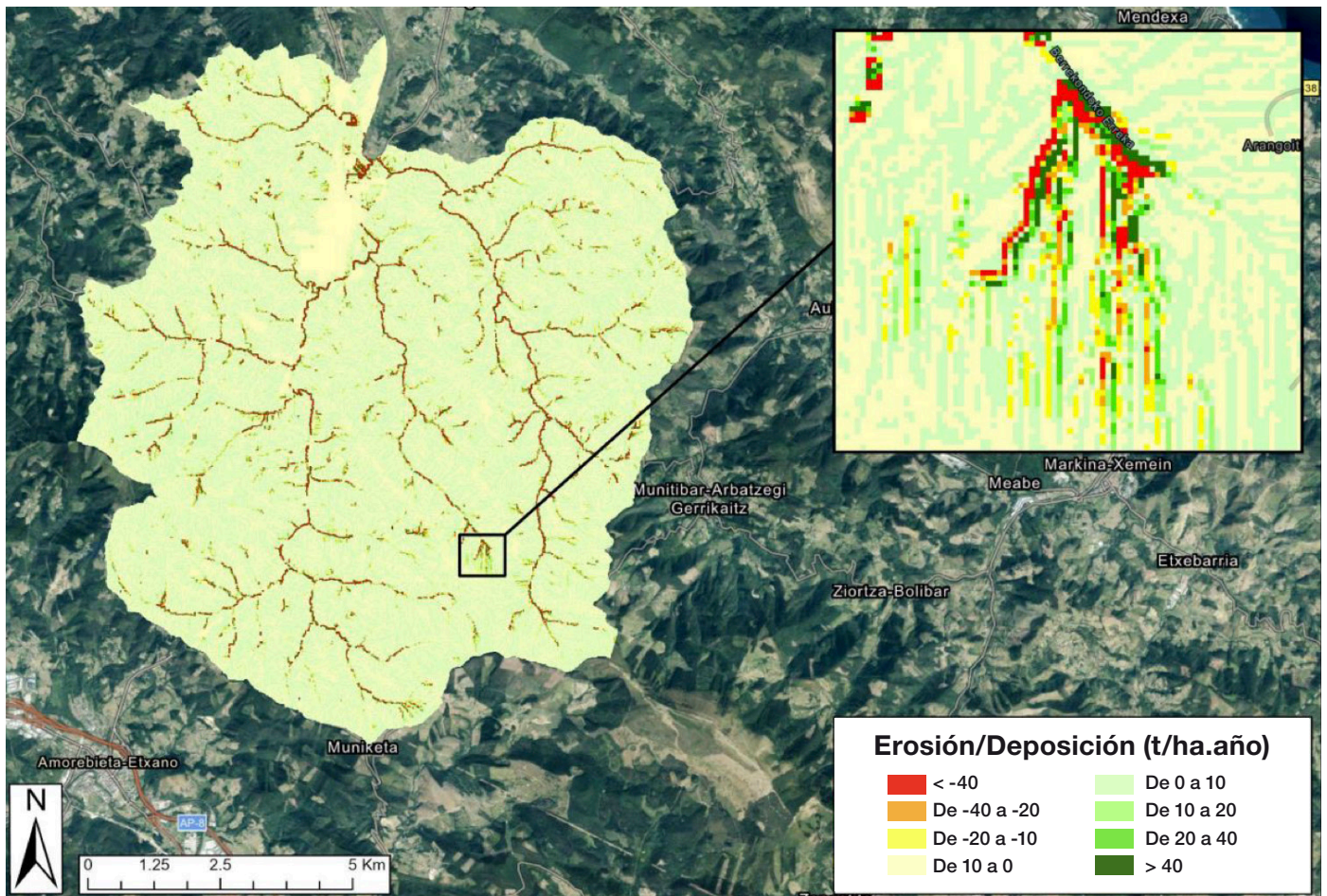


Figura 14. Patrones de erosión y deposición media de la cuenca del Oka (t/ha.año) en el escenario 'Business as Usual'.

En este sentido, una zona de buffer alrededor de los puntos de captación podría ser más eficaz si captura flujo de agua laminar, siéndolo menos si el volumen de flujo laminar no es significativo o hay un bajo potencial de erosión. Por ello, se sugiere superponer las zonas de buffer alrededor de los puntos de captación con los análisis hidrológicos (por ejemplo, los resultados del modelo SWAT). Esta convergencia de modelos (SWAT y USPED), cada cual con sus bases físicas y sus diferentes escalas espaciales y temporales, aportaría conocimiento de gran interés para la conservación del suelo, pero necesita de un mayor esfuerzo temporal.

Los resultados presentes nos llevan a concluir que es necesaria la implementación de zonas de protección, tanto alrededor de los ríos como de los puntos de captación, para reducir la pérdida de suelo. Como norma general, podría ser mejor invertir en una zona de protección más extensa alrededor de los ríos que alrededor de los puntos de captación, donde la eficacia de los mismos dependerá de la geomorfología del terreno y de las dinámicas hidrológicas. Obviamente, esto es en referencia a la presencia de sedimentos en suspensión, sin considerar aquí otros ámbitos de la calidad del agua, más relacionados con la distancia a la captación, y de su cantidad, en relación con reserva de humedad del suelo.

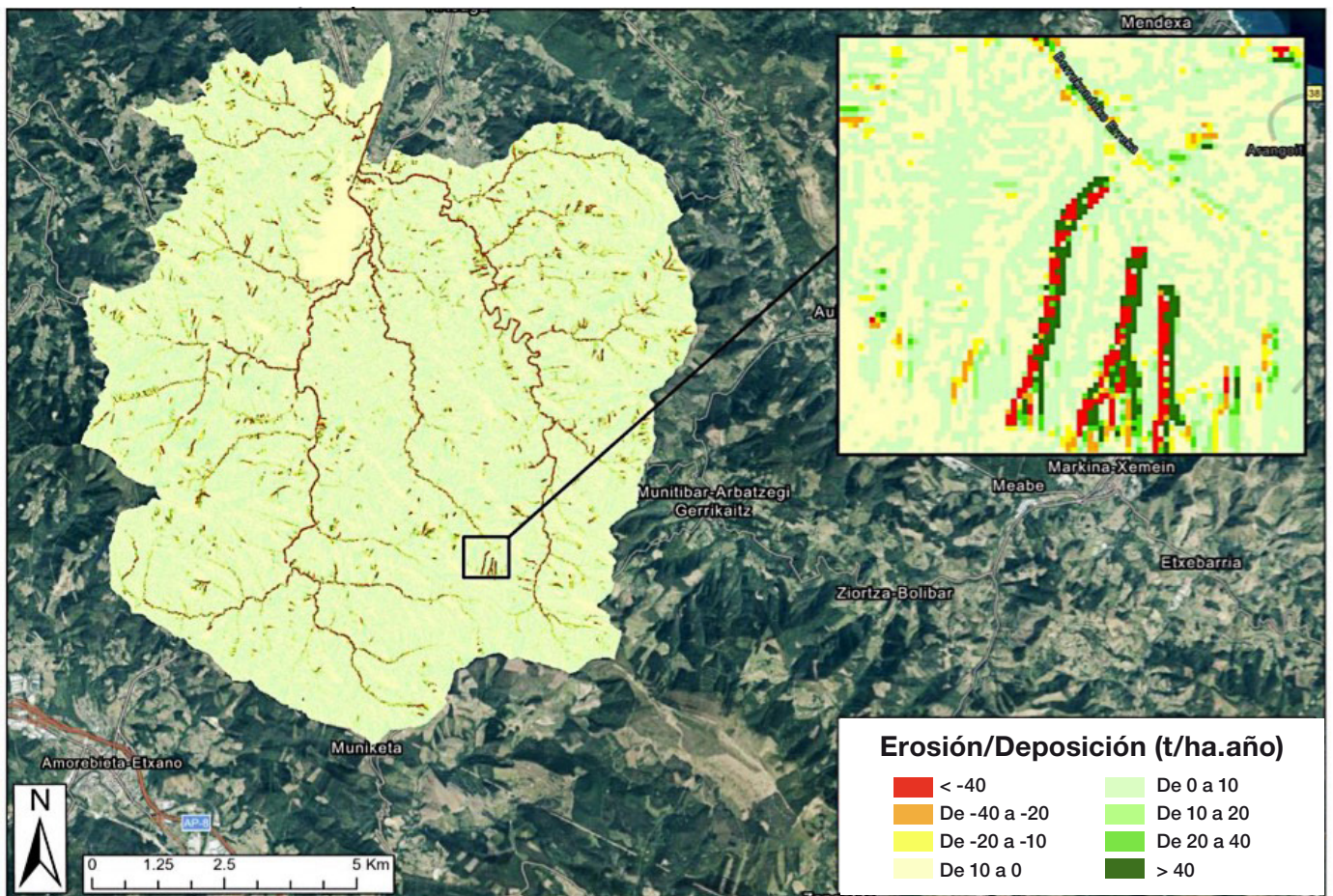


Figura 15. Patrones de erosión y deposición media de la cuenca del Oka (t/ha.año) en el escenario 'URBASO'.

04

Dinámica del estuario en escenarios de cambio climático

En el estudio realizado en este proyecto, se ha abordado tanto la parte terrestre como la marina, siendo ésta una aproximación novedosa en la CAPV, dado que estudios previos han abordado solo parcialmente dichos ámbitos. Así, el estudio de dinámica de flujo y de transporte de materia desde la parte continental debe venir acompañado de un estudio paralelo en el estuario, de forma que se considere en su integralidad el concepto de demarcación hidrográfica recogido en la Directiva Marco del Agua (DMA).




Desde esa visión, se presenta la evaluación del aporte marino y de los cambios morfológicos del estuario inferior (desembocadura, playa y delta) a partir de datos de imágenes procedentes de sistemas de videometría y de ortofotos. A partir de ahí, se estudia el balance sedimentario en todo el estuario mediante un modelo numérico basado en el equilibrio de los flujos entre los elementos del estuario y que integra los resultados de las proyecciones climáticas, los cambios en el aporte sedimentario marino y continental y que, además, puede simular actuaciones antrópicas como la apertura de las munas.

4.1. Aporte marino y cambios morfológicos del estuario inferior

A partir del análisis de las imágenes de videometría desde la fecha de instalación del sistema KostaSystem en Mundaka (2007; Lina *et al.*, 2021; Epelde *et al.*, 2021), se definen cuatro indicadores morfológicos para caracterizar la evolución del estuario inferior: 1) la superficie

de playa supramareal de Laida, 2) la posición norte de la curvatura del meandro del canal principal, 3) la posición sur de la curvatura, y 4) la posición oeste de la barra intermareal (Figura 16).



-  (1) Area supramareal --> 2008-2023 (dato mensual)
-  (2) Canal norte --> 2008-2023 (dato trimestral hasta 2015, luego mensual)
-  (3) Canal sur --> 2008-2023 (dato trimestral hasta 2015, luego mensual)
-  (4) Barra intermareal oeste --> 2008-2023 (dato mensual)

El análisis estadístico de la evolución de los indicadores morfológicos mediante el método GAM (Chust *et al.*, 2022) en el periodo 2007-2023 permite identificar una estacionalidad significativa para los elementos exteriores (playa y barra) que se explica por su fuerte exposición al oleaje. Por otra parte, se obtienen unas tendencias significativas en la disminución del área de playa supramareal de Laida y en la migración hacia el norte del meandro del canal principal (Tabla 1).

Cabe resaltar la importancia de los datos con alta frecuencia temporal para caracterizar la tendencia y la

variabilidad de los indicadores morfológicos. Los datos de videometría mensuales analizados tienen una resolución adecuada, aunque su escala temporal (2007-2023) es todavía limitada. La información procedente de ortofotos (Monge-Ganuzas *et al.*, 2013), disponibles desde 1956, a pesar de su baja resolución temporal, permite identificar el efecto de las actuaciones en la zona previamente al periodo de monitoreo intensivo mediante videometría, contribuyendo a constatar que las actuaciones de dragado y regeneración de la playa de Laida perturban el comportamiento natural del sistema (Figura 17).

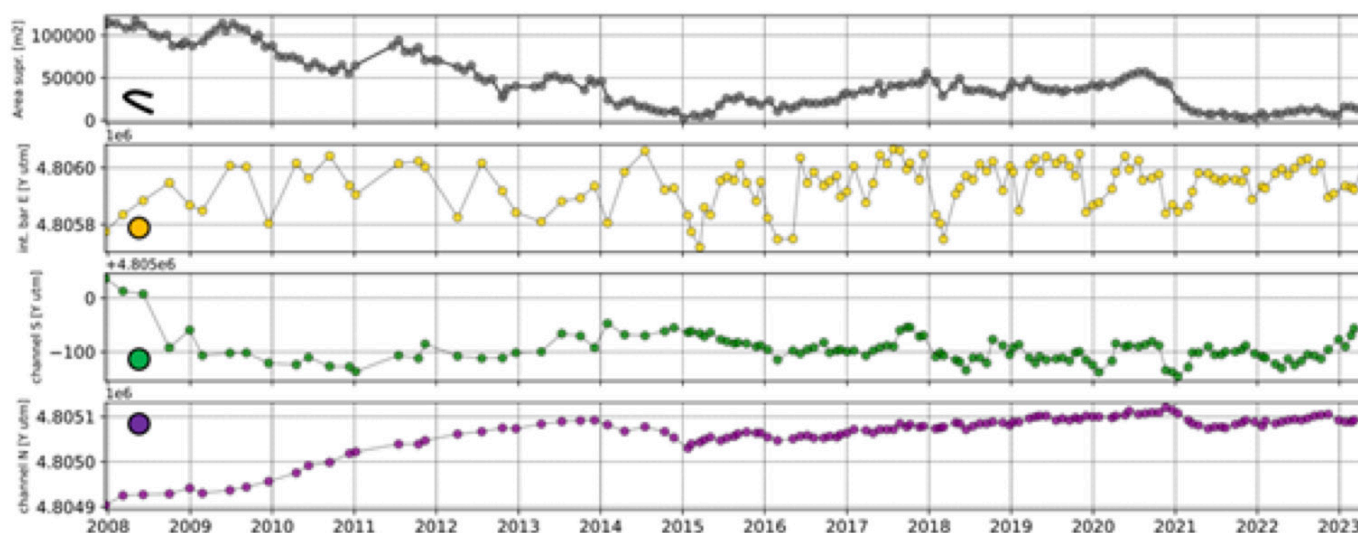


Figura 16. Descripción de los indicadores morfológicos (arriba) y series temporales de los indicadores (abajo), de arriba abajo: área supramareal, barra intermareal oeste, Canal sur y Canal norte.

| INDICADOR | TENDENCIA | P-TENDENCIA | P ESTACIONALIDAD | R2 |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|--------|
| Área supramareal | -5104 m ² /año | 4·10 ⁻⁷ | 0,004 | 0,581 |
| Canal Norte | 8,65 m/año | 1,75·10 ⁻⁷ | 0,613 | 0,656 |
| Canal Sur | -2,07 m/año | 0,0731 | 0,28 | 0,0948 |
| Barra intermareal oeste | 3,37 m/año | 0,0825 | <2·10 ⁻¹⁶ | 0,397 |

Tabla 1. Resumen de los resultados del modelo GAM aplicado a las series de indicadores. Se establece que la tendencia, o la estacionalidad, es significativa si $p < 0.05$. El parámetro R2 representa la parte de la variabilidad de los datos explicado por la tendencia y la estacionalidad.

De los resultados obtenidos se concluye que las tendencias observadas en los indicadores morfológicos no se relacionan con la transgresión natural del estuario como consecuencia del aumento del nivel del mar. Por otra parte, no se identifica ningún cambio en el aporte sedimentario marino, dado que no se observa ninguna tendencia significativa en los indicadores del oleaje, driver principal del aporte marino. Los resultados indican que las tendencias detectadas se deben principalmente

a la recuperación del estuario tras las actuaciones de dragado y de regeneración de la playa de Laida. En particular, los análisis de rampa y quiebro indican que el área de la playa de Laida se ha estabilizado a partir de los años 2014-2015 (Figura 18). Las tendencias podrían también ser debidas a un comportamiento cíclico del estuario, en particular, el desplazamiento hacia el norte del meandro del canal se podría relacionar con un episodio de estrangulamiento del canal.

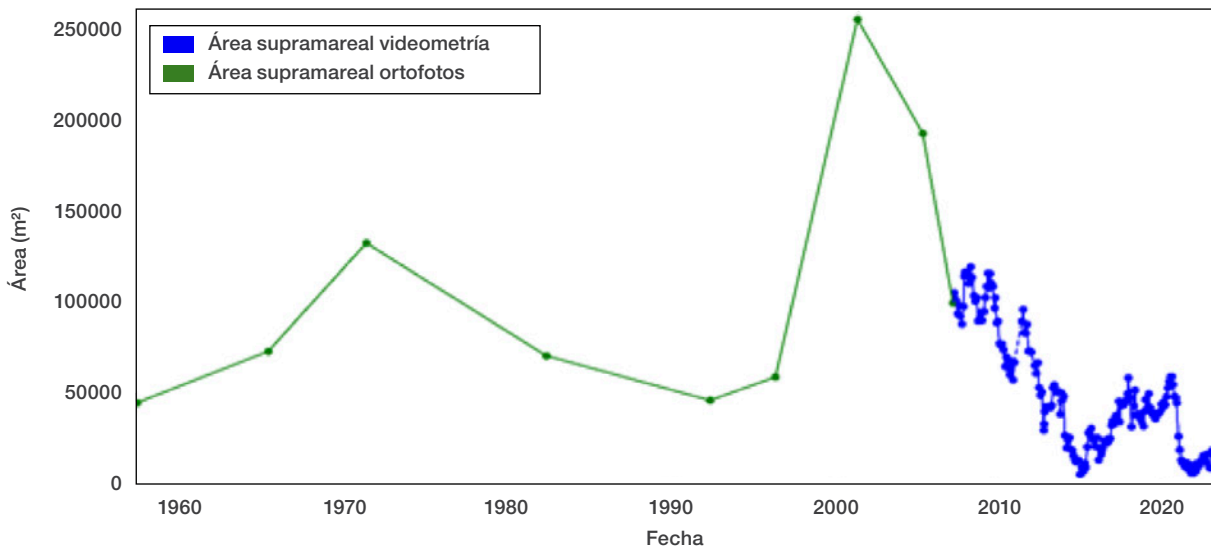


Figura 17. Serie de datos del área supramareal de la playa de Laida añadiendo información histórica de las ortofotos.

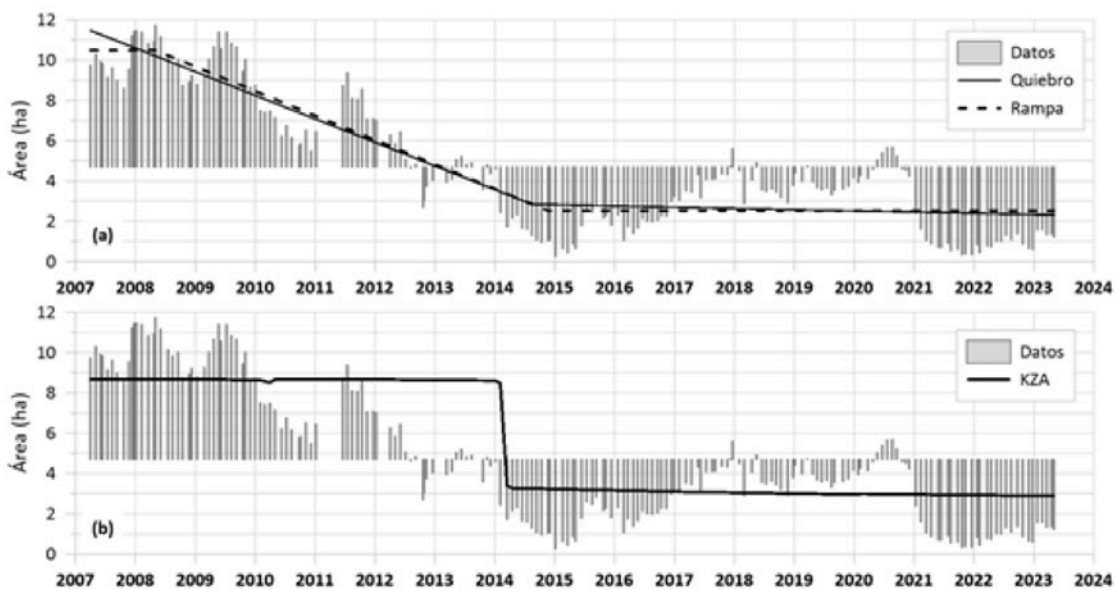


Figura 18. (a) Se muestra la serie de datos mensuales del área de la playa de Laida desde 2007 a 2023 y los resultados del ajuste a la función de Quiebro y Rampa sobre dicha serie de datos. (b) sobre los datos mensuales del área de la playa de Laida se han representado los resultados del filtro KZA con un ancho de ventana de 36 datos y 4 iteraciones.

4.2. Balance sedimentario en el estuario

El balance sedimentario en el estuario se ha investigado empleando dos modelos numéricos semi-empíricos forzados, principalmente, por el aumento de nivel del mar. El primero de ellos es el modelo ASMITA (Townend *et al.*, 2016; Garnier *et al.*, 2022) que permite simular la interacción entre los elementos geomorfológicos del estuario (playa, deltas, canales, llanuras intermareales, marismas) y proporciona resultados de la evolución del volumen de cada elemento. Se ha desarrollado una nueva versión del modelo ASMITA, la versión v3.3,

para poder extender los resultados obtenidos en Okaklima (Klimatek 2020-2021) e incluir un cambio en el transporte marino/continental y los efectos de restauración de marismas (Figura 19).

El segundo modelo utilizado es el *ChannelForm* (Townend *et al.*, 2021; www.coastalsea.uk), que incluye una representación del estuario simplificada, pero permite caracterizar la transgresión del estuario (Figura 20). Su aplicación práctica a un estuario real ha constituido una primicia pues ha sido Urdaibai el primer lugar estuario donde ha sido utilizado *ChannelForm*. En este estudio se ha desarrollado una metodología y se presentan los resultados preliminares de la primera aplicación del modelo a un caso real.



Conectividad entre elementos

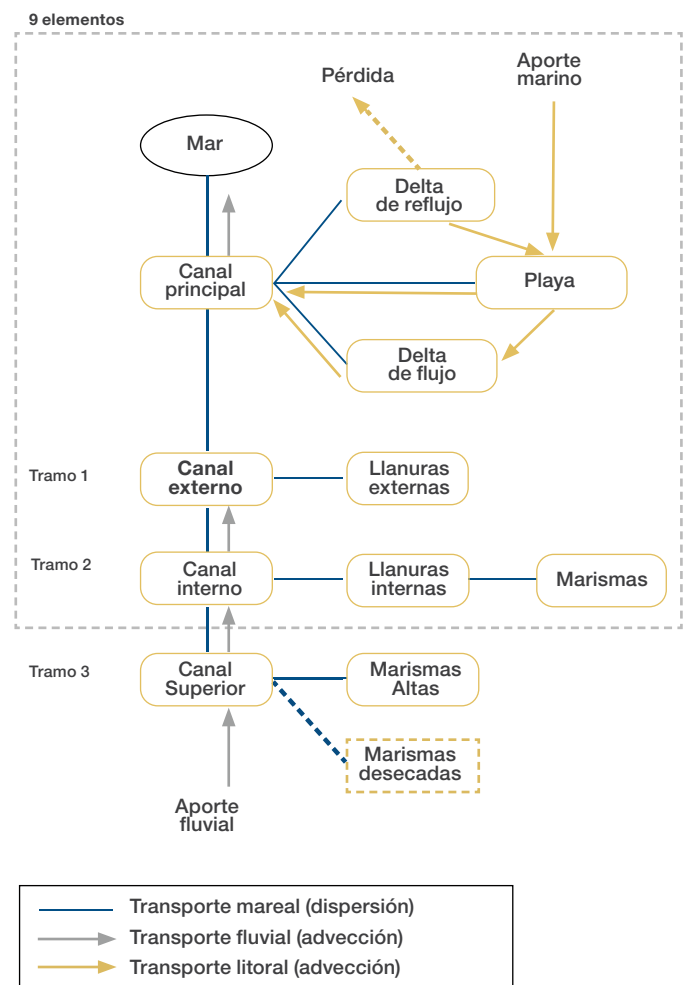


Figura 19. Definición de los distintos tramos del estuario del Oka implementados en el modelo ASMITA y esquema de las interconexiones entre los elementos en el modelo.

Conforme con los resultados obtenidos en Okaklima, los resultados de ASMITA indican que, para un aporte de sedimento marino y continental constante, el estuario se ajustaría a un aumento de nivel del mar lineal. Así, se encontraría en un equilibrio dinámico donde se produciría sedimentación en el estuario al mismo ritmo que el aumento del nivel del mar, en otras palabras, la profundidad se conservaría. Sin embargo, considerando un aumento de nivel del mar exponencial, incluyendo los últimos resultados de proyecciones climáticas del IPCC (2023), el estuario no se ajusta a la evolución del nivel medio del mar: la profundidad de los elementos internos aumenta y se incrementa la sedimentación en el delta de reflujo (Figura 21).

Los resultados anteriormente descritos de los modelos numéricos no han permitido identificar cambios recientes en el aporte sedimentario marino y los últimos estudios de proyecciones de oleaje, motor principal del aporte marino, no indican un aumento significativo durante el resto del siglo XXI y, por lo tanto, se considera un aporte constante en el estudio de proyecciones climática. No obstante, se ha realizado un estudio exploratorio de sensibilidad imponiendo cambios importantes en el aporte marino, del cual ha resultado que se producirían pocos cambios en el volumen de los elementos del estuario, este resultado confirma que **los cambios más importantes que se han observado en el estuario inferior se deben a las actuaciones de dragado y regeneración de la playa de Laida** (Figura 22).

De forma similar, el cambio en el aporte sedimentario del río supone un impacto reducido en el volumen de los elementos morfológicos del estuario. Incluyendo las proyecciones de aporte continental (proyecciones del caudal y de la concentración de sedimento del escenario RCP-8.5 obtenidas en este proyecto; apartado 3), se obtienen unos resultados que suponen una reducción del volumen de 1% del volumen inicial en 2100, lo que es imperceptible si se superpone a los cambios debidos al aumento del nivel del mar (cambios de hasta 25% en el escenario SSP5-8.5, Figura 23).

La modelización permite estudiar los efectos de distintos tipos de intervenciones, especialmente las que se pueden asimilar a un cambio

de volumen de elementos. En particular, se ha mejorado el modelo para analizar un caso de apertura de marismas para realizar el seguimiento de la evolución morfológica de la zona que se abre, así como de los otros elementos del estuario. Por ejemplo, la simulación de la apertura de la zona de la Tejera muestra un cambio de menos del 2% del volumen de los elementos del estuario (Figura 24).

Los resultados presentados en este documento deben de considerarse como **preliminares** y complementarios a un estudio de detalle que evalúe el efecto de actuaciones como la de la Tejera, sobre todo a corto plazo. Debe de tenerse en consideración que el modelo tiene varios parámetros de calibración que pueden afectar los resultados, y para poder calibrar el modelo, se necesita información de evolución de todos los elementos del estuario, tras actuaciones de aperturas de marismas. Los datos disponibles de las actuaciones de apertura que se produjeron en el pasado se limitan a los datos que provienen de sondeos sobre las marismas (Cearreta et al., 2013; García-Artola et al., 2023), comprobándose que los tiempos de respuesta del modelo coinciden. Para una calibración completa, se necesitarían datos que se podrían obtener de un estudio piloto.

Para validar y calibrar el modelo a largo plazo se considera de notable interés el análisis de la información procedente de sondeos. La información de sondeos disponible se ha utilizado para caracterizar la sedimentación en las marismas y validar ASMITA, pero también para definir un estado inicial del estuario con la que dar una primera aproximación de la transgresión del estuario en los últimos 4.000 años. El trabajo exploratorio realizado con *ChannelForm* es la primera aplicación de un modelo a un caso real, y, se obtienen resultados consistentes con los datos disponibles (Figura 25). Para utilizar el modelo alimentado con proyecciones climáticas, se debe mejorar la condición inicial del modelo con información geofísica y sedimentológica de mayor resolución y obtener datos de transgresión recientes (escala de 100 años) realizando nuevos sondeos.

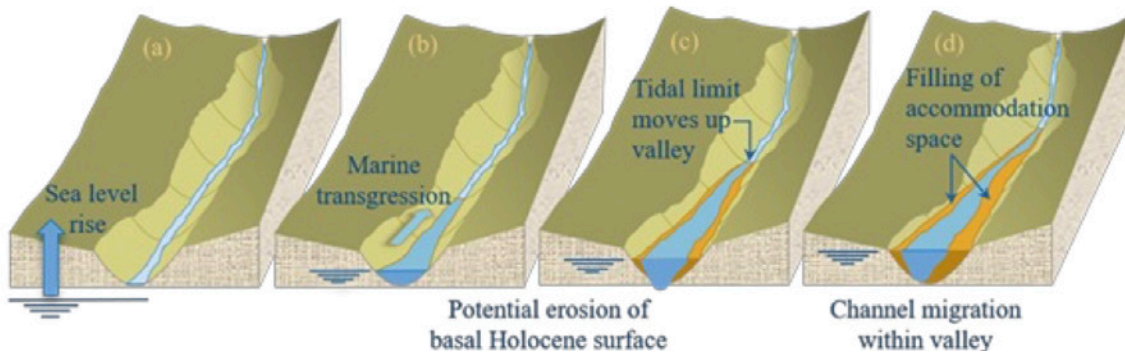


Figura 20. Esquema de la transgresión marina estuarina. (a) valle fluvial inciso pre-Holoceno, (b) formación del proto-estuario a medida que el nivel del mar alcanza el nivel de la sección mostrada, (c) relleno inicial de sedimentos por exceso de espacio de acomodación y aumento del prisma de marea a medida que el estuario se extiende tierra adentro y (d) subsiguiente relleno de sedimentos, movimiento del canal y formación de llanura aluvial más extensa a medida que el nivel del mar sigue aumentando.

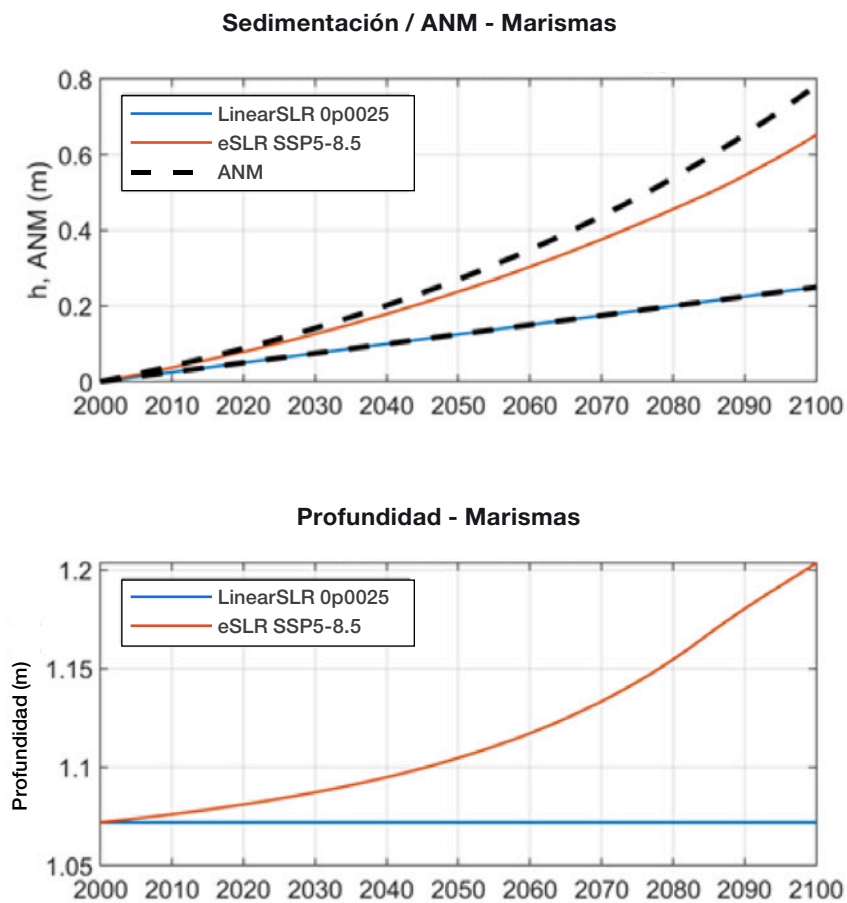


Figura 21. Respuesta de las marismas del estuario del Oka a un aumento de nivel del mar lineal (2.5 mm/año, línea azul) y exponencial (escenario SSP5-8.5, línea naranja). Comparación de la sedimentación y del aumento del nivel del mar (arriba), y evolución de la profundidad hasta el año 2100 (abajo).

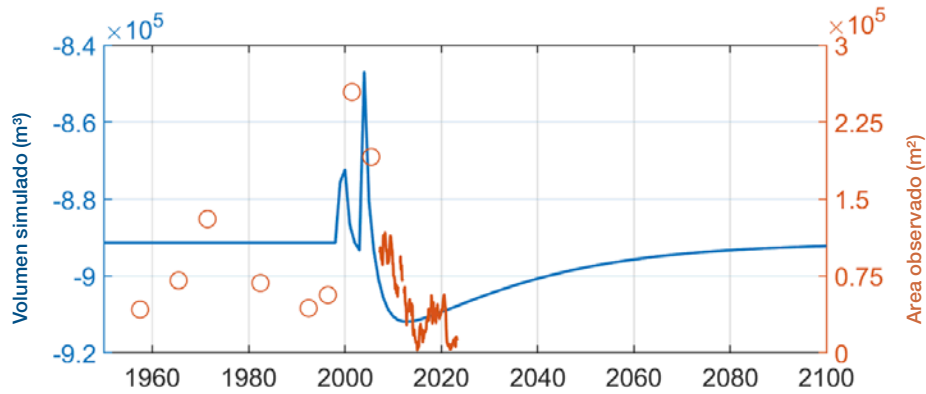


Figura 22. Resultados de la simulación de la actuación del 2003 (volumen de la playa relativo, en azul) y comparación con los datos de evolución del área supramareal (naranja).

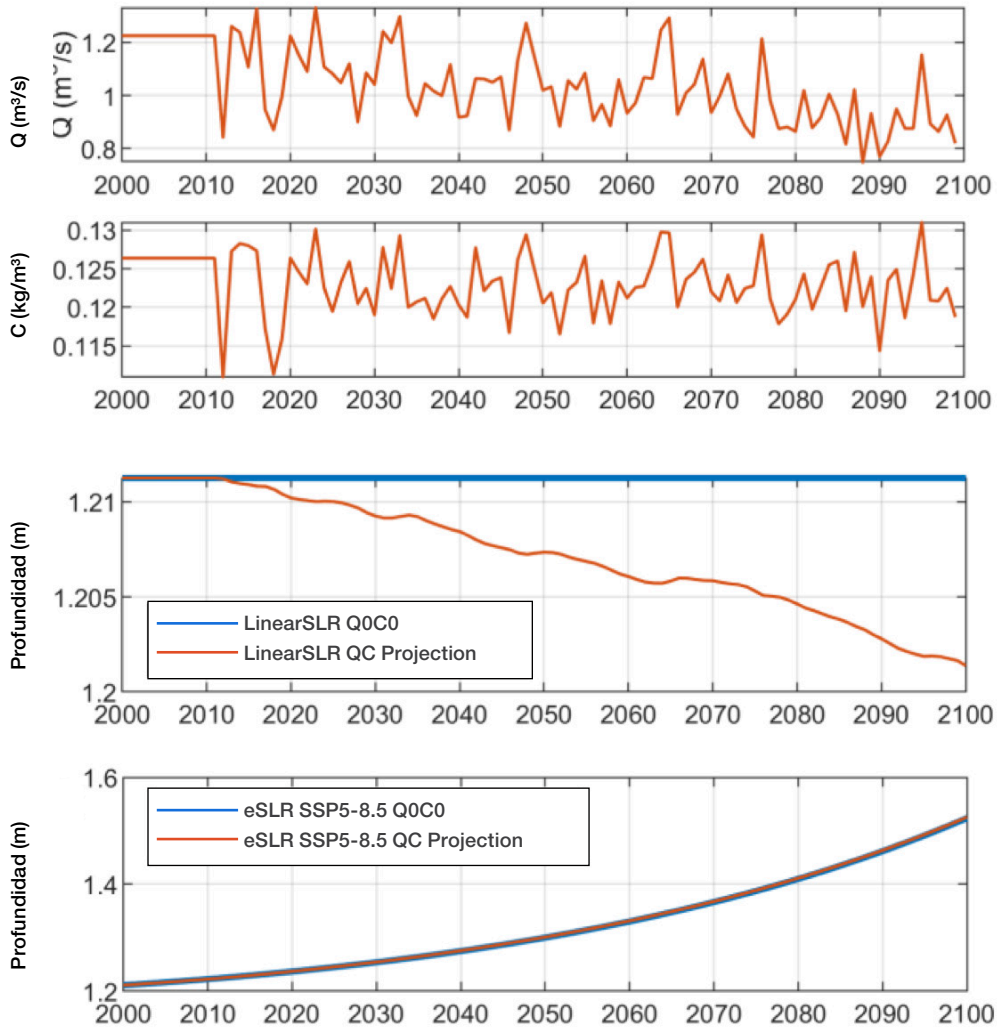


Figura 23. Respuesta del estuario del Oka a las proyecciones climáticas del aporte sedimentario de origen continental (RCP-8.5). De arriba abajo: Proyecciones del caudal del río (Q en m^3/s), de la concentración de sedimentos (kg/m^3), profundidad de las llanuras intermareales para un aumento de nivel del mar lineal y profundidad de las llanuras intermareales para un aumento de nivel del mar exponencial (SSP5-8.5).

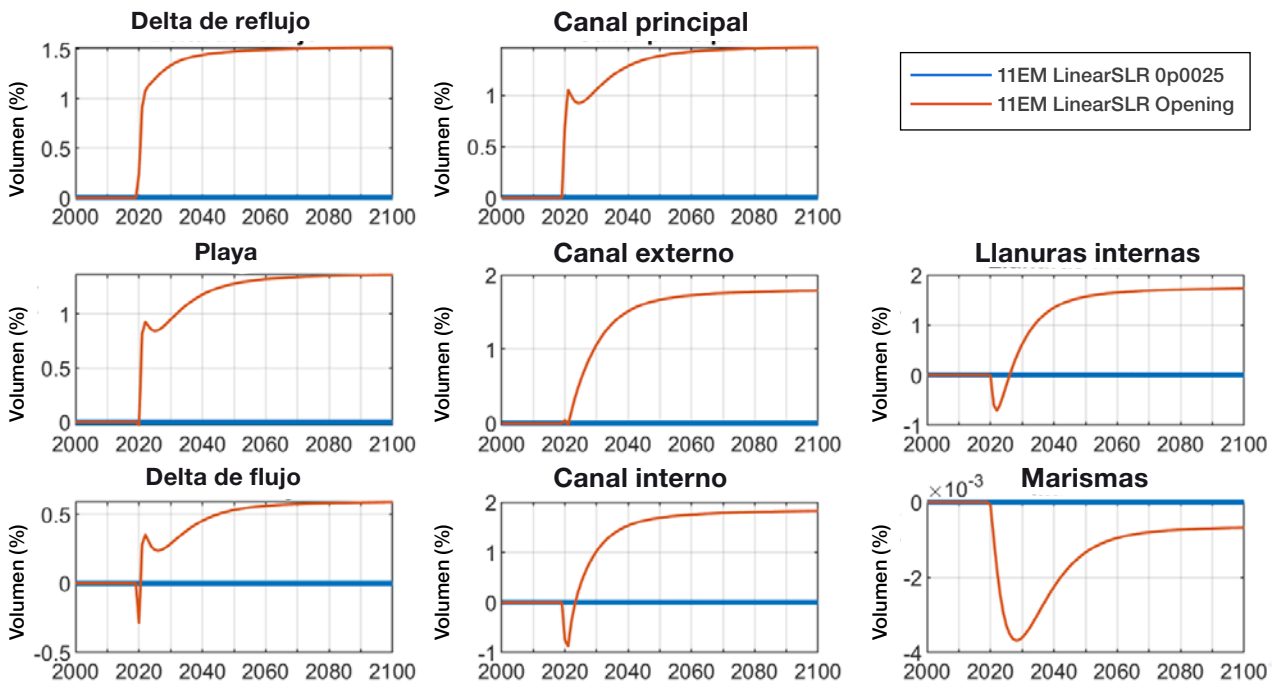


Figura 24. Respuesta del estuario del Oka al efecto de la apertura de marismas. Se representa el cambio de volumen móvil de cada elemento respecto al volumen inicial, se puede asimilar a un cambio de profundidad. Simulaciones de un aumento de nivel del mar lineal sin la actuación (líneas azules) y con la actuación iniciada en la simulación en 2020 (líneas naranjas).

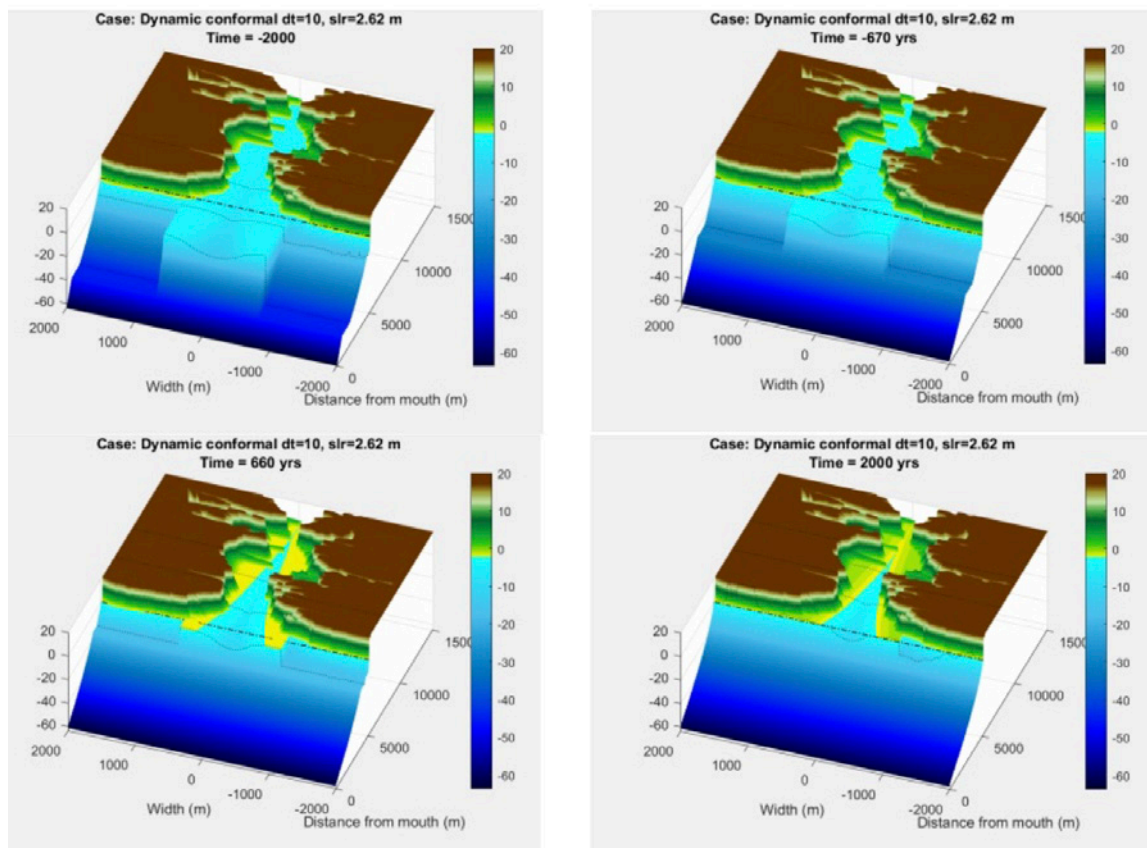


Figura 25. Resultado de la evolución de la topo-batimetría en 4000 años.

Marco conceptual y metodológico para la protección de captaciones

Con el fin de justificar conceptualmente las propuestas hechas en este proyecto para delimitar en la planificación territorial espacios concretos con objeto de proteger las captaciones de agua superficiales, se presentan 2 ámbitos de gran importancia: los Espacios de Prioridad Hidrológica (metodología PIRAGUA) y las Zonas de Protección de Captaciones (metodología URBASO). Previamente se hace un resumen de las normativas en vigor analizadas, relacionadas con las captaciones para el abastecimiento, su ámbito hidrológico territorial y sus formas de protección. Se trata de sustentar en estas normativas las propuestas de incidencia hidrológica territorial que se presentan en este proyecto, poniendo en evidencia la necesidad de una mayor concreción en aspectos conceptuales y metodológicos para la protección de captaciones.

5.1. Marco normativo

RD 35/2023. Plan Hidrológico Demarcación Hidrográfica Cantábrico Oriental (2022-2027)

<https://www.uragentzia.euskadi.eus/plan-hidrologico-tercer-ciclo-planificacion-2022-2027/webura00-01020102planrevision/es/>

Como se recoge en este Plan (PH) «La planificación hidrológica se desarrolla conforme a un proceso cíclico e iterativo sexenal, de aproximaciones sucesivas a una realidad cambiante». De hecho, el propio conocimiento

de los procesos hidrológicos a escala de cuenca (más aún en un contexto de cambios complejos, en clima y ocupación del territorio) supone una aproximación sucesiva (es necesario seguir ahondando en el conocimiento). Añade que: «el modelo territorial de la demarcación, marcado por una topografía accidentada y la elevada densidad de población de la mayor parte del territorio, se ha traducido en una alta ocupación de muchas vegas fluviales y estuarinas para uso urbano e industrial, cuyos vertidos han supuesto una presión importante, mayoritariamente, para las masas de agua superficiales». Esto no deja de ser una visión parcial, ya que, en el caso de las captaciones, sobre todo en medio rural, las presiones sobre los recursos hídricos no proceden de la ocupación de las vegas, ni de la industria, sino de la actividad agroforestal, no debidamente considerada en las normativas, y que, además, no sólo afecta a la calidad del agua, sino también a su cantidad estacional (reducción en verano y, sobre todo, otoño), afectando de forma muy seria a la propia conservación del suelo.

En el PH se dice también: «Todas las captaciones destinadas a consumo humano incluidas en el Registro de Zonas Protegidas deberán disponer de su correspondiente **perímetro de protección** donde se delimiten las áreas a proteger, las medidas de control y se regulen los usos del suelo y las actividades a desarrollar en los mismos para evitar afecciones a la cantidad y calidad del agua de las captaciones». Sin embargo, en la Demarcación sólo hay un perímetro de protección declarado (BOPV 8 abril 2005), el de las captaciones de

aguas subterránea (sondeos Vega, Eusko Trenbideak y Ajangiz-A) del acuífero de Gernika. Mencionamos este caso por ser el único perímetro declarado en el espacio Urdaibai, y que muestra el camino a seguir para establecer la zonación de todas las captaciones.

En cualquier caso, el Anejo-04 del PH dice que «en la delimitación del perímetro de protección se utilizarán, con carácter general, criterios hidrológicos o hidrogeológicos». Y añade: «En tanto no se delimite el perímetro de protección, se establece una **zona de salvaguarda** en la que la Administración Hidráulica podrá exigir la presentación de una evaluación de los efectos de la actividad sobre la captación protegida, en particular sobre la calidad y caudal de las aguas».

«La zona de salvaguarda estará constituida por una superficie circular de radio fijo alrededor de las captaciones subterráneas y, en el caso de captaciones superficiales, una superficie delimitada por un arco de radio fijo sobre la cuenca vertiente. Dichos radios serán: 500 m en las captaciones de sistemas de abastecimiento que sirven a más de 15 000 habitantes; 200 m en el caso que sirvan entre 2000 y 15 000 habitantes; 100 m entre 50 y 2000 habitantes; y una longitud a determinar por la Administración Hidráulica en las captaciones de sistemas de abastecimiento que sirven a una población comprendida entre 10 y 50 habitantes». Lo que la normativa no establece, al menos de forma clara, es la limitación de usos que conlleva esa zonación; la metodología URBASO, luego presentada, sí que considera condicionantes en función del buffer referido dentro de la zonación propuesta.

Se hace también mención en el PH a los «Efectos del cambio climático». «En el ámbito de la demarcación se han realizado diferentes estudios que analizan la incidencia del cambio climático en las variables hidrológicas y climáticas bajo distintos escenarios y proyecciones. En general, todos ellos indican un descenso de la precipitación y de la escorrentía anual y un aumento de la temperatura media que llevaría asociado un incremento de la evapotranspiración, con la consecuente disminución de la disponibilidad de recursos hídricos en la demarcación». «La variación global del clima y la alteración de las diferentes variables hidrológicas podrán tener consecuencias directas en las condiciones de las masas de agua y zonas protegidas, alterando el régimen hidrológico, la composición de especies y las características fisicoquímicas, entre otros. Por ello, es necesario adoptar medidas y trabajar para fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación, así como para mitigar sus efectos».

Al respecto de estas citas es esencial resaltar un tema que, por desgracia, con demasiada frecuencia no suele ser tenido en cuenta en las normativas que no van directamente dirigidas a la planificación hidrológica sino a la territorial. Nos referimos a la **evapotranspiración**, proceso ligado al cambio climático, pero también a la gestión de los usos del territorio, sobre todo los forestales, de amplia presencia en Urdaibai. Hablamos de afección a la cantidad del recurso, sin limitarnos a su calidad. Por eso, la gestión forestal adaptativa puede jugar un papel fundamental en la resiliencia hidrológica del territorio, siempre y cuando así venga recogido en el espíritu de las normas, forales en este caso, correspondientes. Es desde esta visión que se debería dar más importancia a la declaración, recogida en esas normas, de «montes protectores», que ayuden a la regulación efectiva del régimen hidrológico y a la conservación de los suelos, con más urgencia en los perímetros de protección de las captaciones de agua para abastecimiento.

RD 3/2023, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro

<https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/01/10/3/con>

Este Real Decreto es la trasposición a la legislación estatal de la Directiva 2020/2184, relativa «a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, y tiene por objeto proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas de consumo garantizando su salubridad y limpieza, y mejorar el acceso a las aguas de consumo». Se interesa por el buen estado de «las masas de agua utilizadas para la captación de aguas destinadas a la producción de agua de consumo», que están recogidas en el registro que a tal efecto establecen los PH de las Demarcaciones Hidrográficas. Este RD va a condicionar de forma notable las formas y criterios de la protección de las captaciones.

Esta directiva supone un importante avance: «El enfoque basado en el riesgo que se establece en este real decreto supone una novedad importante al integrar tres componentes: la evaluación y gestión del riesgo de las zonas de captación de aguas destinadas a la producción de agua de consumo humano; la evaluación y gestión del riesgo en la zona de abastecimiento, desde la captación hasta la entrega al usuario, lo que se denomina acometida; y, por último, la evaluación y gestión del riesgo de las instalaciones interiores en edificios prioritarios». En este proyecto el interés se

limita al primer componente: «Por lo que respecta a la evaluación y gestión del riesgo de las zonas de captación deben adoptar un enfoque holístico y debe ser la base de las medidas orientadas a reducir el nivel de tratamiento de potabilización requerido para la producción de agua de consumo». Es decir, cuanto mejor sea la calidad en origen menor será el tratamiento posterior requerido, aunque siempre tenga que estar previsto, por la necesaria precaución.

Conviene tener en cuenta algunas definiciones que contempla este RD: «Agua de captación: aguas de la zona de captación en las masas de agua, que vayan a ser utilizadas para la producción de agua de consumo, independientemente de su origen y del tratamiento requerido, en su caso. «Zona de captación»: zona en la que se produce la captación de agua destinada a la producción de agua de consumo, y en la que las actividades presentes, usos de suelo o naturaleza del mismo pueden tener influencia en la calidad del agua captada: 1.º En el caso de captaciones de aguas superficiales continentales estará formada por el área hidrológica, cuenca o subcuenca de drenaje, que drena sus aguas hacia el punto de extracción» (es nuestro concepto de Espacio de Prioridad Hidrológica). A señalar la importancia renovada que toma el concepto de «zona de captación», que extiende el interés del «agua de captación» a su entorno territorial. De ahí que el texto recoja que la «administración hidráulica» debe establecer «la geometría de las zonas de captación mediante servicios de información interoperables».

Se especifican en el RD los «Elementos de evaluación de riesgos de las zonas de captación» que incluyen, entre otros, la «caracterización de las zonas de captación» y la consideración de forma específica de «los riesgos derivados del cambio climático, con el objeto de identificar las medidas de adaptación más adecuadas para hacerles frente». La caracterización incluye «la cartografía de los perímetros de protección», a realizar de conformidad con lo expuesto en el RD 907/2007: «El plan hidrológico podrá fijar los **perímetros de protección**, en los que se prohíba el ejercicio de actividades que pudieran constituir un peligro de contaminación o degradación del dominio público hidráulico... Asimismo, se recogerán en el plan hidrológico los perímetros establecidos con objeto de proteger el estado de las masas de agua subterránea». A señalar que en el ámbito de Urdaibai sólo hay un perímetro de protección declarado, y es de aguas subterráneas. La caracterización incluye también «la descripción de los usos del suelo, la escorrentía y los procesos de alimentación de las zonas de captación». En el caso de Urdaibai este tema es clave, pero no solo

el uso del suelo, forestal mayoritariamente, sino, sobre todo, su gestión, ya que ésta condiciona de forma notable la escorrentía y los procesos de alimentación a las captaciones.

Estrategia de Protección del Suelo Euskadi 2030 (Gobierno Vasco, 2022)

<https://www.lhobe.eus/publicaciones/estrategia-proteccion-suelo-2030>

Partiendo del hecho de que el suelo es el elemento biofísico más olvidado de la planificación, no sólo hidrológica sino también territorial, y teniendo en cuenta su funcionalidad hidrológica, se incluyen aquí algunos aspectos positivos de esta Estrategia, en lo que a nuestra temática se refiere, mostrando también sus lagunas. Como «cuestión clave» reconoce que «La protección del suelo ha sido ignorada sistemáticamente durante mucho tiempo. La contaminación ha sido la única amenaza objeto de políticas específicas como consecuencia de la magnitud de esta problemática en los países desarrollados, especialmente en los más industrializados. Sin embargo, más allá de la contaminación, existen otras amenazas a la integridad funcional del ecosistema edáfico, entre las que se encuentran la erosión, el sellado, la salinización, la compactación, la pérdida de materia orgánica y biodiversidad o los deslizamientos, que no deben olvidarse cuando el objetivo es la protección integral del medio. Todo ello sin olvidar que el suelo es un elemento importante y a menudo descuidado del sistema climático como el segundo sumidero de carbono después de los océanos».

Como resulta obvio, la Estrategia desde el principio recoge los diversos servicios proporcionados por los ecosistemas del suelo y las funciones que los soportan. Así, entre los servicios de regulación la «regulación de la calidad del agua» y la «regulación del suministro de agua», y entre los servicios de aprovisionamiento las «fuentes de agua». En lo que a la erosión se refiere, se desprende que «los usos del suelo que aseguran una cubierta vegetal permanente reducen la pérdida de suelo de manera efectiva», y se destaca «la necesidad de incorporar los condicionantes de la erosión a cualquier política de intervención o gestión del territorio».

El reto está en llevar la teoría a la práctica eficiente, empezando por la gestión forestal. La pérdida de suelo supone la disminución de la regulación de humedad del suelo y el consiguiente aumento en el aporte de sedimentos al cauce, aspectos con afección directa a la funcionalidad hidrológica del territorio. De hecho,

considerar el servicio de regulación de la humedad del suelo como parte de su salud sería clave en la gestión adaptativa del territorio.

En la «Visión 2050» del «Planteamiento Estratégico» de la Estrategia «todos los suelos de Euskadi son gestionados de forma sostenible a la vez que las amenazas se afrontan con éxito garantizando así la salud y con ello, las funciones del suelo a largo plazo para su uso por las generaciones futuras». Apostamos por ello, siempre que se incluyan las hidrológicas entre las funciones del suelo, más aún cuando se plantea como objetivo «la confluencia de dos conceptos interdependientes, suelo y territorio». El agua es el conector de ambos, por naturaleza.

Plan Rector de Uso y Gestión de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (PRUG)

<https://www.euskadi.eus/bopv2/datos/2016/11/1605040a.pdf>

Plan de Acción Territorial de Abastecimiento integral de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (PAT)

<https://www.busturialdekoura.com/biltegia/LEE-PAT/PAT-documento-5.pdf>

El PRUG se aprueba mediante el Decreto 139/2016 (BOPV, 28 noviembre 2016). En el Artículo 1.2.1 «Revisión y modificación» dice: «El presente Plan tiene vigencia indefinida, debiendo ser revisado en los siguientes casos: a) Al finalizar el plazo de diez años desde su entrada en vigor». Por tanto, tocaría revisarlo en el 2026, lo que abre una ventana de oportunidad para considerar aspectos que venimos señalando en esta síntesis, sobre medidas de incidencia territorial para la protección de las zonas de captación, y que necesariamente tienen que ser más concretas que lo recogido en las normativas vigentes.

De hecho, sobre esa temática, es el Artículo 4.5.2 «Protección de las áreas de captación de agua con destino a abastecimiento urbano (PACA)» el que expresamente menciona las captaciones, y cuyo único punto se limita a decir que «El Plan de Acción Territorial de Abastecimiento integral de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai delimitará y regulará los ámbitos de protección de las áreas de captación con destino a abastecimiento urbano». El PAT «es un Plan Especial para la implantación y definición de infraestructuras... permitirá la consecución de los objetivos del Plan Rector de Uso y Gestión de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai a través de una regulación urbanística y medioambiental pormenorizada que desarrolla las determinaciones previstas.

El PAT, en el Artículo 22.1 «Aprovechamientos de aguas» dice que «los aprovechamientos de aguas superficiales y subterráneas se regularán atendiendo a lo establecido en la legislación vigente en materia de aguas», legislación comentada en los apartados anteriores.

De alguna forma, estamos en un círculo cerrado de normas. En el Artículo 24.2 «Perímetros de Protección y Zonas de Salvaguarda» se recoge lo dicho en el PH de la Demarcación Hidrográfica Cantábrico Oriental: «Todas las captaciones destinadas a consumo humano incluidas en el Registro de Zonas Protegidas deberán disponer de su correspondiente perímetro de protección donde se delimiten las áreas a proteger, las medidas de control y se regulen los usos del suelo y las actividades a desarrollar en los mismos para evitar afecciones a la cantidad y calidad del agua de las captaciones».

La revisión del PRUG sería la ocasión para incorporar los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH) del territorio de Urdaibai, con una argumentada delimitación de los perímetros de protección de las captaciones y de su zonación interna, y, junto con eso, para especificar los diferentes condicionantes de usos del suelo en las diferentes zonas cartografiadas, en función de su grado de afección, en cantidad, calidad y estacionalidad, al recurso agua en el punto de captación. Nuestras propuestas van en esa línea. Esto contribuiría, además, al cumplimiento en el espacio Urdaibai de lo recogido en el citado RD 3/2023 sobre «evaluación y gestión del riesgo de las zonas de captación de aguas destinadas a la producción de agua de consumo humano». Del análisis de las normativas se concluye que, si bien todas recogen la necesidad de establecer perímetros de protección en las captaciones del Registro de Zonas Protegidas del PH, su puesta en práctica es muy escasa, más aún en las de aguas superficiales. En éstas, la protección se limita a una zona de salvaguarda, delimitada por un arco de radio fijo sobre la cuenca vertiente, con una longitud de arco entre 100 y 500 m dependiendo del número de habitantes abastecidos. Es una delimitación demasiado abierta, que necesita de mayor concreción y tenga en cuenta los impactos a las captaciones, tanto a la calidad del recurso como a su cantidad y estacionalidad, aspectos no debidamente recogidos en las normativas. Se requiere de un cambio de paradigma en la forma de entender la protección territorial de las captaciones, más aún con la consideración del «enfoque basado en el riesgo» que, como novedad importante, implica la Directiva 2020/2184 y su trasposición mediante el RD 3/2023.

Lo que tampoco las normativas establecen, de forma clara, es la limitación de usos que conlleva la

delimitación espacial de perímetros de protección y de su zonación interna. Aunque puede haber una amplia casuística de situaciones, difícil de llevar a una normativa, sí que se debe apostar por criterios hidrológicos-edáficos generales, más ajustados a la realidad, y que con las evidencias justifiquen las necesarias adecuaciones de las normas. El concepto de Adaptación a cambios debe alcanzar el ámbito de las normativas. La metodología URBASO pretende ser una ayuda al cambio de paradigma al considerar condicionantes en el uso del suelo en función del buffer referido dentro de la zonación propuesta.

5.2. Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH)

Se toma como referencia la aportación hecha por la UPV/EHU al Proyecto PIRAGUA (INTERREG-POCTEFA (EFA210/16, 2018-2021): «ADAPTACION AL CAMBIO CLIMATICO DESDE LA GESTION DE LA FUNCIONALIDAD HIDROLOGICA DEL TERRITORIO. Por un mosaico de usos del suelo que garantice la disponibilidad de los servicios hidrológicos»²⁶.

El objetivo es **la adaptación del Territorio desde su funcionalidad hidrológica**, priorizando zonas de la cuenca que proporcionan servicios hidrológicos (provisión de agua, en cantidad y calidad, espacio y tiempo) y teniendo en cuenta su compleja relación con otros servicios ecosistémicos (aprovisionamiento, regulación, soporte, culturales). Se trata de actuar en los espacios más cambiantes del Territorio, es decir, en las zonas de la cuenca donde se vienen produciendo cambios en los usos del suelo, para determinar cómo adaptar sus usos futuros al cambio

climático desde la consideración de la mejora de los servicios hidrológicos. Este objetivo es más prioritario en los espacios territoriales que definen las zonas de recarga de las captaciones de agua (superficiales y subterráneas), actuales o futuras, que deben ser consideradas como zonas estratégicas en la ordenación territorial, y no solo en la planificación hidrológica.

Hablamos de **servicios hidrológicos (SH)**, ya que a pesar de la notoriedad que los servicios ecosistémicos (SE) adquieren en las estrategias ambientales, no siempre están representados en ellos los beneficios relacionados con el Agua. En este sentido, una referencia obligada es Brauman et al. (2007), que ponen en valor los Servicios Hidrológicos ofrecidos por los ecosistemas, y categorizan sus beneficios derivados en cuatro ámbitos: cantidad, calidad, localización y momento.

Se consideran dos tipos de usos del suelo: los consolidados en el tiempo, sin grandes cambios en las masas vegetales, ni en el suelo (masas boscosas de muchas decenas de años, en las que la gestión realizada no supone cambios hidrológicos relevantes); y aquellos en situación de cambio, con alteración importante en la dinámica de las masas (desde prados en proceso de abandono hasta plantaciones de especies de crecimiento rápido con ciclos de rotación cortos, alterando las condiciones de la **evapotranspiración**, además de las propias del suelo). En este caso, no a todas las zonas se les debe atribuir la misma prioridad: en algunas, se deben priorizar los servicios hidro-ecosistémicos (existencia de captaciones, necesidad de mantener caudales ambientales, ...); en otras, otros servicios, como fijación de carbono o producción de madera... buscando la complementariedad de servicios en el Territorio.

26 <https://digital.csic.es/handle/10261/271868>

Actuar en términos de Adaptación supone conocer la dinámica del territorio, que es evolutiva en el tiempo. Necesitamos una **visión CUENCA**, más allá de la visión CAUCE. En la visión CUENCA (Figura 26, el río como respuesta) se considera el territorio no sólo como receptor de efectos derivados del Cambio Climático, sino también como causa añadida, o amortiguadora (efectos hidrológicos de la ocupación territorial). Así, **la gestión adaptativa del territorio debe ayudar a mitigar los efectos no deseados del cambio, en concreto, sobre los recursos hídricos.**

El cambio de paradigma es necesario para avanzar hacia una gestión adaptativa del territorio ante escenarios futuros. Presentamos los **Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH)** (Figura 26): «Aquellas partes del territorio cuya prioridad debe ser garantizar la disponibilidad, en espacio y tiempo, de los recursos hídricos necesarios a futuro, en

cantidad y calidad. En el caso de las captaciones de aguas superficiales el EPH incluye toda la cuenca de drenaje vertiente a la captación. En el caso de las aguas subterráneas la delimitación de la cuenca vertiente es más compleja y necesita de estudios específicos». Como caso, están las zonas de recarga de las captaciones, sea cual sea su naturaleza y escala, que deben considerarse en la planificación como zonas estratégicas de prioridad hidrológica ante el cambio climático.

En este sentido, hay que señalar que, si bien el cambio climático como generador de impactos hidrológicos no está en discusión y es usual su consideración en la planificación hidrológica, no lo es en la planificación territorial, en lo que a los recursos hídricos respecta. Y es que hay otro cambio a considerar, el de los usos del suelo (y su gestión), dependiente directamente de las decisiones a diferentes escalas territoriales (ordenación del territorio, políticas forestales. Los impactos de este

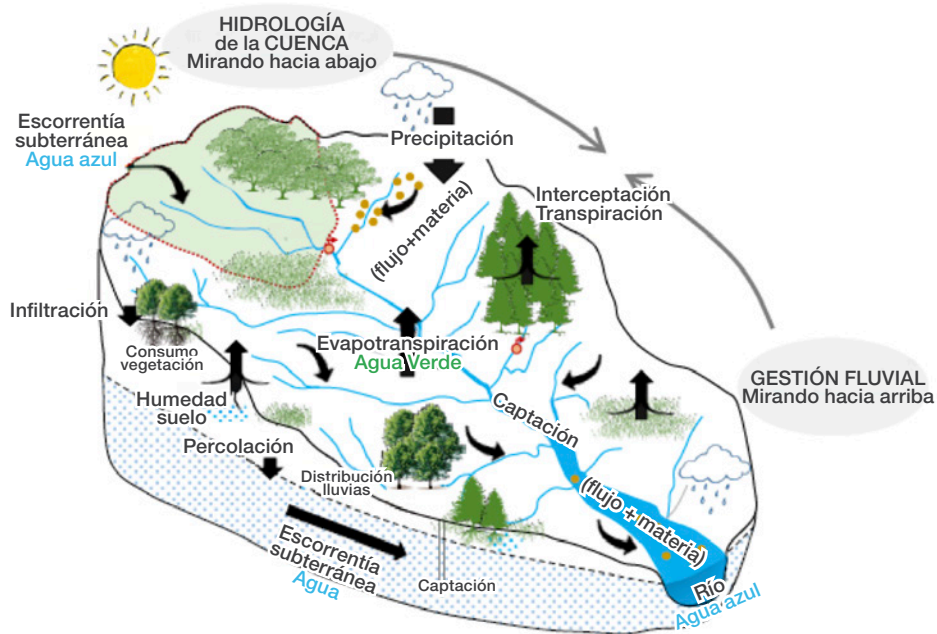


Figura 26. La cuenca fluvial como sistema integrado de procesos: visión CUENCA, esencial para la gestión adaptativa del territorio, más allá del cauce (modificado de Zabaleta *et al.*, 2021²⁷. Se ha señalado en rojo un Espacio de Prioridad Hidrológica (EPH) asociado a una captación.

27 <https://ojs.ehu.eus/index.php/ekaia/article/view/22113>

cambio (sobre todo, la afección a la cantidad del recurso, por aumento de la evapotranspiración) no suelen estar recogidos en la planificación hidrológica, que es como decir que esta planificación no considera en justa medida la funcionalidad hidrológica de las distintas partes del territorio. La separación de impactos es muy importante porque, además de permitir proyectar escenarios hidrológicos futuros, de acuerdo a los escenarios climáticos previstos, permite establecer desde la situación presente medidas de incidencia territorial, a través de la planificación y gestión espacial de usos del suelo, con una visión estratégica de adaptación.

Es esencial conocer y explorar las diferentes posibilidades de adaptación a los cambios desde el propio territorio considerando la función hidrológica del suelo y las necesidades hídricas de las diferentes cubiertas vegetales. En este sentido la Evapotranspiración se convierte en el término más condicionante del balance hídrico, a pesar del mayor interés dado en la planificación hidrológica a las precipitaciones y a los caudales. Se puede decir que **lo mismo que el Suelo es el término más olvidado de la planificación hidrológica, la Evapotranspiración es el término más olvidado del balance hídrico**. Tres términos esenciales del balance hídrico son la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (ETP), y la evapotranspiración real (ETR). **Si el cambio climático afecta a las dos primeras (P y ETP), el cambio en los usos del suelo afecta, sobre todo, al tercero (ETR).**

Es aquí donde adquiere mayor sentido la **Hidrología Forestal** como ámbito de conocimiento de la relación

Bosque-Suelo-Agua. Según Calder (2007), una de las mayores referencias en este dominio, aunque la hidrología forestal ha tenido importantes avances en los últimos años, el conocimiento científico no siempre ha alcanzado el dominio de la política forestal, y añade que los programas forestales suelen estar dirigidos, sobre todo, a aspectos relacionados con la biodiversidad, el secuestro de carbón, la producción de madera, los beneficios lúdicos... pero no siempre se tienen en cuenta los efectos sobre los recursos hídricos. El autor enfatiza el hecho de que la percepción que, sobre los beneficios aportados por los bosques, suele tener la opinión pública no en todos los ámbitos se corresponde con las evidencias científicas, poniendo el foco en la **función hidrológica de los bosques**.

La Figura 27 recoge un esquema conceptual para la adaptación al cambio climático desde el reconocimiento de los servicios hidrológicos, considerando el agua como eje de la adaptación y la gestión del territorio como causa añadida o de amortiguación de los efectos del cambio. La Figura 28 presenta la hoja de ruta para el establecimiento de los **Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH)**. El primer paso es su delimitación, teniendo en cuenta la naturaleza de la captación (aguas superficiales, subterráneas) y el ámbito espacial de los procesos que condicionan la presencia allí del recurso. Estos espacios deberían estar recogidos en el planeamiento territorial como de «**vocación**» hidrológica. El segundo es el diagnóstico sobre las implicaciones hidrológicas que tienen los usos y gestión actuales del suelo, sobre todo los usos no consolidados.

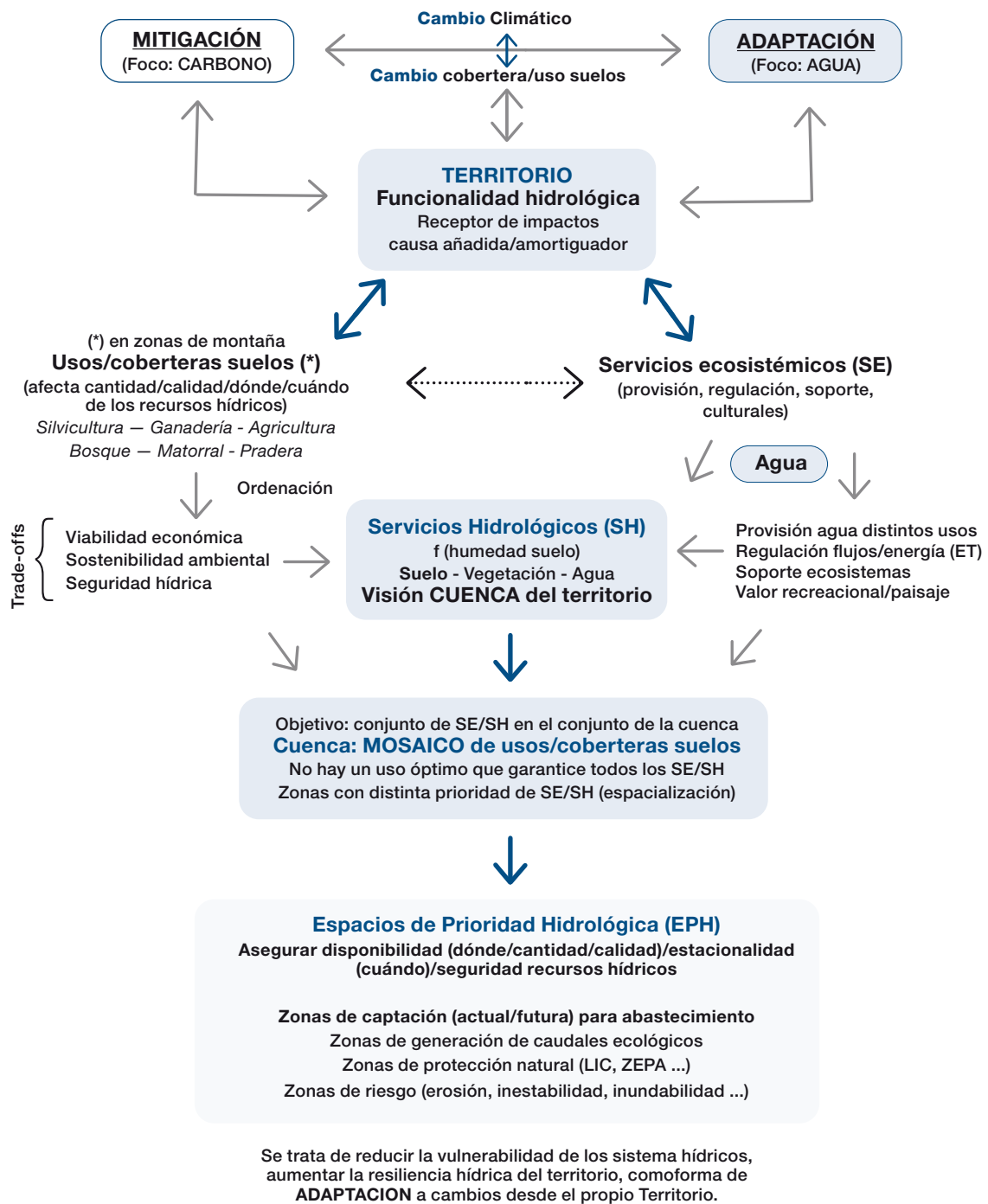


Figura 27. Esquema conceptual para la consideración de los Servicios Hidrológicos (SH) en la planificación territorial, mediante la identificación y actuación sobre Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH)²⁸.

28 <https://digital.csic.es/handle/10261/271868>

En este sentido, resulta preocupante en el espacio de Urdaibai la existencia en los EPH de plantaciones forestales de crecimiento rápido y ciclo corto de tala, ya que al alto consumo de agua por parte de los árboles jóvenes (lo que afecta a la cantidad del recurso) se une la pérdida de suelo (y consiguiente arrastre de sedimentos, con afección a la calidad), a veces muy importante, por la, en la práctica no infrecuente, inadecuada gestión forestal. En la necesaria transición hacia usos de la cuenca que garanticen la eficiencia hídrica de la vegetación y la regulación hidrológica del suelo (con visión de seguridad hídrica) es fundamental repensar la silvicultura (hidrología forestal) y dirigirla hacia un marco conceptual como sistema adaptativo complejo: árboles adecuados en los lugares adecuados y adecuadamente gestionados. En este sentido, las medidas de pagos por servicios ecosistémicos

que se proponen en el apartado 7 pueden ofrecer un marco socio-económico adecuado para garantizar la transición.

La adaptación es, ante todo, un proceso social, colectivo, desde y para la gente, desde y para el territorio. Hay mucha sabiduría popular no actualizada, hay mucha memoria histórica a recuperar sobre las implicaciones de los cambios en el territorio, y toda es necesaria para ayudar a entender el presente. Además, para avanzar hacia la resiliencia hidrológica del territorio, y de sus gentes, es necesario implicar a muchas personas del diverso conocimiento académico, que integrando saberes parciales ayuden en el diagnóstico certero y en las previsiones complejas, y, en consecuencia, informen la toma de decisiones.

ESPACIOS PRIORIDAD HIDROLÓGICA (EPH): Áreas de Captación

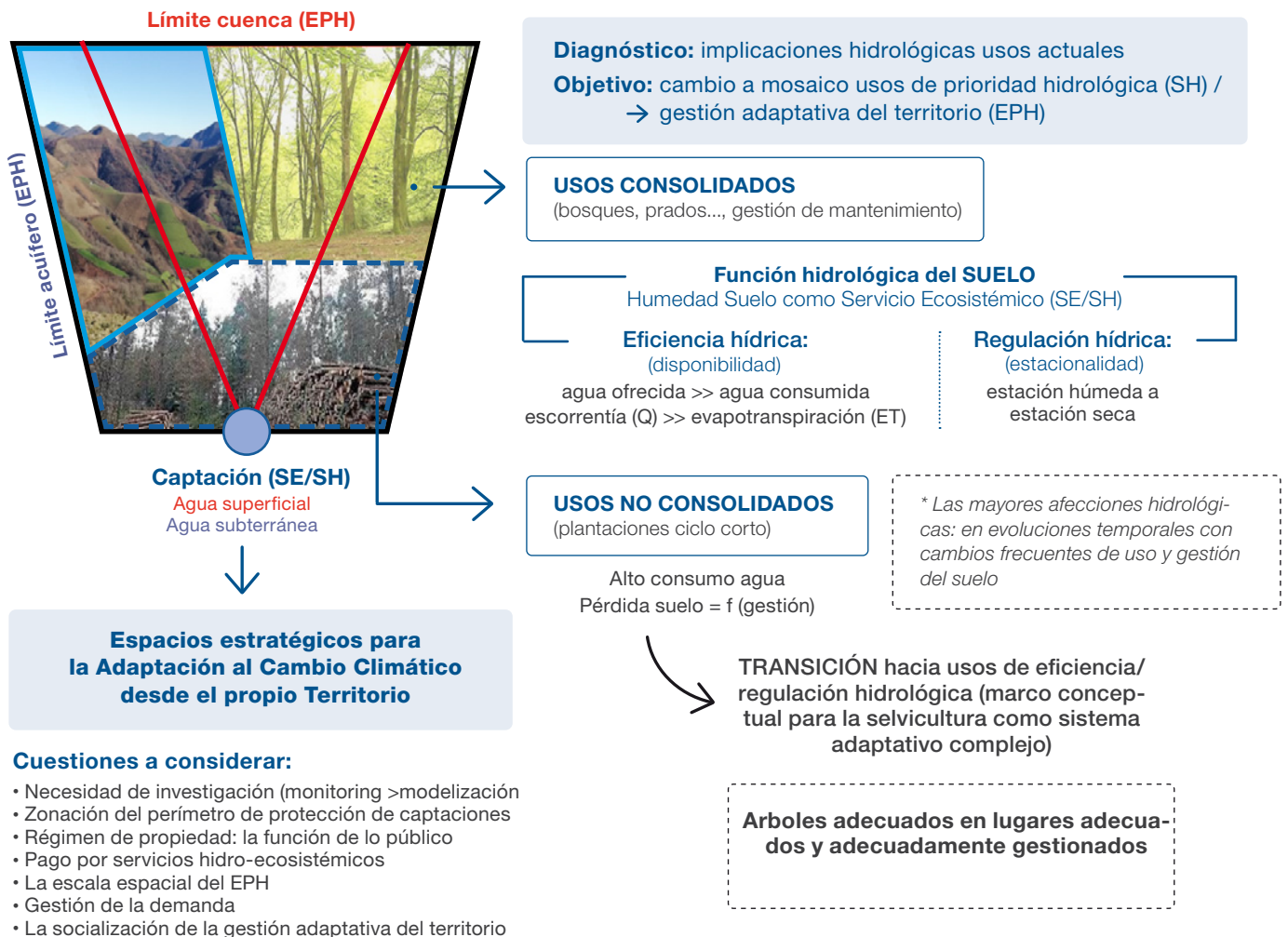


Figura 28. Hoja de ruta para el establecimiento de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH).

5.3. Zonas de protección de captaciones: metodología URBASO

Para el establecimiento de estas zonas se ha tomado como referencia la metodología del proyecto URBASO (LIFE20 ENV/ES/000687, 2021-2015; NEIKER, UPV/EHU, BC3 y BBUP/CABB: «Manual para delimitar y caracterizar las cuencas hidrográficas de captaciones de agua para abastecimiento de consumo humano»²⁹

El manual citado recoge los procedimientos para delimitar las cuencas hidrográficas de las captaciones de agua para abastecimiento y para calcular un conjunto de características de la cuenca, incluidas composición y uso del suelo o erosividad del mismo. Describe herramientas creadas expresamente para automatizar parcial o totalmente estos procedimientos utilizando sistemas de información geográfica de software libre y código abierto (en nuestro caso, buena parte de la información se ha tomado del ftp de Geoeuskadi³⁰. Tanto las herramientas como el manual servirán para aumentar

la estandarización, eficiencia y reproducibilidad de la caracterización de las cuencas hidrográficas dentro de los programas de monitorización, y, más en concreto, del establecimiento de zonas de protección. En la figura 29 se muestra el flujo de trabajo para desarrollar esta metodología.

De hecho, según la normativa vigente antes citada, todas las captaciones destinadas a consumo humano incluidas en el Registro de Zonas Protegidas deben disponer de su correspondiente **perímetro de protección** donde se delimiten las áreas a proteger, las medidas de control y se regulen los usos del suelo y las actividades a desarrollar para evitar afecciones a la cantidad y calidad del agua de las captaciones. Como ejemplo de aplicación de esta metodología se incluye el caso de la captación Mape 1. Esta captación se ubica en el término municipal de Busturia. La cantidad de agua captada es de 746,5 m³/día (URA Agentzia) y tiene la capacidad de abastecer a más de 5.000 personas asumiendo un consumo medio diario de 146 l/persona. La tabla 2 recoge el resumen de las características de agua, usos de suelo, tipos de suelo y clima de la cuenca de Mape 1, con la información disponible.

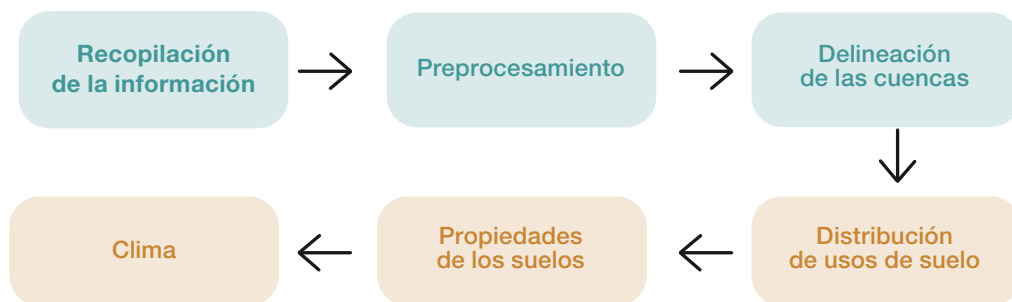


Figura 29. Flujo de trabajo para delimitar (verde) y caracterizar (marrón) las cuencas hidrográficas de las captaciones de agua superficial para abastecimiento de consumo humano.

²⁹ basozaintza@neiker.eus
³⁰ <ftp://ftp.geo.euskadi.eus/>

A partir de la delimitación espacial de la cuenca vertiente a la captación (lo que hemos llamado Espacio de Prioridad Hidrológica EPH) se delimitan las zonas de protección dentro de la cuenca. Así, aguas arriba de la captación se definen 4 zonas de protección: 25 metros a cada lado del río y tres bandas de 100, 200 y 400 metros a partir del punto de captación. La Figura 30 muestra el ejemplo de la captación Mape 1 (Busturia).

Esta propuesta de zonación de la protección se ajusta a lo expuesto en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental³¹ para la delimitación de los perímetros de protección. Pero la metodología URBASO va más allá, ya que pretende, además de delimitar las zonas de protección, **proponer medidas de gestión y de usos de suelo** con el objetivo de fomentar la resiliencia hidrológica del territorio (Tabla 2).

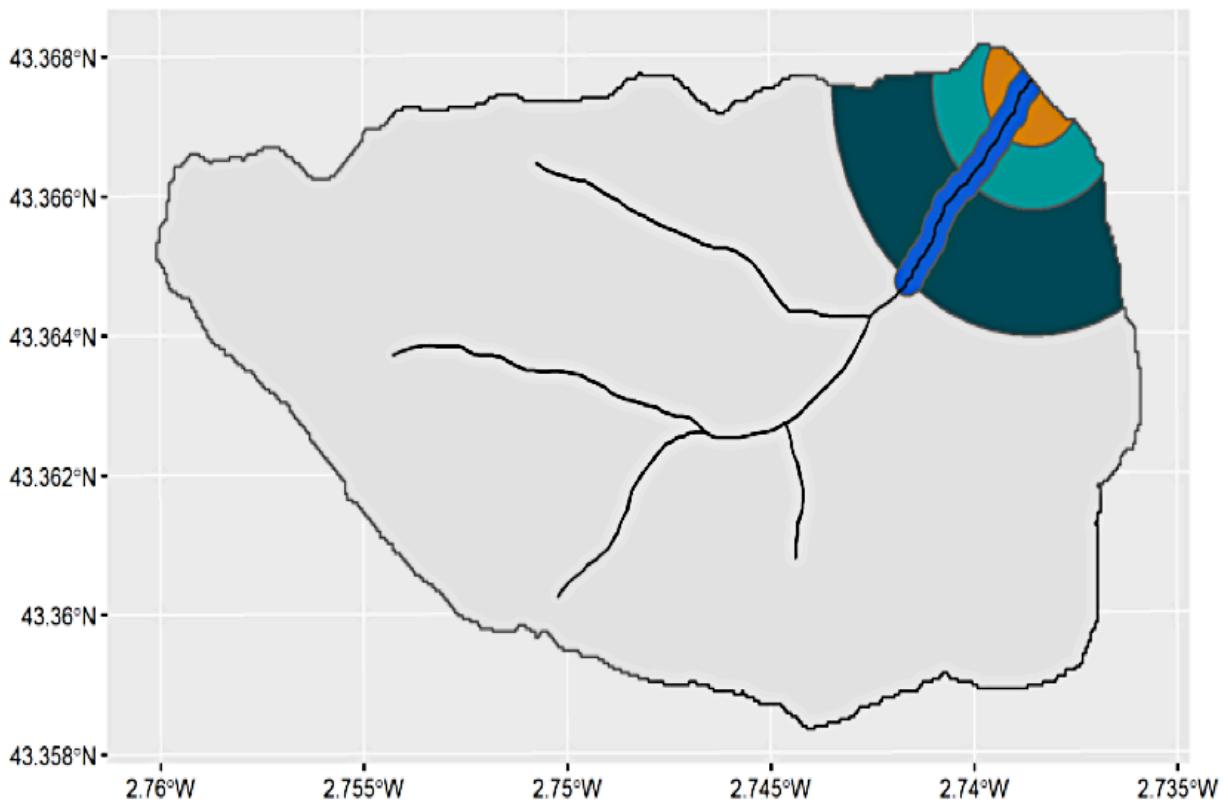


Figura 30. Delimitación de las zonas de protección de la cuenca Mape 1. Zona de ribera (en azul), zona de especial protección (en naranja), zona de protección intermedia (en verde oscuro) y zona lejana de protección (en turquesa).

31 <https://www.uragentzia.euskadi.eus/plan-hidrologico-tercer-ciclo-planificacion-2022-2027/webura00-01020102planrevision/es/>

| | UNIDADES | RESULTADO |
|---|---|---------------------|
| AGUA | | |
| Volumen de agua captada | m ³ /día | 746,5 |
| Abastecimiento | nº de personas | 7.465 |
| Sólidos en suspensión | mg/L | |
| Carbono orgánico disuelto | mg/L | |
| USOS DE SUELO | | |
| Bosque de plantación | % ocupado | 90,2 |
| Especie principal | Nombre | Pino radiata |
| Especie principal | % ocupado por la especie principal | 39,7 |
| Estado de masa principal | Nombre | Fustal |
| Estado de masa principal | % ocupado por el estado de masa principal | 48,5 |
| TIPOS DE SUELO Y SUS PROPIEDADES | | |
| Tipo de suelo principal | Edafotaxa según Taxonomía FAO, 1984 | Cambisol gléyico |
| Capacidad de campo | cm ³ agua/ cm ³ suelo | 0,36 |
| Punto de marchitez | cm ³ agua/ cm ³ suelo | 0,19 |
| Punto de saturación | cm ³ agua/ cm ³ suelo | 0,52 |
| Agua útil | cm ³ agua/ cm ³ suelo | 0,17 |
| Conductividad hidráulica | cm/hr | 0,35 |
| Clase de permeabilidad | | Moderadamente lenta |
| Susceptibilidad a la erosión | | Muy alta |
| CLIMA | | |
| Precipitación anual actual | mm | 1.430 |
| Precipitación anual futura | mm | 1.285 |
| Erosividad de la lluvia actual | MJ mm hm-2 h-1 yr-1 | 695 |
| Erosividad de la lluvia futura (2100) | MJ mm hm-2 h-1 yr-1 | 1.102 |

Tabla 2. Resumen de las características de agua, usos y tipos de suelo y clima de la cuenca de Mape 1.

06

Propuestas para la territorialización de la adaptación hidrológica

Como directrices de incidencia territorial hemos presentado la metodología PIRAGUA, que justifica la necesidad de delimitar Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH), y como medidas de adaptación la metodología URBASO, que justifica la zonación de los perímetros de protección. Con esta perspectiva, hemos delimitado la geometría de los EPH para todas las captaciones superficiales en el espacio Urdaibai

considerado en este estudio, y recogidas en el Registro de Zonas Protegidas³² al margen de su situación actual (activa, complementaria, emergencia). Los EPH están cartografiados por municipios y recogidos en la documentación presentada a Ihobe a la finalización de este proyecto, y, junto con ello, también se han delimitado las zonas de protección de las captaciones.

| ZONAS | DELIMITACIÓN | USO PERMITIDO | GESTIÓN | LIMITACIONES | OBJETIVO |
|------------------------------|------------------------------------|---|--|---|--|
| Especial protección | 0 - 100 m | Monte protector | Conservación (robledal, fresneda...) | No infraestructuras (pistas...) | Reducir carga: sedimentos, carbono orgánico disuelto |
| Protección Intermedia | 100-200 m | Producción maderera. Silvicultura próxima a la naturaleza. Cobertura forestal permanente | Diversidad genética adaptada al territorio | No infraestructuras, entresaca controlada | Evitar erosión y pérdida de suelo |
| Protección lejana | 200-400 m | Como en la de protección intermedia con infraestructura viaria para el aprovechamiento, con condiciones | Diversidad genética adaptada al territorio | Entresaca controlada | Evitar erosión y pérdida de suelo |
| Ribera | Buffer 25 m ambos lados del arroyo | Bosque de ribera | Conservación (aliseda, fresneda...) | No infraestructuras | Regular. Hidromorfología cauce, temperatura agua |

Tabla 3. Buffers de protección propuestos para la zonación y el perímetro de protección de las captaciones (metodología URBASO), y características asignadas.

32 <https://www.geo.euskadi.eus/geobisorea>

La Figura 31 muestra la delimitación espacial de esos EPH. Son 7722 Ha, lo que supone un 35-40% del territorio. Estos espacios actualmente están ocupados por plantaciones de coníferas y eucaliptos en un 68 %, un 17 % corresponde a bosque mixto atlántico, frondosas, y vegetación arbustiva, y un 13 % son prados y pastos. La superficie restante es de cultivos y ocupación urbana. Es evidente la importancia que adquiere la gestión forestal de las plantaciones. La delimitación consiste en señalar sobre una base cartográfica la cuenca drenante a la captación. Se ha hecho sobre el catastro (con código de polígonos y parcelas) y se presenta por municipios para que sea conocida en el ámbito municipal y considerada en el planeamiento territorial.

A modo de ejemplo, la Figura 32 presenta el caso de Muxika (sólo el mapa, sin las tablas con la información catastral), con el EPH y las zonas de protección. Los municipios de Urdaibai que tienen captaciones, o que estando fuera de la Reserva cuentan con zonas de prioridad o protección de captaciones de dentro de Urdaibai son: Ajangiz, Arratzu, Arrieta, Busturia, Errigoiti, Forua, Gernika, Kortezubi, Mendata, Munitibar y Muxika.

La zonación interna propuesta para el perímetro de protección (metodología URBASO) recuerda las «zonas de salvaguarda» del PH en vigor, «en tanto no se delimite el perímetro de protección», delimitadas por una distancia única, a partir del punto de captación de aguas superficiales, de 100, 200 o 500 m en función de la población servida. El problema práctico es la no delimitación del propio perímetro, y la falta de zonación interna de la zona de salvaguarda, cuando es evidente que la distancia al punto de captación es un criterio hidrológico para asegurar la cantidad (en este aspecto es más importante el conjunto del Espacio de Prioridad Hidrológica) y, sobre todo, la calidad del recurso en la captación.

Nuestra propuesta de zonación interna, más la protección de ribera (Figura 30), aporta más concreción al esquema de protección y, aunque hasta cierto punto es generalista, ofrece criterios añadidos de uso, gestión y limitaciones para cada zona delimitada (Tabla 3). Estos aspectos sirven de aportación de este proyecto KLIMATEK al cumplimiento del RD 3/2023 que establece como novedad «el enfoque basado en el riesgo» y la «evaluación y gestión del riesgo de las zonas de captación» .

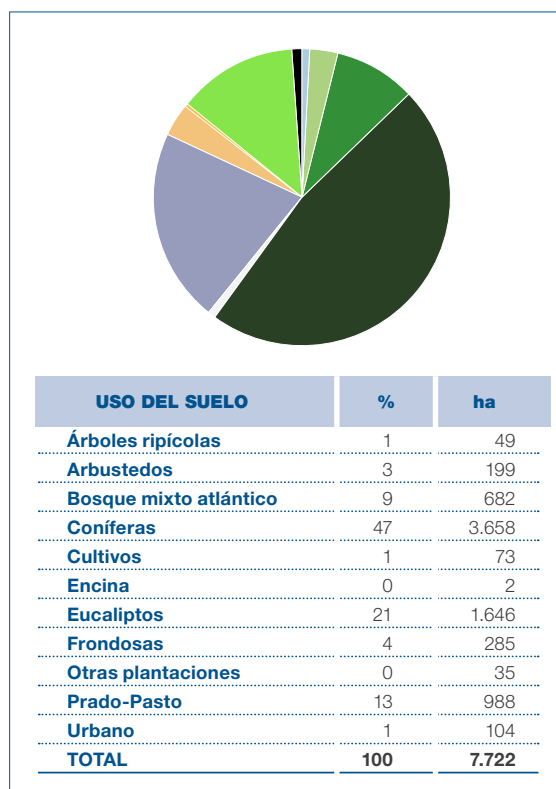
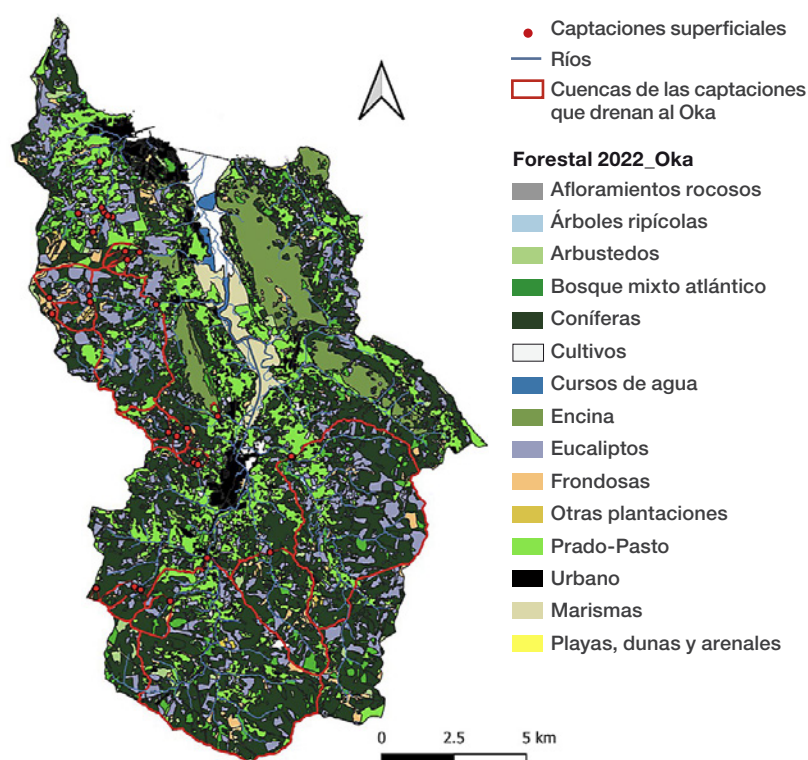


Figura 31. Delimitación de las cuencas vertientes (en rojo) a las captaciones de aguas superficiales de Urdaibai, recogidas en el Registro de Zonas Protegidas del PH. Se incluye la distribución de usos del suelo (Mapa Forestal del País Vasco) y la extensión (Ha) y porcentaje que ocupan las cuencas vertientes delimitadas (EPH).

Pensamos que la consideración a corto plazo de esta zonación en la planificación hidrológica y territorial supondría un avance importante en la gestión hidrológica del territorio para la adaptación, aunque eso no quita que a futuro haya que ir concretando más todos estos aspectos, siempre en base a las evidencias derivadas del seguimiento de procesos. Al fin y al cabo, para adaptarnos a los cambios en marcha (climático y de ocupación del suelo) hay que ir adaptando las propias normas, incluso a mayor rapidez.

Todas las zonas de protección consideradas en la tabla 3 han sido cartografiadas para todas las captaciones de aguas superficiales recogidas en el Registro de Zonas Protegidas (figura 3), junto con la cartografía de los Espacios de Prioridad Hidrológica, y todo ello sobre la base catastral, para facilitar a los entes municipales la identificación de polígonos y parcelas de las diferentes zonas de protección. La Figura 33 muestra la geometría de los perímetros de protección (400 m) de todas esas captaciones, junto con la distribución de los usos del suelo. Todos los mapas, y las tablas catastrales que los acompañan se han presentado a Ihobe por municipios.

Según la tabla de la figura, el área ocupada por la zona de protección lejana (400 m) supone un total de 328 Ha, un 4,2 % del área de los Espacios de Prioridad Hidrológica, y un 15-17 % del área total de la Reserva. Estamos hablando de garantizar en el corto plazo, a través de una adecuada gestión forestal adaptativa, la funcionalidad hidrológica de esa parte del territorio, a la espera de lo que pudiera deparar una consideración a más largo plazo de los usos y gestión del suelo en el conjunto de los EPH. A la vista de los datos, un 58 % de superficie de las zonas de protección está ocupado por plantaciones, coníferas y eucaliptos, un 20 % es bosque, sobre todo mixto atlántico y frondosas, y otro 20 % prados y pastos.

En comparación con los porcentajes en EPH (figura 31), disminuye la extensión de plantaciones (de 68 a 58 %), aumenta la de bosque (de 17 a 20 %) y aumenta más la de prados y pastos (de 13 a 20 %). A tener en cuenta la **amplia ocupación de plantaciones en el entorno de los puntos de captación**, con los efectos perturbadores que en la práctica su gestión conlleva, en cantidad, calidad y estacionalidad del recurso. A señalar la amplia presencia de pastos y prados que, a falta de evidencias más firmes pueden tener efecto positivo sobre esos aspectos del recurso.

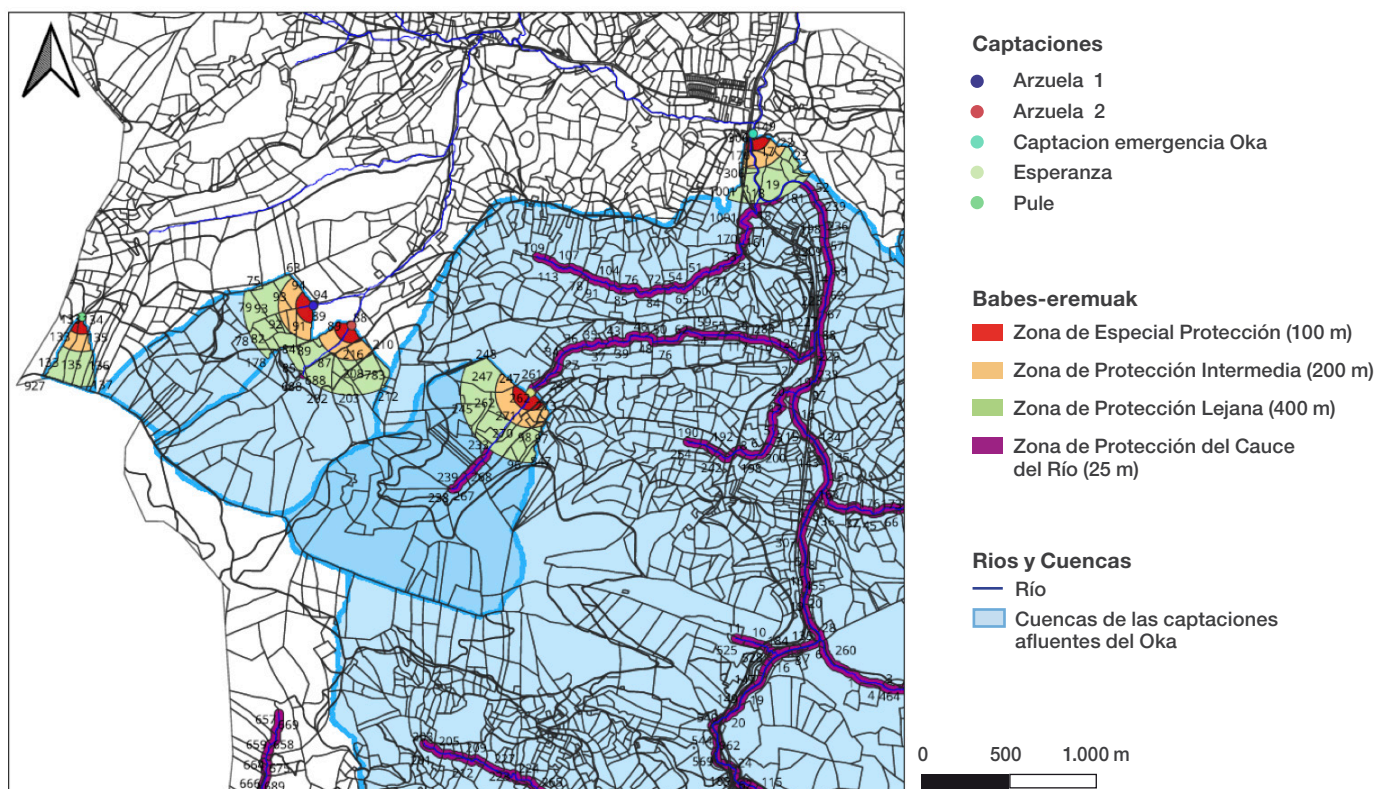


Figura 32. Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH; cuenca, en azul) de las captaciones de Muxika y sus zonas de protección (URBASO).

6.1. Metodología de seguimiento de cambios en demarcaciones hidrográficas

La Figura 34 recoge los aspectos a considerar en un estudio de impactos (el ámbito estuarino es aportación de AZTI). Hay que tener en cuenta que la modelización, si bien es necesaria, nunca va a aportar resultados de más calidad que la de los datos de entrada al modelo. La apuesta está en la cantidad y calidad de esos datos, que para los recursos hídricos pasa por contar con series de datos en continuo de las variables básicas más representativas de los procesos: climáticos (P, T) e hidrológicos (Q, caudales, indicador de cantidad; CSS, concentración sólidos en suspensión, indicador general de calidad, o la turbidez como parámetro sustitutivo, incluyendo su tendencia estacional), que por esta razón vienen marcadas con un * en la figura.

Es en las variables hidrológicas donde debe centrarse el esfuerzo de monitorización, en puntos representativos

de la cuenca. De hecho, a diferencia de geología y relieve, que son «información fija», y que cuentan con cartografías, la de los suelos (espesor, textura, estructura, tipo y estado de la vegetación ...), varía con su uso y gestión, sobre todo por la actividad forestal, ajena con demasiada frecuencia a sus implicaciones edáfico-hidrológicas. Los suelos necesitan de una cartografía representativa de sus propiedades, incluidas las hidrológicas, y de una evaluación temporal que permita detectar tendencias en las propiedades, que podrían ir a favor o en contra de la adaptación territorial. Recordar que los cambios en curso no sólo se refieren al cambio (sobreimpuesto y de escala global) sino también a los que afectan a los usos del suelo (escala local y consecuencia de nuestras decisiones actuales).

«Si los futuros **escenarios climáticos** derivados de Modelos de Circulación General (MCG), con el downscaling, varían mucho de un modelo a otro, la variabilidad es mayor en los **escenarios hidrológicos** esperables (caudales medios, bajos y altos), ya que a la incertidumbre de los MCG se añade la de los modelos hidrológicos utilizados en predicción». Tomado de nuestro proyecto EGHILUR (KLIMATEK 2016)³³

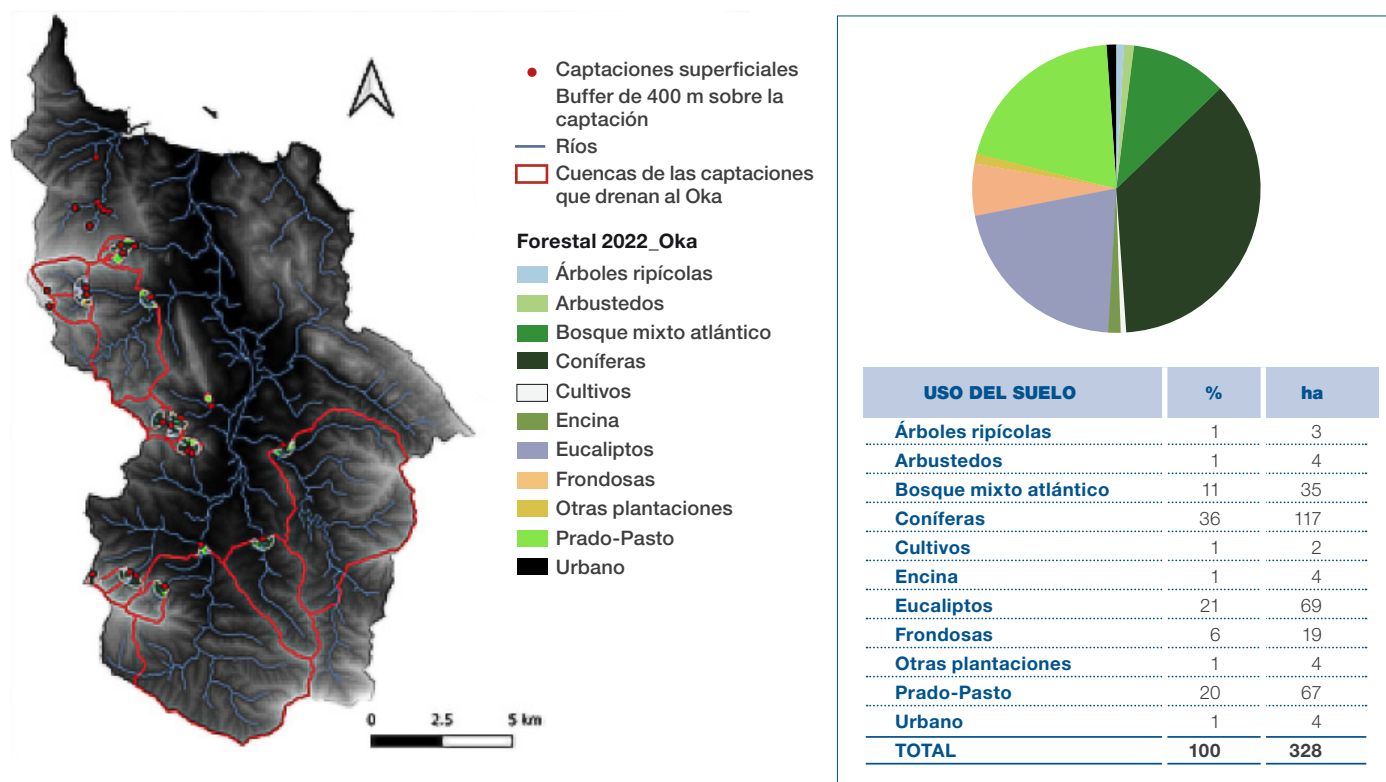


Figura 33. Zonas de protección de 400 m de las captaciones de aguas superficiales del espacio de Urdaibai considerado. Se incluye la extensión (Ha) y el porcentaje ocupado por los usos del suelo (Mapa Forestal del País Vasco). Se muestran también los EPH.

33 https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/eghilur/es_def/adjuntos/02KLIMATEK.pdf

07

Propuestas para Pago por Servicios Hidrológicos (PSH)

Los lineamientos generales que se proponen para el diseño de un esquema de **Pago por Servicios Hidrológicos (PSH)** para Urdaibai son los siguientes: En primer lugar, debe fundamentarse en un proceso de legitimación normativa basado en el establecimiento de un acuerdo institucional de gobernanza entre los actores sociales, en torno a una estrategia consensuada de gestión del territorio siguiendo criterios hidrológicos. En segundo lugar, un esquema de PSH debe articularse mediante un marco conceptual integrado por un conjunto de principios y criterios tanto ambientales (condicionalidad, adicionalidad) como sociales (valores locales, equidad) que deben contribuir a facilitar su efectividad y sostenibilidad a largo plazo. En tercer lugar, este marco conceptual debe desarrollarse socialmente por medio de un marco ético-normativo que tenga como valor fundamental **el cuidado del territorio**. Es decir, un entorno colaborativo capaz de legitimar, garantizar y fiscalizar los derechos y obligaciones necesarios para desarrollar el cambio transformador deseado de una forma justa y equitativa.

7.1. Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE)

Existen diferentes enfoques y teorías sobre el concepto de **Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE)**. En términos generales, se define como un

mecanismo económico, normalmente apoyado en un determinado sistema regulatorio, que trata de internalizar las externalidades ambientales positivas asociadas a la provisión efectiva de determinados servicios ecosistémicos (SE), como, por ejemplo, la protección de las cuencas hidrográficas, la biodiversidad o el secuestro de carbono (Porras, *et al.*, 2008). La primera aproximación teórica al concepto de PSE parte de un enfoque basado en el mercado que consiste en una transacción voluntaria entre un eventual «comprador» dispuesto a adquirir un servicio ecosistémico bien definido, siempre y cuando el «vendedor» o, proveedor del servicio, garantice su prestación (Wunder, 2005).

Expresado desde un punto de vista más pragmático, un esquema de PSE debe implicar necesariamente, como objetivo inmediato, el servir de incentivo a la provisión de determinados SE normalmente mediante la adopción de un conjunto de prácticas sostenibles (Muradian *et al.*, 2010). Sin embargo, alcanzar los objetivos deseados, no depende solamente del grado de participación y cumplimiento por parte de los proveedores, sino también, de un adecuado y riguroso diseño del propio esquema de incentivos económicos o pagos, a partir del conocimiento de las condiciones particulares de los actores y del área de implementación (Porras *et al.*, 2013), es decir, del espacio socio-ecológico con sus interrelaciones complejas y relaciones de poder.

Este enfoque inicial se ha ido progresivamente ampliando y desarrollando en la práctica reflejándose simultáneamente en la literatura. De esta manera, se han incorporado nuevos conceptos, condicionantes y características como la condicionalidad, adicionalidad, además de una estructura de pagos cada vez más compleja. Ahora bien, además de estas características relacionadas con el concepto de PSE, su puesta

en práctica requiere de la revisión previa de un conjunto de factores externos, tanto normativos como institucionales. Estos factores determinan en gran medida no sólo la eficiencia/eficacia del incentivo económico propuesto, sino también, los efectos a nivel social, político e institucional, en términos de equidad y legitimidad social (Muradian *et al.*, 2010; Pascual *et al.*, 2010; Pascual, *et al.*, 2014).

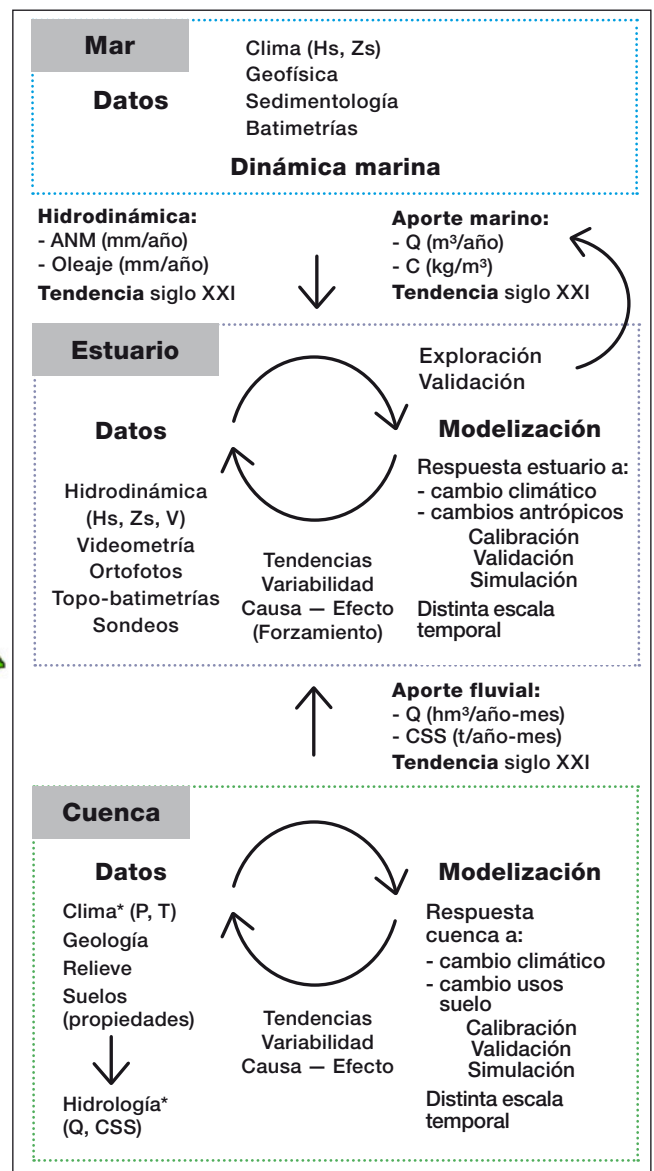
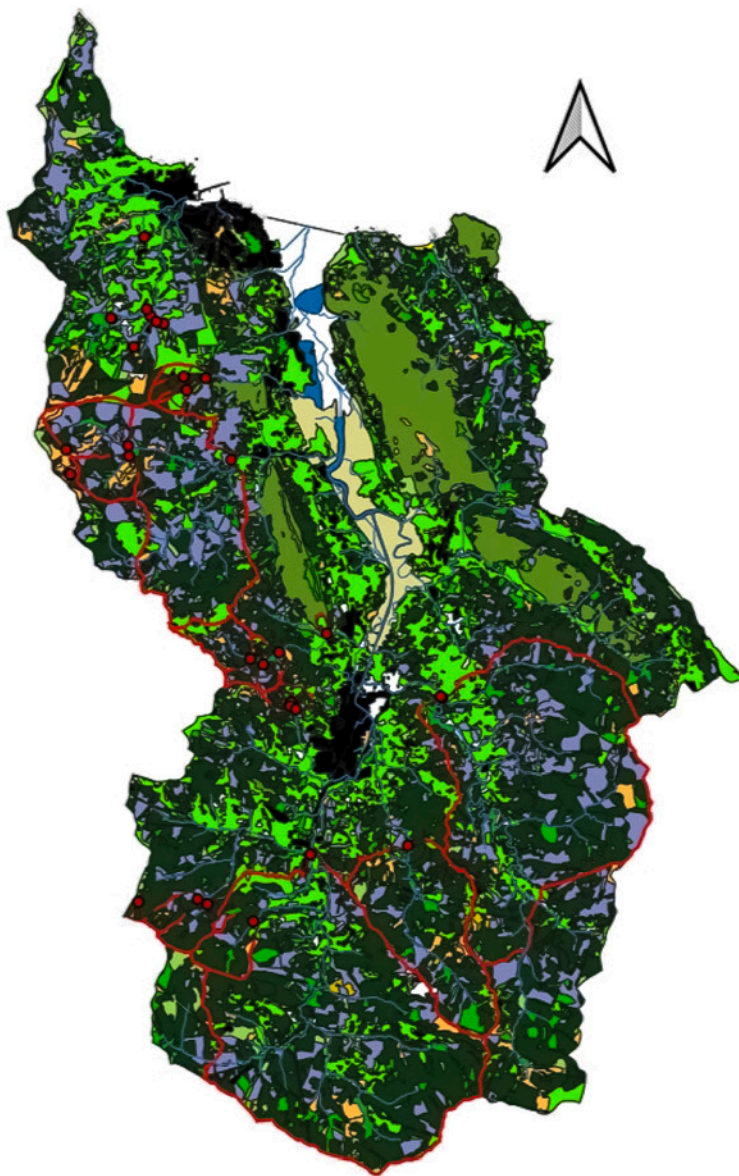


Figura 34. Esquema de los aspectos a considerar en el estudio de los impactos de los cambios (climático y usos del suelo) sobre los recursos hídricos en una Demarcación Hidrográfica (cuenca fluvial y estuario asociado). Es un proceso iterativo de datos (diferente escala temporal) y modelización (conjunto de modelos), para diferentes escenarios climáticos.

7.2. Enfoque metodológico para evaluar los PSH

Un objetivo del presente proyecto ha consistido en evaluar una propuesta integral de gestión adaptativa del territorio basada en la priorización estratégica de los servicios hidrológicos (SH) en el ámbito de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (RBU). Dentro de este planteamiento, se trata de evaluar un conjunto de directrices y lineamientos para el diseño de un esquema de Pagos por Servicios Hidrológicos (PSH) como una herramienta institucional clave de apoyo a la implementación de directrices de ordenamiento territorial sostenible basadas en la gestión hidrológica integral en la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (RBU).

Se ha propuesto un enfoque metodológico dividido en tres etapas. En primer lugar, una revisión de literatura de los esquemas de PSH y los Fondos de Agua (FA). En segundo lugar, se realiza una aproximación cuantitativa basada en el cálculo del valor de rentabilidad económica de las plantaciones de pino insignis (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Este cálculo permitirá estimar un rango respecto a los costes de oportunidad que requerirían (como umbral) los productores forestales o propietarios de la tierra para aceptar un cambio sostenible en su modelo de gestión forestal. En tercer lugar, se proponen un conjunto de lineamientos clave para el diseño de un esquema de PSH para la RBU.

Revisión de literatura

Los objetivos específicos de la revisión de literatura sobre proyectos de PSH y FA son: (1) Identificar los principales patrones y tendencias actuales que presentan estos sistemas de incentivos basados en cuencas hidrográficas, (2) evaluar su impacto en la provisión de SH, (3) establecer elementos clave para el diseño de un esquema de PSH para Urdaibai. Metodológicamente, la revisión se ha realizado en dos etapas consecutivas: (1) Se ha explorado la base de datos académica indexada Web of Science [WoS] ingresando palabras clave y operadores booleanos. (2) Se ha consultado un conjunto determinado de artículos de revisión de literatura centrados en el análisis de estudios de caso de los FA y, además, se han evaluado los proyectos en curso de la plataforma Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua³⁴

Los resultados de la revisión de literatura evidencian la relevancia creciente a nivel global de los esquemas de PSH y los FA en la gestión integral de cuencas hidrográficas. En términos generales, los programas de ámbito local o regional demuestran ser efectivos en el sentido de que la introducción de un determinado esquema de incentivos ha contribuido decisivamente, en primer lugar, a inducir un cambio en el comportamiento de los propietarios de terrenos hacia prácticas de manejo sostenibles (condicionalidad). En segundo lugar, a que estas acciones hayan generado en la práctica cambios netos positivos en la provisión de servicios hidrológicos (adicionalidad). Sin embargo, la experiencia demuestra que el grado de cumplimiento de sus objetivos ambientales y sociales va a depender de dos factores principales a considerarse en la fase de diseño. En primer lugar, la inclusión de estrategias de participación activa y equitativa de los actores sociales en los procesos de toma de decisiones. En segundo lugar, el grado de vinculación normativa e institucional con la gestión del recurso hídrico y la cuenca hidrográfica.

Aproximación económica a un esquema de Pagos por Servicios Hidrológicos (PSH)

A continuación, se presentan los cálculos de valoración económica para una propuesta de PSH para la RBU. En este caso, se aportan los resultados de una primera etapa que consiste en un cálculo preliminar aproximado a un pago mínimo que debería asignarse a los propietarios de terrenos forestales. A cambio, se deben comprometer a sustituir las plantaciones forestales alóctonas por especies autóctonas, con base en una propuesta previa de ordenación adaptativa del territorio fundamentada en criterios hidrológicos. Se trata, por tanto, de calcular, los costes de oportunidad derivados de la pérdida de beneficios económicos como consecuencia del cambio adaptativo en el uso del suelo. Para proporcionar una compensación efectiva o adecuada, los pagos a los propietarios de los terrenos forestales deben exceder o, al menos, cubrir los costes de oportunidad de los usos previstos de la tierra sustituidos por aquellos alternativos especificados dentro de un esquema de PSH (Engel *et al.*, 2008). El esquema teórico se representa en la Figura 35. En el escenario forestal actual dominado por plantaciones de pino y eucalipto, los propietarios de las explotaciones forestales perciben unos beneficios económicos derivados de la comercialización de la madera. Sin embargo,

34 <https://www.fondosdeagua.org/es/>

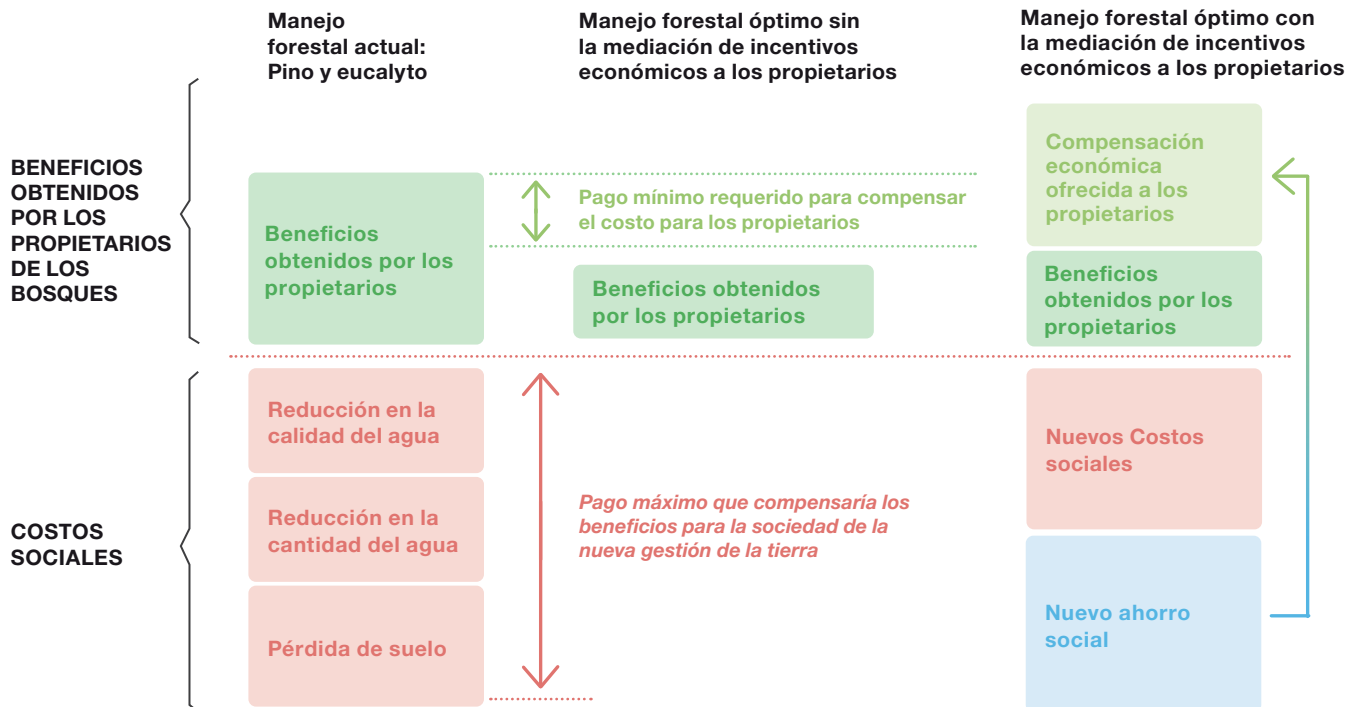
esta actividad genera un conjunto de externalidades negativas o costes sociales, en forma de costes ambientales, dentro de los cuales, se han destacado en esta ocasión solamente los costes «hidrológicos».

En principio, la mayor parte de estos costes «hidrológicos» correspondería al concepto de coste ambiental que menciona la Directiva Marco del Agua (DMA), el cual, en teoría, debería a su vez ser recuperado por la sociedad en forma de internalización dentro de la gestión del servicio del agua. Sin embargo, estos costes hidrológicos no deberían ser asumidos de manera exclusiva por los usuarios, sino por medio del financiamiento complementario de medidas preventivas o correctivas específicas. Tal como lo recomienda, a su vez, la propia DMA (la normativa hidráulica posterior lo enfatiza con mayor firmeza), asumiendo que estas medidas preventivas deben implicar una proyección ambiental, al margen del sistema de recuperación de costes.

Para aproximarse a un valor teórico de referencia que se corresponda a ese pago mínimo requerido para

compensar a los propietarios de las explotaciones, el procedimiento consistiría en conocer la rentabilidad actual anual de las plantaciones de pino y eucalipto. Para ello, se realizó un ejercicio teórico simplificado basado en un modelo de tratamiento silvícola convencional para ambas especies considerando una propiedad privada localizada en la provincia de Bizkaia. Existen muchas variables que intervienen a la hora de calcular tanto los ingresos esperados como los costes de implementación y manejo de una explotación forestal. Por el lado de los ingresos, los precios presentan una estructura compleja según la especie dependiendo de factores como la diferencia de valor del destino final de la madera o su volumen medio, por ejemplo, en el caso del pino (m³ a la cuarta o a la real/pie). Por el lado de los costes, dependiendo de si el terreno es o no es mecanizable en su totalidad, si tiene o no elevada pendiente o pedregosidad, la productividad media según la calidad de la estación, etc.

En primer lugar, los cálculos realizados se cuantifican según los precios de mercado actual (año 2023) tanto para las actividades de tratamiento silvícola realizadas



Fuente: adaptado de Pagiola y Platias (2007) y Engel et al. (2008)

Figura 35. Representación de un esquema teórico de PSH dirigidos a propietarios privados de terrenos forestales a cambio de una gestión forestal sostenible

en el pasado como los correspondientes a la corta final. Es decir, se trata de valores actualizados de ingresos y costes a final de turno sin cuantificar la evolución del Índice de Precios al Consumidor (IPC). En segundo lugar, se computan valores aproximados de ingresos y costes. En tercer lugar, para los precios finales de venta de la madera se toman como referencia los precios en pie.

Pinus radiata

En el caso de una explotación de *Pinus radiata* se asume una densidad final por hectárea en el momento de la corta final de 300 pies/ha, a partir de una repoblación inicial de 1100 pies/ha. Se considera un turno o ciclo de corta de 33 años. Es decir, se estima una productividad promedio anual entre «adecuada» y «óptima» de un rango aproximado de 10-15 m³/ha por año. Por lo tanto, no se considera el efecto de la banda marrón. Estos valores se aplican a un modelo silvícola estándar compuesto por dos clareos y dos podas (baja y alta), además de las actividades de mantenimiento y desbroces. El cálculo aproximado de los ingresos correspondientes a la corta final se realiza considerando

los tres posibles destinos de la madera aserrada en función de su calidad y grosor. Estos destinos principales son mobiliario, embalaje y papel a los que se les asigna un porcentaje de distribución aproximado. Finalmente, se obtiene un valor de rentabilidad anual aproximado de 397 €/ha. La tabla 4 sintetiza los valores que corresponden a una explotación forestal de *Pinus radiata* calculados en euros del año 2023.

Eucalyptus globulus

En este caso se presentan los datos de un ejercicio teórico de rentabilidad económica de una plantación de *E. globulus* Labill proveniente de una repoblación, es decir, de una corta final de primer turno. La densidad inicial corresponde aproximadamente a unos 1.100 pies/ha. En general, se trata de una densidad destinada a la producción de celulosa. Respecto a los tratamientos silvícolas, y teniendo en cuenta que el destino fundamental de la madera de *E. globulus* es la celulosa (trituración), las densidades de plantación suelen ser definitivas y no se aplican claras, y las podas raramente se realizan, ya que la especie tiene poda natural intensa.

| AÑO | TRATAMIENTO SILVÍCOLA | CANTIDAD EXTRAÍDA (pies/ha) | COSTES (€/ha) | DESTINO DE LA MADERA | INGRESOS (€/ha) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|---------------|--|-----------------|
| 0 | Repoblación (1.100 pies/ha) | | 2.500 | | |
| 1-9 | Mantenimiento y desbroces | | 2.000 | | |
| 10 | Poda baja y clareo | 300 | 500 | | |
| 18 | Poda alta 2º clareo | 500 | 500 | Madera de embalaje, palé | 416 |
| 33 | Corta final | 300 | | Muebles (20%) Embalaje (35%) Papel (45%) | 18.200 |
| | | Total | 5.500 | | 18.616 |
| | | Beneficios totales | | | 13.116 |
| | | Rentabilidad anual | | | 397,45 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Rentabilidad financiera de una explotación forestal de *pinus radiata* en €/ha de fin de turno (año 2023)

En la práctica, por tanto, los principales cuidados de la especie se centran, sobre todo, en la fertilización y en la eliminación de la competencia. La fertilización generalmente se realiza en el momento de la plantación, de la reposición de marras (en propietarios privados) y de la propia eliminación de la competencia por matorral. Las diferencias principales se derivan del proceso de desbroce de la maleza y preparación del terreno para la plantación. En esta tarea intervienen varios factores condicionantes, entre ellos, la pendiente, el tipo de roca y las dificultades de drenaje. Como se observa en la tabla 5, estos factores, entre otros, repercuten en diferencias en los costes de operación. Aunque el tratamiento silvícola del eucalipto no incluye ni claras ni podas, se ha introducido una práctica diferenciadora que influye en la rentabilidad final de la explotación forestal. Se trata de una fertilización añadida junto con una labor de desbroce mecanizado. Esta actividad, aunque conlleva un coste de operación, repercute en un incremento de la productividad final. En este caso particular, se produce un incremento del volumen final de madera de 280 esteros (modelo A) a 350 esteros (modelo B).

Con respecto a la valoración económica de un esquema de PSH basado en los costes de oportunidad de las explotaciones de pino y eucalipto, se observan diferencias muy significativas en los datos de rentabilidad. Este hecho dificulta el establecimiento de conclusiones robustas. El sector de la madera presenta de entrada una dificultad intrínseca a la

hora de cuantificar los costes e ingresos de su actividad económica. En segundo lugar, existen múltiples factores coyunturales y contextuales. En tercer lugar, los métodos de cuantificación no suelen ser homogéneos. En cuarto lugar, la existencia de un amplio sistema de subvenciones institucionales dirigidas a las plantaciones alóctonas, representa un factor que, de alguna forma, oculta tanto la viabilidad real del sector como el grado de identificación o aceptabilidad real por parte del propietario frente a posibles alternativas forestales más sostenibles.

Para poder establecer un rango preliminar de rentabilidad aproximativo que pueda servir de referencia para establecer un incentivo mínimo basado en los costes de oportunidad de una explotación de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, se requiere de un trabajo de campo más extenso y detallado. Los resultados preliminares sitúan un rango estimado de un pago mínimo que refleje los costes de oportunidad de aproximadamente 350-400 €/ha anuales para explotaciones de *Pinus radiata* y de aproximadamente 350-450 €/ha anuales para *Eucalyptus* sp. Sin embargo, estos valores deben ser evaluados por medio de un trabajo de campo más extenso y riguroso realizado en las parcelas pertenecientes al proyecto. Dadas las diferencias que se espera obtener entre las rentabilidades de las parcelas, debería plantearse la opción de un modelo de pagos diferenciados.

| AÑO | TRATAMIENTO SILVÍCOLA | CANTIDAD EXTRAÍDA (pies/ha) | COSTES (€/ha) | DESTINO DE LA MADERA | INGRESOS (€/ha) |
|-----------------------------------|---|-----------------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| 0 | Desbroce de la maleza MANUAL, preparación del terreno mecanizada, fertilización, plantación manual (1) | 1.100 | 2.900 | | |
| 0 | Desbroce de la maleza DESBROZADOR, preparación del terreno mecanizada, fertilización, plantación manual (2) | 1.100 | 2.700 | | |
| 0 | Desbroce de la maleza con RASTRILLO, preparación del terreno mecanizada, fertilización, plantación manual (3) | 1.100 | 2.400 | | |
| 3 | Fertilizante con Magnesio (Mg), Fósforo (P) y Nitrógeno (N) | | 170 | | |
| 7 | Desbroce de la maleza mecanizado y fertilización (Rendimientos modelo B) | | 900 | | |
| 15-16 | Corta final (280 estéreos) a 29 € / estéreo (A) | 850 | | Papel (100%) | 8.120 |
| 15-16 | Corta final (350 estéreos) a 29 € / estéreo (B) | 850 | | Papel (100%) | 10.150 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo A1 | | | | | 5.050 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo A2 | | | | | 5.250 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo A3 | | | | | 5.550 |
| RENTABILIDAD ANUAL A1 | | | | | 337 |
| RENTABILIDAD ANUAL A2 | | | | | 350 |
| RENTABILIDAD ANUAL A3 | | | | | 370 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo B1 | | | | | 6.180 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo B2 | | | | | 6.380 |
| TOTAL BENEFICIOS modelo B3 | | | | | 6.680 |
| RENTABILIDAD ANUAL B1 | | | | | 412 |
| RENTABILIDAD ANUAL B2 | | | | | 425 |
| RENTABILIDAD ANUAL B3 | | | | | 448 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Rentabilidad financiera de una explotación forestal de *Eucalytus globulus* en €/ha de fin de turno (año 2023)

7.3. Elementos clave para un esquema de PSH en la RBU

A partir de las propuestas de directrices dirigidas al establecimiento de los Espacios de Prioridad Hidrológica (EPH, Apartado 5.2) y de las correspondientes medidas de zonación interna de los perímetros de protección con base en la metodología URBASO (Apartado 5.3), se propone a continuación una hoja de ruta para el establecimiento de un esquema de PSH para el espacio Urdaibai (Figura 36). El proceso se ha dividido en cinco fases principales que se definen en los elementos claves que se detallan a continuación y cuyos aspectos operacionales relevantes se sintetizan en la figura.

Finalmente, se discuten un conjunto de conclusiones en forma de principios, recomendaciones y elementos clave a partir del análisis de la evidencia reportada en la revisión de literatura de los programas de PSH y de los FA. Para ello, se asumen tanto las limitaciones metodológicas intrínsecas de este trabajo, así como el sesgo aparente entre la teoría y las evidencias reportadas en los proyectos (Martín-Ortega *et al.*, 2013).

1. El diseño de un esquema de PSH debe fundamentarse en un proceso previo de legitimación normativa. Es decir, en el establecimiento de un acuerdo institucional que esté basado en una normativa regulatoria de gestión del territorio incorporando criterios hidrológicos. Acuerdo que, además, facilite el reparto justo y equitativo de unos incentivos económicos que deben garantizar, en primer lugar, la viabilidad económica de las explotaciones forestales. La aceptación de este marco normativo debería, a su vez, facilitar la legitimidad social (en términos de aceptabilidad de diferentes sectores sociales clave) necesaria para implementar eventualmente los modelos forestales recomendados.
2. La implementación de los mecanismos de monitorización biofísica necesarios para demostrar la adición de los servicios hidrológicos. Este hecho implica el establecimiento de líneas de base sólidas y la modelización de los servicios hidrológicos sin proyecto (o business as usual). Este propósito no debe entenderse exclusivamente en términos de demostrar, a nivel interno del proyecto, la eficacia del esquema de PSH y de sus acciones complementarias. Además, debe asumirse como un asunto de justicia y transparencia hacia los proveedores y los beneficiarios de los SH, que, por ejemplo,

dado el esquema de financiación del programa PSH, podrían hipotéticamente estar afrontando una subida de las tarifas por servicio de agua. En este sentido, el diseño metodológico del proyecto Urklima contribuye a lograr este objetivo al implementar estudios técnicos que evalúan la función ecohidrológica de diferentes modelos forestales y sus impactos en términos de erosión (pérdida de suelo) y sedimentación.

Además, el proyecto incorpora metodologías de monitorización internacionales como el ICP Forest.

3. A la hora de diseñar los eventuales contratos de PSH asociados al cumplimiento de unas determinadas prácticas forestales (principio de condicionalidad), es fundamental incorporar mecanismos de monitorización para medir el grado de cumplimiento de esa condicionalidad por parte de los proveedores de los servicios. Sin embargo, en la práctica, son escasos los esquemas de pagos que incorporan mecanismos de sanción por incumplimiento o bien por renuncia voluntaria. Por ello, es recomendable diseñar un modelo de contrato con cierto grado de flexibilidad regulatoria, es decir, con capacidad de adaptarse a eventuales contingencias tanto a nivel normativo-institucional como de tipo climático o ambiental. A nivel interno de gestión administrativa, se recomienda evaluar diferentes posibilidades que ofrezcan a los proveedores de SH oportunidades para renegociar el contrato cada cierto tiempo.
4. La experiencia y la evidencia científica demuestran que la toma en consideración de la equidad social en los procesos de diseño y planificación estratégica y operativa de un esquema de PSH desempeña un destacado papel instrumental, no sólo en términos de integración social, sino también, en el logro de los objetivos de conservación propuestos. En la práctica, la inclusión de un criterio de equidad social implica la integración armónica de, al menos, tres aspectos interrelacionados: (i) participación activa y distributiva de los beneficiarios en los procesos de toma de decisiones, (ii) distribución proporcional de costes, beneficios y derechos y, (iii) el reconocimiento y fortalecimiento de los valores, capacidades, opiniones y derechos de los actores sociales.
5. Un modelo de contrato colectivo puede contribuir a impulsar la aceptabilidad, la identificación y el cumplimiento final de los términos del contrato. Aceptando que sería, en todo caso, una opción abierta y voluntaria. Adicionalmente, el sistema de pagos asociado a este

modelo de contratos colectivos podría incorporar un mecanismo llamado de «aglomeración». Este modelo consiste en aplicar una bonificación al pago base establecido por cada propietario contigo que se decida a participar en el proyecto. Además, un esquema de pagos colectivos puede contribuir a reducir los costes de transacción, es decir, los costes asociados a la administración de un esquema de incentivos y que, en principio, deberían asumir los proveedores de los servicios. Un sistema de PSH que ofrezca pagos diferenciados por aglomeración tiene la ventaja de poder ofrecer una mayor adicionalidad desde el punto de SH, siempre avalado por un estudio detallado de las condiciones ambientales, ecológicas e hidrológicas en cada caso.

y ejecución de los contratos, así como, de todas aquellas actividades de seguimiento y monitorización relacionadas con el cumplimiento efectivo de los compromisos asumidos por los proveedores de los servicios en sus propiedades. Los componentes y montos monetarios de los costes de transacción van a depender del ente o entes que asuman el rol de comprador o pagador, y de las eventuales asimetrías de información en las relaciones contractuales con los proveedores. En teoría, estos últimos asumirían la obligación contractual de desembolso de estos costes de transacción. Ahora bien, la cuantía de estos costes puede ser alta y generar un posible motivo de desincentivación del proyecto. Por ello, el mecanismo que adoptan muchos esquemas de PSH, y en especial los FA, es constituir un fondo fiduciario o trust fund por parte de las administraciones públicas que asuma a largo plazo la responsabilidad presupuestaria de los costes de transacción.

6. Los costes de transacción o costes de administración involucran un conjunto de costes derivados del proceso de formulación, inscripción, negociación



Figura 36. Hoja de ruta para el establecimiento de un esquema de Pago por Servicios Hidrológicos (PSH) para el espacio Urdaibai.

- 7.** La evidencia científica y la experiencia confirman que un esquema de pagos diferenciados incrementa la probabilidad de cumplir con los objetivos de conservación propuestos. Este proceso de diferenciación puede concebirse alternativamente de dos maneras. Por un lado, sobre la base de los costes de provisión (pagando montos más altos a aquellos proveedores cuyos costes de implementación sean mayores) o bien, sobre la base de los beneficios ecosistémicos generados (pagar montos más altos en aquellas parcelas que aporten una mayor provisión de servicios hidrológicos). En el contexto de la RBU, el primer sistema implicaría, por ejemplo, aplicar un incentivo más alto a aquellos propietarios cuyas parcelas forestales generen mayores rentabilidades económicas. En este sentido, existen diferencias muy significativas en las rentabilidades del pino y el eucalipto, e incluso, entre parcelas de la misma especie. El segundo sistema conllevaría pagos más altos en función de las diferencias cuantitativas y cualitativas en el modelo de gestión forestal alternativo que decida implementar el propietario. A esto habría que añadir los pagos adicionales por aglomeración de parcelas para escalar la provisión de SH (punto 5).
- 8.** La evidencia demuestra la relevancia de considerar y articular de manera integrada la diversidad de valores de una determinada región en el proceso de diseño y desarrollo posterior de un esquema de PSE. Por valores locales se entiende las múltiples formas particulares de conocer, interpretar y relacionarse con la naturaleza. Es decir, se trata de adoptar un enfoque inclusivo y participativo de abajo a arriba (bottom-up approach) de análisis y discusión de los aspectos identitarios, culturales, socioeconómicos que conforman un determinado sistema socio-ecológico. La ausencia, insuficiencia o una praxis inadecuada durante este proceso inclusivo de integración, puede repercutir en consecuencias negativas en términos de participación, compromiso, resultados, o incluso, en conflictos sociales.
- 9.** Este modelo de custodia del territorio puede servir de referencia a un marco de interacción social más amplio. Se trata de un marco ético-normativo colaborativo capaz de legitimar, garantizar y fiscalizar los derechos y obligaciones necesarios para desarrollar el cambio transformador deseado de una forma justa y equitativa. Un marco de convivencia que pueda estar supervisado por un ente intermediario con la responsabilidad, por ejemplo, de poder intervenir en eventuales conflictos de interés o derechos de propiedad entre proveedores y usuarios (beneficiarios) de los servicios hidrológicos.
- 10.** El esquema de incentivos que plantea el proyecto Urklima se centra en priorizar la provisión neta de determinados servicios hidrológicos. De esta manera, se incluyen metodologías y mecanismos de medición y monitorización de dichos servicios. Paralelamente a la consecución de este objetivo inmediato, el diseño del esquema de PSH puede aprovecharse para incentivar la adicionalidad de otros SE o co-beneficios como la biodiversidad y el secuestro de carbono. Eso sí, para ello, debe considerarse previamente una modelización de la evolución esperada del conjunto de servicios ecosistémicos para poder anticipar y evitar la posibilidad de ocurrencia de sinergias y situaciones de compromiso (o *trade-offs*).
- 11.** Dada la interrelación compleja de factores e indicadores biofísicos y socio-económicos que intervienen en este proceso de cambio transformador en el modelo de gestión del territorio, y la necesidad de que sean integrados en los procesos de toma de decisiones, se recomienda desarrollar una Evaluación Social Multicriterio a cargo de un ente consultivo. Se trata de una metodología que permite la agregación de un conjunto de variables o criterios de diferente naturaleza (cuantitativa y cualitativa) con el propósito de evaluar un conjunto de alternativas que conforman el espacio de decisión de los actores relevantes. Estas alternativas podrían representar las diversas opciones existentes tanto en términos de usos del suelo como incentivos económicos, combinando diferentes usos forestales con potenciales sistemas de PSE.

Referencias

- BRAUMAN, K., DAILY, G., DUARTE, T.K., MOONEY, H., 2007. *The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services*. Annual Review of Environment and Resources 32: 6.1-6.32. [doi.10.1146/annurev.energy.32.031306.102758](https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758)
- CALDER, I., 2007. *Forests and water - Ensuring forest benefits outweigh water costs*. Forest Ecology and Management 251: 110–120. [doi.10.1016/j.foreco.2007.06.015](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015)
- CEARRETA, A., MONGE-GANUZAS, M., 2013. *Evolución paleoambiental del estuario del Oka (Reserva de la Biosfera de Urdaibai, Vizcaya): respuesta al ascenso del nivel marino durante el Holoceno*. Jornadas de Geomorfología Litoral, pp. 163-166. Geo-Temas 14 ISSN 1576-5172
- CHUST, G., GONZÁLEZ, M., FONTÁN, 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 in the Bay of Biscay*. Science of The Total Environment, 803, 149622.
- DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA (2022). DECRETO FORAL, 69/2022, de 10 de mayo, de la Diputación Foral de Bizkaia por el que se establecen las bases y convocatoria reguladoras de la concesión de subvenciones para la realización de Inversiones en infraestructuras y en el desarrollo de zonas forestales y mejora de la viabilidad de los bosques en el Territorio Histórico de Bizkaia para el año 2022.
- ENGEL, S., PAGIOLA, S., WUNDER, S., 2008. *Designing Payments for Environmental Services in Theory and Practice. An Overview of the Issues*. Ecological Economics 65: 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>
- EPELDE, I., LIRIA, P., DE SANTIAGO, I., GARNIER, R., URIARTE, A., PICÓN, A., GALDRÁN, A., ARTECHE, J.A., LAGO, A., CORERA, Z., PUGA, I., ANDUEZA, J.L., LOPEZ, G., 2021. *Beach carrying capacity management under Covid-19 era on the Basque Coast by means of automated coastal videometry*. Ocean & Coastal Management, 208, 105588.
- GARCÍA-ARTOLA, A., CEARRETA, A., MONGE-GANUZAS, M., NIKITINA, D., LI, T., HORTON, B.P., 2023. *Holocene environmental evolution and relative sea-level change in the Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, northern Spain)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 286.

- GARNIER, R., TOWNEND, I., MONGE-GANUZAS, M., DE SANTIAGO, I., LIRIA, P., ABALIA, A., EPELDE, I., DEL CAMPO, A., CHUST, G., VALLE, M., GONZÁLEZ, M., MADER, J., GÓMEZ, M., CASTILLO, C., URIARTE, A., 2022. *Modelling the morphological response of the Oka estuary (SE Bay of Biscay) to climate change*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 279, 108133. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108133>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI: 10.1017/9781009157896>
- LIRIA, P., EPELDE, I., DE SANTIAGO, I., GARNIER, R., ABALIA, A., MADER, J., 2021. *KOSTASystem, a coastal videometry technology: development and applications*. Proceedings of the 9th EuroGOOS International Conference ‘Advances in Operational Oceanography: Expanding Europe’s Observing and Forecasting Capacity’, 3-5 May 2021.
- MARTIN-ORTEGA, J., OJEA, E., ROUX, C., 2013. *Payments for Water Ecosystem Services in Latin America: A literature review and conceptual model*. Ecosyst. Serv. 6: 122–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.09.008>.
- MARTÍNEZ-SANTOS, M., ANTIGUEDAD, I., RUIZ-ROMERA, E., 2014. *Hydrochemical variability during flood events within a small forested catchment in Basque Country (Northern Spain)*. Hydrological Processes 28(21), 5367-5381. <https://doi.org/10.1002/HYP.10011>
- MONGE-GANUZAS, M., CEARRETA, A., EVANS, G., 2013. Morphodynamic consequences of dredging and dumping activities along the lower Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay, Spain). Ocean & Coastal Management 77, 40-49.
- MURADIAN, R., CORBERA, E., PASCUAL, U., KOSOY, N., MAY, P.H., 2010. *Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services*. Ecol. Econ. 69: 1202-1208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.006>.
- PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., ALEWELL, C., LUGATO, E., MONTANARELLA, L., 2015A. *Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale*. Land use policy (48), 38-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., 2015b. *A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water*. (117-126) Geosciences, 5(2). doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- PASCUAL, U., MURADIAN, R., RODRÍGUEZ, L.C., DURAIAPPAN, A., 2010. *Exploring the links between equity and efficiency in payments for environmental services: A conceptual approach*. Ecological Economics 69: 1237–1244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.000>
- PASCUAL, U., PHELPS, J., GARMENDIA, E., BROWN, K., CORBERA, E., MARTIN, A., GOMEZ-BAGGETHUN, E., MURADIAN, R., 2014. *Social equity matters in payments for ecosystem services*. BioScience 2014, 64: 1027-1036. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu146>
- PERAZA-CASTRO, M., RUIZ-ROMERA, E., MEAURIO, M., SAUVAGE, S., SANCHEZ-PEREZ, J.M., 2018. *Modelling the impact of climate and land cover change on hydrology and water quality in a forest watershed in the Basque Country (Northern Spain)*. Ecological Engineering 122, 315-326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.016>
- PERAZA-CASTRO, M., RUIZ-ROMERA, E., MONTOYA-ARMENTA, L.H., SANCHEZ-PEREZ, J.M., SAUVAGE, S., 2015. *Evaluation of hydrology, suspended sediment and nickel loads in a small watershed in Basque Country (northern Spain) using ecohydrological SWAT model*. Ann. Limnol-Int. J. Lim. 51 (1), 59–70. <http://dx.doi.org/10.1051/limn/2015006>
- PORRAS, I., GRIEG-GRAN, M., NEVES, N., 2008. *All That Glitters: A Review of Payments for Watershed Services in Developing Countries*. International Institute for Environment and Development, United Kingdom, p.138. <http://pubs.iied.org/pdfs/13542IIED.pdf>
- PORRAS, I., AYLWARD, B., DENGEL, J., 2013. *Monitoring Payments for Watershed Services Schemes in Developing Countries*. International Institute for Environment and Development, United Kingdom, p.36. <http://pubs.iied.org/16525IIED.html?c=econ>
- TOWNEND, I.H., WANG, Z.B., STIVE, M., ZHOU, Z., 2016. *Development and extension of an aggregated scale model: Part 1 – Background to ASMITA*. China Ocean Engineering 30(4), 483-504.

TOWNEND, I., ZHOU, Z., GUO, L., COCO, G., 2021. A morphological investigation of marine transgression in estuaries. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(3), 1208 626-641.

UNECE ICP FORESTS PROGRAMME CO-ORDINATING CENTRE (ED.), 2022: *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde [available from: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>]

WUNDER, S., 2005. *Payments for environmental services: some nuts and bolts*. CIFOR Occasional Paper. CIFOR, Indonesia.

ZABALETA, A., ANTIGUEDAD, I., 2013. *Streamflow response of a small forested catchment on different timescales*. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(1), 211-223. <https://doi.org/10.5194/HESS-17-211-2013>

ZABALETA, A., ANTIGUEDAD, I., BARRIO, I., PROBST, J.L., 2016. *Suspended sediment delivery from small catchments to the Bay of Biscay. What are the controlling factors?* *Earth Surface Processes and Landforms* 41(13), 1894-1910. <https://doi.org/10.1002/ESP.3957>

ZABALETA, A., 2008. *Análisis de la respuesta hidro-sedimentaria en pequeñas cuencas de Gipuzkoa*. Tesis doctoral. Geodinamika Saila, UPV/EHU.