



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural

ENCOMIENDA DE GESTIÓN DE TRABAJOS DE ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN MATERIAS COMPETENCIA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL (2009-2013)

Actuación nº 4

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS INTERACCIONES ENTRE LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE Y LA BIODIVERSIDAD

**INFORME A4-T116
TOMO ÚNICO**

Clave CEDEX: 51-309-5-001

Madrid, febrero de 2013

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas



EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS INTERACCIONES ENTRE LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE Y LA BIODIVERSIDAD

ÍNDICE

1	RESUMEN EJECUTIVO	1
2	INTRODUCCIÓN	2
3	LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES Y LOS HÁBITATS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	3
4	LA FRAGMENTACIÓN DEL TERRITORIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	5
5	LA BIODIVERSIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	6
5.1	RESULTADOS BASADOS EN OBSERVACIONES/EVIDENCIAS	7
5.2	RESULTADOS PROVENIENTES DE LA APLICACIÓN DE MODELOS	11
6	LAS REDES DE ESPACIOS PROTEGIDOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	15
7	BIBLIOGRAFÍA	24

1 RESUMEN EJECUTIVO

Los cambios en el clima ejercen una presión sobre la biodiversidad adicional a la que causan las actividades humanas. El presente informe constituye una reflexión sobre las afecciones del cambio climático a las interacciones entre las infraestructuras y el medio ambiente, de modo particular sobre la biodiversidad.

En la distribución espacial de las poblaciones y de las comunidades vegetales y animales los efectos del cambio climático se superponen a los factores ecológicos redibujando la actividad de estos últimos. Coincidiendo con la aceleración del cambio climático, la actividad humana también da lugar a la fragmentación de los territorios en los que se encuentran las poblaciones y comunidades biológicas.

El cambio climático conlleva una redistribución geográfica de los ecosistemas según los conocemos actualmente. Pero esta redistribución se producirá de un modo diferencial, según las capacidades de dispersión de las especies, en interacción con otros factores, principalmente la fragmentación del territorio producida por las infraestructuras de transporte y las relaciones ecológicas que se producen entre los organismos en cualquier ecosistema.

La fragmentación, sea de origen natural o artificial, limita las posibles respuestas de los organismos al cambio climático al dificultar sus movimientos diarios y estacionales, reducir las tasas de dispersión, y reducir la posibilidad de colonizar zonas que podrían ser hábitats favorables en escenarios climáticos futuros. Además, la combinación del cambio climático con la fragmentación representa una contracción de las áreas de distribución de las especies superior en varios órdenes de magnitud frente a los cambios climáticos naturales.

Los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad pueden mostrarse mediante innumerables casos estudiados empíricamente dentro y fuera de España, tanto en organismos vegetales como en animales, y también a partir de las predicciones de modelos de poblaciones.

La reflexión no sólo se dirige a los efectos sobre especies, poblaciones y comunidades, también tiene en cuenta el territorio, planteando hasta qué punto la actual configuración de las redes de espacios protegidos (principalmente la Red Natura 2000) garantiza la conectividad necesaria para colonizar nuevos espacios climáticos potencialmente aptos o, por el contrario, el aislamiento entre las áreas protegidas impedirá la expansión hacia nuevas zonas adecuadas climáticamente. Como estrategia de mejora de la resistencia de las redes de espacios protegidos al cambio climático se propone la identificación de *cuernos de botella* (las partes del área de distribución donde la conectividad es baja o hay escasa área de un hábitat concreto, que inhibe la respuesta espacial de determinada especie al cambio climático) y se priorizan diversas medidas de adaptación del territorio al cambio climático.



CEDEX

2 INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica se comporta como un pequeño continente debido a su extensión y variedad tanto morfoestructural como climática. Además, su situación en el extremo occidental de Europa y la localización entre los continentes europeo y africano, ocasionan una elevada biodiversidad.

Precisamente por su variedad climática y por ende biogeográfica, la Península Ibérica representa un enorme laboratorio de cara a seguir los efectos del cambio climático. Estos cambios en el clima ejercen una presión sobre la biodiversidad adicional a la que causan las actividades humanas (IPCC 2002).

El presente informe se enmarca en el desarrollo de una línea de estudio, desde una perspectiva de adaptación de las infraestructuras lineales de transporte a los efectos del cambio climático. Particularmente se centrará en el análisis de cómo se espera que afecte el cambio climático a las interacciones entre las infraestructuras y el medio ambiente, de modo particular sobre la biodiversidad.

Este estudio se enmarca en el Acuerdo para la Encomienda de Gestión suscrito por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, DGCEAMN) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), que lleva por título Trabajos de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias competencia de la Dirección General (2009-2013). En la Encomienda de Gestión se incluye la Actuación nº 4 Asistencia Técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de evaluación ambiental estratégica (EAE) (clave de actuación 51-309-5-001).

Entre los trabajos desarrollados dentro de esta Actuación nº 4, la DGCEAMN ha encargado al CEDEX abrir una línea de análisis sobre la consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de diferentes sectores de infraestructuras. Dentro de esta línea de trabajo, en noviembre de 2011 se entregó el informe titulado “La consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de planes y programas – Aplicación al caso de planes y programas de infraestructuras de transporte”. Como consecuencia de este estudio, desde la DGCEAMN se ha requerido continuar estos análisis con una reflexión acerca de cómo incluir en la evaluación ambiental los efectos del cambio climático sobre las relaciones entre las infraestructuras y la biodiversidad.

Con este motivo se ha formado un grupo de trabajo constituido por personal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, y Oficina Española de Cambio Climático), del Ministerio de Fomento y del CEDEX, para la definición del alcance del presente informe y la reflexión conjunta desde diferentes perspectivas.

3 LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES Y LOS HÁBITATS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La distribución espacial de las especies de vegetación y fauna y de las comunidades obedece a componentes tanto ecológicos como cronológicos. Los componentes ecológicos hacen que en la Península confluyan especies y comunidades de dominios diferentes, básicamente de país húmedo por el Norte y las montañas, y mediterráneas y esteparias por el Centro y hacia el Este.

Los factores cronológicos se superponen a los ecológicos redibujando la actividad de los componentes ecológicos. Principalmente se deben a la acción diferencial de las oscilaciones climáticas que han afectado a la Península Ibérica desde el Pleistoceno. En líneas generales esta variación climática ha dado lugar a dos grandes tipologías de vegetación y fauna: una muy antigua, que persiste en las regiones que se mantuvieron al margen de las glaciaciones (comunidades esteparias), con marcadas afinidades circunmediterráneas, y otra más moderna procedente de colonizaciones más recientes, en las regiones que se encontraron en el entorno o bajo la acción de los glaciares y que han conservado un clima más húmedo, caracterizada por elementos eurosiberianos y boreoalpinos.

Estas constantes variaciones climáticas naturales persisten actualmente aunque con un desarrollo inesperadamente rápido, acentuado por las emisiones antropogénicas de gases con efecto invernadero a la atmósfera. Paralelamente, las especies vegetales y animales condicionan su distribución a la de los parámetros ambientales más adecuados para completar sus ciclos vitales (alimentación, reproducción y desarrollo).

A diferencia de las anteriores épocas interglaciares, la actividad humana en las últimas seis décadas ha entretejido una tupida red de infraestructuras lineales de transporte dentro de una extraordinaria capacidad de transformación de los usos del suelo. Un resultado secundario de esta actividad, coincidente con la aceleración del cambio climático, ha sido la fragmentación causada por la actividad humana de los territorios en los que se encuentran las comunidades naturales.

Indudablemente el aumento de las temperaturas, el cambio en los patrones de las precipitaciones, etc. conllevarán una redistribución de los ecosistemas según los conocemos actualmente. Esta redistribución es reconocido que se producirá en latitud hacia los Polos y en altitud hacia zonas más elevadas, es decir, buscando mantener las temperaturas y las precipitaciones en las cantidades necesarias. En la Península Ibérica concretamente hacia el norte y hacia las cumbres de las montañas.

Teóricamente, mientras que los factores ecológicos juegan un papel importante en la distribución de los organismos con mayor capacidad de dispersión, los geográfico-cronológicos lo hacen en las formas menos dispersables (Alonso, M. 1998). Se presentan dos casos extremos como ejemplo de diferentes grados de movilidad de ambos tipos de organismos.

Arens *et al.* (2007) estudian los efectos de la fragmentación de hábitats a partir de la estructura genética de diferentes subpoblaciones de la rana de brezal (*Rana arvalis*). Precisamente los anfibios en general se encuentran entre los organismos potencialmente más afectados por la fragmentación, debido a que viven generalmente en medios acuáticos y por sus hábitos de dispersión. El estudio se centra en dos zonas diferentes de Holanda, una fragmentada más



CEDEX

recientemente y con mejor conectividad¹ entre sus hábitats y en la otra las charcas están separadas hace más tiempo y la distancia entre ellas es mucho mayor. Estos investigadores encuentran diferencias genéticas mayores entre las lagunas de la zona fragmentada más antiguamente y con mayor distancia entre ellas. Solamente se detecta una anomalía en este patrón general, y se debe a que la laguna más aislada del conjunto (a mayor distancia y más antiguamente) es muy similar a cualquiera de las demás, debido a que el tamaño de esta población es mucho mayor que en el resto de las lagunas y, por tanto, la diferenciación genética es más lenta.

En el otro extremo se encuentra el saltamontes pardo de matorral (*Pholidoptera griseoptera*) en Suiza. Diekötter *et al.* (2010) detectaron esta especie en el 73% de los hábitats adecuados para sus requerimientos ecológicos. En su estudio no detectan diferencias genéticas entre poblaciones aisladas, al tratarse de un insecto volador con facilidad para colonizar nuevos espacios, y de amplios requerimientos ecológicos.

Sin embargo, ¿somos capaces de cuantificar cómo afectará a ambos conjuntos de especies (más y menos dispersables) la suma de ambos fenómenos (cronológicos y ecológicos)? ¿Encontrarán áreas alternativas a las actuales para ocupar los ecosistemas protegidos en el presente? ¿Los hábitats protegidos actualmente serán iguales a los de los futuros escenarios climáticos, con comunidades vegetales y animales equivalentes? ¿Cómo afectarán las infraestructuras lineales construidas actualmente en la futura redistribución de los ecosistemas?

Por el alcance de este informe centraremos nuestra reflexión en torno a estas preguntas. Las infraestructuras lineales dan lugar, entre otros impactos, a la fragmentación del territorio, que denominamos antropogénica ya que se superpone a la que se puede haber generado de forma natural (distribución disjunta) por las razones explicadas anteriormente. La fragmentación puede dificultar la conectividad entre fragmentos de un mismo hábitat, por ejemplo un bosque, de modo que queda separado en dos o más fragmentos o parches² (por una carretera, urbanización, cultivos, etc.) o también puede afectar a la conectividad de hábitats separados naturalmente (a ambos lados de un río, entre montañas, entre cordilleras, por ejemplo).

Las dificultades genéricas añadidas por la fragmentación del territorio a cualquier redistribución de las especies, aunque no son suficientemente conocidas sí se pueden suponer. Sin embargo es muy complejo determinar cómo afectará a especies singulares esta superposición de factores ecológicos (fragmentación) y cronológicos (cambio climático). Las especies no se encuentran solas ni aisladas en sus hábitats, sino que forman parte de una intrincada malla en la que la desaparición de una especie puede repercutir sobre otras, o también, para que una especie pueda colonizar una zona nueva, precisa que también se trasladen paralelamente otras especies de las que depende en determinados momentos para su desarrollo.

Battisti (2008), por ejemplo, propone algunos indicadores a cerca de los efectos del cambio climático sobre las relaciones entre los árboles forestales y los insectos fitófagos, si bien señala que se necesita más investigación para hacer predicciones fiables.

Parmesan y Yohe (2003) recogen un caso concreto que puede ayudar a entender la superposición de factores para explicar los cambios en la distribución de las especies: la mariposa “rayada saltadora” (*Hesperia comma*) ha ampliado en Inglaterra su distribución hacia el Norte en los últimos 20 años. Las explicaciones ecológicas de esta expansión podrían ser

¹ **Conectividad:** la capacidad de los organismos para moverse a través de paisajes, no sólo en el ámbito terrestre, sino también en sistemas acuáticos y en el medio aéreo y entre ellos.

² **Parche (patch):** retazo o fragmento de un territorio.

tanto el calentamiento regional como los cambios de uso del suelo, ya que coinciden en el periodo analizado.

En este caso particular se contaba con una información valiosa procedente de estudios anteriores, los cuales documentan una fuerte limitación térmica en la distribución de esta especie de mariposa. Además, los modelos de simulación basados exclusivamente en medidas de tolerancia térmica (es decir, sin cambio de uso del suelo) permiten predecir una expansión hacia el Norte de 14,4 km, muy próxima a la observada, de 16,4 km. Por tanto, la comparación de las magnitudes y direcciones de estos dos factores sugiere que el cambio climático es más probable como causa de expansión que el cambio de usos del suelo.

Existen diferentes tipos de modelos (genéticos, sobre el uso del territorio, conductuales según el paisaje, etc.) que procuran predecir la viabilidad de las poblaciones³ ante el cambio climático. Sin embargo los expertos reconocen que aún necesitan realizar validaciones, recoger mayor cantidad de datos empíricos e incluso justificar determinadas conclusiones. Es decir aún se precisa mucha investigación para que estos modelos empiecen a ser generalizables.

Tanto la literatura técnica como la científica recomiendan, mientras no se tenga un conocimiento más concreto de la evolución de los ecosistemas y la readaptación de las especies, incorporar diferentes medidas desde una perspectiva de adaptación: mejorar la resistencia⁴ y la resiliencia⁵ de los hábitats (Lindenmayer *et al.* 2008), conservar la diversidad genética (Loss, S.R. *et al.* 2011), eliminar especies exóticas invasoras (Loss, S.R. *et al.* 2011), preservación de los bordes de los espacios protegidos, incrementar la conectividad (Loss, S.R. *et al.* 2011), hacer más extensa la red de espacios protegidos (Smulders, M.J.M. *et al.* 2009), etc.

4 LA FRAGMENTACIÓN DEL TERRITORIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La fragmentación de hábitats no es el único efecto de las infraestructuras lineales de transporte sobre el medio ambiente, pero resume (a modo de paraguas) los principales impactos que generan dichas infraestructuras. El primer impacto, por ejemplo, en un orden temporal podría ser la pérdida de hábitat, e incluso más llamativo para la opinión pública son los atropellos de fauna, o también el ruido o la producción de gases contaminantes. Cada vez más se toma conciencia de las múltiples consecuencias de la iluminación nocturna. También se explica cómo la apertura de carreteras facilita la penetración en el territorio y además genera la urbanización de los márgenes de la vía. No obstante estos impactos dan lugar en mayor o menor grado al efecto barrera cuya consecuencia última se traduce en la fragmentación de hábitats.

El fenómeno de la fragmentación puede producirse, como se ha explicado en el apartado anterior, por causas naturales o artificiales. Se ha expuesto cómo a causa de los cambios climáticos determinados hábitats y especies van refugiándose en pequeñas porciones del territorio. Por ejemplo, es fácilmente comprensible un modelo de especies boreoalpinas acantonadas en las cumbres de sistemas montañosos ibéricos (Alonso, M. 1998), lejos del

³ **Población:** Conjunto de organismos de la misma especie que ocupan un área definida.

⁴ **Resistencia ambiental:** Capacidad del sistema de soportar perturbaciones sin cambiar su estructura o funcionamiento. Generalmente se trata de perturbaciones leves.

⁵ **Resiliencia ambiental:** Capacidad del sistema de recuperar su estado original al cesar una perturbación. Generalmente se trata de perturbaciones graves.



CEDEX

Norte de Europa de donde proceden. También se observa en ecosistemas tan diferentes como el marino en el que, por ejemplo, especies de peces autóctonas muy extendidas por todo el mar Mediterráneo durante periodos fríos, desde la década de los 80 se detectan progresivamente más acantonadas en las zonas con aguas frías hacia el litoral Norte (Mar Adriático y Golfo de León), según un modelo de “cul-de-sac”. Incluso se ha encontrado una fuerte disminución en la abundancia de las especies boreales (Lasram, F.B.R. *et al.* 2010).

No obstante la velocidad e intensidad del cambio climático en las últimas décadas, combinada con la fragmentación generada por las infraestructuras, representan una contracción de las áreas de distribución de las especies comparativamente de órdenes de magnitud superiores frente a los cambios climáticos naturales.

La fragmentación, sea de origen natural o artificial, limita las posibles respuestas de los organismos al cambio climático a través de cuatro efectos principales a escala de paisaje: (1) reducción en la cantidad de hábitat, (2) desagregación de hábitat en un número cada vez mayor de fragmentos dispares o parches, (3) disminución en el tamaño de los fragmentos, y (4) aumento del aislamiento de estos remanentes de hábitat. La fragmentación del hábitat aumenta la probabilidad de extinción de especies al dificultar sus movimientos diarios y estacionales, reducir las tasas de dispersión, y reducir la posibilidad de colonizar zonas que podrían ser hábitats favorables en escenarios climáticos futuros (Loss, S.R. *et al.* 2011).

En la extensa búsqueda bibliográfica realizada para este estudio no se ha obtenido ningún artículo en el que se investiguen directamente relaciones entre el cambio climático y la fragmentación de hábitats. Sin embargo, es general en la mayor parte de la literatura científica (y técnica) el tópico de que “los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad se verán agravados por la fragmentación de los hábitats”.

5 LA BIODIVERSIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Según las proyecciones climáticas proporcionadas por la Agencia Española de Meteorología (AEMET 2009), tomando como referencia el periodo de 1961 a 1990, se prevén aumentos de la temperatura para el periodo 2071 a 2100 de 8 °C en el centro peninsular (depresiones y ambas mesetas) tanto en la media de las máximas (en todos los modelos) como en la media de las mínimas (en los modelos más pesimistas). En cuanto a las precipitaciones, la disminución llegará aproximadamente hasta la mitad Sur peninsular (Este u Oeste según los meses) al 50% respecto al mismo periodo (1961 a 1990).

Para entender la magnitud de los efectos de estos posibles cambios de temperatura sobre la biodiversidad, se pueden analizar los datos climáticos actuales (AEMET 2011). Se comprueba que el gradiente de temperatura media anual entre el Sur y el Norte peninsular, en el periodo 1971 a 2000 es de poco menos de 8 °C (entre 10 y 12,5 °C de temperatura media en las zonas no montañosas de la submeseta norte y entre 12,5 y 17,5 °C en las zonas no montañosas de la submeseta Sur). De este modo se puede estimar, *grosso modo* y refiriéndonos a las zonas no montañosas, que las isotermas actuales se desplazarán al menos del orden de 500 km en aproximadamente 100 años hacia el Norte, o lo que es lo mismo, unos 5 km anualmente suponiendo que todo el territorio fuera plano (se producen cambios en distancias más cortas cuando se asciende en las regiones montañosas). En las montañas, también a grandes rasgos, hay un gradiente poco superior a 8°C en 1.000 m de altitud, lo que arrojaría un ascenso aproximado de 10 m anuales.

Smulders, M.J.M. *et al.* 2009 realizan extrapolaciones similares en la costa atlántica europea. Estiman que el gradiente de temperatura de norte a sur a lo largo de la costa atlántica europea es de 0,005 °C por km. Esto significa un cambio previsto de 4 °C en 100 años, por lo tanto cada isoterma⁶ se moverá 800 km, es decir, se trasladará a una velocidad promedio de 8 kilómetros por año.

Dadas las profundas transformaciones a que darían lugar estos cambios, puede resultar clarificador exponer una serie de casos estudiados empíricamente que nos ayuden a entender cómo el cambio climático está operando activamente sobre la biodiversidad. Con este objetivo se ha realizado una extensa revisión de casos por todo el Mundo que se complementa con las evidencias recogidas en España en un reciente documento publicado por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC 2012). Este documento, titulado “Evidencias del cambio climático y sus efectos en España”, recopila referencias en publicaciones científicas o técnicas sobre evidencias del cambio climático y sus efectos en España. No se transcriben todos los casos expuestos en este documento, realizándose una selección de los recogidos en el apartado sobre “Cambios observados en los ecosistemas y la biodiversidad”. En la bibliografía se adjunta el enlace URL para el acceso vía Web al documento.

Para favorecer la claridad de la exposición se separarán los casos medidos de los resultados obtenidos de la aplicación de modelos predictivos.

5.1 RESULTADOS BASADOS EN OBSERVACIONES/EVIDENCIAS

Velocidad de colonización y cambios fenológicos⁷ de diferentes tipos de organismos:

- Parmesan y Yohe (2003) estudian 677 casos registrados en la bibliografía, entre taxones y grupos de diferentes tipos de organismos, vegetales y animales (plantas leñosas, herbáceas, arbustivas, líquenes, aves, insectos, anfibios, reptiles, mamíferos, peces, invertebrados marinos incluyendo zooplancton), sus reacciones al cambio climático, tanto espaciales (cambio de rangos de distribución) como las variaciones fenológicas (avance de eventos primaverales, como la floración y la migración). Obtuvieron un promedio de 6,1 km/década de avance de la distribución y 2,3 días/década de adelanto en los fenómenos primaverales. Los cambios de distribución afectaron al 80% de las especies analizadas y el adelanto de los fenómenos primaverales (incluye adelanto de la reproducción en ranas, del anidamiento en aves, de la primera floración, de la apertura de brotes en árboles y de la llegada de aves y de mariposas migratorias) se detectó en un 87% (los rangos de tiempo de los casos analizados varían entre 16 y 132 años, mediana 45 años).
- Un estudio europeo ha evaluado el cambio en las comunidades de aves y mariposas durante dos décadas (1990–2008). Emplearon datos de 9.490 y 2.130 comunidades de aves y mariposas, respectivamente, incluyendo España. El resultado muestra un cambio rápido en las comunidades como respuesta adaptativa frente al cambio climático, equivalente a un desplazamiento hacia el norte de 37 Km para las aves y 114 Km para las mariposas. Sin embargo, estos desplazamientos son claramente inferiores al desplazamiento de la distribución de las isotermas hacia el norte, en concreto 212 Km. para las aves y 135 Km. para las mariposas; estas inercias podrían implicar cierta

⁶ En el texto original escribe “temperature isocline”, que se ha traducido libremente por “isotermas”. Las isóclinas son las líneas que unen puntos de la superficie terrestre con la misma inclinación magnética.

⁷ **Fenología:** Aspecto de la biología que estudia los fenómenos ajustados a cierto ritmo periódico, como la floración, la maduración de los frutos, etc. de las plantas y animales. Estos cambios estacionales están determinados por los factores físicos del ambiente y por mecanismos de regulación internos. Se relacionan con el clima de la localidad en que ocurren.



CEDEX

incapacidad de adaptarse tan rápido al cambio climático, sobre todo en el caso de las aves (OECC 2012), generándose, por tanto, la denominada deuda climática⁸.

- Los cantaderos de urogallo (*Tetrao urogallus cantabricus*) desocupados en las últimas décadas en la Cordillera Cantábrica se hallan a menor altitud que los que siguen ocupados (OECC 2012).
- Un estudio del CSIC demuestra que el papamoscas cerrojillo (*Ficedula hypoleuca*), una pequeña ave forestal migradora, ha disminuido paulatinamente el tamaño de sus huevos en los últimos 16 años debido al aumento de temperaturas. El papamoscas, al contrario que otras aves migratorias, no ha adaptado la fecha de sus migraciones al adelanto de la primavera, pero la época de cría habitual está resultando cada vez menos óptima porque es difícil encontrar el alimento de la calidad o en la cantidad necesarias para formar huevos de mayor tamaño. Este hecho provoca que se generen huevos de menor volumen con una probabilidad menor de eclosionar, lo que ha contribuido al descenso del éxito reproductivo de la población en las dos últimas décadas (OECC 2012).
- Poblaciones de abubilla (*Upupa epops*), águila calzada (*Hieraetus pennatus*), cigüeña negra (*Ciconia nigra*), avetorillo (*Ixobrychus minutus*), martinete (*Nycticorax nycticorax*), o águila culebrera (*Circaetus gallicus*) permanecen en la península en invierno ante la benignidad del clima (OECC 2012).
- Se ha comprobado un aumento en el periodo de actividad de la culebra bastarda (*Malpolon monspessulanus*), especie norteafricana y euromediterránea, en los últimos años en el sureste de España, como respuesta al incremento de las temperaturas (OECC 2012).
- La temporada de floración de los robles (*Quercus spp.*) ha tendido a comenzar antes en la península Ibérica en los últimos años, probablemente debido al aumento de las temperaturas en el periodo previo a la floración (OECC 2012).
- También se ha registrado una tendencia al adelanto en la foliación, la floración y la maduración de los frutos en el sur de España en algunas especies como olivo (*Olea europea*), vid (*Vitis vinifera*), robles y encina (*Quercus*) y herbáceas (*Poaceas*). Estos eventos primaverales se han adelantado con tasas entre 6,5 y 7 días por grado centígrado, siendo significativamente superiores a los observados en otras áreas de Europa (OECC 2012).
- Peñuelas *et al.* (2002) estudiaron datos cronológicos recopilados en Cardedeu (Barcelona) sobre los eventos del ciclo de vida de plantas y algunos grupos de animales, entre 1952 y 2000. La temperatura media en el área de estudio se ha incrementado en 1,4 °C en el periodo de observación, mientras que la precipitación se mantuvo sin cambios. Respecto al inicio del periodo analizado, la aparición de las hojas se adelantó 16 días de media entre todas las especies analizadas, la floración se adelantó en 6 días y la caída de las hojas se produjo 13 días más tarde. Por tanto, con un incremento de la duración del periodo foliar promediado de aproximadamente un mes.

Cambios en la distribución de vertebrados:

- Se han descrito en estudios de comunidades en los límites entre las regiones "polar" y "templada". Se describen casos en el Atlántico Norte (especies marinas), Canadá (zorro) y Gran Bretaña (aves), donde las especies polares han tendido a mantener poblaciones con abundancias estables o a disminuir, mientras que las especies

⁸ **Deuda climática:** un retraso acumulado en la respuesta de las especies a los cambios de las temperaturas, atribuible a sus limitaciones para adaptarse al cambio climático (Devictor 2012).

templadas en las mismas zonas han aumentado sus poblaciones y/o ampliado sus distribuciones. Cambios análogos se producen incluso en el Ártico y en la Antártida entre pingüinos. Se describen patrones similares en poblaciones de aves en zonas montañosas en los trópicos. La mayoría de estos estudios son locales, con alta variabilidad de la dinámica de las poblaciones de especies singulares. Aun así, el 80% de los cambios en la composición de especies de las comunidades coinciden con las predicciones del cambio climático (Parmesan y Yohe 2003).

- La rápida expansión del camachuelo trompetero (*Bucanetes githagineus*) observada desde principios de 1970 puede asociarse con cambios en factores climáticos; los mismos autores señalan el efecto de factores climáticos como la temperatura en su reproducción. Se considera a esta ave, cuya distribución tradicional se extendía por hábitats de desierto, semidesierto y estepa del norte de África, un 'buen indicador' del incremento de la aridez en los suelos del área mediterránea. Su población se ha consolidado en las provincias de Granada, Murcia, Alicante y Almería. En 2010, SEO/Birdlife constató su presencia en varios municipios de Aragón (OECC 2012).
- Se han identificado recientemente colonizaciones de aves desde África hacia España, como las protagonizadas en tan solo una década por el vencejo moro (*Apus affinis*) o el vencejo cafre (*A. caffer*), asentados en varias localidades de Andalucía; el buitre moteado (*Gyps rueppellii*), que lleva una década migrando desde África hasta España y cuyos avistamientos en la orilla europea del Estrecho de Gibraltar continúan incrementándose, o el escribano sahariano (*Emberiza sahari*), un gorrión perteneciente a las paseriformes que se puede observar tanto en Tarifa como en las localidades del norte de África (OECC 2012).
- Destaca especialmente la colonización llevada a cabo por el ratonero moro (*Buteo rufinus cirtensis*), una rapaz procedente del continente africano que se ha establecido y ha criado en la zona de Tarifa, en lo que se considera un salto biogeográfico, y de forma coherente con los resultados de los modelos climáticos de distribución (OECC 2012).
- Especies de aves típicamente mediterráneas han aparecido en la zona atlántica de la Península: la golondrina dáurica (*Hirundo daurica*). Desde su primera cita en Cádiz (1921) ha ampliado progresivamente su límite de distribución peninsular, y sigue su expansión al aparecer recientemente en latitudes cada vez más septentrionales (Asturias, Navarra...), patrón que sigue también en el resto de Europa. Las causas de este progresivo incremento son complejas, pero se incluye en esta recopilación por ser un caso temprano de atribución, ya que desde 1968 se ha apuntado al cambio climático como factor clave de su expansión, acentuado por la filopatría (OECC 2012).
- A partir de los datos recolectados durante el siglo XX sobre la distribución de los reptiles en España, se ha detectado un cambio significativo, de 15.2 km hacia el norte del límite septentrional de sus áreas de distribución entre 1940–1975 y 1991–2005. El límite meridional no cambió significativamente. Estos resultados sugieren que las distribuciones de reptiles pueden estar cambiando latitudinalmente en respuesta al cambio climático (OECC 2012).

Cambios de la distribución en insectos:

- La distribución de la oruga procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) se encuentra limitada principalmente a causa de las temperaturas medias invernales. El motivo es simplemente que el frío reduce el número de horas de alimentación de las orugas. De hecho, la distribución de las plantas huésped (pino *Pinus spp.*, cedro *Cedrus spp.* y abeto de Douglas *Pseudotsuga menziesii*) es mucho más extensa que la del insecto. En consecuencia, si las condiciones climáticas son favorables en latitudes más altas o a mayor altitud, el insecto debería ampliar su distribución hacia estas áreas. Esta importancia relativa de la temperatura sobre los factores bióticos en la definición de



CEDEX

la distribución geográfica hace de este insecto un modelo particularmente adecuado para estudiar el cambio de distribución en relación con el calentamiento global.

De hecho, en las últimas décadas se ha comprobado una expansión sustancial del área tanto hacia el norte como en altitud, agravada por fenómenos climáticos extremos, como el verano de 2003 en la zona estudiada. Esto también ha dado lugar a un aumento de las tasas de ataque en las zonas anteriormente afectadas por el insecto. El caso merece especial interés por las implicaciones que puede tener en la gestión de los bosques y las repoblaciones así como en los árboles ornamentales, en el Centro y Sur de Europa (Buffo *et al.* 2007 y OECC 2012).

- Parmesan y Yohe (2003) recogen el estudio de los cambios del área de distribución de 36 especies de mariposas de América del Norte y Europa a lo largo de todo el siglo XX, con objeto de detectar movimientos de los límites tanto por el Norte como por el Sur de su área de distribución. Ocho especies (22%) mostraron una expansión hacia el Norte (nuevas colonizaciones) y la contracción por el Sur (extinciones de población). Ninguna de las especies mostraron tendencias opuestas al cambio de distribución previsto (contracción hacia el norte y expansión hacia el sur).
- El calentamiento global puede ser la causa de la reducción de las poblaciones de la especie de mariposa *Parnassius apollo* en las montañas españolas, situadas en el extremo más cálido de su distribución (OECC 2012).
- Las primeras citas de la mariposa africana *Colotis evagore* se localizaban en áreas con condiciones microclimáticas especiales y sus colonias desaparecían periódicamente. En la actualidad se considera que se ha establecido de forma permanente en diversas localidades de la costa de Málaga, Granada, Almería y Murcia, y está expandiendo su área de distribución hacia el interior (Granada, Jaén) y costeano hacia el norte (Tarragona, Gerona) y hacia el oeste (Cádiz). Esta colonización de nuevas áreas probablemente este provocada por el cambio climático, que ha permitido traspasar los umbrales para el desarrollo larvario y para la diapausa⁹ invernal (OECC 2012).
- En Canarias, la mariposa *Hypolimnas missipus*, común en zonas tropicales de Asia y África, y relativamente frecuente en las islas Cabo Verde, ha sido citada en los últimos años. Igualmente la mariposa de los geranios (*Cacyreus marshalli*), de origen sudafricano y considerada en Europa un verdadero indicador del avance del cambio climático (OECC 2012).
- Un estudio de la Universidad Juan Carlos I de Madrid, ha revelado que 16 especies de mariposas autóctonas vieron mermadas sus poblaciones y tuvieron que trasladar su hábitat, elevando su límite inferior altitudinal en 212 metros, hasta cotas superiores a los 1.000 metros de altitud entre 1973 y 2003 por el aumento de temperatura (+1,3°C) registrado a causa del cambio climático. En un escenario de aumento de temperaturas limitado a 2°C en los próximos 30 años, las mariposas perderían el 80% de su hábitat (OECC 2012).

Respuestas fenológicas en insectos:

- Parmesan y Yohe (2003) en el estudio referido anteriormente investigaron la respuesta de los insectos al aumento de las temperaturas. Dedujeron que su respuesta no fue ni lineal ni en el sentido que se esperaba, es decir, dando lugar a una aceleración del crecimiento y a la modificación de la duración de la diapausa. Esta modificación de la diapausa se detectó en ambos sentidos, prolongación y anulación. Los casos de anulación de la diapausa se comprobaron en especies, como la mariposa americana *Atalopedes campestris* (mariposa "capitana"), activas en invierno, que se ven

⁹ **Diapausa:** es un estado fisiológico de inactividad con factores desencadenantes y finalización específicos. Se usa a menudo para sobrevivir a condiciones ambientales desfavorables y predecibles, tales como temperaturas extremas, sequía o carencia de alimento. Puede usarse en diversos contextos pero se usa especialmente en insectos.

beneficiadas por la tendencia al incremento de las temperaturas. Su supervivencia en las zonas que va colonizando depende de que las temperaturas invernales no sean excesivamente bajas.

Cambios en la distribución de especies vegetales:

- En el macizo de Peñalara, Sierra de Guadarrama, los arbustos (enebro rastrero y piorno serrano) son cada vez más abundantes en altitudes donde antes predominaban los pastos de alta montaña. Asimismo, en el Montseny, se ha observado un reemplazamiento progresivo de los ecosistemas frío-templados por otros de tipo mediterráneo. Se ha registrado un ascenso en el límite altitudinal superior de los hayedos de al menos 70 m desde 1945. El hayedo y el brezal están siendo sustituidos por el encinar en altitudes intermedias. Los procesos ecológicos observados en esta dinámica son coherentes con el desplazamiento causado por cambio climático, aunque los cambios de uso del suelo complementarían las causas (OECC 2012).

Velocidad de colonización de especies arbóreas hacia nuevas áreas:

- Smulders, M.J.M. *et al.* 2009 muestran que los datos palinológicos¹⁰ e históricos sobre la velocidad a la que se mueven las especies forestales indican que el movimiento de los árboles es altamente dependiente de la especie, pero en un rango de 0,25 – 1,5 km por año, siendo el valor más grande para las coníferas. Por ejemplo, el movimiento real del abeto rojo (6 km hacia el Norte en un período de 60 años desde 1.935 hasta 1.995) está en línea con estos modelos.

5.2 RESULTADOS PROVENIENTES DE LA APLICACIÓN DE MODELOS

- Entre el año 2.070 y 2.099, la media de la temperatura superficial del mar Mediterráneo se proyecta que subirá 3,1 °C. Entre 2.041 y 2.060 se prevé que 25 especies endémicas del mar Mediterráneo que actualmente no lo están formarán parte de la Lista Roja de UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) y 6 se habrán extinguido. Entre 2.070 y 2.099 se prevé que 45 especies endémicas del mar Mediterráneo que actualmente no lo están formarán parte de la Lista Roja de UICN y 14 se habrán extinguido (Lasram, F.B.R. *et al.* 2010).
- Hay autores que estiman que, como máximo, los árboles serían capaces de cambiar su rango hasta 10 - 70 km según las especies durante los próximos cien años, y esto sin tener en cuenta la fragmentación del hábitat (Smulders, M.J.M. *et al.* 2009).
- Resulta interesante la aplicación de modelos genéticos predictivos de cambios en la distribución de especies como consecuencia del cambio climático.

A continuación se desarrolla un ejemplo concreto de la aplicación de estos modelos en una especie y cuál es el alcance de sus previsiones.

El cambio climático como motor de variación de la distribución del pico mediano (*Dendrocopos medius*): predicciones de un modelo aplicado a hábitats fragmentados (Cobben *et al.* 2012).

En relación con los cambios en la distribución de las especies resulta muy interesante el artículo de Cobben *et al.* (2012), cuyo título es realmente expresivo, "El lugar equivocado en el momento equivocado: el cambio climático como motor de variación de la distribución de

¹⁰ **Palinología:** disciplina de la botánica dedicada al estudio del polen y las esporas (URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Palinología>).



CEDEX

especies provoca inadaptación y disminución del tamaño de población según el modelo aplicado en aves en hábitats fragmentados” (*Wrong place, wrong time: climate change-induced range shift across fragmented habitat causes maladaptation and declined population size in a modelled bird species*).

Se estudia la distribución del pico mediano, ave incluida en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial” del Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas.

Por otra parte, aunque tiene una extensa distribución por el continente europeo y Oriente Medio, en España se encuentra su límite suroccidental de distribución. De hecho, sobre una población mundial que puede aproximarse al millón de ejemplares, en España se cuenta tan solo con unas 1.200 parejas reproductoras, distribuidas por los bosques de las montañas cantábricas y pirenaicas (Domínguez 2010).

Los cambios en la distribución pueden tener consecuencias genéticas, como por ejemplo los “efectos fundadores¹¹”, de gran importancia de cara a la evolución de las metapoblaciones¹². El efecto fundador se produce cuando unos pocos miembros de la población original establecen una colonia. Por su naturaleza generalmente implica un tamaño poblacional pequeño, por lo que la colonia puede tener poca variabilidad genética respecto a la población original. Además, puede afectar a cualquier porción del material genético de una especie y por lo tanto a su grado general de adaptación a las condiciones locales. Como resultado da lugar normalmente a una mala adaptación local y, en consecuencia, a una disminución del tamaño de la población y de su persistencia. Naturalmente estas colonizaciones se producen desde los bordes del área de distribución de la especie hacia zonas nuevas, y su tendencia natural es a encontrarse, si arraiga, al cabo de un “tiempo ecológico¹³” en el interior del área de distribución y no en su borde (tenderá a extenderse si la colonización se asienta). Paralelamente, las poblaciones en el borde en retracción tenderán a extinguirse.

La actual fragmentación de hábitats al aumentar el efecto borde¹⁴ en los hábitats, incrementará la frecuencia del efecto fundador.

¹¹ **Efecto fundador (*founder event*):** Es la reducción en la variación genética que se produce cuando un pequeño subconjunto de una población grande se utiliza para establecer una nueva colonia. La nueva población puede ser muy diferente de la población original, tanto en sus genotipos como en sus fenotipos. En algunos casos, el efecto fundador forma parte importante en el proceso de aparición de nuevas especies (URL: <http://www.genome.gov/>).

¹² **Metapoblación:** Conjunto de poblaciones que están interconectadas por fenómenos de emigración e inmigración. La importancia de este concepto en conservación radica en que puede ser posible la persistencia a largo plazo de una especie en una determinada metapoblación a pesar de que cada población individual tenga un cierto riesgo de extinción a corto plazo (modificado de Gutiérrez 2002).

¹³ **Tiempo ecológico:** Escala de tiempo que permite evaluar la adaptación de las poblaciones a los cambios ambientales.

¹⁴ **Efecto de borde:** se refiere a los cambios en las condiciones biológicas y físicas que se producen en el límite de un parche con los parches adyacentes. Hay muchos tipos de bordes y efectos de borde, por ejemplo, humano / natural, primario / secundario y duro / blando. También hay mucha variación ecológica en la respuesta a diferentes tipos de bordes: entre los taxones, entre los tipos de vegetación o entre regiones. Aunque la magnitud de las respuestas a los efectos de borde en particular pueden diferir, a menudo la naturaleza del efecto (es decir, positiva o negativa) no.

Los bordes son generalmente considerados desde una perspectiva y escala humanas, pero los bordes y los efectos de borde pueden existir también en muchas escalas, y la forma en que los organismos perciben y responden a los bordes a menudo difieren de los seres humanos. Por lo tanto, las categorías

El objetivo de esta investigación era, por tanto, estudiar mediante un complejo modelo de simulación de demografía de metapoblaciones (METAPHOR) cómo influyen el incremento de la temperatura y la variabilidad climática sobre las frecuencias locales de diferentes genotipos y, en último término, sobre la viabilidad de la especie.

Con este objetivo se aplicó el programa en 3 escenarios climáticos en el que las isotermas se trasladaban hacia el norte a una velocidad de 2, 4 y 8 km anuales, a partir de unas previsiones consistentes en un incremento de la temperatura de 1º, 2º y 4ºC hasta el año 2.100. La distancia entre el Norte y el Sur del área de distribución es de 2.000 km.

El modelo parte del supuesto según el cual las poblaciones del interior del área de distribución son especialistas respecto de la temperatura y sin embargo las de los bordes son generalistas. Paralelamente, las especialistas respecto a la temperatura explotan mejor el territorio y tienen una alta tasa reproductora por lo que presentan abundancias elevadas (en el interior, hacia su óptimo de temperaturas). Mientras que las generalistas explotan peor el territorio, su tasa reproductora es menor y su abundancia relativa es, por tanto, también menor (hacia el exterior se alejan de su óptimo respecto de las temperaturas).

La distribución (*range*) de la especie, por tanto, en el año 0 se encuentra con poblaciones especialistas y con buena aptitud (*fitness*) en el interior y generalistas en los bordes. Al correr el programa en el escenario de desplazamiento de la isoterma de los 2 km anuales, se comprueba cómo la localización de la temperatura media óptima para la especie se ha movido al Norte y apenas cambia la distribución de las poblaciones de especialistas y generalistas, en todo caso se produce un aumento de los generalistas hacia el Norte mientras que los especialistas apenas avanzan. Posteriormente, todas las poblaciones hacia el Norte por encima del óptimo de temperatura están formadas por generalistas mientras que todas al Sur son especialistas. Al final del periodo analizado apenas quedan poblaciones residuales de especialistas en el borde Sur del área de distribución, siendo mayoritariamente poblaciones de generalistas respecto de la temperatura. Es decir, donde se producen avances del área de distribución, al Norte del óptimo de temperatura, las poblaciones se vuelven generalistas, mientras que las especialistas no son capaces de moverse paralelamente a la traslación de las isotermas. Y en el borde Sur se extingue la especie progresivamente a medida que el territorio se vuelve incompatible con sus requerimientos térmicos.

El resultado es, por tanto, que el área de distribución se compone de poblaciones generalistas para la temperatura, pero con menos aptitud para explotar el territorio, por tanto se pone en riesgo la persistencia de la especie si su área de distribución no es suficientemente extensa para superar los problemas derivados de áreas de distribución pequeñas. Éste es el riesgo que introduce la fragmentación sobre los cambios de las áreas de distribución de las especies, haciendo peligrar poblaciones que se encuentran más vulnerables. La capacidad de adaptación

simples como “especies de borde” o “especies de interior” a menudo proporcionan descripciones inadecuadas de respuestas complejas.

Igualmente, la suposición de que los bordes y efectos de borde son importantes también está vinculada a la idea de que los paisajes se estructuran en parches. Las clasificaciones de paisajes complejos basadas en parches pueden ser artefactos de mapeo. Una gran cantidad de literatura demuestra que tanto variables bióticas como abióticas cambian como funciones continuas (es decir, gradientes) desde el interior de un parche al interior del parche adyacente. El análisis de los paisajes mediante ambos enfoques complementarios (gradientes y estructura en parches) pueden ayudar a mejorar nuestra comprensión acerca de cómo los patrones de paisaje, incluyendo los bordes, pueden influir en los procesos ecológicos (modificado de Lindenmayer *et al.* 2008).



CEDEX

local proveniente de los efectos fundadores también conduce a inadaptaciones, dando lugar a la extinción de las especies.

Una vez se estabilizan las temperaturas, el programa predice que el área de distribución se expande ligeramente por el borde Norte y las poblaciones de especialistas respecto de la temperatura van ganando territorio hacia el Norte en detrimento de las generalistas, que nuevamente se van relegando a los bordes.

Por otro lado, en cuanto a los tres escenarios climáticos, la especie solo sería capaz de subsistir en el del incremento de 2 km anuales hacia el Norte, a pesar de que en este supuesto la población disminuiría su tamaño en un 25%. En el caso de los 8 km de desplazamiento anual de la isoterma, a los 200 años la población habría disminuido en más de un 95%, desapareciendo por completo antes del año 300.

El programa predice que ni los generalistas y menos aún los especialistas (en el caso concreto del pico mediano) respecto a la temperatura son capaces de ocupar nuevos territorios con la velocidad suficiente como para no extinguirse con cambios de unos 4 km anuales o más de traslación de las isotermas hacia el Norte.

- Otra fuente de ideas para obtener modelos de predicción sobre la distribución futura de las especies ante escenarios de cambio climático procede del análisis de las especies invasoras. Angert *et al.* (2011) demuestran que las características de las especies invasoras, tanto vegetales como animales, son las mismas que facilitan los cambios en la distribución inducidos por el clima. Entre las características de las especies vegetales invasoras destacan ciclos de vida cortos, alta capacidad de dispersión y gran tamaño de su área de distribución natural. Respecto a las especies animales, recoge un estudio en el que examina las invasiones de aves en todo el mundo. Entre las características de las especies animales invasoras destacan un cerebro más grande y hábitats y nichos de alimentación más amplios. Estas características aumentan la capacidad adaptativa de las especies a las nuevas circunstancias ambientales tanto de los nuevos medios que invaden como las causadas como consecuencia del cambio climático. Sin embargo, estos modelos tienen un poder explicativo bajo. En una comparación de las especies euroasiáticas naturalizadas frente a no-naturalizadas en Argentina, este artículo recoge un estudio en el cual se encontraron que las relaciones monovariantes no explican más del 9% de la variación en el estado de invasión, y los rasgos de todos en conjunto (relaciones multivariantes) explicaron solo el 21%. En consecuencia, otros investigadores han hecho hincapié en la importancia de los factores no relacionados con la especie, como el historial de la invasión o las características invasoras de la comunidad. Además existen otros factores extrínsecos, como la fragmentación del hábitat y la dispersión antropogénica, que también pueden afectar a la invasión de determinadas especies.
- Es importante recordar que las especies que desarrollan tanto invasiones como cambios del área de distribución no se están dispersando en un hábitat vacío, sino que deben ser capaces de invadir con éxito compitiendo con las comunidades residentes, y puede ser particularmente difícil predecir el resultado de estas interacciones de las especies nuevas en comunidades que no se encuentran en equilibrio.

La interpretación de estos casos debe ser prudente, ya que existen dificultades terminológicas, conceptuales y metodológicas importantes causadas por las diferentes perspectivas según el campo profesional desde el cual se abordan. Es el caso de la definición de “tendencia sistemática” según se trate de biólogos o economistas. Es también compleja la interpretación según la ciencia de análisis de los “factores importantes”. En este último caso, cualquiera

podría considerar como “importante” un controlador actualmente fuerte, pero los biólogos también dan importancia a fuerzas actualmente débiles, pero que es probable que persistan. Para los biólogos, las tendencias pequeñas y sistemáticas pueden llegar a ser importantes a largo plazo.

Este debate entronca con el de los problemas de escala, ya que las tendencias que se detectan a escalas de tiempo grandes pueden encubrirse por fenómenos locales. De hecho, la mayoría de los cambios locales son a corto plazo y no son atribuibles directamente al cambio climático, sino por ejemplo al cambio de los usos del suelo o a fluctuaciones naturales en la abundancia y distribución de especies.

6 LAS REDES DE ESPACIOS PROTEGIDOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

En este apartado se propone una discusión que está en el centro de la reflexión de este documento. Se plantea la siguiente cuestión: hasta qué punto la actual configuración de las redes de espacios protegidos (principalmente la Red Natura 2000) garantiza la conectividad necesaria para colonizar nuevos espacios climáticos¹⁵ potencialmente aptos para los hábitats y especies para cuya conservación se declararon o, por el contrario, el aislamiento entre las áreas protegidas impedirá la expansión hacia nuevas zonas adecuadas climáticamente. El objetivo se alinearía, por tanto, con la tendencia a implementar una política espacial europea de adaptación de la Red Natura 2000 al cambio climático.

Actualmente no hay una respuesta a esta discusión, ya que deben realizarse los estudios necesarios para adquirir el conocimiento suficiente, en la escala necesaria. Esta respuesta, además, es compleja, ya que las redes de espacios protegidos y el cambio climático no son los únicos factores a tener en cuenta, mostrándose también muy relevantes entre otros las características del territorio que media entre dichos espacios, particularmente en cuanto a sus usos. Esto es lo que hace referencia al marco abiótico en el que se desenvuelven las especies. Pero la complejidad también proviene de las propias especies que se pretende analizar, ya que según los grupos (por ejemplo, entre la fauna, insectos, aves o mamíferos) las escalas espaciales y temporales de análisis son muy diferentes y sus reacciones frente a la misma característica abiótica, por ejemplo una barrera a la conectividad, es completamente diferente. La complejidad aumenta exponencialmente cuando estudiamos estos movimientos en especies dependientes entre sí, como ciertos predadores muy dependientes de determinada presa, o especies de insectos que se alimentan de determinadas especies vegetales.

Hay un consenso creciente sobre la importancia de mejorar la conectividad como medida prioritaria de adaptación al cambio climático. Sin embargo, una determinada medida imprescindible para facilitar el movimiento de unas especies determinadas puede resultar inútil para otras. Un simple aumento en número o anchura de los corredores de fauna podría ser suficiente para algunas especies generalistas pero ineficiente para otras especialistas.

No es suficiente, por tanto, para responder a la cuestión planteada una mera superposición espacial entre las redes de espacios protegidos en su configuración actual con las áreas de

¹⁵ **Nuevo espacio climático (*new climate space*):** compensación de las pérdidas del área de distribución de una especie mediante la colonización de otras regiones donde las condiciones climáticas se vuelven adecuadas (Vos *et al.* 2008). Es un concepto complementario al de **Espacio climático adecuado (*suitable climate space*)**, que hace referencia al espacio que se utiliza en la actualidad y que sirve como referencia inicial.



distribución actuales y potenciales en futuros escenarios climáticos de la vegetación y la fauna. Los esfuerzos deben ir ajustándose con el desarrollo de modelos que permitan valorar las respuestas espaciales según las especies.

Puede servir de punto de partida, no obstante, para buscar respuestas al problema planteado el documento BRANCH 2007 y el artículo de Vos *et al.* 2008. Aunque se fundamenta en la superposición espacial de las áreas de distribución de las especies, de las redes de espacios protegidos, de las características de dispersión, área de reproducción y sensibilidad a las barreras, lo hace sobre un conjunto muy heterogéneo de especies (de diferentes grupos faunísticos en distintos ecosistemas) que puede considerarse representativo del conjunto de las especies de un determinado ámbito geográfico extenso. El estudio determina *cueillos de botella* que dificultan el movimiento de las especies hacia nuevos espacios climáticos adecuados y propone un conjunto de medidas y estrategias para mejorar la conectividad en dichos territorios.

Con la metodología expuesta en este estudio, se pueden identificar en la Unión Europea los espacios naturales aislados o excesivamente pequeños y que requieren una mejor conectividad a las redes resistentes al cambio climático¹⁶. Es el caso de los humedales, por ejemplo. Otras ventajas de la aplicación de este método u otros similares es que permite la identificación de los puntos críticos a gran escala geográfica, como los cuellos de botella entre espacios o las zonas que constituyen los “refugios climáticos¹⁷” comunes para un conjunto importante de especies. De este modo se pueden priorizar las estrategias y regiones de actuación en función tanto de la urgencia como de que los potenciales beneficios sean mayores. Estas zonas podrían convertirse en puntos focales en el futuro desarrollo de las redes de espacios protegidos, como la Red Natura 2000.

Cualquier actuación destinada a la adaptación de los hábitats tendrá que equilibrar el riesgo de que se adopten medidas en un lugar equivocado frente a la posibilidad de que la adaptación se realice demasiado tarde para acomodar las respuestas de la biodiversidad al cambio climático. El tiempo de desarrollo de los ecosistemas forestales, por ejemplo, es muy largo, y cualquier medida no será efectiva en un plazo aproximado de 50 años. Además, estas actuaciones de mejora de los hábitats repercutirán en la mejora de los servicios ecosistémicos¹⁸.

Zonas prioritarias de adaptación al cambio climático de las redes de espacios protegidos (Vos *et al.* 2008).

Introducción

El tamaño de las redes de hábitat que requieren las especies para persistir varía con las mismas. Salvo en casos de especies con áreas de distribución muy restringida, las especies normalmente cuentan con áreas de distribución que exceden los límites de los espacios

¹⁶ **Red de hábitats a prueba de clima, red de hábitats resistente al clima (*climate – proof network*):** Sería más correcta la traducción “Red de hábitats a prueba o resistente al cambio climático”, ya que se está valorando la resistencia de la red de hábitats a un clima cambiante. Se entiende que una red de hábitat es resistente al clima cuando hay suficiente superposición entre la localización actual de la red de hábitat adecuado climáticamente y la localización de la red de hábitat adecuado en función de futuros escenarios de cambio climático (BRANCH: Biodiversity Spatial Planning Climate Change).

¹⁷ **Refugio climático (*climate refugia*):** Espacio climático adecuado en la actualidad (referencia) y en diferentes escenarios climáticos.

¹⁸ **Servicios ecosistémicos:** Procesos funcionales proporcionados por los ecosistemas beneficiosos para el hombre. Por ejemplo, regulación hídrica, moderación de la temperatura, fijación de carbono, autodepuración, retención de sólidos, etc.



protegidos. Además, ni los territorios incluidos en las redes de espacios protegidos ni menos los territorios fuera de estos espacios protegidos, son homogéneos en cuanto a su aptitud para albergar a una determinada especie. A escala biogeográfica, por tanto, la distribución de una especie se puede describir como un mosaico de regiones que varían en la cantidad y la densidad de su hábitat adecuado, que además pueden incluir unas redes de hábitat con una determinada cohesión espacial.

Las redes de hábitat son un mosaico de parches de entornos con diferentes tamaños, densidades, calidades y conectividad, con muy diferente valoración en cada una de estas características según las especies. También las redes de hábitat pueden variar en su porcentaje de parches ocupados, las tasas de crecimiento de la población en cada parche y la capacidad de proporcionar colonizadores para espacios climáticos nuevos. Por otra parte, la colonización de los nuevos espacios climáticos requiere que el espacio entre éstos y los parches o redes de hábitats se pueda cruzar con una probabilidad de éxito alta (considerando distancias, permeabilidad de la matriz y barreras físicas).

Por tanto, en Europa la fragmentación de los hábitats plantea la cuestión de si la estrategia de conservación actual permitirá que las especies afectadas por el cambio climático puedan ampliar su distribución hacia nuevos espacios climáticos. Entonces debemos plantearnos, ¿hasta qué punto, la actual cohesión territorial que proporciona la Red Natura 2000 es suficiente para permitir la colonización de los nuevos espacios climáticos? y, entonces, ¿qué zonas podrían quedar aisladas de posibles colonizaciones?

Metodología

El objetivo consiste en identificar a gran escala geográfica, por ejemplo las regiones biogeográficas de la Red Natura 2000, dónde se prevé que los patrones de cohesión espacial de los ecosistemas pueden resultar insuficientes para permitir que las especies puedan responder a un clima cambiante. A continuación, se examinará a la misma escala o más restringida según el tamaño del área de distribución del hábitat o las especies, en qué medida el actual grado de fragmentación de los ecosistemas permitirá extenderse al hábitat o a las especies hacia el nuevo espacio climático, si el margen evaluado de movimiento del hábitat o de las especies puede compensar las pérdidas en otras partes, y cuáles serían las estrategias adecuadas para modificar el alcance y la configuración de la Red Natura 2000 con objeto de que siga cumpliendo la función ecológica con la que se diseñó.

En su estudio, Vos *et al.* 2008 seleccionan tres especies de tres ecosistemas diferentes (bosques, humedales y pastizales naturales) de diferentes grupos faunísticos (mamíferos, aves, anfibios e insectos), características en el Noroeste europeo (tabla 1). Se superponen sus áreas de distribución actuales y los espacios de la Red Natura 2000 en donde se encuentran. Los cambios en el “espacio climático adecuado” se valoran utilizando el modelo bioclimático envolvente SPECIES, que emplea una red neuronal artificial (ANN) para proyectar las áreas actuales y futuras de espacio climático potencialmente adecuado basado en las correlaciones entre la presencia/ausencia de especies y determinadas variables climáticas biológicamente relevantes. Para cada especie elegida, la configuración de las redes de hábitat potencialmente adecuado se analizó con el modelo de dispersión GRIDWALK. Se utilizó el escenario HadCM3 A2 para proyectar los cambios sobre el espacio climático potencialmente adecuado.



CEDEX

Tabla 1.- Especies analizadas en el estudio de Vos *et al.* 2008. Capacidad de dispersión estimada (CDE), área requerida por unidad reproductora (ARUR) y sensibilidad a las barreras (SB): no sensible (-), sensible (+) y muy sensible (++)

Ecosistemas	Especies	CDE	ARUR	SB
Bosques	Pito negro <i>Dryocopus martius</i>	50	250	-
	Pico mediano <i>Dendrocopos medius</i>	10	20	-
	Rana ágil <i>Rana dalmatina</i>	5	5	++
Humedales	Avetoro común <i>Botaurus stellaris</i>	30	100	-
	Carricero políglota <i>Acrocephalus palustris</i>	15	5	-
	Mariposa grande de la salud <i>Coenonympha tullia</i>	12	1	+
Prados naturales	Liebre común <i>Lepus europaeus</i>	25	500	+
	Bisbita común <i>Anthus pratensis</i>	15	5	-
	Rana verde centroeuropea <i>Rana lessonae</i>	5	5	++

Para cada especie, se definieron los parches de hábitat adecuado para la reproducción sobre la base de CORINE (2005). Las carreteras principales se obtuvieron de la base de datos de ESRI (ESRI 2002). La valoración de la resistencia de las redes de hábitat al cambio climático se realizó mediante un nuevo método llamado CENA (*Climate-based Ecological Network Analysis*). Las redes de hábitat potencialmente adecuado se perfilaron para tres escenarios: referencia, 2.020 y 2.050. En cada escenario, se definieron las redes de hábitat potencialmente adecuadas en función de la conectividad calculada entre los parches adecuados. De este modo se considera que dos parches pertenecen a la misma red cuando: (i) los parches estaban dentro del mismo espacio climático adecuado, y (ii) la conectividad entre parches era suficiente.

Se definen “cuellos de botella”, como las partes del área de distribución donde la conectividad es baja o hay escasa área de un hábitat concreto, que inhibe la respuesta espacial de determinada especie al cambio climático. Un cuello de botella por lo tanto identifica las regiones donde, debido al cambio climático y la fragmentación del hábitat, los objetivos de los planes de biodiversidad no pueden alcanzarse. Se distinguen tres tipos de cuellos de botella, cada uno relacionado con una estrategia de adaptación del paisaje para promover la pervivencia de las especies:

1. La separación de la zona climáticamente adecuada y del nuevo espacio climático supera la capacidad de dispersión de determinada especie. La estrategia consistirá en unir estos parches sueltos a la red de hábitats resistente al clima más cercana (estrategia de adaptación I).
2. El tamaño de la población en la *zona de solapamiento* (puede definirse como la parte de una red que es adecuada en períodos sucesivos de tiempo, es decir, en escenarios sucesivos de cambio climático), es importante en la resistencia de una red de hábitat a prueba de clima. Cuando este solapamiento es demasiado pequeño, es poco probable que las especies sean capaces de colonizar un espacio climático nuevo porque el flujo de la dispersión es demasiado bajo. Se designa este cuello de botella cuando hay menos del 50% de solapamiento entre zonas climáticas adecuadas consecutivas. La estrategia de adaptación en este caso sería aumentar la cantidad de hábitat adecuado en la zona de solapamiento con el fin de promover una mayor capacidad de colonización (estrategia de adaptación II).
3. Desde la perspectiva de una especie es importante que esté bien protegida en las áreas climáticamente estables de su área de distribución. Estas regiones forman refugios climáticos de los cuales podría ser capaz de expandirse si las condiciones climáticas se

estabilizan. La estrategia de adaptación en este caso consistiría en promover las condiciones ambientales favorables en los “refugios climáticos”, lo que maximizaría la persistencia de la especie (estrategia de adaptación III).

En la figura 1 se presenta un esquema de este análisis por pasos, que puede orientar posibles desarrollos del análisis de la relación entre la distribución de especies y hábitats actual y potencial en escenarios de cambio climático, la distribución de las redes de hábitats protegidos y las medias de adaptación de los espacios de cara a la gestión de los “cuellos de botella”.

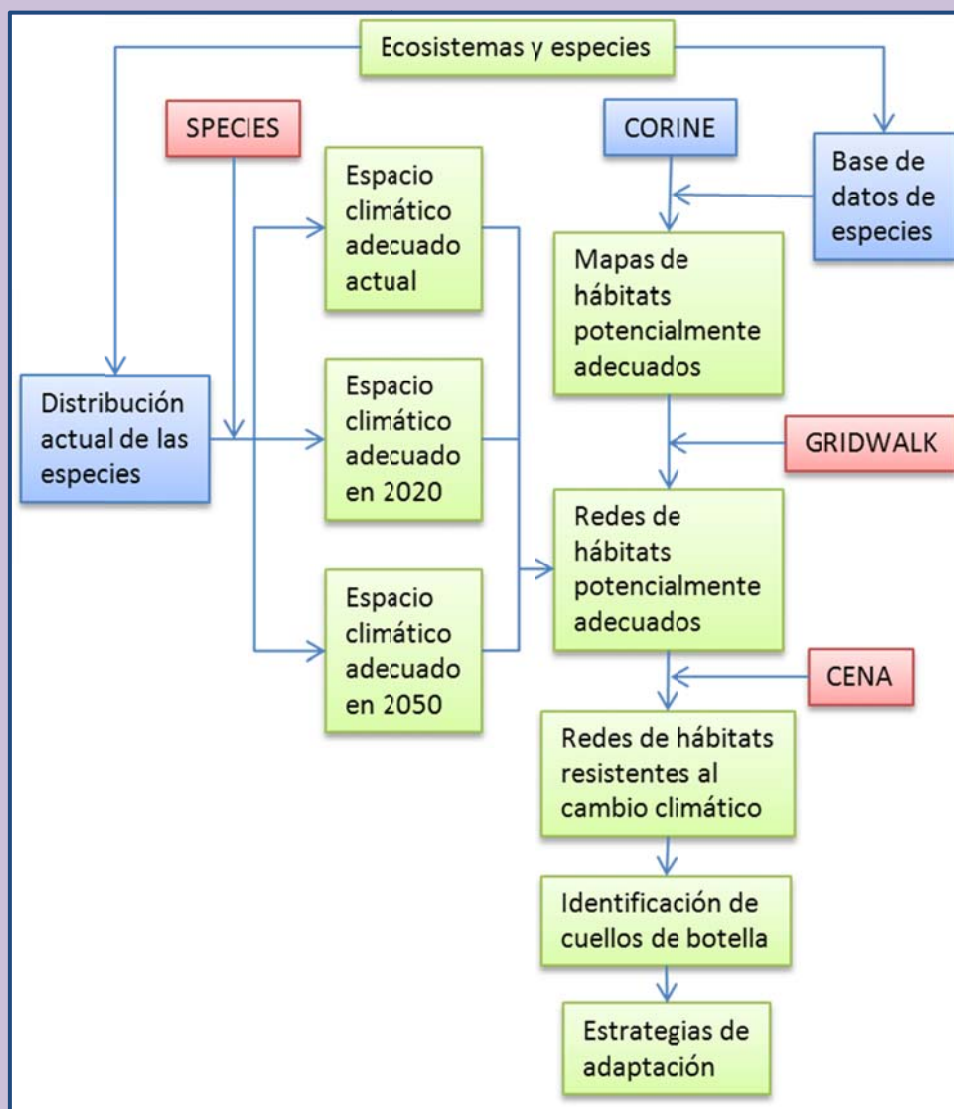


Figura 1.- Esquema modificado del análisis por pasos propuesto por Vos *et al.* 2008, para examinar la adecuación de las redes de espacios protegidos al cambio climático desde el punto de vista de la conectividad.

Resultados

Siguiendo con el estudio de Vos *et al.* 2008, una comparación de la superficie total adecuada entre el escenario de referencia (o, también, línea de base) con los escenarios de 2.020 y 2.050 muestra una reducción progresiva del área de distribución dentro de la zona de estudio para las nueve especies. La cantidad de hábitat protegido por Natura 2000 también disminuye para todas las especies (figura 2). Las diferencias entre las especies son grandes; para



algunas, la reducción es limitada (la rana ágil 6% y el avetoro 8%), mientras que para otras es considerable (el pájaro carpintero negro, el carricero políglota y el bisbita común, el 70%).

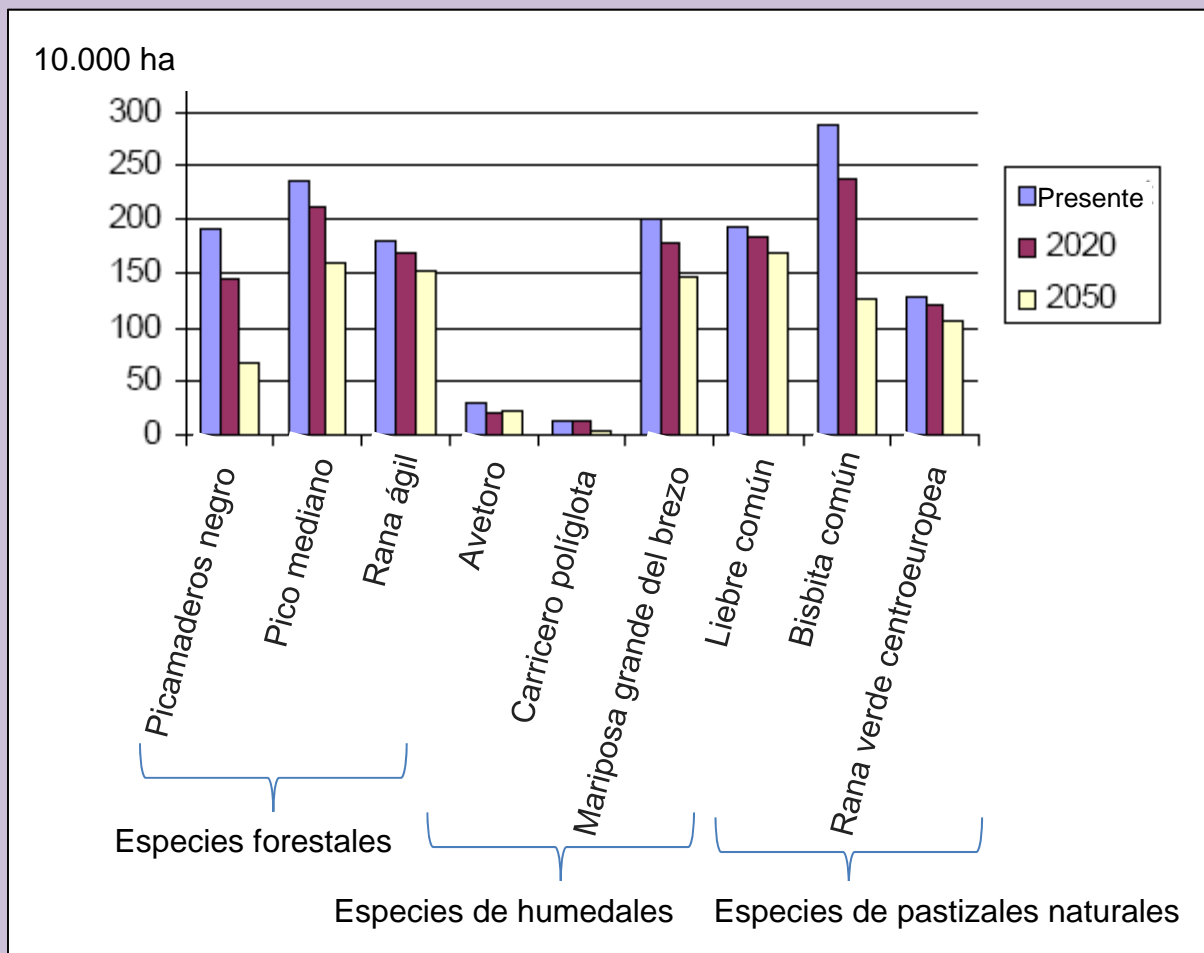


Figura 2.- Superficie de hábitat en el espacio climático adecuado que se encuentra protegida dentro de la Red Natura 2000 para las nueve especies estudiadas por Vos et al. 2008., en el clima actual y según la predicción para 2020 y 2050.

Del hábitat idóneo total, un promedio de 5% y 4%, en 2020 y 2050 respectivamente, precisaría de actuaciones de adaptación. Otra vez las diferencias entre las especies son grandes. Para el avetoro, las áreas de adaptación añadirían hasta un 33% y un 24% (en 2020 y 2050) del total de su hábitat adecuado, mientras que el carricero políglota no muestra aparentemente ninguna necesidad de adaptación.

Por ejemplo, para el pico mediano en Francia se proyecta, como se puede ver en la figura 3a, una contracción de su hábitat adecuado, y en Irlanda, los Países Bajos y Dinamarca se prevé una expansión. En Inglaterra se produce una leve contracción por el Sur mientras su espacio climático idóneo se expande hacia el Norte de Inglaterra y Escocia. Es muy extensa la zona que no se prevé que se vea afectada por el cambio climático, por lo menos hasta 2050.

Los mapas para 2020 (figura 3b) y 2050 (figura 3c) muestran cuellos de botella importantes en Bélgica, los Países Bajos, Alemania y Dinamarca, al Noroeste, donde el clima llega a ser

adecuado, pero los parches están demasiado aislados para ser colonizados. Esta especie muestra una posible expansión del área de distribución hacia Gran Bretaña e Irlanda. Sin embargo, teniendo en cuenta su distribución actual (figura 4a), la expansión probablemente estará obstaculizada por la barrera del mar. Además, las áreas boscosas en el Sur de Irlanda e Inglaterra están demasiado fragmentadas para permitir su expansión. Las redes resistentes al cambio climático en Inglaterra, en 2020, son de color verde claro, que indica que la zona de solapamiento es menor al 20%. Por lo tanto, la capacidad de colonizar este nuevo espacio climático es limitada.

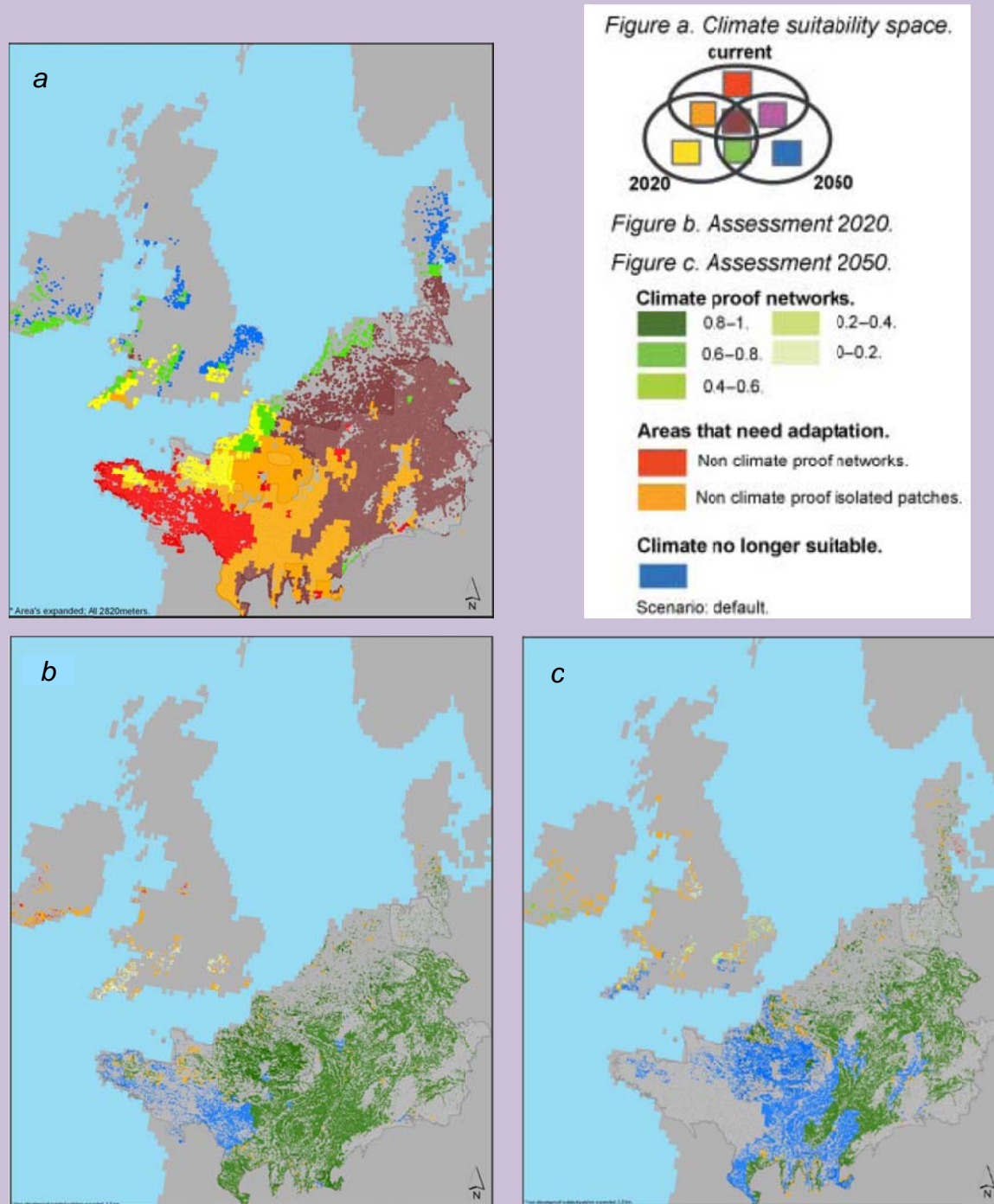


Figura 3.- Valoración de la resistencia del pico mediano al cambio climático. En **a** se muestra el hábitat climático adecuado en la situación actual y las proyecciones de hábitat potencial adecuado (bosques de hoja ancha, planifolios) para 2020 y 2050. En **b** (2020) y **c** (2050), las áreas verdes indican la red de

hábitat resistente al cambio climático (*climate proof networks*). Las redes verdes más oscuras son las más robustas (comparten gran parte de su superficie la zona prevista con la zona climática anterior). Las zonas rojas y anaranjadas indican que necesitan adaptación, ya que tienen un clima adecuado pero los parches están demasiado aislados para ser colonizados. En las áreas azules, el clima no es adecuado.

En cuanto a las estrategias de adaptación del hábitat del pico mediano, se muestran las zonas potenciales de expansión, siempre que se tomen las medidas de adaptación (figura 4b). Las zonas rojas sólo se podrán colonizar si se conectan a la red de hábitat a prueba de clima más próxima (estrategia de adaptación I). Las zonas verdes son pequeñas, y por lo tanto, la capacidad colonizadora necesita incrementarse (estrategia de adaptación II). Por último, las manchas grises muestran zonas que no se ven afectadas por el cambio climático. Estas áreas forman refugios climáticos relativamente estables, por lo menos hasta 2.050. En este sentido, los esfuerzos de conservación deberían centrarse en la optimización de la sostenibilidad de la red (estrategia de adaptación III).

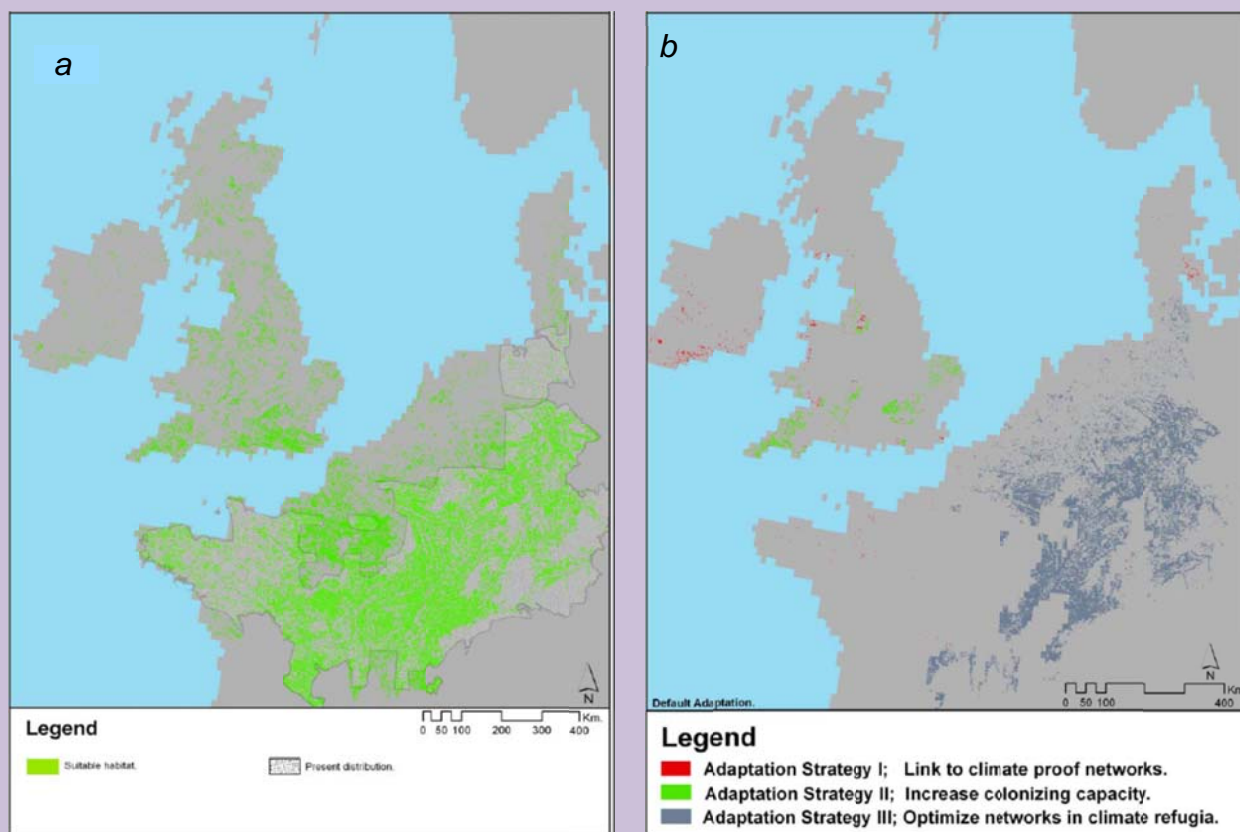


Figura 4.- (a) Distribución actual (color verde) y hábitat disponible del pico mediano en el Noroeste de Europa (tramado dentro de las líneas) y **(b)** localización de cada una de las diferentes estrategias de adaptación que se proponen en el apartado anterior de *Metodología* para favorecer la pervivencia de la especie.

En la figura 5 se muestra un mapa que reúne el conjunto de medidas de adaptación para las tres especies forestales (picamaderos negro, pico mediano y rana ágil).

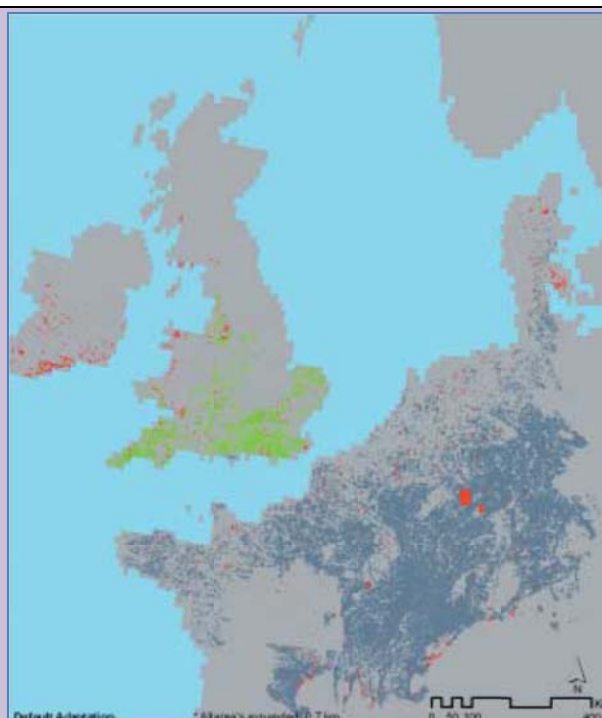


Figura 5.- Mapa integrado de las medidas de adaptación de las tres especies forestales analizadas en el trabajo de Vos et al. 2008. La leyenda de colores coincide con la de la figura 4b.

Si se consideraran representativas de la respuesta de la fauna este tipo de ecosistemas al cambio climático, este mapa indicaría a los gestores dónde deben promoverse las distintas estrategias de adaptación.

Conclusiones

Los resultados muestran que la combinación de modelos bioclimáticos, de conectividad y datos reales de usos del suelo ofrece una herramienta útil para definir a gran escala las actuaciones prioritarias de adaptación de los hábitats al cambio climático. La gravedad del efecto del cambio climático sobre los hábitats es que hay menos espacio adecuado en las áreas de expansión que en las de contracción, por lo que, si no se toman las medidas adecuadas, en las condiciones proyectadas la pérdida de biodiversidad será inevitable.

Una limitación a esta metodología proviene de la selección de las “especies representativas”, de las posibles respuestas al cambio climático, y no tanto por su valor ecológico, emocional, turístico, etc. Por otra parte también supone una limitación la propia escala de los datos de usos del suelo, ya que grupos como los anfibios precisarían de datos de partida más detallados.

Además, este sistema entiende que el clima es el principal factor que organiza la distribución de las especies, cuando hay una diversidad de factores que pueden alterar las proyecciones sobre futuros cambios en la distribución, como por ejemplo la competencia entre especies y otro tipo de relaciones complejas (p.e. especies antagónicas), la propia calidad del hábitat, factores microclimáticos, aumento de eventos climáticos extremos, falta de determinados recursos, extinciones locales (sumideros), reducción del éxito reproductivo, etc. Aún falta mucho conocimiento sobre la respuesta de las especies a gran escala, necesaria para mejorar este tipo de proyecciones.



CEDEX

7 BIBLIOGRAFÍA

- AEMET. 2009. *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 158 pp.
- AEMET – Instituto de Meteorología de Portugal. 2011. *Atlas climático ibérico. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000)*. 79 pp.
- Alonso, M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. *Limnetica* **15**: 1-176.
- Angert, A.L., Crozier, L.G., Rissler, L.J., Gilman, S.E., Tewksbury, J.J. y Chunco, A.J. 2011. Do species' traits predict recent shifts at expanding range edges? *Ecology Letters* **14**: 677–689.
- Arens, P., van der Sluis, T. y van't Westende, W.P.C. *et al.* 2007. Genetic population differentiation and connectivity among fragmented Moor frog (*Rana arvalis*) populations in The Netherlands. *Landscape Ecology* **22**:1489–1500.
- Battisti A. 2008. Forests and climate change - lessons from insects. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, vol. **1**: 1-5. (URL: <http://www.sisef.it/forest/abstract/?id=ifor0210-0010001>).
- BRANCH partnership 2007. Planning for biodiversity in a changing climate – BRANCH project Final Report. *Natural England*, UK. (URL: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20090703091708/branchproject.org/achieve/wildlifemapping/habitatnetworks/>)
- Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M. y Larsson, S. 2007. Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology* **9**: 65-72.
- Cobben, M.M.P., Verboom, J., Opdam, P.F.M., Hoekstra, R.F., Jochem, R. y Smulders, M.J.M. 2012. Wrong place, wrong time: climate change-induced range shift across fragmented habitat causes maladaptation and declined population size in a modelled bird species. *Global Change Biology* **18**: 2419–2428.
- Devictor V, Van Swaay C., Brereton T., Brotons Ll., Chamberlain D., Heliola J., Herrando S., Julliard R, Kuussaari, M, Lindstrom A., Reif J., Roy D.B., Schweiger O., Settele J., Stefanescu C., Van Strien A., Van Turnhout C., Vermouzek Z., WallisDeVries M., Wynhoff I. y Jiguet F. 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, 2012; DOI: 10.1038/nclimate1347. (URL: http://www.ornitologia.org/ca/quefem/recerca/recerca_publicacions_sci.html).
- Diekötter, T., Baveco, H., Arens, P., Rothenbühler, C., Billeter, R., Csencsics, D., de Filippi, R., Hendrickx, F., Speelmans, M., Opdam, P. y Smulders, M.J.M. 2010. Patterns of habitat occupancy, genetic variation and predicted movement of a flightless bush cricket, *Pholidoptera griseoptera*, in an agricultural mosaic landscape. *Landscape Ecology* **25**:449–461.
- Domínguez, J. 2010. Pico mediano – *Dendrocopos medius*. Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles. Salvador, A., Bautista, L. M. (Eds.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid. (URL: <http://www.vertebradosibericos.org/>).
- Gutiérrez, D. 2002. Metapoblaciones: un pilar básico en biología de conservación. *Ecosistemas* 2002/**3** (URL: www.aeet.org/ecosistemas/investigación3.htm).
- IPCC. 2002 Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V. (URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>).
- Lasram, F.B.R., Guilhaumon, F., Albouy, C., Somotz, S., Thuiller, W. & Mouillot, D. 2010. The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change. *Global Change Biology* **16**: 3233-3245.
- Lindenmayer, D., Hobbs, R.J., Montague-Drake, R., Alexandra, J., Bennett, A., Burgman, M. *et al.* 2008. A checklist for ecological management of landscapes for conservation. *Ecology Letters* **11**: 78-91.



- Loss, S.R., Terwilliger, L.A. y Peterson, A.C. 2011. Assisted colonization: Integrating conservation strategies in the face of climate change. *Biological Conservation* **144**: 92-100.
- OEEC. 2012 Evidencias del cambio climático y sus efectos en España. Recopilación realizada por: Alfonso Gutiérrez Teira y José Ramón Picatoste Ruggeroni. Oficina Española de Cambio Climático. MAGRAMA. (URL: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/CC_Efectos_evidencias_tcm7-204411.pdf).
- Parmesan, C. y Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**: 37-42.
- Peñuelas J., Filella I. y Comas P. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* **9**: 531-544. (URL: http://www.creaf.uab.es/Global-Ecology/Pdfs_UEG/Peñuelas%20et%20al%20GCBcomas2002.pdf)
- Smulders, M.J.M., Cobben, M.M.P., Arens, P. y Verboom, J. 2009. Landscape genetics of fragmented forests: anticipating climate change by facilitating migration. *iForest* **2**: 128-132.
- Vos, C.C., Berry, P., Opdam, P., Baveco, H., Nijhof, B., O'Hanley, J., Bell, C. y Kuipers, H. 2008. Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology* **45**: 1722-1731.

Madrid, febrero de 2013

El autor del informe y responsable de la actuación

D. Manuel Ramón García Sánchez-Colomer
Doctor en Ciencias Biológicas
Jefe del Área de Ingeniería Ambiental