

CATEGORIZACIÓN DE CORREDORES ECOLÓGICOS EN FUNCIÓN DE SU CONTRIBUCIÓN A LA CONECTIVIDAD DE LA RED NATURA 2000. IMPLICACIONES PARA LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

MIKEL GURRUTXAGA SAN VICENTE^{1,2}

¹Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU),
C/ Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz, España

²School of Geography and the Environment, University of Oxford, Oxford, United Kingdom
mikel.gurrutxaga@ehu.es

RESUMEN

La preservación de la conectividad del paisaje es objeto de una creciente atención para minimizar los efectos negativos de la fragmentación de hábitat y el cambio climático sobre la biodiversidad. La Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad insta a las Comunidades Autónomas a fomentar la conservación de corredores ecológicos, en particular entre los espacios Natura 2000. En este artículo se describe una metodología para identificar y priorizar conectores territoriales entre distintos espacios protegidos, en función de su grado de contribución a la conectividad y disponibilidad global de hábitat en el territorio. Como caso de estudio se categorizan los conectores entre espacios Natura 2000 con formaciones boscosas en la zona central del País Vasco. Esta metodología es aplicable y especialmente valiosa para apoyar la toma de decisiones espacialmente explícitas en los instrumentos de ordenación del territorio.

Palabras clave: conectividad del paisaje, corredores, planificación territorial, Natura 2000.

CLASSIFYING ECOLOGICAL CORRIDORS BY THEIR CONTRIBUTION TO NATURA 2000 NETWORK CONNECTIVITY. IMPLICATIONS FOR SPATIAL PLANNING

ABSTRACT

Landscape connectivity conservation is receiving increasing attention in conservation planning as a way to reduce the negative effects of habitat fragmentation and climate change on biodiversity. Spanish Law 42/2007 on Natural Heritage and Biodiversity urges Autonomous Communities to promote the conservation of ecological corridors, in particular between Natura 2000 sites. This article describes a methodology to identify and prioritize landscape connectors between different protected areas, according to their degree of contribution to the habitat connectivity and availability over wide spatial scales. The methodology is applied to an illustrative case study on the connectors between Natura 2000 forest areas in central Basque Country. This

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

methodology is applicable and particularly valuable for spatial decision support in spatial planning instruments.

Keywords: landscape connectivity, corridors, spatial planning, Natura 2000.

1. Introducción

Preservar la conectividad ecológica del territorio (también denominada conectividad del paisaje) se considera clave para minimizar los efectos negativos de la fragmentación de hábitats y del cambio climático sobre la biodiversidad (Bennet, 2004; Crooks, y Sanjayan, 2006; Heller y Zavaleta, 2009; Nuñez *et al.*, 2013). La conectividad ecológica se refiere al grado en que el territorio facilita o dificulta, entre otros procesos ecológicos, los desplazamientos de las especies a través de los recursos de hábitat existentes en el paisaje (modificado a partir de Taylor *et al.*, 1993). La influencia de la configuración y composición del paisaje sobre las especies es diferente en función de la movilidad y los requerimientos de hábitat de las mismas. Así, la conectividad es un atributo del paisaje específico para una especie o para un grupo funcional de especies de similar perfil ecológico.

El desarrollo durante las últimas décadas de la teoría biogeográfica de islas (MacArthur y Wilson, 1967) y del cuerpo disciplinar de la Ecología del Paisaje (Forman y Godron, 1986) ha puesto de manifiesto la relevancia de mantener la conectividad funcional en paisajes crecientemente fragmentados por factores como la expansión urbana, la construcción de infraestructuras y la intensificación agraria. La conectividad tiene gran importancia para la persistencia regional de especies silvestres sensibles a la fragmentación del hábitat, junto a otros factores fundamentales como la cantidad y calidad de hábitat disponible. La relevancia de la conectividad en la conservación se manifiesta si cabe con mayor relevancia al considerar el cambio climático, dado que numerosas especies deben realizar desplazamientos para variar sus áreas de distribución (Opdam y Wascher, 2004; Araujo *et al.*, 2011; Nuñez *et al.*, 2013).

Se considera necesario aplicar criterios de conservación de la conectividad ecológica dentro y fuera de las áreas protegidas (Fischer *et al.*, 2006; Araujo *et al.*, 2011), de forma que existe un amplio consenso científico-técnico en señalar que la conservación eficiente de la biodiversidad y de los recursos naturales y culturales asociados requiere superar la dualidad y contraposición territorial entre espacios protegidos y el resto, y enmarcarse en la ordenación integral del territorio, a distintas escalas (Bennet y Wit, 2001; Gurrutxaga, 2004; Jongman y Pungetti, 2004; Mata, 2005; Sneath y Jones-Walters, 2008; Santos y Ganges y Herrera Calvo, 2013).

Para integrar criterios de conectividad en los instrumentos de planificación territorial es necesario analizarla de forma espacialmente explícita al diagnosticar el medio físico, con objeto de incluirla en la planificación del sistema de espacios abiertos (Mata y Olcina, 2010). Las zonas del territorio de especial interés para preservar la conectividad se denominan corredores ecológicos. La Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad define corredor ecológico como un territorio de extensión y configuración variables que conecta funcionalmente espacios naturales.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

El presente artículo tiene como objetivo describir y mostrar un ejemplo ilustrativo de aplicación de una metodología aplicable en la identificación y priorización de corredores ecológicos claves como proveedores de conectividad funcional, planteada como una metodología de apoyo a la planificación del sistema de espacios abiertos en los instrumentos de ordenación territorial.

2. La ordenación del territorio y la conectividad del paisaje: el caso de España

2.1. Estado de desarrollo de la ordenación del territorio

La ordenación del territorio comprende aquellos métodos utilizados por las administraciones públicas para influenciar la distribución futura de las actividades en el espacio, coordinar las políticas sectoriales con incidencia territorial y promover el equilibrio territorial (Comisión Europea, 1997). Se aplica sobre ámbitos geográficos supramunicipales y sus objetivos fundamentales son el desarrollo socioeconómico y equilibrado de las regiones, la mejora de la calidad de vida, la gestión responsable de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y la utilización racional del territorio (CEMAT, 1983). La Constitución española de 1978 atribuyó a las Comunidades Autónomas las competencias en ordenación del territorio. No existe una legislación básica estatal de ordenación del territorio a la que deba someterse las leyes autonómicas, lo cual ha conllevado cierta variedad en los conceptos y métodos (Mata, 2005). Paralelamente, la planificación a escala municipal, también llamada planificación urbanística, es competencia de los ayuntamientos. Los planes municipales han de ajustarse a los contenidos vinculantes que, en su caso, recogen los instrumentos de ordenación territorial, y deben ser finalmente aprobados por la Comunidad Autónoma.

La elaboración y aprobación de planes de ordenación territorial supramunicipal (de ámbito regional y subregional) en España ha sido un proceso lento y prácticamente se restringe a la última década (figura 1), con un desarrollo muy desigual entre las distintas Comunidades Autónomas (figura 2). Actualmente seis Comunidades Autónomas no han aprobado aún su plan de ordenación regional. Catorce autonomías no han aprobado la totalidad de sus planes subregionales, entre ellas, cuatro no han aprobado ninguno y otras cuatro han aprobado uno, el referente a su franja litoral. Los instrumentos de ordenación integral de ámbito autonómico, o planes regionales, tienen carácter estratégico y establecen las directrices tanto para los instrumentos de ordenación integral de ámbito subregional como para los instrumentos de ordenación de carácter sectorial, referidos a materias sectoriales de alta incidencia territorial. Los planes subregionales ordenan conjuntos de municipios relacionados funcionalmente y tienen como objetivos principales definir las necesidades y la localización de futuros desarrollos urbanísticos, infraestructuras y proyectos de dinamización del territorio, las directrices para la compatibilización de usos en conflicto, la regulación de actividades en las distintas zonas del territorio, la protección de espacios de valor natural, paisajístico y cultural, y la protección ante riesgos naturales. En general, los planes subregionales no establecen modelos futuros cerrados de ordenación y establecen un modelo de referencia para la planificación sectorial y para el planeamiento municipal (Benabent, 2012).

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

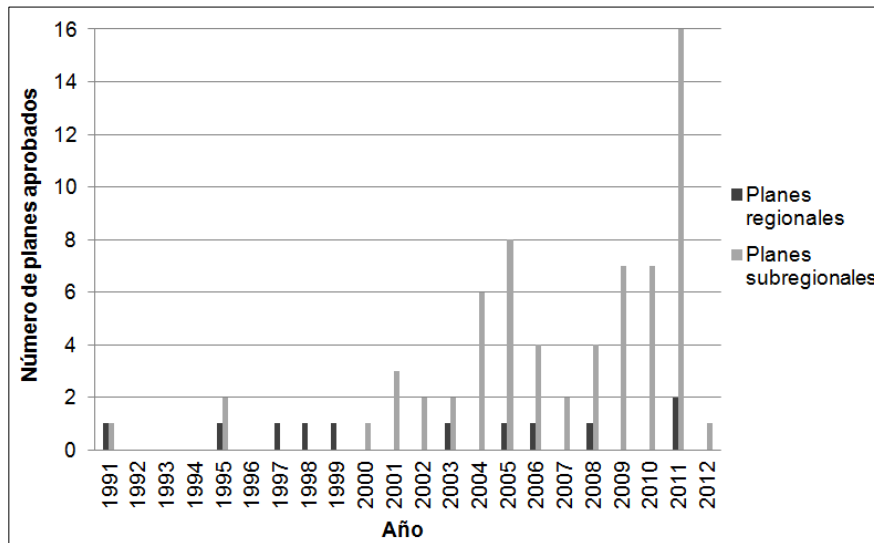


Figura 1. Número de planes de ordenación integral del territorio aprobados por año en España. (Fuente: Elaboración propia).

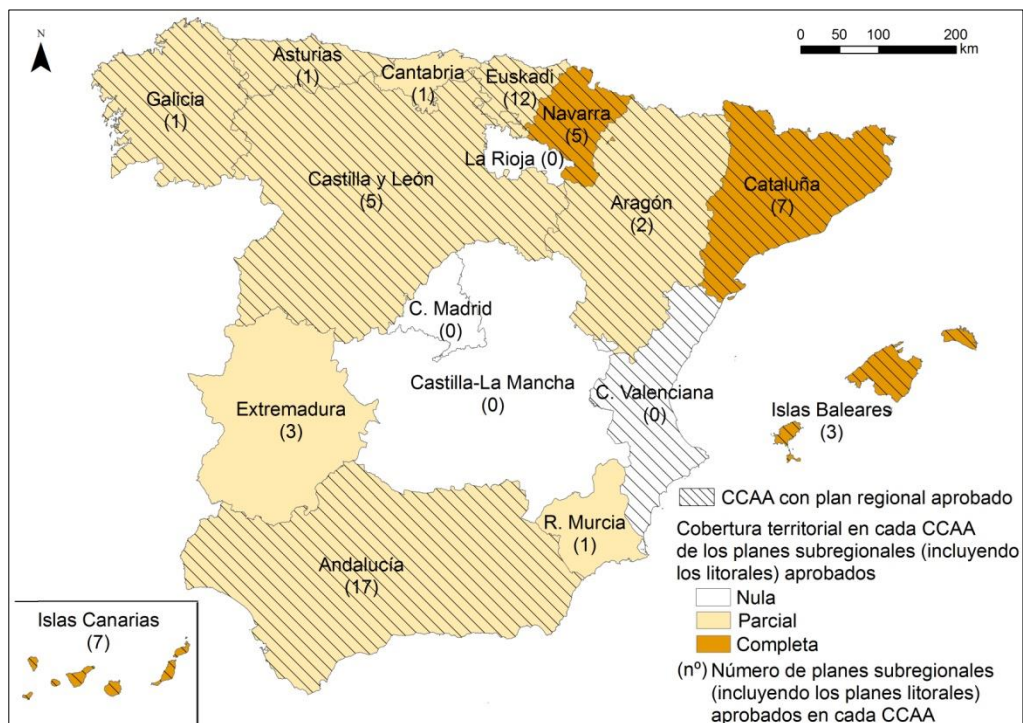


Figura 2. Distribución por Comunidades Autónomas de los instrumentos de ordenación integral del territorio aprobados en España. (Fuente: Elaboración propia).

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): “Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

La lentitud en el desarrollo de la ordenación territorial en España ha podido deberse, entre otros factores, a que las administraciones públicas han tenido tradicionalmente un funcionamiento claramente sectorial, resistiéndose a la inserción de esta política de carácter horizontal e integrado (Benabent, 2012) y a que la planificación a escala municipal tiene un recorrido mucho más largo y consolidado (Aguado, 2010), lo que ha llevado a que durante mucho tiempo se considerara a la ordenación del territorio como la suma de los planes de los distintos municipios y los planes sectoriales. A esto se añade que durante la reciente burbuja inmobiliaria (1995-2007) hubo en diversos ámbitos cierta tendencia a no aprobar planes supramunicipales o bien a aprobarlos sin recoger medidas efectivas para ordenar el crecimiento urbanístico municipal (Burriel, 2011), en combinación con una falta de mecanismos de coordinación y de adecuada gobernanza territorial (Romero *et al.*, 2012). Asimismo, se ha constatado la necesidad de que la planificación territorial mejore su operatividad (Benabent, 2012) y optimice la funcionalidad de sus contenidos, recogiendo de forma diferenciada determinaciones a corto plazo (medidas de intervención, con inversión económica, relacionadas con los periodos de cada gobierno y los presupuestos anuales), a largo plazo (medidas de regulación territorial para la conservación ambiental) y de tipo urbanístico (con una visión territorial más amplia que los instrumentos municipales) (Fariña y Naredo, 2010).

Dentro de los planes de ordenación integral del territorio, las medidas referidas al suelo no urbanizado, ya sean de intervención (como la restauración de ecosistemas degradados) o de regulación y control (como las dirigidas a la protección de espacios de valor natural, paisajístico y cultural, la conservación de corredores ecológicos o la protección ante riesgos naturales) se establecen en el apartado de planificación del medio físico (Gómez Orea, 2002) o del sistema de espacios abiertos (Mata y Olcina, 2010).

2.2. La conectividad del paisaje en la planificación del sistema de espacios abiertos

La Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad insta en su artículo 46 a fomentar la conectividad y coherencia ecológica de la red Natura 2000 de la siguiente manera:

“Con el fin de mejorar la coherencia ecológica y la conectividad de la Red Natura 2000, las Comunidades autónomas, en el marco de sus políticas medioambientales y de ordenación territorial, fomentarán la conservación de corredores ecológicos y la gestión de aquellos elementos del paisaje y áreas territoriales que resultan esenciales o revistan primordial importancia para la migración, la distribución geográfica y el intercambio genético entre poblaciones de especies de fauna y flora silvestres”.

Y define corredor ecológico como un “territorio, de extensión y configuración variables, que, debido a su disposición y a su estado de conservación, conecta funcionalmente espacios naturales de singular relevancia para la flora o la fauna silvestres, permitiendo, entre otros procesos ecológicos, el intercambio genético entre poblaciones de especies silvestres o la migración de especímenes de esas especies”.

De esta forma, la Ley 42/2007 insta al establecimiento de corredores ecológicos a modo de conectores territoriales extensivos en el marco de la ordenación territorial en España. Esta definición de corredor ecológico supera claramente la referencia a la conectividad de la red Natura

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): “Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

2000, basada en elementos lineales y puntuales del paisaje (como medios fluviales y sotos) que hacía en 1992 la Directiva 92/43/CEE o Directiva Hábitats, en consonancia con la tendencia a atribuir mayor consistencia a la preservación de la conectividad ecológica observada durante las últimas dos décadas en los textos normativos a distintos niveles (Gurrutxaga y Lozano, 2009).

La noción de corredor ecológico que recoge la Ley 42/2007 aporta un marco adecuado para la integración del concepto red ecológica –definida como un sistema coherente de elementos de paisaje naturales y/o seminaturales, formado y gestionado con el objetivo de mantener o restaurar las funciones ecológicas como medio para conservar la biodiversidad, creando al mismo tiempo oportunidades apropiadas para el uso sostenible de los recursos naturales (Bennett y Wit, 2001)– en la planificación del sistema de espacios abiertos o planificación del medio físico en el marco de la ordenación del territorio. Recientemente el concepto de red ecológica ha sido ampliado con el de infraestructura verde, que además de la conservación de la biodiversidad, tiene como objetivos la sostenibilidad socioeconómica a través de la prestación de distintos servicios ecosistémicos y se extiende a ámbitos urbanos. La Comisión Europea (2013) define la infraestructura verde como una red de zonas naturales y seminaturales y de otros elementos ambientales, planificada de forma estratégica, diseñada y gestionada para la prestación de una extensa gama de servicios ecosistémicos, y la está impulsando como un marco de trabajo a desarrollar hasta 2020, como había demandado la Estrategia Europea de Biodiversidad 2020 (Comisión Europea, 2011).

En España, la integración de corredores ecológicos en la planificación territorial es más reciente que en otros países europeos, y no existe una coordinación de la administración estatal al respecto (Sunyer y Manteiga, 2008). Desde mediados de la década de los años 2000 se ha observado una incipiente integración de conectores ecológicos en la planificación del medio físico de los instrumentos de ordenación subregional en España (Mata, 2005), si bien el grado de integración es desigual y existe un amplio margen de mejora en la materia (Gurrutxaga, 2011).

El presente artículo tiene como objetivo mostrar un novedoso marco metodológico de ayuda a las decisiones espaciales, contrastable empíricamente, aplicable en la preservación de la conectividad ecológica del territorio dentro de la planificación del sistema de espacios abiertos de los instrumentos de ordenación territorial.

Dicho marco metodológico se compone de una combinación de herramientas. En primer lugar, aborda la estimación de las distancias funcionales entre los distintos espacios protegidos, teniendo en cuenta la composición del paisaje intermedio y contemplando dos formas de evaluar dichas distancias. El cálculo de dichas distancias funcionales es un paso previo para aplicar un método de categorización de los corredores, basado en estructuras de grafos, que prioriza dichos corredores en función de su grado de contribución a la conectividad y disponibilidad de hábitat a escala territorial. El marco metodológico descrito se ilustra mediante un caso de estudio a escala subregional entre Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) de la red Natura 2000 con hábitats boscosos.

3. Metodología

3.1. Caso de estudio y datos empleados

El área de estudio comprendió la zona central del País Vasco, un ámbito geográfico con un relevante papel potencial en la conectividad ecológica en Europa suroccidental, al situarse entre notables reservorios de biodiversidad como la Cordillera Cantábrica y los Pirineos (Gurrutxaga, 2005; Mallarach *et al.*, 2010; Gurrutxaga, 2011). En especial, el área de estudio destaca por su potencial contribución a la conectividad del hábitat forestal entre dichas cordilleras (Jongman *et al.*, 2006).

El objetivo del presente caso de estudio es obtener una jerarquización de los conectores territoriales entre LIC con formaciones forestales situados en la zona central del País Vasco, en función de su grado de contribución a la conectividad y disponibilidad global de hábitat de bosque natural en el conjunto del territorio en el que se sitúan dichos LIC. Como grupo faunístico en función del cual realizar el estudio se utilizó el de los medianos mamíferos forestales, debido a su sensibilidad a las principales dinámicas territoriales de la zona de estudio (urbanización, efecto barrera de infraestructuras viarias de gran capacidad, intensificación y abandono agrario, etc.) y a su grado de movilidad detectable a la escala de estudio (a diferencia de otras especies de menor capacidad dispersiva, cuyo estudio sería relevante a escalas de más detalle). Se tomó una distancia de dispersión de 5 km como representativa del grupo de medianos mamíferos forestales (Bowman *et al.*, 2002).

El ámbito subregional del caso de estudio abarcó 13 LIC con formaciones forestales, repartidos en el territorio en un total de 30 teselas (figura 3).

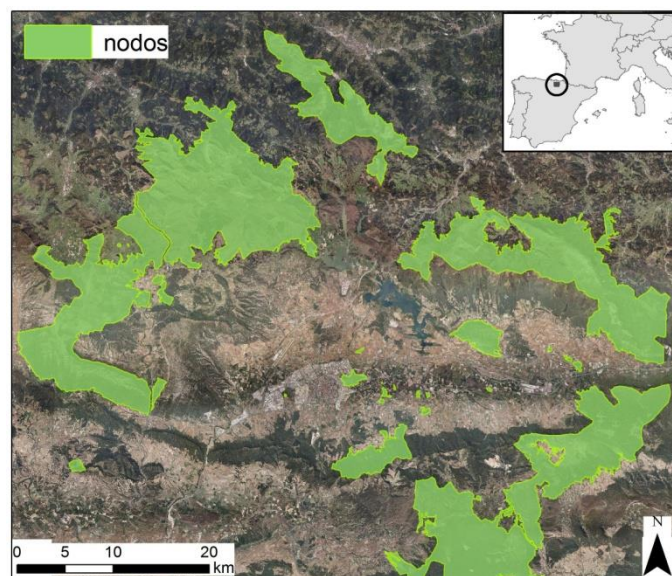


Figura 3. Área de estudio.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

Como información de partida se utilizó el mapa de hábitats EUNIS del País Vasco escala 1:10.000 (Gobierno Vasco, 2009), disponible en el geoportal de referencia de la Infraestructura de Datos Espaciales de Euskadi (<http://www.geo.euskadi.net/>).

3.2. Técnicas de análisis

A) Cálculo de distancias funcionales entre espacios Natura 2000

Para realizar el cálculo de las distancias funcionales entre los espacios Natura 2000 se partió de dos capas de información: i) los espacios a conectar, o nodos, y ii) un mapa de resistencias en formato raster en el que se parametrizó la resistencia que ofrece el paisaje al desplazamiento del grupo funcional de fauna seleccionado (Adriaensen *et al.*, 2003). Los espacios a conectar correspondieron a las áreas fuente o nodos entre los que analizar los enlaces o conectores territoriales para el grupo de fauna seleccionado, en este caso los LIC con bosques que existen en la zona de estudio. El resto de masas boscosas presentes en el territorio externo a los LIC puede contribuir como teselas puente o elementos conectores que proporcionen cauces de dispersión o refugios temporales para las especies entre los nodos.

Para parametrizar la impedancia que ofrece el paisaje al desplazamiento del grupo funcional de mamíferos forestales se utilizaron unos valores de resistencia de las cubiertas del suelo (tabla 1) análogos a los empleados en el diseño de la red de corredores ecológicos del País Vasco (Gurrutxaga, 2005). Es preciso destacar que si bien dichos valores de resistencia originalmente fueron asignados en 2005 mediante consulta bibliográfica y a expertos (Gurrutxaga, 2005), posteriormente han sido validados empíricamente en la zona de estudio mediante datos de flujo génico del mamífero forestal marta europea *Martes martes* (Ruiz-González *et al.*, 2010). Los valores de resistencia forman un gradiente que abarca el conjunto de las cubiertas del suelo, desde las más favorables (como los bosques) hasta las que ofrecen mayor fricción (como las zonas urbanas) (tabla 1). El mapa de resistencias se rasterizó a una resolución de pixel de 50 m.

Tabla 1. Valores de resistencias de las cubiertas del suelo.

Cubierta del suelo	Resistencia
Bosque	1
Matorral	5
Plantación forestal	10
Pasto	30
Pastizal	40
Roquedo	40
Cultivo	60
Agua	100
Urbano	1000

Fuente: Adaptado de Gurrutxaga (2005).

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

A partir de los nodos y del mapa de resistencias se calcularon las distancias funcionales, influenciadas por la composición de la matriz territorial, entre cada par de nodos. Estas distancias funcionales cuantifican el grado de permeabilidad que tiene el territorio situado entre uno y otro nodo, de forma que caracterizan los potenciales enlaces o conectores territoriales entre cada par de nodos. Al partir de 30 teselas (nodos), se calcularon las distancias funcionales entre 435 $((n^2-n)/2)$ pares de nodos. Se utilizaron paralelamente sendos programas, *Pathmatrix* (Ray, 2005) y *Circuitscape* (McRae *et al.*, 2008), respectivamente. *Pathmatrix* calcula las distancias funcionales como la resistencia acumulada en las rutas de mínimo coste de desplazamiento entre cada par de nodos (Ray, 2005). Por su parte, *Circuitscape* calcula, con base en adaptaciones de la teoría de circuitos al estudio de la conectividad del paisaje, las distancias funcionales entre cada par de nodos, considerando simultáneamente los flujos en todos las posibles rutas de dispersión existentes en el paisaje, y no sólo de la de menor coste (McRae *et al.*, 2008).

B) Jerarquización de conectores en función de su contribución a la disponibilidad de hábitat

La importancia o contribución de cada enlace al mantenimiento de la conectividad y disponibilidad de hábitat en el conjunto de nodos se calculó con el programa *Conefor* (Saura y Torné, 2009), disponible en www.conefor.org, mediante el índice de la probabilidad de conectividad (*PC*) (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010), que tiene en cuenta la posición topológica de los enlaces en el paisaje y la superficie de hábitat de los nodos que conectan.

El concepto de disponibilidad de hábitat integra: i) la cantidad de hábitat que hay dentro de los nodos y ii) el hábitat que resulta accesible o alcanzable gracias a las conexiones entre los distintos nodos (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010). La disponibilidad de hábitat para una determinada especie u organismo será baja si los nodos se encuentran aislados unos de otros, pero también si el hábitat es muy escaso, aunque los nodos estén fuertemente conectados entre sí. La conectividad determina cuánta superficie de hábitat de la existente en el conjunto de los nodos es realmente accesible y alcanzable para un organismo situado en un punto concreto del territorio (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010; Saura, 2013).

El índice *PC* se calcula mediante estructuras de grafos. Así, para su cálculo se representó el paisaje de estudio como un grafo, compuesto de un conjunto de nodos conectados funcionalmente (en mayor o menor medida) por enlaces. Los enlaces representan la conexión funcional de cada par de nodos, obtenida en función tanto de la distancia funcional entre los nodos (calculada con *Pathmatrix* o *Circuitscape*) como de la capacidad de dispersión de las especies concernidas (en este caso fijada en 5 km, como se ha señalado anteriormente).

La distancia de dispersión fue multiplicada por el valor medio del mapa de resistencias, y el resultado determinó la distancia de dispersión efectiva d_{ef} que corresponde a una probabilidad directa de dispersión de 0.5 entre dos nodos (p_{ij}) (Saura y Pascual-Hortal, 2007). El valor d_{ef} corresponde a la capacidad efectiva de las especies para moverse entre los nodos, expresada como un costo acumulado de desplazamiento tras tener en cuenta la variable permeabilidad del territorio.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

PC se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2}$$

siendo a_i y a_j los atributos de los nodos i y j (en este caso la superficie de bosque de cada nodo); p_{ij}^* es el máximo producto de probabilidad que caracteriza la viabilidad de movimiento entre i y j ; A_L es el atributo máximo del paisaje (en este caso el área total del ámbito de estudio) y n el número de nodos en el paisaje. p_{ij}^* contabiliza las probabilidades de dispersión directa entre los nodos (p_{ij}) y el papel de los escalones intermedios (teselas puente) a lo largo del proceso de dispersión que pueden aumentar la probabilidad de dispersión entre i y j ($p_{ij}^* \geq p_{ij}$). Los valores p_{ij} se obtuvieron de una función exponencial negativa de la distancia funcional entre nodos, que produce un valor de $p_{ij}=0.5$ para la distancia de dispersión efectiva (d_{ef}) de las especies concernidas. Para más detalles véase Saura y Pascual-Hortal (2007) y Saura y Rubio (2010).

El índice PC permite calcular la importancia o contribución de cada enlace al mantenimiento de la conectividad y disponibilidad de hábitat en el conjunto de los nodos (o conectividad y disponibilidad global de hábitat). Esta importancia o contribución se calcula como dPC_k , es decir, como el porcentaje de disminución en la conectividad que se produciría por la pérdida de un determinado enlace en el territorio (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$dPC_k = 100 \frac{PC - PC_{elim,k}}{PC}$$

siendo dPC_k la importancia del enlace k para el mantenimiento de la conectividad y disponibilidad de hábitat en el paisaje según este índice; PC el valor del índice en el paisaje original (antes de la eliminación de ningún elemento) y $PC_{elim,k}$ es el valor del índice tras la eliminación del enlace k .

De esta forma, el cálculo de dPC_k para cada uno de los enlaces permite priorizar e identificar los corredores ecológicos más críticos para el mantenimiento de la conectividad y disponibilidad global de hábitat en el territorio de estudio. El deterioro de estos corredores clave tendría un impacto negativo especialmente crítico sobre la conectividad global del hábitat en la red de espacios Natura 2000 concernida, de forma que resulta prioritaria la conservación de dichos corredores clave (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio 2010; Saura, 2013).

4. Resultados

En la figura 4 se muestra la jerarquización de los enlaces en términos de su contribución a la conectividad y disponibilidad global de hábitat obtenida con *Conefor*, partiendo de las distancias funcionales obtenidas i) con *Pathmatrix* y ii) con *Circuitscape*. Se representan, respectivamente, los 30 enlaces con mayor contribución, divididos en tres grupos de diez enlaces cada uno (en rojo los primeros diez, en azul los segundos y en amarillo los terceros). Con objeto de facilitar su

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): “Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

visualización, la categorización de los enlaces en dichos tres grupos se representa, tanto en i) como en ii), sobre la ruta de mínimo coste entre los nodos.

En tonos grises se representan los gradientes en el territorio intermedio entre los nodos referidos a: i) la resistencia acumulada que sirve para determinar las rutas de mínimo coste y ii) el grado de concentración de flujo en las distintas posibles rutas entre los nodos (figura 4). Dichos gradientes son capas SIG en formato raster, resultantes de la aplicación de i) *Pathmatrix* y ii) *Circuitscape*, respectivamente, y permiten visualizar la diferencia en el modo de calcular las distancias funcionales que tienen ambos programas. Asimismo, dichos gradientes sirven de apoyo para identificar o delimitar zonas concretas del territorio a formar parte de los conectores territoriales entre espacios Natura 2000 categorizados.

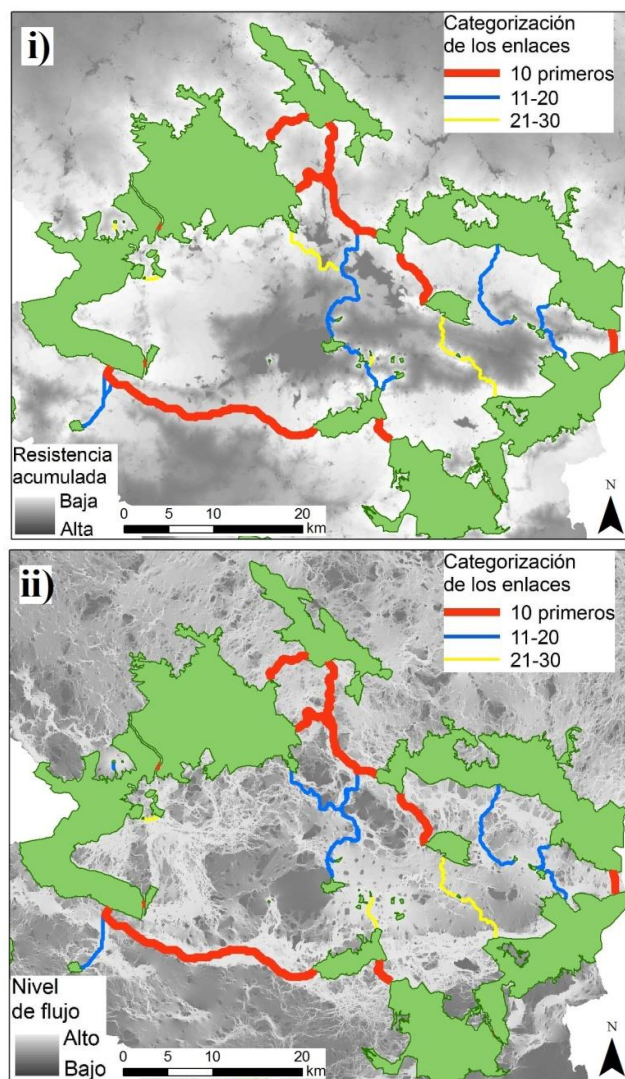


Figura 4. Categorización de los enlaces obtenida.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

Los 10 primeros enlaces con mayor contribución a la conectividad y disponibilidad global de hábitat, representados en rojo, fueron los mismos partiendo de las distancias funcionales calculadas con i) *Pathmatrix* y ii) *Circuitscape*, respectivamente. Los segundos y terceros diez enlaces más importantes (en azul y amarillo, respectivamente) no coincidieron plenamente, y se obtuvieron cinco enlaces que cambiaron de categoría según la forma de estimación de las distancias funcionales adoptada (figura 4).

5. Discusión

Los resultados obtenidos en el caso de estudio aportan una categorización de conectores territoriales que forman parte de la red regional de corredores ecológicos del País Vasco entre espacios Natura 2000 (Gurrutxaga, 2005). La identificación de los conectores más prioritarios permite optimizar la utilización de dicha red autonómica de corredores, tanto en los procesos de evaluación ambiental de planes y proyectos, en los que se utiliza como información de referencia, como en la implementación de los conectores en la planificación subregional y local.

Los resultados de jerarquización de corredores ecológicos obtenidos son similares partiendo de las distancias funcionales calculadas con *Pathmatrix* y *Circuitscape*, respectivamente. En especial en los diez conectores de mayor relevancia, en los que los resultados fueron iguales. La consideración del papel del conjunto de la matriz territorial en el que se insertan los nodos se considera más completa con *Circuitscape*, por lo que en los casos de discrepancia se daría prioridad a la jerarquización obtenida con dicha herramienta.

Los gradientes territoriales resultantes de la aplicación de *Pathmatrix* y *Circuitscape* sirven de apoyo para identificar o delimitar zonas concretas del territorio con especial relevancia para ser adecuadamente conservadas o gestionadas para el fomento de la conectividad, formando parte de los conectores territoriales jerarquizados con *Conefor*. Estas zonas pueden abarcar distintas cubiertas del suelo, incluyendo parcelas de explotación agraria donde sería prioritario, por su ubicación estratégica, aplicar medidas agroambientales que favorezcan la permeabilidad del paisaje (Donald y Evans, 2006).

La metodología utilizada ha permitido por primera vez jerarquizar la importancia relativa de los conectores territoriales entre LIC forestales en la zona de estudio, algo que no había podido ser abordado en estudios previos mediante otras aproximaciones metodológicas (Gurrutxaga *et al.*, 2008). En el caso de estudio se ha utilizado una distancia de dispersión de 5 km como referencia del grupo funcional de medianos mamíferos forestales. En caso de considerar distancias de dispersión menores y/o mayores, propias de otros mamíferos forestales, la jerarquización variaría en cierta medida. No obstante, estudios previos utilizando un amplio rango de distancias de dispersión han mostrado que una notable parte de los conectores clave coinciden para especies de distintas capacidades dispersivas (Gurrutxaga, 2011)

En un caso de estudio como el realizado, sobre un conjunto de espacios Natura 2000 dentro de un ámbito subregional, la definición y jerarquización de conectores territoriales se ha afrontado a una escala supramunicipal. No obstante, dado que el diagnóstico del medio físico y de la

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): “Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

conectividad ecológica territorial es relevante y complementario a las distintas escalas geográficas y niveles administrativos en los que se ordena el territorio, la planificación del sistema de espacios abiertos y la definición de corredores ecológicos ha de responder a un proceso multiescalar (Bennet y Wit, 2001; Gurrutxaga, 2013). Por ejemplo, en la planificación a nivel de municipio, además de recogerse los conectores territoriales definidos a escalas superiores, se habrán de identificar otros relevantes con objeto de conectar nodos de hábitat de menor extensión pero de importancia a escala municipal.

Es preciso señalar que en el caso de estudio se ha partido de los espacios Natura 2000 con hábitats de bosque como nodos a conectar, con el objeto de atender a la demanda de establecer conectores territoriales concebidos para fomentar la conectividad de la red Natura 2000. Asimismo, el diagnóstico de la conectividad del hábitat forestal también podría realizarse, a distintas escalas espaciales, con base en la identificación y jerarquización de los conectores territoriales entre las principales masas de bosque, independientemente de su ubicación respecto a los LIC, presentes en el territorio de estudio (Gurrutxaga y Saura, en prensa). La misma metodología se podría aplicar de manera análoga a otras especies o ecosistemas no forestales, tales como humedales o zonas de agricultura extensiva.

6. Conclusiones

Además de la protección de los espacios valor natural, paisajístico y cultural, y la prevención de riesgos naturales, la planificación del sistema de espacios abiertos ha de afrontar la conservación de la conectividad ecológica del territorio (Mata y Olcina, 2010). En España existe un amplio margen de mejora en la integración de conectores ecológicos en los instrumentos de ordenación territorial y planeamiento municipal (Sunyer y Manteiga, 2008; Gurrutxaga, 2011), de forma que son necesarias metodologías adecuadas para desarrollar dicha integración, tanto cuando se afronta la revisión de los instrumentos en vigor como en la elaboración de los que quedan por realizar. En el presente trabajo se ha mostrado, mediante un caso de estudio, una metodología de ayuda a las decisiones espaciales para optimizar el fomento de la conectividad de la red Natura 2000 en el marco de los instrumentos de ordenación integral del territorio.

En cuanto a la aplicabilidad de la presente metodología en la ordenación del territorio, es preciso destacar que, además de su utilidad para integrar la conservación de corredores ecológicos prioritarios dentro de las medidas preventivas de regulación territorial en la ordenación del medio físico, se puede utilizar también para calcular la contribución a la mejora de la disponibilidad y conectividad global del hábitat de medidas de intervención en distintas localizaciones del paisaje (Saura y Torné, 2012). Estas medidas de intervención pueden abarcar, por ejemplo, la restauración del hábitat en enclaves degradados o la construcción de pasos de fauna para la desfragmentación de infraestructuras viarias con importante efecto barrera (Gurrutxaga y Saura, 2013). Para ello es preciso contemplar en el análisis tanto la situación actual del territorio como los escenarios en los que dichas medidas se habrían ejecutado. Así, *Conefor* es aplicable también como herramienta de ayuda para la localización prioritaria de medidas concretas de intervención dentro de la gestión activa del medio físico.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

El caso de estudio mostrado se ha centrado en la conectividad del hábitat forestal y contaba con una mapa de resistencias contrastado empíricamente mediante datos de flujo génico de una especie de mamífero forestal representativa (Ruiz-González *et al.*, 2010). No obstante, la metodología empleada es también aplicable sobre otros tipos de hábitats, para especies o grupos funcionales de especies asociadas a ecosistemas agrarios, acuáticos, etc. Investigaciones actuales y futuras en Ecología del Paisaje con especies de diferentes perfiles ecológicos permitirán ir ampliando y mejorando la obtención de datos empíricos que permitan optimizar la determinación de los parámetros de los que se nutre la metodología, como las distancias de dispersión de las especies focales y la resistencia del paisaje al desplazamiento (Zeller *et al.*, 2012).

Pese a su reciente desarrollo, el índice *PC* (Saura y Pascual-Hortal, 2007), implementado en *Conefor*, está siendo empleado en una amplia gama de planes e investigaciones sobre conectividad ecológica en numerosos países (véase www.conefor.org). La utilización de distancias funcionales entre nodos obtenidas con *Circuitscape* para el cálculo del índice *PC* es especialmente novedosa y permite una consideración más completa del papel del conjunto del territorio en el análisis de la conectividad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos CONECTERR (CSO2011-23653) y GEFOUR (AGL2012-31099) y por el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco a través del proyecto SBDP (IT575-13).

Referencias bibliográficas

Adriaensen, F.; Chardon, J.P.; De Blust, G.; Swinnen, E.; Villalba, S.; Gulinck, H. y Matthysen, E. (2003): "The application of least-cost modelling as a functional landscape model", *Landscape and Urban Planning*, 64, pp. 233-247.

Aguado, J. (2010): "La formalización jurídico-administrativa de la ordenación del territorio en España", en Galiana, L. y Vinuesa, J. (Coords.) *Teoría y práctica para una ordenación racional del territorio*. Madrid: Síntesis, pp. 45-70.

Araújo, M. B.; Alagador, D.; Cabeza, M.; Nogués-Bravo, D. y Thuiller, W. (2011): "Climate change threatens European conservation areas", *Ecology Letters*, 14, pp. 484-492.

Benabent, M. (2012): "Treinta años de ordenación del territorio en el Estado de las Autonomías", en Castañer, M. (Ed.) *El planejament territorial a Catalunya a inici del segle XXI*. Barcelona, Societat Catalana d'Ordenació del Territori, pp. 140-165.

Bennett, A.F. (2004): *Enlazando el paisaje: El papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre*. San José, UICN.

Bennett, G. y Wit, P. (2001): *The development and application of ecological networks: a review of proposals, plans and programmes*. Amsterdam, AIDEnvironment.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

Bowman, J.; Jaeger, J.A.G. y Fahrig, L. (2002): "Dispersal distance of mammals is proportional to home range size", *Ecology*, 83, pp. 2049-2055.

Burriel, E.L. (2011): "Subversion of land-use plans and the housing bubble in Spain", *Urban Research & Practice*, 4, pp. 232-249.

CEMAT (Council of Europe Conference of Ministers Responsible for Spatial/Regional Planning) (1983): *European regional/spatial planning charter*. Strasbourg, Council of Europe.

Comisión Europea (1997): *The EU compendium of spatial planning systems and policies*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.

Comisión Europea (2011): *Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020. COM(2011) 244 final*. Brussels, European Commission.

Comisión Europea (2013): *Green Infrastructure (GI): Enhancing Europe's Natural Capital. COM(2013) 249 final*. Brussels, European Commission.

Crooks, K.R. y Sanjayan, M. (Eds.) (2006): *Connectivity conservation*. Cambridge, Cambridge University Press.

Donald, P.F. y Evans, A.D. (2006): "Habitat connectivity and matrix restoration: the wider implications of agri-environment schemes", *Journal of Applied Ecology*, 43, pp. 209-218.

Fariña, J. y Naredo, J.M. (Dir.) (2010): *Libro blanco de la sostenibilidad en el planeamiento urbanístico español*. Madrid, Ministerio de Vivienda del Gobierno de España.

Fischer, J.; Lindenmayer, D.B. y Manning, D. (2006): "Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes", *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, pp. 80-86.

Forman, R.T.T. y Godron, M. (1986): *Landscape Ecology*. New York, John Wiley and Sons.

Gobierno Vasco (2009): *Mapa de hábitats EUNIS de la Comunidad Autónoma del País Vasco a escala 1:10.000, actualización 2009*. Vitoria-Gasteiz, Gobierno Vasco.

Gómez Orea, D. (2002): *Ordenación territorial*. Madrid, Mundi-Prensa.

Gurrutxaga, M. (2011): "La gestión de la conectividad ecológica del territorio en España: Iniciativas y retos", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, pp. 225-244.

Gurrutxaga, M. (2013): "La implementación de la conectividad ecológica a distintas escalas espaciales", en Santos y Ganges, L. y Herrera Calvo, P.M. (Coords.) *Planificación espacial y conectividad ecológica: los corredores ecológicos*. Valladolid, Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid, pp. 139-148.

Gurrutxaga, M. (IKT) (2005): *Red de corredores ecológicos de la Comunidad Autónoma de Euskadi*. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco. [Consulta: 14-08-2013]. Disponible en http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-u95/es/contenidos/informe_estudio/corredores_ecologicos/es_doc/indice.html

Gurrutxaga, M. y Saura, S. (2013): "Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity", *Environmental Conservation*, doi: 10.1017/S0376892913000325.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): "Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

Gurrutxaga, M. y Saura, S. (En prensa): "Conectividad forestal", en Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Identificación de áreas a desfragmentar para reducir los impactos de las infraestructuras lineales de transporte en la biodiversidad. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transporte, número 6*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, pp. 250-258.

Gurrutxaga, M. (2004): *Conectividad ecológica del territorio y conservación de la biodiversidad. Nuevas perspectivas en ecología del paisaje y ordenación territorial*. Vitoria-Gasteiz, Gobierno Vasco.

Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J. (2009): "La integración de la conectividad ecológica en los instrumentos de ordenación y planificación territorial: una revisión", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 49, 45-66.

Gurrutxaga, M.; del Barrio, G. y Lozano, P.J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus*, 8, pp. 296-316.

Gurrutxaga, M.; Rubio, L. y Saura, S. (2011): "Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe)", *Landscape and Urban Planning*, 101, pp. 310-320.

Heller, N.E. & y Zavaleta, E.S. (2009): "Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations", *Biological Conservation*, 142: 14-32.

Jongman, R.H.G. & y Pungetti, G. (Eds.) (2004): *Ecological networks and greenways: Concept, design, implementation*. Cambridge, Cambridge University Press.

Jongman, R.H.G.; Bouwma I.M. y van Doorn, A.M. (2006): *The indicative map of the Pan-European Ecological Network in Western Europe*. Wageningen, Alterra.

MacArthur, R.H. y Wilson, E.O. (1967): *The theory of island biogeography*. Princeton, Princeton University Press.

Mallarach, J.M.; Rafa, M. y Sargatal, J. (2010): "Cantabrian Mountains-Pyrénées-Massif Central-Western Alps great mountain corridor", en Worboys, G.L., Francis, W.L. y Lockwood, M. (Eds.) *Connectivity conservation management. A global guide*, London, Earthscan, pp. 269-279.

Mata, R. (2005): *Integración de los espacios naturales protegidos en la ordenación del territorio*. Madrid, EUROPARC-España.

Mata, R. y Olcina, J. (2010): "El sistema de espacios libres", en Galiana, L y Vinuesa, J. (Coord.) *Teoría y práctica para una ordenación racional del territorio*. Madrid, Síntesis, pp. 87-128.

McRae, B.H.; Dickson, B.G.; Keitt, T.H. y Shah, V.B. (2008): "Using circuit theory to model connectivity in ecology and conservation", *Ecology*, 10, pp. 2712-2724.

Núñez, T.A.; Lawler, J.J.; McRae, B.H.; Pierce, D.J.; Krosby, M.B.; Kavanagh, D.M.; Singleton, P.H. y Tewksbury, J.J. (2013): "Connectivity planning to address climate change". *Conservation Biology*, 27: 407-416.

Opdam, P. y Wascher, D. (2004): "Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation", *Biological Conservation*, 117, pp. 285-297.

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014): “Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 68-84. ISSN: 5578-5157

Ray, N. (2005): “Pathmatrix: a geographical information system tool to compute effective distances among samples”, *Molecular Ecology Notes*, 5, pp. 177–180.

Romero, J.; Jiménez, F. y Villoria, M. (2012): “(Un)sustainable territories: causes of the speculative bubble in Spain (1996-2010) and its territorial, environmental, and sociopolitical consequences”, *Environment and Planning C: Government and Policy*, 30, pp. 467-486.

Ruiz-González, A.; Gurrutxaga, M.; Madeira, M.J.; Lozano, P.J.; Fernández, J.M. y Gómez-Moliner, B. (2010): *Estudio de la conectividad ecológica en la CAPV. Genética del paisaje aplicada sobre una especie-objetivo de la red de corredores ecológicos: la marta europea (Martes martes)*. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco. [Consulta: 14-08-2013]. Disponible en www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-u95/es/contenidos/informe_estudio/genetica_paisaje_m_martes/es_doc/indice.html

Santos y Ganges, L. y Herrera Calvo, P.M. (coords.) (2013): *Planificación espacial y conectividad ecológica: los corredores ecológicos*. Valladolid, Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid.

Saura, S. (2013): “Métodos y herramientas para el análisis de la conectividad del paisaje y su integración en los planes de conservación”, en De la Cruz, M. y Maestre, F. (Eds.) *Avances en el análisis espacial de datos ecológicos: aspectos metodológicos y aplicados*, ECESPA-AEET, pp. 1-46.

Saura, S. y Pascual-Hortal, L. (2007): “A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study”, *Landscape and Urban Planning*, 83, pp. 91-103.

Saura, S. y Rubio, L. (2010): “A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape”, *Ecography*, 33, 523-537.

Saura, S. y Torné, J. (2009): “Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity”, *Environmental Modelling & Software*, 24, pp. 135-139.

Saura, S. y Torné, J. (2012): *Conefor 2.6 user manual (April 2012)*. Universidad Politécnica de Madrid. [Consulta: 14-08-2013]. Disponible en www.conefor.org.

Snethlage, L. y Jones-Walters, L. (Eds.) (2008): *Interactions between policy concerning spatial planning policy and ecological networks in Europe*. Tilburg, ECNC.

Sunyer, C. y Manteiga, L. (2008): “National report for Spain”, en Snethlage y L. Jones-Walters, L. (Eds.) (2008) *Interactions between policy concerning spatial planning policy and ecological networks in Europe*. Tilburg, ECNC.

Taylor P.D.; Fahrig, L.; Henein, K. y Merriam, G. (1993): “Connectivity is a vital element of landscape structure”, *Oikos*, 68, pp. 571-573.

Zeller, K.A.; McGarigal, K. y Whiteley, A.R. (2012): “Estimating landscape resistance to movement: a review”, *Landscape Ecology*, 27, pp. 777-797.