

VALORACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN ZONAL A LA CONECTIVIDAD DE LA RED NATURA 2000 EN EL PAÍS VASCO

MIKEL GURRUTXAGA SAN VICENTE ^{1,3}, GABRIEL DEL BARRIO ESCRIBANO ² y PEDRO J. LOZANO VALENCIA ³

¹ IKT SA, Departamento de Medio Natural y SIG, Granja Modelo, s/n, 01192 Arkaute (Álava).

² Estación Experimental de Zonas Áridas, Departamento de Desertificación y Geoecología, General Segura 1, 04001 Almería.

³ Universidad del País Vasco, Departamento de Geografía, Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz (Álava).

murrutxaga@ikt.es; gabriel@eeza.csic.es; fgplovap@vc.ehu.es

RESUMEN

Se realiza una investigación, mediante métodos geomáticos de análisis y modelado espacial, con objeto de valorar la contribución de diferentes espacios naturales (nodos) y de la matriz territorial en la que se insertan a la conectividad de la red de conservación del País Vasco. Por un lado, se estima la superficie efectiva de hábitat que presenta localmente el sector del territorio en el que se ubica cada nodo. Por otro lado, se estima el grado de contribución de cada nodo a la conectividad regional, incorporando el efecto que presenta la matriz territorial en la que se insertan. Se comprueba que la superficie efectiva de hábitat no explica la relevancia de los nodos para mantener la conectividad regional. Este resultado sugiere que ciertos corredores ecológicos que tienen como objeto mantener la conectividad entre nodos de superficie efectiva relativamente reducida podrían ejercer una función conectora clave a escala regional.

Palabras clave: corredores ecológicos, red Natura 2000, SIG, conectividad, País Vasco.

AN APPRAISAL OF THE ZONAL CONTRIBUTION TO NATURA 2000 NETWORK CONNECTIVITY IN THE BASQUE COUNTRY

ABSTRACT

Using geomatic methods of spatial analysis and modeling, a research is conducted to assess the importance of the different natural areas (nodes) and the landscape matrix on the connectivity of conservation network in the Basque Country. On the one hand, it is estimated the effective surface of habitat covering the zone where each node is located. On the other, the contribution of every node to the regional connectivity is estimated, integrating the effect of landscape matrix. It is verified that the effective surface of habitat does not explain the relevance of the nodes to support the regional connectivity. This result suggests that certain ecological corridors that have as objective

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

to support the connectivity with nodes of relatively small effective surface might exert a key connector function at regional scale.

Keywords: ecological corridors, Natura 2000 network, GIS, connectivity, Basque Country.

1. Introducción

Los procesos de fragmentación de hábitats son apuntados como una de las principales causas de la crisis global de biodiversidad (Primack, 2006). Evitar la pérdida de conectividad ecológica en el territorio, entendida como la capacidad de éste para permitir los desplazamientos de las especies silvestres entre las teselas con recursos (Taylor *et al.*, 1993), constituye uno de los retos fundamentales a afrontar por las políticas en materia de conservación (Bennett *et al.*, 2006). Fruto de ello, se ha puesto de manifiesto con gran consenso, que las estrategias de conservación basadas en la protección de espacios naturales, concebidos como unidades territoriales discretas y aisladas entre sí -es decir, espacial y funcionalmente independientes-, no resuelven la necesidad de tomar en consideración los flujos ecológicos que tienen lugar en el conjunto del territorio (Múgica *et al.*, 2002). En este contexto, el desarrollo de redes ecológicas coherentes, compuestas tanto por áreas protegidas, como por corredores de conexión y zonas de amortiguación, está tomando un notable impulso en los últimos años (Bennett y Mulongoy, 2006).

En el ámbito europeo, la Directiva 92/43/CEE del Consejo Europeo, o Directiva Hábitats, la cual regula el desarrollo de la red ecológica Natura 2000, insta a mejorar la coherencia ecológica de ésta mediante la gestión de aquellos elementos del paisaje que resulten fundamentales para garantizar la migración, distribución geográfica y el intercambio genético de las especies silvestres. Las áreas de la matriz territorial que se consideran de mayor capacidad para garantizar la conectividad se denominan genéricamente "corredores ecológicos" (Bennett, 1999).

Dado que la conectividad es una cualidad del paisaje en relación a una especie o grupo funcional de especies de similar capacidad dispersiva y perfil ecológico (del Barrio *et al.*, 2000), se parte de la evidencia de que no existen "corredores universales" que sirvan como conductos al conjunto de especies silvestres presentes en el territorio. Así, pueden concebirse conectores ecológicos de cara a favorecer la conectividad del paisaje para especies concretas, o para grupos funcionales de taxones con rangos de movilidad y requerimientos similares.

En la Comunidad Autónoma del País Vasco, con el fin de identificar y delimitar aquellos sectores de la matriz territorial prioritarios para mantener la conectividad ecológica a escala regional, se ha diseñado, mediante modelización GIS, una serie de corredores ecológicos entre diferentes áreas naturales, fundamentalmente espacios de la red Natura 2000, en función de los requerimientos de un grupo funcional de especies-objetivo formado por medianos mamíferos que se desplazan preferentemente por hábitats forestales (Gurrutxaga, 2007). Se trata de los ungulados *Capreolus capreolus* (corzo), *Sus scrofa* (jabalí) y *Cervus elaphus* (ciervo), y de los carnívoros *Martes martes* (marta), *Felis silvestris* (gato montés), *Genetta genetta* (gineta), *Mustela putorius* (turón), *Meles meles* (tejón) y *Martes foina* (garduña). Dichas áreas naturales conforman los nodos de la red ecológica del País Vasco, la cual queda completada con corredores de conexión y zonas de amortiguación.

La transitabilidad a través del territorio de las especies del grupo funcional seleccionado es sensible a tres de los procesos principales de pérdida de conectividad ecológica en el País Vasco a escala regional: la fragmentación de los bosques, la pérdida de heterogeneidad de los paisajes agrícolas por intensificación de las explotaciones y el efecto barrera de las infraestructuras de transporte. Cabe destacar que en el contexto internacional los grandes y medianos mamíferos son el grupo zoológico que más se ha utilizado en el diseño de corredores ecológicos a escala nacional y regional (véase por ejemplo Bruinderink *et al.*, 2003, Jędrzejewski *et al.*, 2005).

1.1. Objetivos

El objetivo del presente artículo es realizar una valoración, mediante métodos geomáticos de análisis espacial, de la importancia del papel conector que presentan ciertos sectores de la matriz territorial con alta permeabilidad relativa al desplazamiento de una serie de especies-objetivo, entre diferentes espacios naturales (nodos) en el País Vasco. Para ello, en primer lugar se pretende estimar la "superficie efectiva" de hábitat apto para el grupo funcional de especies-objetivo, que presenta la zona en la que se ubica cada nodo, con objeto de valorar la importancia relativa que puede atribuirse a la conexión de cada nodo con respecto a favorecer la conectividad ecológica en el territorio. Este análisis se denomina cálculo de superficie efectiva de núcleos de hábitat, y no tiene en cuenta las características de la matriz territorial en que se insertan éstos. En segundo lugar, se pretende estimar el grado de contribución de cada nodo a la conectividad del conjunto de espacios-núcleo, o conectividad regional, incorporando en el análisis el papel que presenta la matriz territorial en que se insertan éstos sobre la conectividad.

La estimación de la superficie efectiva de los núcleos de hábitat permitirá valorar la ubicación de los diferentes nodos dentro de la estructura natural del territorio. A priori, los nodos pertenecientes a núcleos de hábitat de superficie efectiva más amplia presentarían una mayor relevancia dentro de dicha estructura. Así, la función conectora de los corredores ecológicos dirigidos a enlazar nodos situados en núcleos de hábitat de superficie efectiva más amplia tendría, en principio, una mayor relevancia relativa respecto a la de otros corredores dirigidos a mantener la conectividad entre nodos situados en núcleos de hábitat de menor envergadura.

Con el doble análisis planteado se pretende valorar si existen otros factores, no relacionados con la superficie efectiva de hábitat, que tengan incidencia en el peso relativo de los diferentes nodos sobre la coherencia de la red ecológica a escala regional. En último término, y a efectos prácticos, los resultados de la valoración de dicha importancia relativa pueden trasladarse a una priorización para el establecimiento de corredores ecológicos eficaces que eviten el aislamiento de los nodos de mayor peso.

1.2. Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio de la Comunidad Autónoma del País Vasco, incluyendo los enclaves del Condado de Treviño (provincia de Burgos, Comunidad Autónoma de Castilla y León) y de Villaverde de Trucíos (Comunidad Autónoma de Cantabria). No obstante, es

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

preciso evitar el sesgo que conllevaría adoptar un área de estudio con límites meramente administrativos –que no atienden a la realidad física ni biogeográfica del territorio-, en continua interacción funcional con los espacios que le rodean. Así, en el primero de los análisis a realizar en la presente investigación (cálculo de la superficie efectiva de núcleos de hábitat), se incluyen las provincias colindantes al área de estudio (Cantabria, Burgos, La Rioja y Navarra). En el segundo de los ejercicios de análisis espacial a realizar (estimación de la contribución de cada nodo a la conectividad regional) se incluye, en un radio de 20 km, las zonas periféricas al territorio de estudio, pertenecientes a las provincias citadas anteriormente ([figura 1](#)). No se incluye en el análisis la zona del extremo suroccidental francés colindante al área de estudio. No obstante, se considera que, dada la escasa superficie y la situación marginal de la zona, su no inclusión no tendrá incidencia en los resultados a obtener.

Es preciso destacar, por su relevancia añadida, que el área de estudio se configura como un ámbito de carácter estratégico a nivel nacional y europeo para el análisis y la conservación de la conectividad ecológica. La situación del País Vasco a caballo entre los Pirineos y la Cordillera Cantábrica, hace que el área de estudio constituya la parte central del gozne entre los referidos Sistemas Montañosos. Por este motivo, se denomina "umbral vasco" al área montañosa de menor altitud que se sitúa entre ambas Cordilleras (de Terán y Solé, 1968). En la medida en que tanto la Cordillera Cantábrica como los Pirineos conforman muy destacados reservorios de biodiversidad y núcleos de hábitats naturales y seminaturales, tanto a nivel del Norte de la Península Ibérica, como del cuadrante Suroccidental de Europa, el área de estudio ejerce un papel de vital importancia en la regulación de relevantes flujos bióticos. El papel conector de los sistemas forestales del País Vasco como nexo natural entre las Cordilleras Cantábrica y Pirenaica puede apreciarse dentro del Mapa Indicativo de la Red Ecológica Pan-Europea en Europa Occidental (Jongman *et al.*, 2006).

2. Datos y métodos

Se parte de una serie de espacios-núcleo o nodos seleccionados por albergar hábitats adecuados para las especies-objetivo. Dados los requerimientos de las especies-objetivo que guían el diseño de los corredores, los espacios Natura 2000 que son contemplados como nodos a conectar mediante corredores ecológicos a escala regional en el País Vasco se corresponden con aquéllos que poseen bosques y/o mosaicos agroforestales. En cambio, no se contemplan como nodos, áreas protegidas de ambientes azonales o extrazonales, como humedales y hábitats litorales.

No obstante, la disposición de las áreas Natura 2000 que actúan como nodos en el área de estudio no resulta lo suficientemente coherente, al concentrarse en algunas zonas y quedar otras desprovistas. Por ello, se seleccionan ciertos nodos no pertenecientes a la red Natura 2000 con objeto de dar la suficiente coherencia al conjunto de espacios a conectar. El conjunto de espacios-núcleo o nodos de partida se muestra en la [figura 2](#).

Por otro lado, es preciso señalar, en la medida en que el concepto de escala pequeña y grande posee significados contrarios según diferentes autores (Antúnez y Márquez, 1992), que en el presente artículo se identifican escalas grandes con resoluciones espaciales menores y mayores extensiones de estudio.

2.1. Método de estimación de la superficie efectiva de los núcleos de hábitat

Se identifican los núcleos de hábitat de interés para las especies-objetivo mediante la agrupación de los bosques y espacios circundantes con un cierto índice de naturalidad (matorrales, pastizales y roquedos). Como información de base se ha utilizado la cartografía del Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2006) en el País Vasco, Navarra, Burgos, Cantabria y La Rioja.

Con objeto de valorar la importancia relativa como núcleos de hábitat de las manchas continuas resultantes de dicha agrupación, se estima su superficie efectiva para las especies-objetivo. Ésta se calcula ponderando el valor como hábitat de las diferentes teselas de cada mancha continua, de forma que los bosques se consideran hábitats óptimos y en orden decreciente matorrales, pastizales y roquedos. Para ello se asignan los siguientes pesos a cada tipo de hábitat concernido, mediante consulta a un panel de expertos, de manera que la fórmula utilizada para realizar el cálculo estimatorio de la superficie efectiva de cada núcleo de hábitat es:

$$S_{efectiva} = S_{bosque} + (S_{matorral} \times 0,5) + (S_{pastizal} \times 0,2) + (S_{roquedo} \times 0,1)$$

No se incluyen los agrosistemas como componentes de los núcleos de hábitat dado que, en caso de hacerlo, no sería posible obtener núcleos discretos, dada la extensión de las zonas sometidas a aprovechamientos agrícolas y forestales en el territorio.

Es preciso señalar que la elección de pesos de ponderación condiciona gran parte de los resultados subsiguientes. Una alternativa habría sido usar los *eigenvalues* de un análisis factorial de las presencias del grupo funcional seleccionado en los distintos tipos de hábitat, por ejemplo mediante ENFA *Ecological Niche Factor Analysis* (Biomapper). Sin embargo, la aproximación utilizada se justifica por la falta de datos de presencia exhaustivos a una resolución apropiada.

Además de la superficie efectiva de los núcleos de hábitat, el criterio de calidad y estado de conservación de hábitat debería tenerse en cuenta en la evaluación de la aptitud de dichos núcleos en relación a las especies-objetivo. Cuestiones estructurales como la diversidad específica en los distintos estratos, la presencia de arbolado viejo y madera muerta, la densidad del sotobosque o la capacidad de regeneración del arbolado, inciden sobre la calidad del hábitat. Sin embargo, no se dispone de datos que abarquen el territorio de estudio.

2.2. Método de estimación de la contribución de cada nodo a la conectividad regional

La estimación de la contribución de cada espacio-núcleo a la conectividad del conjunto del área de estudio se ha realizado mediante la aplicación del programa ALCOR[®] (ALgoritmo para la Conectividad Regional) (del Barrio *et al.*, 2000, 2006), integrado en el soporte de IDRISI[®] Kilimanjaro (Eastman, 2003). En primer lugar, se modela la conectividad que presenta la matriz territorial entre los nodos. Se obtiene así un mapa denominado superficie de coste, que da idea de la permeabilidad que presenta el territorio al desplazamiento de las especies objetivo entre los nodos. Una vez obtenido éste modelado, se estima la contribución de cada nodo a la conectividad regional. Es preciso señalar que, tal y como se puede apreciar en la [figura 2](#), se contemplan de manera

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

agrupada las diferentes teselas que componen ciertos espacios-núcleo correspondientes a conjuntos de bosques-isla próximos entre sí. Este es el caso de los nodos de Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) de los robledales-isla de la Llanada Alavesa y de Urkabistaiz, del LIC de encinares cantábricos de Urbaibai, y los conjuntos de bosques-isla de las comarcas de Valles Alaveses y la Rioja Alavesa. El resto de los espacios-núcleo se contempla individualmente, si bien es preciso tener en cuenta que tanto el LIC de Pagoeta, como el de Arkamo-Gibijo-Arrastaria presentan dos teselas cada uno.

Para estimar la contribución de cada nodo a la conectividad regional, el programa ALCOR calcula, en escenarios de supresión iterativa de cada nodo, la varianza de la dimensión fractal de las superficies de coste obtenidas (indicador de la rugosidad de éstas) con la distancia. La escala espacial a la que se detecta una variación en la rugosidad respecto a la de la superficie de coste de referencia (con todos los nodos), se utiliza como indicador de la contribución del nodo suprimido a la conectividad del sistema. A continuación se detallan los pasos seguidos y métodos aplicados para realizar la estimación concernida.

2.2.1. Modelado de la conectividad de la matriz territorial

Para la obtención de la superficie de coste, se parte de dos capas de información, el mapa de localizaciones de partida (en este caso los nodos), y el mapa de resistencias de los usos del suelo de la matriz al desplazamiento de la especie o grupo funcional considerado.

A) Valores de resistencias de los usos del suelo al desplazamiento

La elaboración del mapa de fricción consiste en asignar valores de resistencia al desplazamiento de las especies objetivo a los diferentes tipos de usos del suelo (tablas 1 y 2). Especies con un comportamiento similar en sus desplazamientos a través del paisaje pueden ser agrupadas y serles asignados valores de resistencia comunes. Los valores del mapa de resistencias son relativos en relación a un gradiente, en un rango de valores a determinar. En este caso, prefijamos los valores mínimo y máximo entre 1 y 1.000. Los valores de fricción son asignados mediante el apoyo en consulta bibliográfica y a expertos, en función de los conocimientos disponibles sobre ecología espacial del grupo de especies-objetivo seleccionado. Si bien la consulta a expertos puede acarrear ciertos problemas de consistencia, su practicidad justifica su utilización. Es preciso citar que actualmente existen métodos de inteligencia artificial, como CART, Redes Neuronales, etc., que pueden utilizarse para obtener valores de fricción (del Barrio *et al.*, 2006).

El mapa de resistencias se elabora, en formato ráster, con una resolución de píxel de 20 m de lado, mediante la utilización de las siguientes cartografías de base:

- Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2006).
- Suelo residencial e industrial.
- Red viaria y ferroviaria.
- Intensidad Media Diaria de vehículos de la red viaria.
- Túneles y viaductos en autopistas y autovías (elaboración propia).

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

Cuando el uso es Forestal Arbolado, se asigna una fricción mínima (valor 1) a los bosques autóctonos, mayor a formaciones de especies alóctonas de turno de corta medio (valor 10), y mayor aún a las de turno corto (valor 20). Dado que en las teselas inventariadas se diferencian hasta tres especies forestales con su correspondiente coeficiente de cobertura, el valor de resistencia en cada tesela es el resultado del sumatorio de las resistencias de cada tipo de formación multiplicadas por el tanto por uno de cobertura de éstas, dividido entre el número de tipos considerados. La expresión es:

$$\text{Fricción forestal arbolado} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FiCi$$

donde n es el número de especies forestales, Fi es el valor de fricción de cada especie forestal, y Ci es el tanto por uno de cobertura de cada especie forestal en el conjunto de la mancha.

Los valores de resistencia de las carreteras del País Vasco son asignados en función del tráfico que soportan y de si están o no valladas ([tabla 2](#)). Por último, los túneles y viaductos en carreteras de gran capacidad (autopistas y autovías) constituyen áreas con mayor permeabilidad relativa respecto al resto del trazado de las mismas, de forma que se les asignan valores de resistencia en función del uso del suelo que presentan. El mapa de resistencias del área de estudio y su periferia se muestra en la [figura 3](#).

Dado que el tamaño de píxel (20 m de lado) no garantiza una representación íntegra de los elementos lineales del paisaje en el mapa de resistencias, se presta especial atención en incorporar el trazado completo de las carreteras dentro de éste, con objeto de que el valor de impedancia de los viales quede recogido en toda su longitud. Esto es importante para evitar interrupciones en la representación de elementos lineales en el mapa de resistencias, tal y como advierten algunos autores (Rothley, 2005; Theobald, 2005).

B) Superficie de coste de desplazamiento desde los nodos

El programa ALCOR calcula, con base en el mapa de resistencias, un valor de coste acumulado para cada celda o píxel, sumando píxel a píxel desde las localizaciones origen el valor de las resistencias que oponen las celdas contiguas. Se obtiene así un mapa o superficie de coste que representa el grado de permeabilidad del territorio entre los nodos para las especies-objetivo. Así, tomando el mapa de espacios-núcleo como elementos de origen y el mapa de resistencias de los usos del suelo elaborado como superficie de fricción, el programa ALCOR calcula un mapa del coste acumulado de desplazamiento radial desde cada uno de los espacios-núcleo, que se denomina superficie de coste. Ésta puede representarse tanto en dos dimensiones ([figura 4](#)) como en tres ([figura 5](#)). El gradiente de valores de coste acumulado obtenido se refiere al grado de dificultad que representa para las especies-objetivo acceder a cada punto del territorio desde los espacios-núcleo. Cuando la superficie de coste se representa en 3D, mientras los "valles" y superficies planas representan localizaciones altamente transitables por las especies entre los nodos, las elevaciones indican lugares con mayores dificultades para el desplazamiento.

2.2.2. La dimensión fractal como indicador del peso de cada nodo en la conectividad regional

La conectividad del paisaje puede ser estimada mediante un indicador de la complejidad geométrica de la superficie de coste. Un indicador apropiado de dicha complejidad geométrica es la dimensión fractal. Cuanto menor sea la complejidad de la superficie de coste, cabe esperar que también sea menor su efecto determinista sobre el tránsito entre los nodos del grupo funcional de especies considerado. En este sentido, las superficies de coste pueden ser interpretadas como mapas topográficos, representadas mediante isolíneas de coste o en relieve, en mapas de tres dimensiones. Cuanto mayor sea la rugosidad de la superficie de coste mayor será la varianza o diferencia de "altitud" esperable entre dos puntos separados por una distancia dada (del Barrio *et al.*, 2000). Además, es posible calcular la varianza de cualquier variable (en nuestro caso el valor en cada punto de la superficie de coste) entre pares de puntos separados por una determinada distancia y volver a calcularla entre pares de puntos separados por distancias cada vez mayores. La varianza de la variable tenderá a crecer conforme aumenta la distancia que separa los puntos de muestreo, hasta que se llega a un intervalo a partir del cual la varianza alcanza un máximo. La representación gráfica de la varianza en función de los intervalos de distancia que separan los puntos de muestreo se denomina semivariograma (o variograma).

Trabajos como los de Klinkenberg y Goodchild (1992) y de Xu *et al.* (1993) ofrecen métodos detallados sobre el cómputo e interpretación de dimensiones fractales en topografías complejas mediante el uso de variogramas (Isaaks y Srivastava, 1989). Con base en estas aportaciones, es posible utilizar los semivariogramas obtenidos con las superficies de coste para, una vez transformados logarítmicamente, ajustar a éstos una recta cuya pendiente sirve para estimar la dimensión fractal (del Barrio *et al.*, 2000).

$$D = 3 - (\text{pendiente} / 2)$$

donde la "pendiente" alude al cociente de los valores de variación de coste entre los valores de distancia, ambos transformados logarítmicamente. Cuando la rugosidad de una superficie es muy baja la dimensión fractal está muy próxima a 2 (dimensión euclídea de una superficie plana), mientras según aumenta la rugosidad el valor la dimensión fractal se acerca a 3 (dimensión euclídea de un espacio tridimensional y dimensión fractal de una superficie teórica infinitamente irregular).

Con base en el método expuesto para el cálculo de la dimensión fractal, ALCOR estima la rugosidad de las superficies de coste a distintas longitudes de escala, lo cual permite obtener un indicador del grado de conectividad, asumiendo que, cuanto mayor sea la rugosidad de la superficie de coste, más determinista será su efecto sobre el movimiento de las especies-objetivo. Asimismo, ALCOR estima la contribución individual de cada nodo a la conectividad del sistema, suprimiéndolo del mismo y recalculando la dimensión fractal de la nueva superficie de coste generada. Ello permite valorar el efecto de la supresión de cada nodo sobre la coherencia del conjunto del sistema, o conectividad regional.

El método del variograma usado por ALCOR para calcular la dimensión fractal empieza muestreando valores de coste según un diseño estratificado-aleatorio, obteniendo una cantidad de puntos aproximadamente igual al 10% del total de celdas de la imagen. Con ellos se construye un

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

semivariograma experimental, especificando una distancia máxima entre pares de puntos suficientemente grande como para saturar la semivarianza. El semivariograma es entonces sometido a una transformación logarítmica en sus dos ejes, sobre la cual se realiza un ajuste lineal. Por definición, la mayor clase de distancia en el eje de abscisas a la cual se puede realizar un ajuste lineal, corresponde a la longitud de escala a la cual la superficie muestra propiedades brownianas. Se emplea un coeficiente de determinación mínimo de 0.9 para establecer la bondad de dicho ajuste. La pendiente de dicha recta es usada en la fórmula mostrada más arriba para calcular su dimensión fractal.

El modelo ALCOR calcula la dimensión fractal de la superficie de coste de referencia, que incluye todos los nodos. Tras ello, calcula dimensiones fractales de nuevas superficies de coste construidas iterativamente mediante la supresión de cada uno de los nodos, para lo cual utiliza los mismos ajustes de variograma seleccionados en la de referencia. Las dimensiones fractales así calculadas son atribuidas a la perturbación causada por la supresión de los nodos respectivos.

3. Resultados y discusión

3.1. Superficie efectiva de los núcleos de hábitat

En la [figura 6](#) se observa la distribución de los núcleos de hábitat obtenidos, así como la estimación de sus valores superficie efectiva dentro de un gradiente de mayor a menor. Los núcleos de hábitat de mayor superficie efectiva (color marrón oscuro) corresponden a las estribaciones orientales de la Cordillera Cantábrica, que llegan hasta el extremo occidental del área de estudio, y a las estribaciones occidentales de los Pirineos, que llegan hasta el extremo nororiental de ésta y se prolonga hasta el nodo del LIC Aizkorri-Aratz. En la zona sur de La Rioja, el Sistema Ibérico conforma otro núcleo de hábitat de elevada superficie efectiva, que sin embargo no afecta al área de estudio. Los siguientes núcleos de hábitat por superficie efectiva corresponden, por este orden, al que se extiende a través de la parte suroriental del área de estudio y se prolonga hacia Navarra (color marrón), y al que se ubica en la parte centro-occidental del País Vasco (color marrón claro). El primero llega prácticamente a conectar con el núcleo anteriormente citado de las estribaciones prepirenaicas, mientras al segundo le ocurre lo propio con el de las estribaciones de la Cordillera Cantábrica. En el extremo opuesto del gradiente, existe un "archipiélago" de núcleos de hábitat de pequeña superficie efectiva (color amarillo) dispuestos de forma dispersa en el territorio.

En la [figura 7](#) se clasifican los nodos en tres categorías, en función del valor de superficie efectiva que presenta, en cada caso, el núcleo de hábitat sobre el que se disponen. Los nodos que se sitúan sobre núcleos de baja superficie efectiva corresponden a bosques-isla situados en diferentes zonas de la mitad meridional del área de estudio (Llanada Alavesa, Valles Alaveses, Urkabustaiz y Rioja Alavesa), así como al robledal situado en la tesela oeste del LIC Pagoeta. Los nodos que se disponen sobre núcleos de hábitat de superficie efectiva intermedia (colores anaranjados en la [figura 6](#)), se diferencian en otra categoría y se representan en azul en la [figura 7](#). Por último, se representan en otra categoría los nodos que se disponen sobre núcleos de hábitat con elevada superficie efectiva.

En función de esta clasificación, y en la medida en que la superficie efectiva es un indicador de la capacidad de los núcleos de hábitat para albergar poblaciones viables de las especies-objetivo, puede atribuirse una mayor importancia relativa a que se mantenga y, en su caso, se restaure la conectividad entre aquellos nodos ubicados en núcleos de hábitat con mayor superficie efectiva. Así, la función de aquellos corredores ecológicos dirigidos a mantener la conectividad entre nodos ubicados en núcleos de hábitat de mayor superficie efectiva se manifiesta a una escala amplia, trascendiendo incluso del ámbito autonómico del País Vasco y manifestándose en un contexto territorial más amplio, de tipo suprarregional. En el extremo opuesto, la importancia de los corredores dirigidos a mantener la conectividad entre nodos con baja superficie efectiva se manifestaría a escalas comarcales o locales.

3.2. Contribución de los nodos a la conectividad regional

La dimensión fractal de las superficies correspondientes a la eliminación de nodos tiende a aumentar más rápidamente que la de la superficie de referencia a medida que aumenta la distancia en los rangos espaciales más pequeños. Se obtiene una gráfica de variación de la dimensión fractal con la distancia para la superficie de coste obtenida con la totalidad de los nodos (superficie de coste de referencia), así como una gráfica análoga para cada superficie de coste obtenida mediante la eliminación de cada uno de los nodos.

Los rangos espaciales correspondientes al eje de abscisas de estas graficas se interpretan como longitudes de escala a las cuales se obtiene la dimensión fractal correspondiente. La escala a la cual se manifiesta la variación de la rugosidad de la superficie de coste motivada por la eliminación de un nodo se obtiene, en su caso, en el punto de corte de la gráfica de variación de la dimensión fractal de ésta con la gráfica obtenida con la totalidad de los nodos. A modo de ejemplo ilustrativo, en el caso del nodo de los bosques-isla de la Llanada Alavesa, el corte se produce a una distancia de 52.500 m, mientras que para el nodo de Urkiola el corte se produce a una distancia de 87.500 m. (véase [figura 8](#) y [tabla 3](#)). Esto se traduce en que la contribución del LIC de Urkiola a la conectividad regional es mayor que la del conjunto de bosques isla de la Llanada Alavesa, dado que la perturbación causada en la superficie de coste debido a su eliminación se detecta a una longitud de escala mayor.

En la [tabla 3](#) se relaciona la longitud de escala donde se producen cortes en la parte ascendente de las gráficas de variación de la dimensión fractal, para los diferentes escenarios de supresión de los nodos del sistema respecto del escenario de referencia, así como el valor de coste medio del mapa de costes generado en cada escenario. Cuanto mayor es la longitud de escala a la que se produce dicho corte, mayor se considera la contribución del nodo suprimido en el escenario en cuestión a la conectividad del sistema ([figura 9](#)), dado que el aumento de rugosidad de la superficie de coste que genera su supresión es detectable a escalas de menor detalle.

Paralelamente, el aumento de la media de los valores de la superficie de coste generada por la supresión de cada nodo, si bien es un parámetro no espacial, da una idea genérica del efecto que produce dicha supresión. Es preciso tener en cuenta ambos parámetros para una más precisa estimación de la contribución de los nodos a la conectividad regional. Así, puede haber nodos cuya supresión provoque un gran aumento en el valor medio de la superficie de coste respecto a la de

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

referencia, y que, sin embargo, no se corten las curvas de variación de la dimensión fractal con la distancia. Este es el caso de los nodos de Aiako Harria, Sierra de Cantabria, bosques isla de la Rioja Alavesa o de los encinares cantábricos de Urdaibai ([tabla 3](#)). En estos casos, podrían existir cortes en ventanas de muestreo más amplias, de forma que su contribución a la conectividad del sistema no pueda ser valorada dentro del ámbito de estudio. La cercanía al borde de los límites del área de estudio impide conocer si esto es así.

Los resultados obtenidos para los nodos que sí han registrado cortes en las gráficas correspondientes indican la importancia de nodos situados en zonas donde la matriz territorial es menos permeable, como pueden ser ciertos LIC de la vertiente cantábrica del País Vasco (Arno, Urkiola, Izarraitz, etc.), situada en la mitad septentrional de éste. En cambio, la contribución de nodos con mayor superficie efectiva pero situados en zonas mejor conectadas por la matriz territorial resulta menor (como puede ser el caso de los LIC de Aizkorri-Aratz, Entzia y Gorbeia) ([figura 9](#)), dado que su supresión provoca un aumento de la rugosidad de las superficies de coste detectables a menor escala.

Este resultado sugiere que ciertos corredores que tienen como objeto mantener la conectividad con nodos de superficie efectiva relativamente reducida podrían ejercer una función conectora clave a escala regional. En términos de gestión, este resultado pone de manifiesto la elevada importancia estratégica que presenta, de cara a mantener la coherencia de la red de conservación del País Vasco a escala regional, la aplicación de medidas dirigidas a mantener y, en su caso, restaurar la conectividad con áreas naturales de superficie efectiva relativamente modesta.

De forma análoga, cabría esperar que si el análisis se hubiera realizado para un ámbito más amplio que abarcara también el Pirineo y la Cordillera Cantábrica, la supresión de un LIC situado en alguna de dichas Cordilleras hubiera repercutido en menor medida a la conectividad del sistema que la de un LIC situado en el País Vasco. Este puede ser el caso, por ejemplo, de los LIC de Gorbeia o Aizkorri-Aratz, que además de situarse en la zona de gozne entre ambas Cordilleras, se ubican en una matriz territorial de menor permeabilidad en relación a la que se insertan ciertos LIC de dichas Cordilleras. Esto también se puede interpretar como potencialidad a la hora de implementar diferentes aplicaciones del método a distintas escalas. Así, el estudio multiescalar permite realizar una aproximación a resultados más ajustados a realidades territoriales más o menos amplias, o a especies con rangos de movimiento mayores o menores. Otra de las posibilidades de aplicación del método consiste en el análisis de escenarios futuros, incorporando proyectos de obras de infraestructura, procesos urbanísticos, cambios de usos del suelo, etc.

Salvando las distancias conceptuales y centrándonos en los aspectos de relación espacial, cabe realizar una equiparación del ejercicio de investigación realizado con la contribución de poblaciones locales de un taxón a la conectividad de una metapoblación. Así, si habláramos de poblaciones de una especie dada, la extinción local de un núcleo poblacional situado en una zona accesible desde otras fuentes tendría menores repercusiones sobre la conectividad de la metapoblación que la de otra situada en una zona menos permeable y que a su vez sirve de puente hacia otras poblaciones. Esto se debe a la mayor facilidad para que la zona donde se extinguió la primera población sea recolonizada, así como a la situación crítica de aislamiento a la que podrían verse abocadas las poblaciones a la que sirve de puente en caso de extinción de la segunda. Por ejemplo, la población de marta *Martes martes* que existe en los LIC de Ernio-Gatzume e Izarraitz

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

constituye el núcleo de población de la especie en el País Vasco que aparentemente se encuentra más aislada respecto al resto de poblaciones (Palomo y Gisbert, 2002). Así, parece lógico pensar que, en caso de producirse su extinción local, ello puede suponer la reducción del área de distribución de la marta en el País Vasco, dadas las mayores dificultades de recolonización de la zona. Además, se vería hipotecada la posible recolonización por la especie de otros LIC cercanos a la costa, como el de Arno y el de los encinares cantábricos de Urdaibai.

Los resultados obtenidos en la presente investigación ponen de manifiesto el papel crucial que juega la matriz territorial, es decir, el conjunto heterogéneo o mosaico de teselas de diferentes usos del suelo en el que se insertan los nodos, en el modelado de las interacciones que se producen entre éstos. Así, los resultados obtenidos sugieren que la hipótesis inicial de que aquellos corredores dirigidos a mantener la conectividad entre nodos ubicados en zonas con mayor superficie efectiva presentarían una mayor relevancia en la conectividad regional sería errónea al no incorporar el efecto de las características de la matriz.

La investigación realizada aporta una muestra sobre el importante avance que ha supuesto la incorporación de la heterogeneidad de la matriz en el modelado de la conectividad ecológica entre localizaciones de partida, ya sean núcleos de población de especies o zonas aptas, frente a la toma en consideración del paisaje como un modelo binario (Gustafson y Gardner, 1996; Jepsen *et al.*, 2005). En este sentido, numerosos autores han destacado el carácter crucial de considerar las características de la matriz en los estudios sobre conectividad en paisajes fragmentados (p. ej. Chardon *et al.*, 2003; Verbeylen *et al.*, 2003; Broquet *et al.*, 2006; Kupfer *et al.*, 2006).

Agradecimientos

El presente artículo se enmarca dentro del proyecto, financiado por la Dirección de Biodiversidad y Participación Ambiental del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco, para el diseño de la red de corredores ecológicos de la Comunidad Autónoma del País Vasco, encargado a la empresa IKT, S.A. Dos revisores anónimos ayudaron a mejorar la versión inicial del presente artículo.

Referencias bibliográficas

- Antúnez, A. y Márquez, A.L. (1992): "Las escalas en Biogeografía", en Vargas, J.M., Real, R. y Antúnez, A. (Eds.): *Objetivos y métodos biogeográficos. Aplicaciones en Herpetología*. Valencia, Asociación Herpetológica Española, pp. 31-38.
- Bennett, A. (1999): *Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Bennett, A.F., Crooks, K.R. y Sanjayan, M. (2006): "The future of connectivity conservation", en Crooks, K.R. and Sanjayan, M. (Eds): *Connectivity conservation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bennett, G. y Mulongoy, K.J. (2006): *Review of experience with ecological networks, corridors and buffer zones*. Montreal, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Technical Series, 23.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

- Broquet, T. *et al.* (2006): "Genetic isolation by distance and landscape connectivity in the American marten (*Martes americana*)", *Landscape Ecology*, 21, pp. 877-889.
- Bruinderink, G.G. *et al.* (2003): "Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe", *Conservation Biology*, 17, pp. 549-557.
- Chardon, J.P., Adriaensen, F. y Matthysen, E. (2003): "Incorporating landscape elements into a connectivity measure: a case study for the speckled wood butterfly (*Pararge aegeria* L.)". *Landscape Ecology*, 18, pp. 561-573.
- De Terán, M. y Solé, L. (1968, Dir.): *Geografía Regional de España*. Barcelona, Ariel.
- Del Barrio, G. *et al.* (2000): "Aproximación para estimar la conectividad regional de las redes de conservación", en *V Congreso Nacional de Medio Ambiente. Comunicaciones Técnicas*. Madrid, Colegio oficial de Físicos, Madrid, pp. 1-17.
- Del Barrio, G. *et al.* (2006): "Integrating multiple modelling approaches to predict the potential impacts of climate change on species' distributions in contrasting regions: comparison and implications for policy", *Environmental Science & Policy*, 9, pp. 129-147.
- Eastman, J.R. (2003): *IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University, Worcester.
- Gustafson, E.J. y Gardner, R.H. (1996): "The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization", *Ecology*, 77, pp. 94-107.
- Gurrutxaga, M. (2007): *La conectividad de redes de conservación en la planificación territorial con base ecológica. Fundamentos y aplicaciones en la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, Bilbao.
- Isaaks, E.H. y Srivastava, R.M. (1989): *An introduction to applied geostatistics*. Nueva York, Oxford University Press.
- Jędrzejewski, W. *et al.* (2005): *Project of ecological corridors linking Natura 2000 sites in Poland*. Mammals Research Institute, Polish Academy of Science, Białowieża.
- Jongman, R.H.G, Bouwma, I.M. y Van Doorn, A. (2006): *Indicative map of the Pan-European Ecological Network in Western Europe*. Alterra, Wageningen, European Centre for Nature Conservation. Alterra-rapport 1429.
- Jepsen, J.U. *et al.* (2005): "Evaluating the effect of corridors and landscape heterogeneity on dispersal probability: a comparison of three spatially explicit modelling approaches", *Ecological Modelling*, 181, pp. 445-459.
- Klinkenberg, B. y Goodchild, M. (1992): "The fractal properties of topography: a comparison of methods", *Earth Processes and Landforms*, 17, pp. 217-234.
- Kupfer, J.A., Malanson, G.P. y Franklin, S.B. (2006): "Not seeing the ocean for the islands: The influence of matrix-based processes on forest fragmentation effects", *Global Ecology and Biogeography*, 15, pp. 8-20.
- Múgica, M. *et al.* (2002): *Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Palomo, L.J. y Gisbert, J. (2002): *Atlas de los mamíferos terrestres de España*. Madrid, Dirección General de Conservación de la Naturaleza-SECER-SECER.
- Primack, R.B. (2006): *Essentials of conservation biology*. Sinauer Associates, Sunderland. 4th Edition.
- Rothley, K. (2005): "Finding and filling the cracks in resistance surfaces for least-cost modelling", *Ecology and Society*, 10, 4.
- Taylor, P.D. *et al.* (1993): "Connectivity is a vital element of landscape structure", *Oikos*, 68, pp. 571- 573.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

Theobald, D.M. (2005): "A note on creating robust resistance surfaces for computing functional landscape connectivity", *Ecology and Society*, 10, 2. Disponible en:

<http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss2/resp1/>

Verbeylen, G. *et al.* (2003). "Does matrix resistance influence Red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape?", *Landscape Ecology*, 18, pp. 791-805.

Xu, T., Moore, I.D. y Gallant, J.C. (1993): "Fractals, fractal dimensions and landscapes - a review", *Geomorphology*, 8, pp. 245-262.

TABLAS

Tabla 1. Valores de resistencia asignados a los usos del suelo.

Uso	Resistencia
Agua	100
Urbano	1.000
Roquedos	40
Canteras	90
Prados	40
Pastizales	30
Matorrales	5
Forestal arbolado	Mín. 1, Máx. 20
Cultivos	60

Fte. Elaboración propia.

Tabla 2. Valores de resistencia asignados a infraestructuras viarias.

IMD (Intensidad media diaria de vehículos) de las carreteras	Resistencia
< 1.000	80
1.000-5.000	100
5.000-10.000	300
10.000-20.000	Sin vallado: 700
	Con vallado: 900
> 20.000	Sin vallado: 800
	Con vallado: 1000

Fte. Elaboración propia.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Resultados del ALCOR en los diferentes escenarios.

Escenarios	Escala corte (m)	Media coste
Referencia	-	136.411
Arno	92500	137.580
Urkiola	87500	139.923
Izarraitz	82500	137.476
Pagoeta	62500	136.841
Ernio-Gatzume	62500	137.489
Robledales-isla Llanada Alavesa	52500	138.130
Bosques-isla Valles Alaveses	52500	138.141
Aralar	52500	140.905
Aizkorri-Aratz	47500	139.988
Valderejo	42500	138.996
Robledales-isla Urkabustaiz	42500	136.544
Montes de Aldaia	42500	136.703
Sierra Salvada	27500	137.759
Entzia	27500	137.715
Ordunte	22500	140.838
Gorbeia	22500	139.698
Lokiz	12500	136.764
Aiako Harria		143.626
Sierra de Cantabria		141.769
Bosques-isla Rioja Alavesa		145.995
Encinares cantábricos Urdaibai		149.225

Fte. Elaboración propia.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

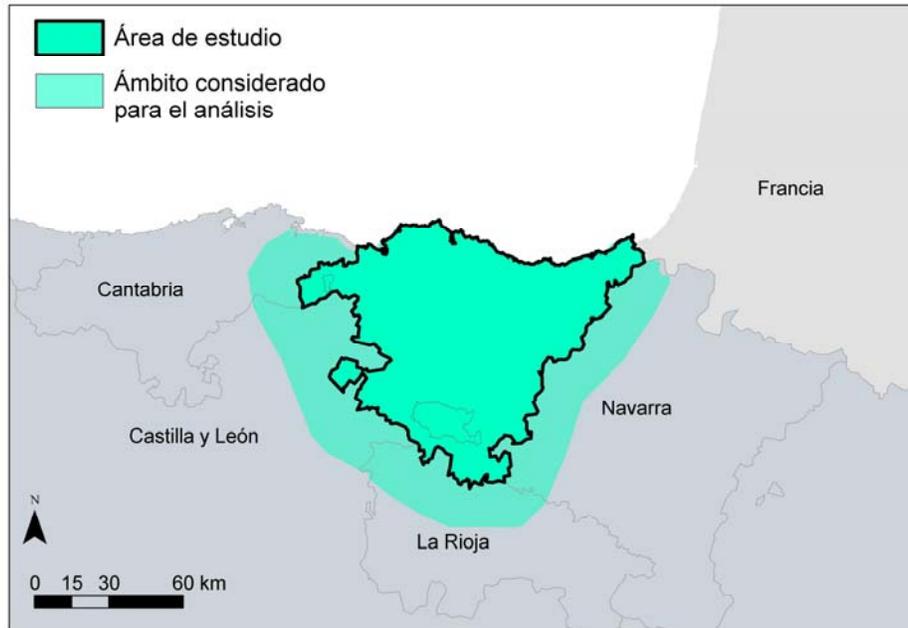


Figura 1. Área de estudio (Comunidad Autónoma del País Vasco y enclaves del Condado de Treviño y Villaverde de Trucíos) y ámbito considerado para el análisis de la conectividad regional.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

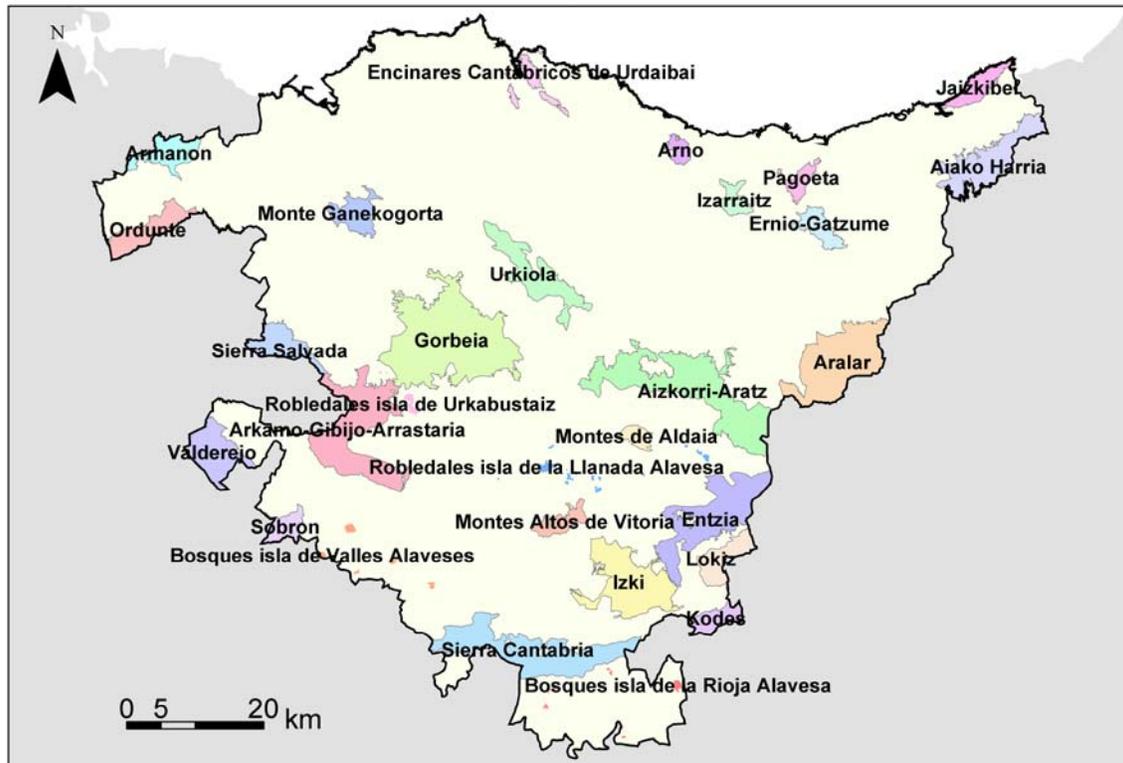


Figura 2. Espacios-núcleo o nodos.

Elaboración propia a partir de la cartografía de LIC y ZEPAs del País Vasco.

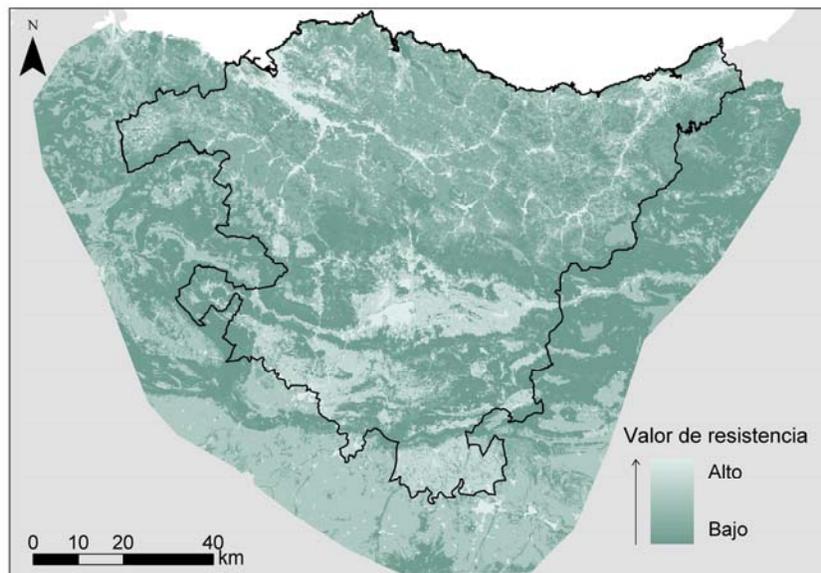


Figura 3. Mapa de resistencias de los usos del suelo al desplazamiento de las especies-objetivo.

Elaboración propia.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

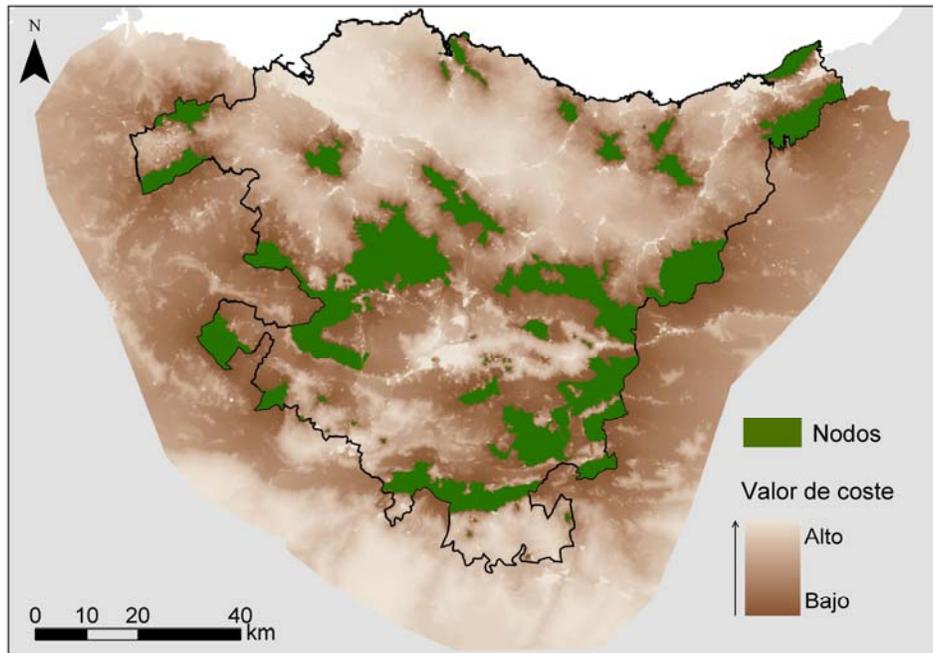


Figura 4. Mapa de coste de desplazamiento acumulado desde los espacios-núcleo.

Elaboración propia a partir del mapa de nodos y del mapa de resistencias.

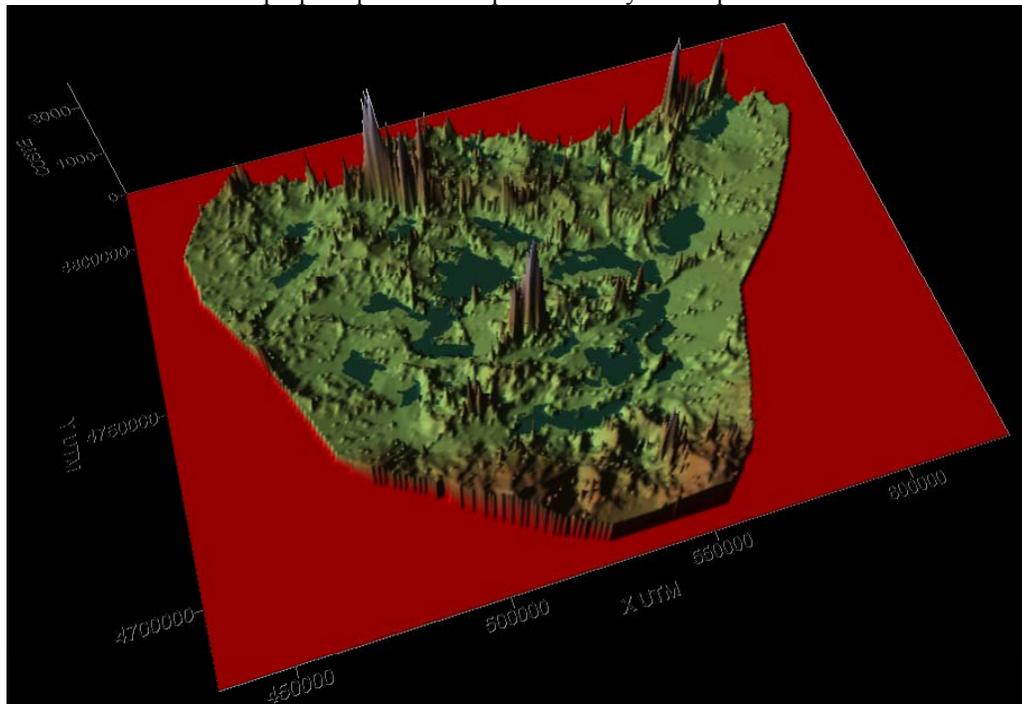


Figura 5. Mapa de coste de desplazamiento acumulado desde los espacios-núcleo en 3D.

Elaboración propia a partir del mapa de nodos y del mapa de resistencias.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

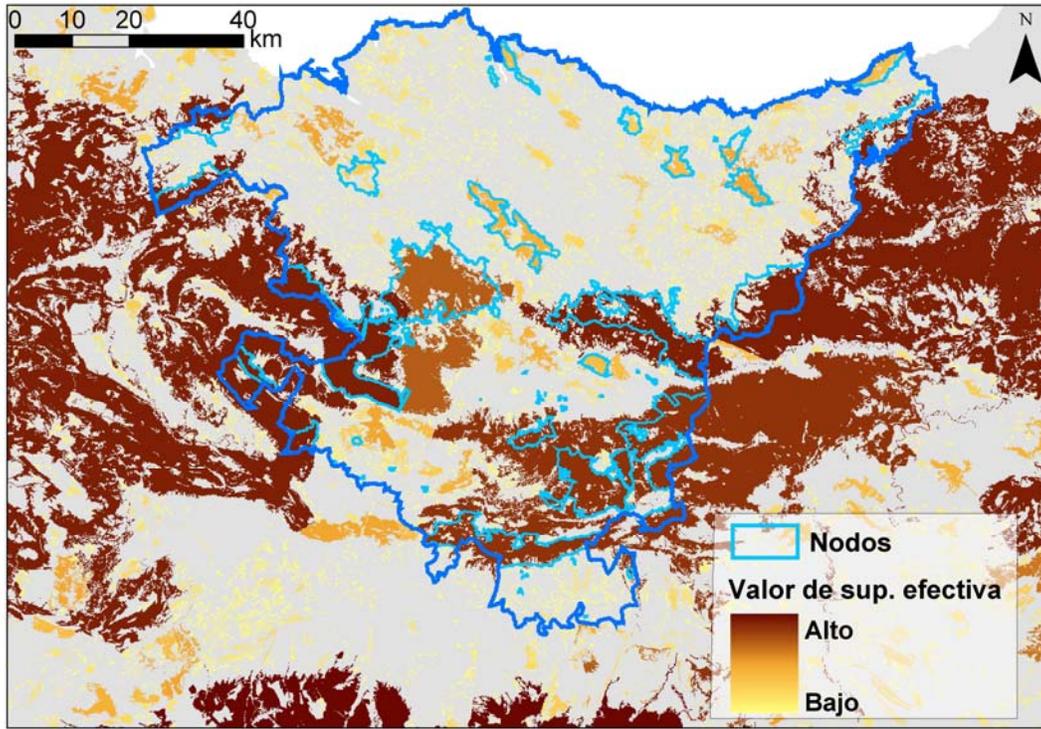


Figura 6. Mapa de superficie efectiva de núcleos de hábitat y ubicación de los nodos respecto a éstos. Elaboración propia.

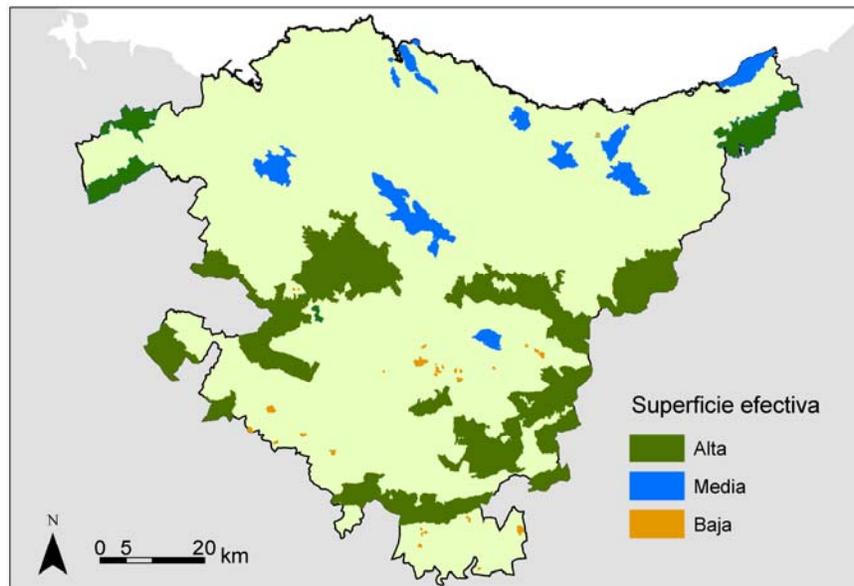


Figura 7. Clasificación de los nodos en función de la superficie efectiva de los núcleos de hábitat en que se ubican. Elaboración propia.

Gurrutxaga San Vicente, M., del Barrio Escribano, G. y Lozano Valencia, P. J. (2008): "Valoración de la contribución zonal a la conectividad de la red Natura 2000 en el País Vasco", *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 296-316. ISSN: 1578-5157

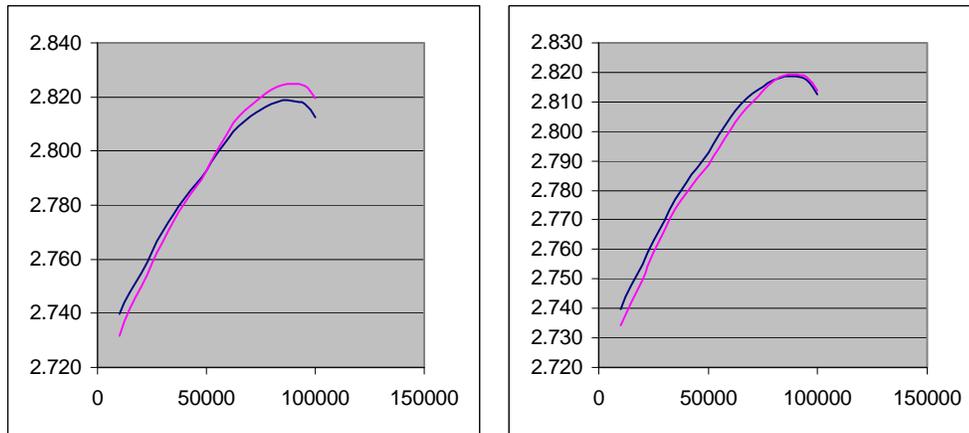


Figura 8. Gráficas de variación de la dimensión fractal con la distancia. Las curvas azules corresponden a la superficie de coste de referencia, con todos los espacios-núcleo, mientras las moradas corresponden a las generadas mediante la eliminación del LIC robledales-isla de la Llanada Alavesa (figura izquierda) y del LIC Urkiola (figura derecha).

Elaboración propia.

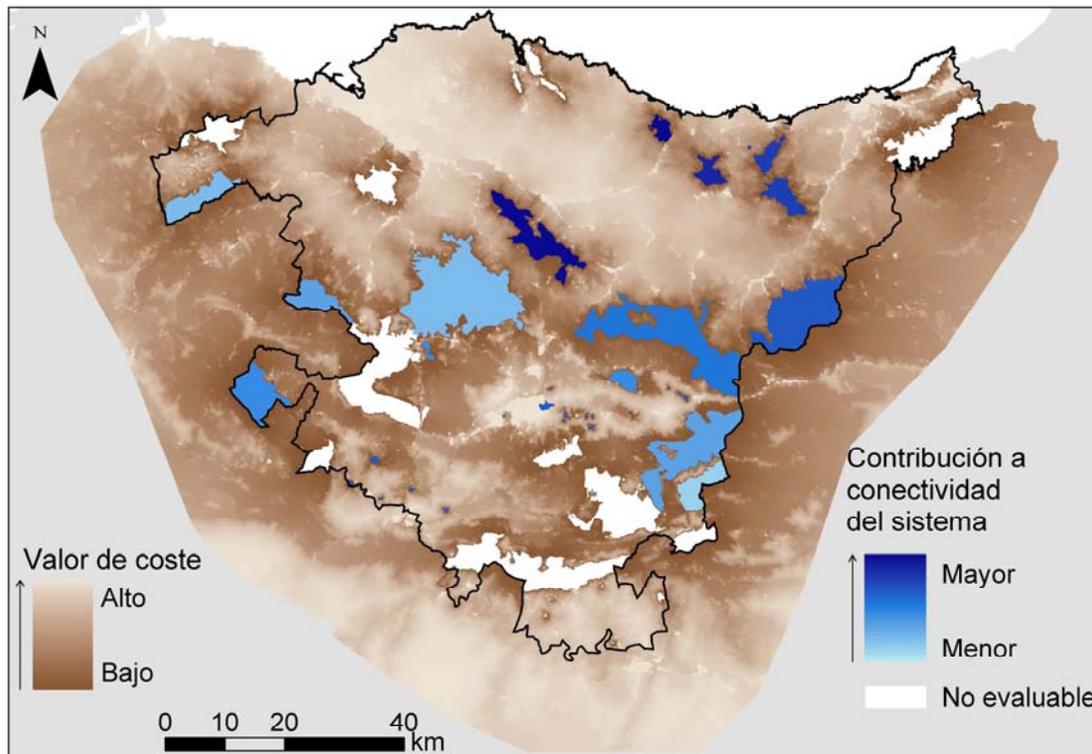


Figura 9. Contribución de los nodos a la conectividad regional. Elaboración propia.