



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Efectos del cambio climático en el país vasco y estrategias de adaptación.

Autor: Óscar Santa Coloma Moso¹

Institución: LABEIN - Tecnalía

e-mail: santacol@labein.es

Otros Autores: M. Mendizabal¹, E. Feliu¹, G. Chust², M. Pinto³, O. del Hierro³ & F. Olarreaga⁴

¹TECNALIA Unidad de Medio Ambiente, Parque Tecnológico de Bizkaia. C/ Geldo, Edificio 700, 48160 Derio, Bizkaia. Spain. Telf +34 946073300, <http://www.tecnalia.com>, k-egokitzen@labein.es

²AZTI-Tecnalia, Unidad de Investigación Marina, Herrera kaia portualdea z/g 20110 Pasaia (Gipuzkoa).

³NEIKER-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. Derio (Bizkaia).

⁴Dirección de Planificación Ambiental y Cambio Climático, Gobierno Vasco.

RESUMEN

Las políticas nacionales, regionales y locales de cambio climático han estado durante años focalizadas en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, habitualmente denominado mitigación, y desde hace relativamente poco tiempo se incorpora con mayor presencia en dichas políticas la perspectiva de la adaptación a los potenciales efectos del cambio climático, entrando a formar parte con cierta relevancia de la agenda política, aunque bien es cierto que con un desarrollo desigual en función de los casos. Con el objeto de fomentar el “Science for Policy”, o ciencia para la política en esta materia, internacionalmente han sido creadas numerosas iniciativas de investigación promovidas o apoyadas desde administraciones públicas, para constatar las evidencias del cambio y valorar la vulnerabilidad de sistemas potencialmente afectados, como el CIP (UK) o Knowledge for Climate (NL).

En esa misma línea de actuación, en el País Vasco se desarrolla el proyecto de investigación estratégica K-Egokitzen, financiado por el Gobierno Vasco, y en el que participan 15 grupos de investigación pertenecientes a centros tecnológicos (Tecnalia-Unidad de Medio Ambiente, Azti-Tecnalia y Neiker-Tecnalia) y a la Universidad del País Vasco. Actualmente la iniciativa se encuentra en la fase de renovación de un nuevo periodo de tres años, en el que se mantendrán las áreas de investigación: 1/ Recursos hídricos; 2/ Costas; 3/ Ecosistemas marinos; 4/ Ecosistemas terrestres (naturales y agrarios); 5/ Medio urbano;

El enfoque de los trabajos de investigación ha cubierto en la mayoría de las 20 líneas de investigación la secuencia evidencias-escenarios-impacto-vulnerabilidad-adaptación, aunque es necesario mejorar la cobertura territorial de los estudios realizados, y profundizar en el diseño de algunas de las medidas de adaptación. En cualquier caso, ya se cuenta con datos relevantes sobre los principales efectos que tendrá el cambio climático en la CAPV (subida del nivel del mar y retroceso de costas, aumento de las precipitaciones extremas, aumento de la evapotranspiración, etc.) y se está avanzando en las respuestas que se deben plantear para hacer frente a las consecuencias negativas en las que ello derive.

Según los primeros resultados de los modelos disponibles elaborados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), para la zona del País Vasco y para finales del s. XXI se espera un aumento de las precipitaciones en invierno y disminución en verano debido al cambio climático, lo que se traduce en una reducción anual de las mismas de entre un 15 y un 20%. Las temperaturas máximas extremas a fin de siglo podrán subir entre 1,5°C y 3,5°C; y las mínimas extremas entre 1 y 3°C. Este aumento térmico junto con la variación de la precipitación, se preve que afecte a los sistemas humanos y naturales.

Además de los cambios en las variables climáticas, se espera que el nivel medio del mar ascienda entre 29 y 49 cm, lo que podrá provocar el retroceso de entre un 25 y 40% de la anchura de las playas para finales del siglo XXI e incremento del riesgo de inundaciones en los estuarios.

Basándonos en los impactos detectados, se han identificado las actuaciones prioritarias a fin de adaptar los recursos hídricos, el medio costero y el medio urbano, así como los ecosistemas marinos, terrestres naturales y los sistemas agrarios. Aunque los impactos estudiados tienen todavía gran incertidumbre y es necesario ampliar las investigaciones iniciadas, se pone en evidencia la necesidad y la rentabilidad de acometer acciones tempranas.

Palabras Clave: Impacto, vulnerabilidad, riesgo, adaptación al cambio climático, ciencia para la política, IPCC, escenarios climáticos.

1 Escenarios de cambio climático

En primer lugar debe observarse que existen pocos estudios que se centren en el análisis de los escenarios climáticos existentes focalizándose en la zona del País Vasco. Por ello, las estimaciones actuales se deben considerar como una primera aproximación. Las principales variables que se verán afectadas por el cambio climático y que se analizan en este trabajo son la temperatura, la precipitación, el nivel del mar, temperatura del mar, oleaje y otras variables como evaporación, velocidad del viento y radiación.

En cuanto a las temperaturas en la Península Ibérica, las proyecciones para final del siglo XXI reflejan un aumento de la temperatura media de hasta 5-7°C en los meses de verano y 3-4°C en los meses de invierno, reduciéndose en 2°C estos intervalos en la franja costera. Previsiblemente, aumentará el número de días con temperaturas máximas extremas y disminuirá el número de días con temperaturas mínimas extremas.

En el caso específico de la CAPV durante el último tercio del siglo XXI se espera un aumento de las temperaturas máximas extremas de 3°C durante los meses de verano. A consecuencia de los cambios, se esperan olas de calor más largas y un ligero aumento de su frecuencia. Durante el periodo de referencia (1978-2000) solo el 10% de los días de verano se inscribían en periodos de olas de calor. Sin embargo, entre los años 2020 y 2050 este número ascenderá a 30%, pudiendo llegar a 50% a finales de siglo.

Con respecto a las temperaturas mínimas extremas se estima un aumento de la misma de entre 1 y 3°C durante los meses de invierno. Además, se espera una disminución del 50% en el número de días helados ($T_{min} < 0^{\circ}C$). Debido a este descenso en la duración y frecuencia de las olas de frío (episodios de entre 7 y 19 días), se prevé la desaparición de este fenómeno por completo a partir del 2020.

En cuanto a la precipitación, tanto los modelos globales como los regionales a más alta resolución (IPCC AR4, 2007; Brunet *et al.*, 2009) apuntan a una disminución de la precipitación en la CAPV. Los modelos regionales prevén una reducción anual de la precipitación de entre un 15 y 20% para el escenario de final del s. XXI.

Aunque la distribución de la precipitación a lo largo del año no muestra un claro patrón de comportamiento, éstas apuntan a un aumento durante los meses invernales (diciembre a febrero) estimado entre un 5 y 20% y una disminución durante los meses de verano (junio a agosto) estimada entre un 30 y 50%. El principal cambio pluviométrico podría estar más condicionado por el reparto estacional de las lluvias (con una mayor heterogeneidad espacial y temporal) que por la propia disminución porcentual en valores absolutos. Previsiblemente, disminuirá la frecuencia de días de lluvia que superan los umbrales de 1,5 y 10 mm y aumentará el número de días que superan los 30 mm (lluvia muy intensa). Se espera un incremento del 10% en la precipitación extremal diaria durante el s. XXI (para el escenario A1B) (Chust *et al.*, in press).

Por otra parte, las proyecciones climáticas para finales del s. XXI indican que la costa y medio marino vasco experimentarán cambios que incluyen el calentamiento del mar de 1,5 a 2,05 °C en los primeros 100 m de profundidad y un ascenso del nivel medio del mar de entre 29 y 49 cm (Chust *et al.*, 2010). Estos cambios esperados se contrastan con el análisis de registros históricos de la costa vasca.

Otras variables susceptibles de sufrir modificaciones debido al cambio climático son la evaporación, la velocidad del viento y radiación. Se espera una disminución generalizada de la evaporación en casi todos los años respecto a la media del período de referencia (de hasta 0.8 mm por día en el escenario A2 y 0.6 mm en el B2).

Todos los modelos muestran resultados muy semejantes para el variable viento (considerado a 10 metros del suelo). En general, a escala anual se observa una disminución de la velocidad del viento en todos los modelos (de hasta 0.6 m/s para la media diaria en el escenario A2 y de 0.4 m/s en el escenario B2).

Con respecto a la radiación de onda corta incidente, a escala anual todos los modelos predicen para el periodo 2071-2100 un aumento de la radiación sobre la superficie (de hasta 20 W/m² diarios en el escenario A2 y 15 W/m² en el escenario B2).

2 Impactos y adaptación en los diferentes sectores y sistemas

Recursos hídricos

Los análisis de los modelos climáticos (basados en los escenarios IPCC A2 y B2) que sugieren una disminución de la precipitación del 5% (en invierno y primavera) junto con un aumento de la temperatura, se prevé que generen una disminución de 9% en caudales diarios medios en el caso de la cuenca alta de Nerbioi (según el estudio realizado por Antigüedad, I. *et al.*, de la UPV/EHU). Estos resultados se contrastan con las tendencias históricas observadas para la CAPV. Debido al cambio esperado en los recursos y al tipo de territorio en el que vivimos, se ve necesaria la consideración del papel hidrológico del suelo y de sus formas de ocupación como herramienta de adaptación. Con el objetivo de paliar los cambios esperados en caudales se propone integrar la función hidrológica del territorio en la evaluación de planes con incidencia territorial en la CAPV.

Estos cambios en las aportaciones influyen directamente en la cantidad y calidad del recurso disponible. Una de las cuestiones a valorar es si con los cambios esperados en las aportaciones y teniendo en cuenta la capacidad de los embalses, tenemos la garantía de los sistemas que nos abastecen. Como resultado del estudio realizado en el K-Egokitzen (realizado por Almandoz *et al.*, de la UPV/EHU), se ha observado que 6 de 11 sistemas estudiados no tienen garantizado el caudal inyectado necesario en alta. De los 6 sistemas, 5 podrían dar solución al problema con estrategias relacionadas con el volumen de fugas existente, excepto uno de los sistema que debería recurrir a otras estrategias como el ahorro de los usuarios, renovación de tuberías, gestión de la presión, etc. para garantizar el suministro. Por ello y para adaptarnos al cambio climático, debemos conocer y mejorar el estado de los abastecimientos de la CAPV. Según el estudio realizado, la mayoría de los abastecimientos analizados presentan una vulnerabilidad media a muy alta ante cambios en las aportaciones. Para minimizar el impacto esperado se proponen medidas específicas para cada tipología de abastecimiento (definidas a través de 21 variables): desde más complejas como definir un modelo matemático y gestionar la presión hasta más básicas como asignar un responsable, definir tarifación y calcular los rendimientos:

1. Definir modelos matemáticos, PIGDA y de gestión de la presión.

2. Mejoras puntuales en rendimientos de red y medición, modelo matemático y PIGDA.
3. Mejoras puntuales en rendimientos de red y medición, modelo matemático, PIGDA y optimización del sistema de tarificación.
4. Sectorización equilibrada, con ayuda de modelo matemático, gestión de la presión.
5. Mejora en las fugas, mejora en la medición, utilización de caudalímetro.
6. Generación de cartografía, datos básicos de la red, caracterización de la demanda, necesidad de CAF y mejora de la gestión de la medición.
7. Asignación de personal, tarificación y cálculo de los rendimientos.

Por otra parte, los análisis de carácter regional de los modelos climáticos que sugieren un aumento de las precipitaciones extremas del 10% (precipitación diaria) (Moncho *et al.*, 2010), nos llevarán a un incremento de las pérdidas por inundación. Los resultados obtenidos en el estudio de la cuenca de Nerbioi (que presenta un importante registro histórico de episodios de inundaciones), nos muestra que el municipio de Amurrio verá aumentado las pérdidas por este evento en un 15% debido al cambio climático. Este aumento se debe al cambio esperado en el caudal pico del río Nerbioi, el cual se verá incrementado en un 22% para el 2050, lo que llevará a una mayor extensión del área inundable además de incidir en el grado de virulencia (incremento en la velocidad y altura de la lámina de agua en la zona inundable) (Mendizabal *et al.*, 2010). El área inundable se prevé que aumente en un 3% para un periodo de retorno de 50 años, pero puede llegar a incrementarse en un 5% para periodos de retorno de 500 años. Debido a estos cambios, se espera que las áreas de la CAPV que son susceptibles a inundaciones se vean extendidas para mediados y finales del s. XXI para el caso de precipitaciones con un periodo de retorno de 50 años.

El aumento de las precipitaciones extremas además de tener una incidencia en las inundaciones, se prevé que afecte al sistema de laderas. Los episodios tormentosos, además de alterar los caudales, favorecerán la reactivación de algunos grandes deslizamientos y coladas de tierra especialmente si el aumento de las precipitaciones viene acompañado de crecidas fluviales capaces de proseguir la acción erosiva en los márgenes fluviales.

Teniendo como base estos mapas de peligrosidad, se proponen actuaciones a una escala urbana en el que se caracteriza el receptor del impacto y se actúa sobre los más vulnerables. Para ello se identifican de entre la batería de medidas que se definen en el Catálogo de medidas genéricas de adaptación, las que responden a disminución de la exposición, disminución de la sensibilidad y aumento de la capacidad de respuesta del receptor:

1. Planificación territorial y urbana orientada a la reducción de la exposición promoviendo el “espacio para el río”. Se aconseja un análisis coste-beneficio de varias alternativas: uso compatible con el efecto; evacuación de estos suelos para la prevención del riesgo; o la construcción de defensas acompañada de la implantación de restricciones de uso.

2. Inundaciones controladas en zonas concretas: para disminuir el caudal pico de avenida cuenca abajo y evitar el desbordamiento en ciertos puntos. De esta forma, se garantiza la seguridad de los bienes y las personas.
3. Reducir la capacidad de aparcamiento bajo rasante en las zonas afectadas al mínimo imprescindible. Es posible su uso para almacenamiento temporal de agua de escorrentía.
4. Estudio, dimensionamiento y planificación de redes de saneamiento adaptadas.
5. Pavimentar con materiales permeables que reduzcan la escorrentía.
6. Mejora de materiales de edificación. Fomentar las políticas de rehabilitación integral.
7. Informar, comunicar y formar a la ciudadanía para mejorar la capacidad de adaptación.

Ante estos eventos, además de actuar a escala urbana, se propone una adaptación a escala territorial, en el que se realicen acciones para aumentar la capacidad de respuesta de la cuenca. Tomando como base los resultados del estudio sobre la incidencia de la vegetación en la generación de escorrentía y por consiguiente en el caudal, se propone el uso del arbolado para conseguir un efecto de disminución en el pico de caudal del río. Además, para la predicción de disminución de la precipitación media observamos que el prado tiene una incidencia negativa en el caudal mínimo. Por ello se recomiendan soluciones que responden a las distintas situaciones proyectadas (disminución de caudales medios, aumento de caudales pico) a través de la definición de modelos de usos de suelo que regulen la escorrentía y el caudal. Se apuesta por un territorio mosaico de comunidades vegetales promoviendo la estructura de “parches distribuidos espacialmente” (manteniendo la biodiversidad y apostando por especies autóctonas).

Medio costero

El impacto del ascenso del nivel del mar máximo proyectado de 49 cm para finales del presente siglo ha sido estimado en 110,8 ha de zonas de riesgo de inundación en la costa de Gipuzkoa (Chust *et al.*, 2010) y 12 ha en la Reserva de la Biosfera de Urdaibai. Los mapas de riesgo de inundación generados permiten localizar el impacto de dicho ascenso en múltiples sectores de la costa. Dicho impacto en la costa será uno de los principales, especialmente en zonas llanas estuáricas (gran parte de ellas urbanizadas). Las zonas urbanas costeras y portuarias podrán verse afectadas en 34 ha de varias localidades de Gipuzkoa. Las playas y arenales constituyen uno de los elementos más vulnerables al ascenso del nivel del mar con retrocesos de 25 a 40% de su anchura. Según los resultados obtenidos y en base a las características generales de las playas guipuzcoanas, el retroceso de la línea de costa es más importante en playas con: una mayor exposición al oleaje, un tamaño de grano menor, una pendiente más suave, una menor anchura de la playa seca, y un confinamiento (natural o artificial) de la parte alta del perfil que limite la capacidad de evolución natural de la playa. La parte central y oeste de la playa de Zarautz y la playa de Gaztetape (Getaria), serían las más afectadas (desde el punto de vista de su uso turístico) por el ascenso del nivel del mar, pudiendo perder la ya escasa superficie de arena seca que presentan actualmente en una situación de pleamar viva (y una configuración habitual del arenal). Cabe resaltar el impacto esperado sobre las playas de la Reserva de Urdaibai que puede alcanzar 47 m de retroceso en la playa de Laida. Al margen de las condiciones naturales de cada playa, el grado de

urbanización tiende a aumentar los efectos perjudiciales del cambio climático en una playa.

Si bien la variación del clima marino extremal (incremento de altura de ola significativa) será muy leve, y está escasamente estudiada con modelos climáticos forzados por GEI, su efecto debe considerarse en los escenarios futuros por el gran impacto que tienen los eventos extremos poco probables. Así, la cota alcanzada por el oleaje en eventos extremos de 50 años de periodo de retorno afectaría 164,1 ha de la costa de Gipuzkoa. El efecto del run-up por oleaje extremal queda concentrado en la línea de costa, mientras que el efecto del ascenso del nivel del mar es relativamente mayor en zonas interiores llanas de estuarios. Para un dique tipo (no real), la interacción del ascenso del nivel medio del mar y de la altura del oleaje inducidos por el cambio climático, supondrá un aumento del rebase en los principales diques exteriores de protección de la CAPV del 64-157%.

Las principales medidas de adaptación al cambio climático para el mantenimiento de las playas y su calidad que se plantean son:

1. Evitar barreras artificiales que confinan el sistema duna-playa-depósitos submarinos y en su caso desembocadura y río/estuario, para mantener el transporte sedimentario natural. Esta medida previene la pérdida de playas y depósitos de arena, que representan una protección contra la erosión costera y la adaptación a la subida del nivel del mar y a eventos extremales de oleaje. Igualmente, el sustrato móvil es hábitat de comunidades biológicas específicas y es criadero de muchas especies. Si bien las tendencias de variación del clima extremal marino (incremento de altura significativa) es despreciable, los eventos extremales del régimen actual causan recurrentemente erosión y daños que pueden mitigarse mediante el mantenimiento del transporte sedimentario original.
2. Restringir ciertos usos, especialmente la urbanización, y la extracción de arena en el marco de la celda sedimentaria completa.
3. Regenerar playas en aquellos arenales más vulnerables al ascenso del nivel medio del mar, es decir, aquellos con mayor exposición al oleaje y/o un tamaño de grano menor, pendiente más suave, menor anchura de la playa seca (mayor retroceso porcentual), y elevado confinamiento (natural o artificial) de la parte alta del perfil, lo que restringe su capacidad de evolución natural de la playa. La restauración de playas puede hacerse mediante redistribución de material dentro de la propia celda sedimentaria o bien implicar aporte de material nuevo. En este último caso, el nuevo sedimento deberá, además de cumplir las exigencias que marca la normativa, ser compatible con las características del sedimento natural de la playa. Las playas guipuzcoanas más vulnerables son la playa de Zarautz y la playa de Gaztetape (Getaria). Estas medidas evitarían la pérdida del uso turístico de las playas afectadas.
4. Revisión de la servidumbre marítimo-terrestre para anticiparse a la subida de 0,5 m del nivel del mar para toda la línea de costa vasca y sus efectos en la erosión del litoral. Teniendo en cuenta que las playas de arena supralitoral guipuzcoanas retrocederán entre 5 y 31 m, el límite interior de la servidumbre marítimo-terrestre debería retroceder una distancia similar hacia el interior en dichas zonas.

5. Conocer la dinámica de la celda sedimentaria completa en la que se enmarca una playa e integrar dicho conocimiento en la gestión de los diferentes elementos (dunas, playa, arenal sumergido, desembocadura, estuario, puerto). Esta gestión deberá ser en base a objetivos comunes y criterios de sostenibilidad.

Los principales criterios de planificación urbanística en zonas costeras para su adaptación al cambio climático son:

1. Revisión de la servidumbre de protección del dominio público marítimo-terrestre para anticiparse al ascenso del nivel del mar máximo previsto de 0,5 m, en toda la costa vasca. Teniendo en cuenta que la servidumbre de protección se extiende entre el límite interior de la ribera del mar y 100 metros tierra adentro, el nuevo límite deberá retroceder una distancia que va a depender de la nueva cota de pleamar máxima viva equinoccial prevista.
2. Elevación de 0,5 m de islas barrera urbanizadas en caso de que sea técnica y estratégicamente factible.
3. Reforzamiento y en su caso elevación de infraestructuras de protección frente a la erosión e inundación en zonas costeras (incluyendo estuarios). En el caso de las estructuras marítimas exteriores de protección se ha de tener en cuenta que el rebase del oleaje extremal, previsto con un periodo de retorno de 50 años, para un dique tipo es del 64-157%.
4. Evaluar las distintas estrategias de adaptación a la erosión e inundación: acomodación, retroceso y protección.
5. Incorporar en los planes de gestión que afecten a las zonas costeras los posibles impactos del cambio climático en estas zonas.
6. Una vez implementadas las medidas de adaptación, realizar un seguimiento continuo de las principales variables climáticas y de sus impactos asociados; además de evaluar si las medidas de adaptación adoptadas cumplen los objetivos para las cuales fueron diseñadas
7. Revisión y en caso necesario modificación de los sistemas de alcantarillado, drenaje y vertido de aguas existentes. En el diseño de nuevos sistemas, se ha de tener en cuenta la nueva cota de marea prevista.
8. Seguimiento de los acuíferos costeros susceptibles de sufrir salinización (p.ej.: acuífero de Gernika). Una forma de evitar la intrusión de agua marina es la no sobreexplotación del agua contenida en estos acuíferos. Además, existen técnicas de ingeniería que evitan este tipo de contaminación, como barreras físicas sub-superficiales o sistemas de bombeo.

Ecosistemas y recursos marinos

Los estudios realizados para evaluar los impactos en humedales y marismas indican que un 6.5% de su superficie actual podría verse afectada por ascenso del nivel del mar. La

respuesta de las marismas, humedales, y otras comunidades intermareales como las praderas de fanerógamas a dicho ascenso podrían tener lugar a través de la migración natural hacia el interior, aunque en muchos casos se verá impedida por barreras fijas artificiales y naturales. Las especies estuáricas que tienen un rango del nicho ecológico estrecho, asociado con aquellas variables climáticas que van a variar, y con capacidad de dispersión limitada, verían su vulnerabilidad incrementada por la interacción de los factores ambientales de cambio dado que su hábitat podría verse reducido y fragmentado. Este es el caso de la única fanerógama marina presente en la CAPV *Zostera noltii*, cuyo hábitat idóneo podría reducirse en un 40% en el estuario del Oka hacia finales del presente siglo por el ascenso del nivel del mar (Chust *et al.*, In press). Esta especie podría por lo tanto considerarse especialmente vulnerable al cambio climático, dado que se encuentra en sólo tres estuarios del País Vasco, y podría verse además afectada por la interacción del calentamiento del agua y del aire y su presumible poca conectividad genética.

La respuesta de las comunidades bentónicas de la costa vasca ante variables climáticas y antropogénicas, muestra que las variables climáticas son las que más influyen en la variabilidad de las comunidades costeras (explicando un 15% de su composición específica) y, en particular, el forzamiento clave es el caudal de los ríos (por precipitaciones) (Garmendia *et al.*, 2008), en cambio, en estuarios es más importante el efecto antropogénico (Pérez *et al.*, 2009). Por otro lado, también se ha observado una disminución de especies típicas de aguas frías y aumento de las de aguas cálidas, en el submareal costero comparando las comunidades de 1991 al 2008.

El estudio de la serie temporal de clorofila, como indicador de la biomasa de fitoplancton, en la plataforma continental vasca (Revilla *et al.*, 2010) permite concluir que: 1) La variabilidad de la clorofila responde en gran medida a patrones de oscilaciones climáticas, como el índice Eastern Atlantic (EA). 2) Un índice positivo de EA (como ha ocurrido desde 1997) hace decrecer la clorofila en aguas superficiales, pero la incrementa en aguas más profundas. Esto puede deberse a una mayor turbulencia y hundimiento de las capas superficiales de agua, en respuesta a una circulación atmosférica del noroeste. 3) La diferente distribución de la clorofila en la columna de agua, puede tener importantes implicaciones para otros compartimientos del ecosistema. Por otro lado, los experimentos en laboratorio muestran, además, que el calentamiento del mar extendería el período y la frecuencia de floraciones de algas potencialmente nocivas en los tramos anteriores de los estuarios, y las especies tóxicas de origen marino podrán adentrarse más en los estuarios al incrementarse la salinidad.

En el estudio de la sensibilidad de los recursos marinos al clima se han considerado dos especies: (1) el alga *Gelidium corneum*, como ejemplo de un recurso bentónico explotado, del que se extrae el agar, y (2) la anchoa, como recurso pesquero pelágico.

El estudio del alga *Gelidium* ha mostrado que el 70% de la variabilidad en su biomasa está explicada por cambios físicos relacionados con la climatología. El modelo Vensim® ha sido utilizado para simular el efecto de los cambios en la temperatura (incremento de 1,5 o 2 °C) y/o en la irradiancia (disminución de 10, 20 y 30%) sobre la biomasa de las poblaciones del alga *Gelidium corneum* en el submareal. La variación que se encontró no fue muy importante, aunque los cambios fueron significativos ($p: 0,0005$). Además, el

incremento de temperatura se vería compensado por la caída en la irradiancia, por lo que a 4 m no se esperan grandes cambios, aunque sí a 8 m.

En lo referente a la influencia del clima sobre la anchoa (Borja *et al.*, 2008), se ha mostrado que el 60% de la variabilidad en el reclutamiento de la anchoa está relacionado con el índice EA que se traducen localmente por cambios en la dirección de los vientos e intensidad del afloramiento de las Landas. Un estudio más reciente ha determinado además que las condiciones climáticas tienen mayor capacidad predictiva sobre el reclutamiento de la población que el mismo tamaño de la población de la anchoa (Fernandes *et al.*, 2010). La población de anchoa, al ser local y con una conectividad reducida, se muestra sensible a estos cambios.

Los principales criterios de conservación de la biodiversidad y recursos marinos para la adaptación al cambio climático son:

1. Crear una serie de reservas marinas protegidas que representen todos los ecosistemas de la costa vasca y medio marino, estableciendo cierta conectividad entre ellas. Estas reservas se deben basar en la funcionalidad de los ecosistemas, procurando un mantenimiento de las actividades reproductivas, de criadero, alimentación y descanso. Esto hará que todos los niveles de la red trófica estén representados y los ecosistemas sean más saludables.
2. Restaurar las zonas degradadas, aumentando la resiliencia de los ecosistemas y especies explotadas y su capacidad de adaptación natural a los cambios. Esto es especialmente importante en la franja costera (zonas arenosas y dunares) y estuarios (fangales, marismas, zonas húmedas), devolviendo al mar terrenos ganados anteriormente para agricultura u otras actividades.
3. La gestión de la conservación debe ser dinámica y adaptativa, no estática y rígida.
4. Incidir en la gestión de las especies invasoras, mediante la regulación estricta y el control de las aguas de lastre y el combate de aquellas especies que causen daños ecológicos y económicos a los ecosistemas.
5. Luchar contra la contaminación, que representa una amenaza para la biodiversidad, procurando que las masas de agua alcancen un buen estado ecológico, lo que supondrá una mayor resiliencia de los ecosistemas y recursos explotables ante el cambio climático.
6. Preservar los hábitats de las especies vulnerables.
7. Favorecer la conectividad de todos los hábitats de interés comunitario, especialmente aquellos más fragmentados, como marismas y humedales.

Sistemas agrarios

En el sector agrario, las futuras condiciones ambientales debidas al cambio climático harán que las plantas se enfrenten a variaciones en las condiciones edafoclimáticas que incluirán elevadas concentraciones de CO₂ en la atmósfera, una menor disponibilidad de agua al disminuir las precipitaciones y aumentar la evapotranspiración, un cambio en la temperatura del aire y del suelo y la salinización de los suelos. Estos factores pueden tener efectos contrapuestos y no uniformes, pudiendo ser beneficiosos o dañinos para los

diferentes sistemas agrarios. La respuesta de las especies vegetales variará dependiendo de su vulnerabilidad frente a dichos impactos y a su capacidad de adaptación frente a los mismos. Dicha respuesta, dependerá de variaciones tanto intraespecíficas: cultivar, ecotipo, etc., como interespecíficas, y de los grupos funcionales a las que las mismas pertenezcan.

Los estudios realizados muestran los siguientes impactos en el sector agrario: es de esperar un posible aumento de la productividad de los cultivos (como consecuencia del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y el consiguiente incremento de la tasa fotosintética de los vegetales); además de un incremento de la eficiencia en el uso del agua (el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera disminuye la transpiración debido al cierre estomático), factor que será determinante cuando las plantas crezcan simultáneamente a elevado CO₂ y con sequía. Aunque el aumento de la temperatura puede contrarrestar el efecto anterior al aumentar la demanda evapotranspirativa de los cultivos y por tanto la demanda de agua.

Se debe mencionar que el impacto en los cultivos será diferente en función del grupo funcional al que pertenezcan, así el efecto de la sequía será mayor en plantas C3, observándose al mismo tiempo una mayor incidencia del aumento de CO₂, que en plantas C4. Sin embargo, éstas también responden al aumento del CO₂ de la atmósfera, manifestándose sobre todo en su respuesta en la eficiencia en el uso del agua.

Las variaciones de la precipitación total y de su distribución estacional será determinante en los sistemas de secano y en el diseño y manejo de los sistemas de regadío dado que los aumentos de temperatura pueden incrementar la demanda evapotranspirativa de los cultivos, y con ello las necesidades de riego en algunos casos.

Además, se ha podido observar que la salinización del suelo, como consecuencia de las mayores tasas de evapotranspiración debidas al cambio climático, no afecta a los niveles de agua del suelo ni al contenido hídrico en las plantas. Sin embargo, la eficiencia en el uso del agua aumenta en las plantas en condiciones salinas, gracias a una menor pérdida de agua, si bien va acompañada de una menor producción de biomasa. Al mismo tiempo, la salinización disminuye la capacidad de las plantas para adquirir y distribuir nutrientes a la vez que acumula iones tóxicos como el Na⁺. Los estudios realizados, han indicado cómo el crecimiento de las plantas bajo elevado CO₂ mitiga y retrasa los efectos del estrés hídrico tanto en cebada como en sorgo y los de la salinidad en cebada.

Por otro lado, las condiciones climáticas que se proyectan favorecerán la colonización de los cultivos por especies plaga de distribución mediterránea y a un incremento del número de generaciones. En términos generales, la subida de las temperaturas influirá en las interacciones entre patógenos y cultivos acelerando el ritmo de crecimiento de los patógenos, lo que incrementa las generaciones reproductivas por ciclo vegetativo, disminuyendo la mortalidad de los patógenos.

Con el objetivo de conocer con mayor detalle los impactos del cambio climático en los cultivos de la CAPV, en el marco del proyecto K-Egokitzen se han realizado simulaciones mediante la utilización de modelos de simulación de cultivos (DSSAT, STICS) introduciendo los resultados de 9 modelos climáticos regionales usados en PRUDENCE (CHRM, REMO, RCAO, HadRM3H, CLM HIRHAM, PROMES, RegCM y RACMO) (<http://prudence.dmi.dk/>). Se han simulado el trigo de invierno y la vid (al considerarse cultivos de alta relevancia económica).

Para el trigo de invierno, en un escenario de disponibilidad de agua, los resultados de las proyecciones realizadas dan una tendencia consistente de aumentos en los rendimientos (con una incertidumbre de las proyecciones muy baja). Las simulaciones que dan aumentos de rendimiento más moderados son las realizadas por 5 modelos climáticos, mientras que 4 modelos proyectan aumentos de más del 50%, con zonas donde se duplicarían los rendimientos.

Sin embargo, cuando se realizan las simulaciones en condiciones de limitación de agua, se observa que: en secano la influencia del suelo en el modelo es mucho mayor debido a la capacidad de retención de agua en el perfil. La incertidumbre es mayor ya que se observa que en 4 de los 9 modelos la respuesta en secano y regadío es muy similar (estos modelos dan un mayor peso a la temperatura que a la precipitación), en tres de los modelos estudiados la respuesta es muy distinta a la obtenida cuando se realiza la simulación sin restricción de agua (en este caso es la precipitación la que determina la respuesta), y dos presentan una respuesta similar con diferencias puntuales importantes. El hecho de que cuatro miembros de 9 estén en el primer caso y 2 en el tercero, apunta a que las temperaturas tienen una gran influencia, posiblemente mayor que la precipitación, en los impactos de los cultivos de invierno, es decir, el periodo de noviembre a junio.

En cuanto al rendimiento de la vid, aunque el rango de impactos es similar al del trigo, los modelos de simulación han mostrado una incertidumbre alta en la mayor parte de la Rioja Alavesa. Así, 5 de los modelos dan impactos positivos hasta del 200%, mientras que 3 de los modelos dan impactos claramente negativos. Sin embargo, se debe considerar que los dos modelos que mejor simulan la estacionalidad proyectan tendencias de aumento de rendimiento. Hay que constatar que un posible incremento de la producción agravaría el control de la producción (dentro de la D.O.Ca Rioja se fija un límite productivo que hasta el año 2009 ha sido de 6.500 Kg. ha⁻¹, pero que se ha reducido en un 10%, es decir, a 5.850 Kg. ha⁻¹ en el año 2010, lo cual implicaría un control del viñedo cada vez más exhaustivo para no superar el límite fijado).

A partir de los estudios realizados se definen las siguientes medidas de adaptación:

1. Búsqueda o selección de variedades y cultivares más resistentes o robustas frente a los eventos climáticos externos, salinidad, plagas y enfermedades así como a la menor disponibilidad hídrica que se prevé para el futuro en las áreas que potencialmente sean más sensibles al cambio climático. En los estudios, se ha puesto de manifiesto cómo la selección de cultivares que poseen una mayor eficiencia en el uso de agua (caso del cv. Iranis vs Alpha en el caso de la cebada), puede ayudar a adaptar al cultivo de esa especie a una situación climática cambiante logrando mayores niveles de producción así como a la salinidad. Asimismo, los estudios han demostrado que hay cultivares que responden mejor a la salinidad que otros (Iranis vs. Alpha). En estas condiciones, su menor consumo de agua y la mayor eficiencia en su uso permitirían la utilización de suelos con mayor concentración salina para el cultivo de cebada, lo que conllevaría el aumento del área disponible para su cultivo.
2. Mejora de las prácticas agrícolas para conservar los niveles de fertilidad y humedad del suelo: laboreo de conservación, laboreo mínimo, utilización de fertilizantes orgánicos, reciclado de residuos. Todas estas técnicas revierten en la conservación del suelo (y del carbono asociado), en el aumento del carbono edáfico y en la

disminución del uso de combustibles fósiles (menor utilización de maquinaria o de fertilizantes inorgánicos).

3. Realización de una zonificación agroecológica de la CAPV según la vulnerabilidad de las diversas zonas del territorio a los efectos del cambio climático. Habrá de adaptar los manejos de algunos cultivos: cambios en las fechas de siembra y recolección, cambios en las rotaciones, cambios en la fertilización y en el tratamiento con fitosanitarios, etc. Esta zonificación nos facilitaría una herramienta de gestión de los cultivos.
4. Introducción de nuevos cultivos. Debe abordarse desde un punto de vista agroecológico integral, incluyendo junto a los clásicos factores agronómicos estrictos y los económicos (viabilidad técnico-económica), los factores de incidencia sobre el agrosistema (paisaje, biodiversidad y fertilidad del suelo), sobre la estabilidad de la población rural y la seguridad alimentaria. A la hora de seleccionar los cultivos hay que tener en cuenta las diferencias existentes entre los grupo funcionales, con diferente estrategia de secuestro de carbono (plantas C3: cebada, frente a plantas C4: sorgo).
5. Cultivos energéticos: cultivo de especies para la obtención de energía ya que este tipo de cultivos presentan una buena adaptación para su desarrollo en terrenos no utilizados para la producción de alimentos y tienen una alta eficiencia en el uso del agua. En este sentido, los estudios han demostrado la viabilidad del cultivo de la colza para producción de biodiesel en la CAPV.
6. Desarrollo de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones políticas, (Scientific Support to Policies, SSP) de adaptación al cambio climático en el sector agrícola y medioambiental de la CAPV. En el proyecto se ha elaborado la herramienta AGROCLIMA-SSP-CAPV v.1.0, que incorpora los resultados obtenidos hasta la fecha y queda abierta para la inclusión de los que se obtengan en fases posteriores del proyecto.
7. Implementación de sistemas de riego que posibiliten un mejor uso de los recursos del agua a través de la utilización de los sistemas de riego adecuados para cada cultivo y zona de producción, así como reducir el potencial déficit de agua para fines agropecuarios.
8. Implementación de un sistema de plagas y enfermedades: reducir los efectos de la contaminación del suelo y de las aguas superficiales, que se producirá por el uso indiscriminado de pesticidas y herbicidas, cuya aplicación está sujeta a los rendimientos decrecientes debido a las plagas y enfermedades, lo que hace necesario una aplicación cada vez mayor para amortiguar su efectos y por ende aumentar la productividad de los cultivos. Un sistema adaptado a cada zona y para cada cultivo, incluyendo la rotación de cultivos, la siembra de variedades resistentes, el uso de semillas certificadas y la aplicación de agroquímicos en las épocas oportunas.
9. Desarrollo de técnicas de adaptación biológica, (micorrización, etc.)

Ecosistemas terrestres naturales

En el caso de la producción primaria de los pastos de montaña, resulta difícil concluir el impacto que causaría el descenso esperado en la disponibilidad hídrica asociada al cambio climático, ya que el crecimiento vegetal (producido por fotosíntesis) no sólo depende del agua disponible, sino también de la concentración de CO₂ en el ambiente. Así, por una parte, una menor disponibilidad hídrica durante el periodo de pastoreo influiría en una menor producción primaria aérea (menos cantidad de forraje, y por lo tanto una reducción en la capacidad de carga), un marchitamiento acelerado del pasto y consecuentemente una pérdida de calidad nutritiva, y problemas de abastecimiento de agua para el ganado (puntos de agua y abrevaderos secos). Todo ello conllevaría cambios imprevisibles de uso y selección del territorio por parte de los animales, modificaciones en la competencia entre distintas especies y reajustes en el reparto de los recursos tróficos. Pero, por otra parte, se obtendrían mejores producciones que las esperadas a concentraciones de CO₂ actuales, dada la interacción existente entre concentración de CO₂ y disponibilidad hídrica en el crecimiento de las plantas estructurales de los pastos de montaña (gramíneas y leguminosas herbáceas), que conlleva que en una situación de estrés hídrico un aumento del CO₂ produzca un incremento en la productividad primaria aérea.

Por consiguiente, y como medida de adaptación al cambio climático, se propone la utilización del modelo de predicción de la producción primaria aérea de los pastos de montaña en relación con la disponibilidad hídrica y el efecto del pastoreo, que se ha desarrollado a lo largo del proyecto, como herramienta para la toma de decisiones a la hora de desarrollar planes de gestión adaptados a la producción, la calidad y capacidad de carga de los pastos de montaña.

Por otra parte, con respecto a las especies vegetales alóctonas, se sabe que en la actualidad, en la CAPV existen 478 especies alóctonas de plantas vasculares (20,8% de la flora total) que aparecen con mayor o menor frecuencia de forma espontánea en diversos hábitats del territorio, de las que 86 (18%) muestran carácter invasor.

Los estudios realizados indican que los principales impactos del cambio climático, serían: favorecimiento del establecimiento de nuevas especies alóctonas originarias de regiones cálidas y el aumento en la extensión de algunas especies ya invasoras en el territorio (debido al aumento de las temperaturas invernales que podría aumentar la oceanidad en ciertas comarcas); aumento en la superficie de zonas sometidas a sequía estival (clima mediterráneo, debido a una disminución de las precipitaciones estivales, sobre todo en las comarcas submediterráneas) lo que en principio dificultaría el establecimiento y expansión de muchas especies alóctonas. Además, se esperan cambios en la distribución de los pisos bioclimáticos: así, bajo un escenario de reducción de la precipitación de un 10% y un aumento de la temperatura media anual de 1,65°C para el periodo 2011-2040, se producirían cambios en la extensión y distribución de los ombrotipos de la CAPV, con un aumento de la extensión del ombrotipo seco y subhúmedo junto con una disminución de las áreas con ombrotipo húmedo e hiperhúmedo. En el occidente vizcaíno esta tendencia limitaría la extensión de algunas especies invasoras como *Robinia pseudoacacia*, *Paspalum dilatatum*, *Cortaderia selloana*, *Aster squamatus*, etc. y favorecería a otras especies como *Dittrichia viscosa*, *Sonchus tenerrimus*, *Senecio inaequidens*.

A pesar de que muchas especies alóctonas muestren preferencia por las comarcas más cálidas, el factor antrópico seguirá resultando determinante a la hora de determinar el

grado de invasión de especies alóctonas en la CAPV. Así, los estudios muestran que la comarca del Gran Bilbao es la que representa un mayor nivel de invasión, coincidiendo con la presencia de temperaturas medias más altas (piso termotemplado superior) y una elevada disponibilidad de hábitats artificiales para el establecimiento de especies alóctonas casuales. Un aumento de la temperatura (sobre todo invernal) podría favorecer la expansión de algunas especies a otras comarcas, si encuentran hábitats favorables.

Con el aumento de la continentalidad y la disminución de la termicidad, se espera que disminuya el grado de invasión de los ecosistemas riparios, aunque aumenta con la degradación ecológica o el aumento de la presión humana.

Teniendo en cuenta los impactos esperados en las especies alóctonas, éstas son las medidas de adaptación que se proponen:

1. Desarrollar, al menos en las áreas de protección especial (Reservas, Parque Naturales y otras áreas de interés), un Plan de Manejo Integrado para abordar el control de las especies invasoras (Campos, 2000; Campos y Herrera, 2006) que constaría de seis componentes básicos: la prevención, método que resulta ser el más eficiente y económico si se compara con otras opciones de gestión y manejo ya que elimina desde un principio las potenciales consecuencias de una invasión; la valoración del impacto de cada especie en los distintos ecosistemas (inocuas, amenaza actual y amenaza futura); la elaboración de un Programa de Control Específico para cada especie dado que todas no producen los mismos impactos ni requieren la misma prioridad de actuación; la evaluación de la efectividad de las técnicas de control y manejo aplicadas; seguimiento y monitorización de las especies tratadas y de la respuesta de las especies y comunidades nativas a los tratamientos aplicados; y por último, la educación y divulgación medioambiental.
2. Las medidas de divulgación e información deben ir encaminadas a crear una conciencia pública del riesgo que suponen las especies exóticas para la conservación de los ecosistemas naturales y hacer un llamamiento a la colaboración y participación de ciudadanos y organismos públicos y privados en la lucha contra algunas de estas especies.
3. Dado que la alteración antrópica de los ecosistemas se presenta como uno de los principales factores que facilitan su invasión, la conservación de los hábitats naturales y seminaturales en un aceptable grado de naturalidad puede ser una buena medida para prevenir el establecimiento y expansión de muchas especies invasoras. Dicho planteamiento se convierte al mismo tiempo en objetivo y herramienta en la lucha contra las especies invasoras.
4. Creación de una legislación específica para la lucha contra la invasión de plantas alóctonas en la CAPV, que regule su uso, su distribución, su venta, etc., en el territorio., es decir, una legislación donde se establezcan protocolos de actuación en todas aquellas actividades que puedan estar relacionadas con la invasión de estas especies.
5. *Baccharis halimifolia*, *Cortaderia selloana* y *Fallopia japonica*, por su gran poder colonizador y su creciente expansión en hábitats naturales y seminaturales de gran valor ecológico, incluidos enclaves naturales protegidos como la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, deben ser consideradas como plagas vegetales de alto impacto ecológico y se deberían tomar medidas inmediatas para su erradicación y

control. Dada la gran rapidez con que están aumentando estas tres especies, se recomienda elaborar urgentemente Programas de Control específicos para cada una, con el fin de erradicarlas y/o frenar su expansión antes de que el problema adquiriera mayores proporciones. Otras especies mucho menos abundantes actualmente, muestran un claro comportamiento invasor en hábitats naturales y debería abordarse su control inmediato para evitar que su invasión adquiriera mayor extensión y el coste sea mucho más elevado: *Spartina patens*, *Spartina alterniflora*, *Cotula coronopifolia*, *Oenothera glazioviana*, *Oe. x fallax*, *Pterocarya x redheriana*, etc.

Con respecto al sector forestal, con el objetivo de conocer el posible impacto del cambio climático en la distribución potencial futura de algunas especies, se han realizado predicciones utilizando modelos de nicho ecológico. En concreto, se ha utilizado el algoritmo GARP (Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction) para modelizar el espacio geográfico cuyas variables ambientales serán capaces de mantener poblaciones viables de determinadas especies forestales presentes actualmente en la CAPV para los años 2020, 2050 y 2080.

Los resultados generados por GARP predicen un impacto significativo sobre las especies estudiadas (*Q. robur*, *F. sylvatica* y *P. radiata*), para las que se espera la desaparición casi total de sus nichos para el año 2080 y un desplazamiento progresivo de los mismos hacia el norte de Europa a lo largo del s. XXI. Del mismo modo, es esperable que especies típicamente mediterráneas desplacen sus nichos hacia el norte, y colonicen el territorio de la CAPV, dando lugar a cambios en los ecosistemas forestales. Un peligro añadido del desplazamiento de los nichos a consecuencia del cambio climático, es la facilitación de la entrada y colonización de especies exóticas invasoras. Estos resultados deben ser considerados con cautela, ya que los modelos predicen la distribución de los nichos potenciales en cuanto a variables bioclimáticas, y puede haber más factores que influyen la distribución de una especie determinada. Por ello la distribución del nicho potencial no tiene porque coincidir exactamente con la distribución real que se dará en un futuro.

En general, se espera que para el sector forestal el aumento de la temperatura media, la disminución de la precipitación anual y el incremento de episodios climatológicos extremos, unido al incremento de la concentración de CO₂ atmosférica, tengan los siguientes efectos:

1) Mayor tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo, debido al incremento de temperatura y suponiendo que la humedad permanece a niveles actuales. Sin embargo, teniendo en cuenta que a medida que se incremente la temperatura y la demanda evaporativa disminuirá la reserva de agua en el suelo, la tasa de descomposición de la materia orgánica dependerá del número de días que el suelo esté por debajo del 50 % de la capacidad del campo. Esto supondrá un importante factor de estrés para el arbolado, llegando incluso a ocasionar cambios en la densidad del arbolado o de especies e incluso al cambio en el uso del suelo (pasando a matorral u otra vegetación de menor porte).

2) En el sector primario, la explotación forestal podría ver alterado su periodo productivo, aspecto que puede contribuir a que determinadas especies dejen de ser rentables. Los

caducifolios alargarán su ciclo vegetativo. En el caso de las especies perennifolias, se producirá una disminución de la vida media de las hojas, lo que puede suponer un incremento en la producción de hojarasca y del CO₂ devuelto a la atmósfera. La renovación foliar y de las raíces finas de los perennifolios se acelerará, disminuyendo así las reservas de la planta e incrementando su vulnerabilidad ante episodios adversos.

3) El incremento de la fotosíntesis producirá el aumento en el retorno al suelo de materia orgánica en forma de hojarasca, al tiempo que disminuirá la producción de madera. Lo que conlleva que la cantidad de carbono devuelta a la atmósfera aumente sensiblemente con el paso del tiempo.

4) Las nuevas variables climáticas elevarán la producción de las masas forestales inicialmente, para disminuir conforme avance el siglo. Esto puede provocar que en un futuro los bosques inviertan su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera.

5) Con el cambio climático el contenido en carbono de los suelos de la CAPV disminuirá. Las zonas donde cabe esperar pérdidas mayores de carbono orgánico serán las más húmedas y en los usos del suelo que comportan contenidos en carbono orgánico más elevados, como son los bosques y los prados.

6) El cambio en el régimen de precipitaciones incrementará el grado de erosión potencial de los suelos en aquellas zonas que actualmente presentan un riesgo alto pues depende del tipo de suelo.

7) Además, el cambio climático puede alterar el equilibrio entre las plagas de insectos, sus enemigos naturales y sus hospedadores. Uno de los efectos más importantes puede ser la alteración de la sincronía entre el huésped y el desarrollo de la plaga, tanto en primavera como en otoño. El aumento previsto de la temperatura también favorecerá, en general, el desarrollo del insecto y su supervivencia durante el invierno como consecuencia de temperaturas más benignas.

Visto los impactos, las medidas de adaptación que se proponen para el sector forestal son las siguientes:

1. Favorecer la reforestación y forestación. En este caso, el secuestro de carbono iría unido a otros efectos beneficiosos como son, el control de la erosión y desertificación, el control de avenidas y en general en beneficio del ciclo de agua en las cuencas.
2. Favorecer la diversidad biológica: al aumentar la diversidad se dota al ecosistema de mayor calidad biológica y resistencia y resiliencia respecto de las posibles perturbaciones (fuego, plagas, etc.).
3. Desarrollo de modelos predictivos para orientar la planificación de los programas de restauración forestal basándose en los factores que controlan la capacidad de secuestro de carbono en el suelo, en el marco de una política de reforestación de montes degradados o forestación de cultivos abandonados.
4. Gestión forestal que tenga en cuenta la prevención de incendios, de manera que se mejore la resistencia y resiliencia al fuego, tomando en cuenta la selección de las

especies más apropiadas y el diseño de la distribución espacial de las masas forestales en relación con la propagación de los incendios. Al disminuir la extensión e intensidad de los incendios se contribuye a mejorar el balance de carbono. Así como la acumulación de carbono en fracciones orgánicas más estables.

5. Evitar la desaparición de áreas específicas de acumulación de carbono como turberas y humedales. Si bien no ocupan una fracción importante de la superficie del territorio, son áreas en que se suele acumular gran cantidad de carbono, y que deberían ser objeto de protección.
6. Se deben identificar y establecer áreas potenciales para la conservación de especies de interés donde se pueda comenzar en un futuro próximo con medidas de incorporación de especies amenazadas por el cambio climático.
7. Desarrollar un plan de conectividad que contemple los efectos del cambio climático y asegure la existencia de redes conectivas que permitan a las especies desplazar su hábitat en altitud o latitud hacia áreas más propicias para su desarrollo.
8. Introducir especies/ecotipos adaptadas, localización de ecotipos con menor vulnerabilidad al cambio climático y facilitar su extensión.
9. Desarrollar, investigar en herramientas biológicas de ayuda a la naturaleza (micorrización, selección genética) que permitan a las especies adaptarse a los cambios con mayor facilidad.

Medio urbano

Durante la última década se han dado grandes pasos hacia la consecución de una gestión urbana cada vez más proactiva ante escenarios de cambio climático. A pesar de estos avances, aún se necesitan enfoques más ajustados a la práctica de la planificación, que relacionen estrechamente diagnóstico y actuación, necesidad a la que se ha propuesto responder con la metodología desarrollada. La metodología desarrollada dentro del proyecto K-Egokitzen permite identificar zonas urbanas vulnerables o generadoras de vulnerabilidad donde sería necesario dedicar recursos (económicos, humanos...) y esfuerzos tanto municipales, como regionales y territoriales, es decir, este desarrollo nos permite priorizar acciones o actuaciones.

Los resultados del análisis de vulnerabilidad municipal en la CAPV indican que ocho municipios, que, por lo general, se localizan o bien en la costa o bien en la rivera (Bermeo, Bilbao, Donostia-San Sebastián, Erandio, Errenteria, Getxo, Santurtzi y Zarautz) pueden sufrir impactos de los tres eventos climáticos extremos analizados (inundaciones, islas de calor y subida del nivel del mar). Ahora bien, estos municipios, que representan el 3,2% de la CAPV, acogen al 35,4% de la población de la misma. A estos habría que añadir otros 37 municipios que pueden sufrir impactos de 2 de los 3 eventos analizados y que, por lo general, se encuentran también densamente poblados.

En conjunto, podemos decir que el 77% de la población de la CAPV residen en municipios que podrían sufrir 2 o 3 de los eventos climáticos extremos más probables en la CAPV.

La vulnerabilidad urbana se ha analizado en el municipio de Amurrio (caso piloto) por ser uno de los mayores municipios de la cuenca del Nerbioi y tener un alto compromiso social e institucional. En este caso se ha analizado la vulnerabilidad en relación a los dos tipos de impactos que le podrían afectar: inundaciones y olas de calor. Los resultados obtenidos para inundaciones con periodo de retorno de 500 años (correspondiendo esta a una de las peores situaciones posibles) muestran que la capacidad de respuesta del medio biofísico, social y económico contrarresta la sensibilidad de estos sistemas, por lo que la vulnerabilidad de estos no es excesivamente alta, a pesar de que se parte de niveles muy altos de sensibilidad:

- El 18% de la superficie (34.6 ha.) del medio biofísico expuesto es vulnerable. Si bien solo el 2% de la superficie del municipio de Amurrio está expuesta (192,4 ha.) al fenómeno de inundaciones para el periodo de retorno de 500 años, siendo 79.8% de esta área sensible (153,5 ha.).
- El 2,2% del medio social expuesto es vulnerable (31 personas). Si bien el 14,1% de la población de Amurrio está expuesta al evento (1.427 personas), de las cuales el 28,5% son sensibles (407 personas).
- Con respecto al medio económico, el 13% de las actividades (3) y el 15% del empleo (36 empleos) expuestos son vulnerables. Se parte de que en el suelo expuesto se localizan 23 actividades, en las que se encuentran empleadas 241 personas. El 83% de las actividades (19) y el 91% de los empleos expuestos son sensibles.
- El 75% de la superficie construida expuesta es vulnerable (83,7 ha), debido principalmente a la existencia de edificios especiales (centros sanitarios, educativo...) o de patrimonio cultural. El medio construido en el municipio de Amurrio no posee una alta capacidad de respuesta ante inundaciones, por lo que la vulnerabilidad es muy semejante a la sensibilidad de este sistema.

Evidentemente, la metodología de evaluación de la vulnerabilidad que se ha desarrollado tiene su máxima utilidad cuando los resultados de su aplicación se utilizan para orientar, dirigir y diseñar estrategias de adaptación que conlleven una reducción de la vulnerabilidad al cambio climático, bien reduciendo la sensibilidad y/o aumentando la capacidad de respuesta de los sistemas, o bien aumentando la capacidad de adaptación, es decir, realizando Gobernanza Adaptativa.

En este sentido se han desarrollado las siguientes herramientas e instrumentos de trabajo:

1. Guía de definición de estrategias de adaptación al cambio climático desde la escala regional a la local. Se trata de una Hoja de Ruta para la definición de medidas de adaptación basada en una aproximación en cuatro fases: Prospectiva, Diagnóstico, Diseño de Planes de Adaptación y Definición de Líneas de Actuación. El proceso se inicia con la identificación de los sectores o municipios vulnerables de la CAPV, para a continuación evaluar su vulnerabilidad sectorial, y en base a esto definir un conjunto de alternativas de adaptación, que constituye el Plan de Adaptación específico. Posteriormente, se priorizan estas medidas en función de una serie de criterios, como, aplicabilidad a la CAPV, tendencias de los grupos sociales afectados a futuro, impacto medioambiental, efectividad en base a certidumbre de los impactos, análisis coste-beneficio, etc.

2. Catálogo de medidas genéricas de adaptación al cambio climático en el ámbito de la planificación urbana y territorial. Constituye una guía y fuente de información destinada a autoridades públicas (locales, provinciales y regionales), donde se muestran las diferentes alternativas existentes en lo que se refiere a medidas generales de adaptación. Constituye la base para la elaboración posterior de estudios de detalle sobre la viabilidad de la aplicación de estas medidas. La guía recoge 18 medidas de adaptación (descritas en formato ficha) que mayoritariamente se refieren a la adaptación ante eventos extremos por inundaciones, aunque algunas de ellas son también aplicables a olas e islas de calor.
3. Propuesta de medidas de adaptación específicas a un caso piloto: el municipio de Amurrio. Para el análisis de la potencialidad o el éxito de alternativas de adaptación a nivel local, se han realizado simulaciones en el municipio de Amurrio en base a los resultados de vulnerabilidad que se han obtenido en las diferentes dimensiones: social, biofísica, económica y urbana. Para ello se han seguido los siguientes pasos: 1) selección de un *driver* relevante, 2) cálculo de las variables de sensibilidad (S) y capacidad de respuesta (CR) para ese nuevo escenario, y 3) simulación de la medida necesaria para devolver los valores de S y/o CR a su valor original o mejorarlo, con el fin de minimizar el valor de vulnerabilidad futura.

Con respecto al segundo impacto estudiado en los núcleos urbanos, estudios preliminares sobre el cambio climático muestran una amplificación del impacto térmico en las ciudades de la CAPV. Así, se puede apreciar un aumento de las temperaturas máximas para finales de s. XXI (2071-2100) de 4°C para la ciudad de San Sebastián y de 4,7°C para la de Vitoria. Para dicho periodo, el número de días que superarán 35°C se multiplica por cinco (10 días) en las tres ciudades. Se estima que estos valores son para la ciudad, entre 2 y 3 veces mayores que para las zonas rurales adyacentes. Además, se espera que los episodios de ola de calor sean más largos, así como las temperaturas implicadas más elevadas (del orden de 1,4°C).

En cuanto a las temperaturas mínimas, se ha estimado que para finales de siglo habrá un aumento de 2,9°C para San Sebastián y Vitoria y de 3,6°C para Bilbao. El número de días con temperaturas inferiores a 0°C pasa de 30 en Vitoria y 8-9 en las dos ciudades costeras en el periodo actual a 8.5 días y 1-2 días respectivamente a finales de siglo. La tendencia futura predicha para episodios de olas de frío es una disminución en el porcentaje de ocurrencia de estos eventos, así como una disminución de su temperatura media. Los periodos de olas de frío serán además más largos.

Un análisis más exhaustivo a escala de barrio ha mostrado la importancia del diseño urbano sobre las variables climáticas locales y en consecuencia sobre la percepción y confort del peatón (índice PET). Por ello se han analizado diferentes escenarios de diseño urbano para la mejora del clima entorno a la plaza de Indautxu (Bilbao). Este análisis conlleva una metodología específica que incluye mediciones microclimáticas y modelización numérica de alta resolución.

En cuanto a las mediciones experimentales, como era de esperar, los registros climáticos obtenidos varían de forma significativa a lo largo del día. Consecuentemente, el índice de confort térmico PET también evoluciona a lo largo del día aumentando la magnitud en

aquellas zonas expuestas a la radiación solar (radiación de onda corta) y alcanzando un máximo en las horas posteriores al mediodía (15-17 horas). Así mismo se observó el calentamiento de los elementos urbanos (radiación de onda larga) y su influencia en el confort térmico de los habitantes de los núcleos urbanos. Sin embargo, también se ha comprobado que la exposición a flujos de aire (distinta velocidad de viento) que se encauzan a través de las estructuras urbanas afecta el confort térmico del peatón. Así pues, otro factor clave en el microclima local o de barrio es su ventilación.

Aunque existen días a lo largo del año donde la sensación térmica es de incomodidad, el clima en Bilbao se caracteriza por ser húmedo y temperaturas suaves. En cualquier caso, la percepción térmica de los habitantes de Bilbao es una característica subjetiva del conjunto de la población ya que aspectos socio-culturales y de adaptación al clima influyen de forma determinante. De las entrevistas a la población, realizadas simultáneamente con las mediciones climáticas, se desprende que existe una especial sensibilidad entre la población a la humedad ambiental. Cuanta más humedad se percibe, mayor es también la percepción de temperatura y se percibe menos viento y menos agrado con la humedad, temperatura y viento, y mayor es el estrés térmico del día.

A raíz de los resultados obtenidos, se han analizado escenarios de diseño urbano propuestos. Dichos escenarios se han basado en las variables que influyen en el clima local: la presencia de vegetación, modificación de la cobertura urbana (propiedades de los materiales) y cambio en la morfología urbana (movimiento de aire y radiación).

Los resultados de la comparación con el escenario base (el actual diseño de Indautxu) han mostrado que una parte muy significativa de las características climáticas de la plaza pueden cambiar con pequeños cambios urbanos. Se ha observado la influencia del balance radiativo y el efecto de la evapotranspiración de la vegetación en la temperatura del aire junto a los árboles (puede descender hasta 3°C). Por otra parte, un pequeño cambio en el diseño urbano (eliminación de un edificio) puede aumentar el flujo de aire con el correspondiente efecto en la sensación térmica del peatón que podría pasar de incomodo por exceso de calor a confortable en más de la mitad de la superficie de la plaza. Igualmente los efectos en la calidad del aire pudiendo disminuir a la mitad los niveles de concentración de contaminantes en más del 50% de la superficie.

Así pues, la experiencia del estudio de la Isla de Calor – Clima Urbano es la base para el planteamiento de medidas para la disminución de los efectos de la urbe dentro de un contexto de adaptación ante un potencial incremento de las temperaturas debido al cambio climático. Así, como se ha demostrado en los apartados anteriores las posibles soluciones se plantean desde una perspectiva multiescalar, valorando el efecto del cambio climático en el conjunto del núcleo urbano, especializando su impacto según los diferentes barrios y usos del suelo y obteniendo las zonas más sensibles. Por supuesto conocer la vulnerabilidad de las personas a través de su percepción térmica es de vital importancia para establecer medidas concretas de adaptación. En este sentido la evaluación climática a escala de barrio a través de la modelización a muy alta resolución horizontal (<5 m) permite el análisis de diferentes soluciones o escenarios a través de la planificación y diseño urbano en base a:

1. La utilización de nuevos materiales (pavimentos, cubiertas, fachadas, ...).
2. La introducción de vegetación (índice de sombra, evapotranspiración, adaptabilidad, ...).

3. La utilización del flujo de viento a escala local y la modificación de los patrones de ventilación a escala de toda la urbe (emplazamiento, orientación, forma, altura de cada edificio y disposición de ellos dentro de una barriada).

En materia de salud humana, se espera un aumento de la morbi-mortalidad por olas de calor e islas de calor y un aumento de los episodios agudos respiratorios, especialmente de las alergias. Estos episodios se intensificarían como consecuencia de la ampliación del periodo polínico y del número de días calurosos y secos que potencian la carga ambiental (resultando la región sur la más perjudicada), que afectarían fundamentalmente a la población sensible como la infancia, las personas mayores o personas con movilidad reducida (dependencia y/o discapacidad) (para 2020 el 25% de la población superará los 65 años). Como consecuencia del aumento de la temperatura podría aumentar la concentración de ozono troposférico, especialmente durante los meses de verano, con el consiguiente empeoramiento de la calidad del aire. Esta situación se intensificaría en situaciones anticiclónicas en las que predominen altas temperaturas, escasa cobertura nubosa y poco viento (situaciones que, previsiblemente, como consecuencia del cambio climático se producirán con mayor frecuencia).

3 Conclusiones

Los trabajos para la estimación de los impactos del cambio climático y la definición de alternativas de adaptación de los diferentes sistemas, deberán continuar mejorando progresivamente la precisión de las predicciones futuras de impactos climáticos, así como su integración con escenarios socio-económicos y de cambios de usos del suelo, para una mejor modelización de la vulnerabilidad futura de los diferentes sistemas costeros, marinos, industriales, de comunicación, urbanos, naturales y agrícolas.

En la evolución futura de estos trabajos, los análisis de impacto-vulnerabilidad deberán combinarse con análisis coste-efectividad de las alternativas de adaptación. Los costes económicos esperados por el impacto del cambio climático pueden llegar a ser importantes y debe analizarse la rentabilidad de las acciones tempranas de adaptación, ya que resulta menos costoso mitigar emisiones de manera inmediata que afrontar en el futuro los impactos económicos derivados del cambio climático.

Agradecimientos

El proyecto K-Egokitzen está cofinanciado por el Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca de Gobierno Vasco, a través del programa ETORTEK de la Sociedad para la Promoción y Reconversión Industrial (SPRI), y el Departamento de Industria e Innovación en el marco de Plan Vasco de Ciencia, Tecnología e Innovación 2010.

Esta comunicación, constituye un documento resumen en el que se muestran los resultados del proyecto K-Egokitzen, en el que han participado 15 grupos de investigadores y más de 100 investigadores (VVAA, 2010). De los 15 grupos, 3 pertenecen a los Centros Tecnológicos de Tecnalia-Unidad de Medio Ambiente, AZTI-Tecnalia y Neiker-Tecnalia. Los 12 grupos restantes, pertenecen a diversos departamentos de la Universidad del País Vasco: Dpto. Matemática Aplicada; Dpto.

Ingeniería nuclear y dinámica de fluidos; Dpto. Geodinámica; Dpto. Biología Vegetal y Ecología: Grupo investigación "Bentos Marino (flora y fauna)", Grupo investigación "Fitoplancton Marino", Grupo investigación "Zooplancton Marino", Grupo investigación "Uso eficiente del nitrógeno", Grupo investigación "Incremento de CO₂ y Cambio Climático", Grupo investigación "Paisaje Vegetal", Grupo investigación "Flora y Vegetación"; Dpto. Zoología y Biología Celular Animal: Grupo de investigación "Fauna Continental", Línea de investigación "Salud de los ecosistemas".

Para llevar a cabo este trabajo hemos contado con el apoyo de diversas Instituciones y organizaciones tales como Diputación de Gipuzkoa, Bizkaia y Araba, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Servicio de Cartografía de Gobierno Vasco entre otros.

Bibliografía relevante

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

Brunet, M., Casado, M.J., de Castro, M., Galán, P., Lopez, J.A., Martín, J.M., Pastor, A., Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Rodríguez, E., Torres, L. (2009). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

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

Chust G, Borja A, Caballero A, Liria P, Marcos M, Moncho R, Irigoien X, Saenz J, Hidalgo J, Valle M, Valencia V. Climate Change on the coast and pelagic environment in the south-eastern Bay of Biscay. *Climate Research* (In press). DOI: 10.3354/cr00914.

Fernandes, J. A., X. Irigoien, N. Goikoetxea, J. A. Lozano, I. Inza, A. Pérez, A. Bode, 2010. Fish recruitment prediction, using robust supervised classification methods. *Ecological Modelling*, 221: 338-352.

Garmendia M, Borja A, Muxika I (2008) Long-term environmental, climatic and anthropogenic factors affecting subtidal soft-bottom benthic communities, within the Basque coast. *Rev Invest Mar* 2:1-28

Campos J.A. (2000). Impacto de la Flora Exótica naturalizada en la CAPV: Clasificación, Evaluación y Control. Trabajo de Investigación Inédito realizado para la Fundación BBK. Aula de Cultura de la BBK, Bilbao.

Campos Prieto J.A. y Herrera Gallastegui M (2006). *Cortaderia selloana* en Bizkaia: situación actual y estrategias de control. "EEI 2006" 2º CONGRESO NACIONAL SOBRE ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS. León.

IPCC AR4, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. R. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff et al.

Mendizabal, M., Moncho, R., Chust, G & Torp, P. (2010). Modelling hydrological responses of Nerbioi River Basin to Climate Change. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-12492-1.

Moncho, R., Chust, G. & Caselles, V (2010). Regional scenarios of mean and extreme precipitation regimes in the Basque Country. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-4407.

Pérez, L., Borja, Á., Rodríguez G., Muxika, I., 2009. Long-term environmental, anthropogenic and climatic factors explaining spatial and temporal distribution of soft-bottom benthic communities within the Basque estuaries. Revista de Investigación Marina, 14: 22 pp.

Revilla M., A. Borja, A. Fontán, J. Franco, M. González, V. Valencia, 2010. A two-decade record of surface chlorophyll "a" and temperature in offshore waters of the Basque country (southeastern Bay of Biscay). Revista de Investigación Marina, 17(2): 13-20.

VVAA (2010). El Cambio Climático en la CAPV: impactos y adaptación. Gobierno Vasco (pendiente de publicación).