

METODOLOGÍA PARA LA INCORPORACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LOS BOSQUES EN LA PLANIFICACIÓN Y ORDENACIÓN FORESTAL EN ESCALAS AMPLIAS

Lucía Pascual Hortal, Cristina Vega García y Santiago Saura Martínez de Toda

Departamento de Ingeniería Agroforestal. ETSEA. Universidad de Lleida. Av. Rovira Roure, 191. 25198. Lleida. Correo electrónico: ssaura@eagrof.udl.es

Resumen

La pérdida de conectividad del paisaje forestal constituye una de las mayores amenazas para la conservación de la biodiversidad y las funciones ecológicas de los bosques. La fragmentación y aislamiento de las teselas de los bosques dificultan la capacidad de movimiento de las especies animales asociadas a los mismos, pudiendo llegar a quedar comprometidas su viabilidad y conservación. Actualmente existe la necesidad de considerar la conectividad en la ordenación y conservación de los recursos forestales, pero se carece de procedimientos prácticos que permitan incorporarla de manera adecuada a la toma de decisiones. Por otro lado, se requiere una ampliación de las escalas de estudio consideradas tradicionalmente en la ordenación forestal para poder caracterizar y abordar adecuadamente estos fenómenos. Aquí se describe una nueva metodología operativa en desarrollo en el ámbito del proyecto CONEFOR del Plan Nacional de I+D+I, que permite incorporar criterios de conectividad en la planificación y ordenación forestal en escalas amplias y priorizar las teselas más relevantes para el mantenimiento de la conectividad global. Esta metodología se basa en el uso combinado de SIG y estructuras de grafos, junto con nuevos índices de conectividad, lo que constituye un enfoque innovador y potente que permite superar distintas limitaciones de otras metodologías utilizadas con anterioridad en este ámbito.

Palabras clave: fragmentación, biodiversidad, grafos, ecología, paisaje

1. INTRODUCCIÓN

La conectividad de los bosques condiciona multitud de funciones ecológicas del paisaje forestal, que necesitan de la existencia de una estructura espacial en cierto grado conexa para producirse. La dispersión animal, y en consecuencia la persistencia de las metapoblaciones, es uno de los procesos críticos fuertemente dependientes del grado de conectividad existente entre los fragmentos de hábitat forestal de un territorio (FAHRIG & MERRIAM 1985).

Durante el proceso de fragmentación de los bosques, la superficie disponible por los organismos silvestres va quedando reducida y separada en el espacio en forma de pequeñas teselas inconexas. La existencia de una estructura de hábitats excesivamente fragmentada provoca la interrupción de procesos ecológicos y la distorsión de los ciclos naturales, amenazando el equilibrio dinámico y la autorregulación de los sistemas naturales (GARCÍA-MORA 2003). De ahí que sea evidente la estrecha vinculación entre fragmentación, degradación de hábitats forestales y pérdida de conectividad.

Las causas que han propiciado la progresiva fragmentación de los bosques en muchas regiones de la geografía española son diversas y en su mayoría debidas a la fuerte presión de las actividades antrópicas sobre el medio natural. El desarrollo de la agricultura, la densificación de la red de comunicaciones y las actividades económicas e industriales asociadas al medio natural han contribuido a la formación de un mosaico paisajístico muy heterogéneo, donde los bosques presentan en general una elevada fragmentación.

En este patrón paisajístico tan dividido, las teselas de hábitat forestal son percibidas como islas en el territorio por las especies asociadas al mismo. La pérdida de superficie forestal y el aumento de la distancia entre las teselas de hábitat dificultan la dispersión de las especies animales, que cada vez ven más mermadas sus capacidades de movimiento a través del territorio. Tanto es así que la pérdida de conectividad del paisaje forestal constituye una de las mayores amenazas para la viabilidad y supervivencia de la fauna (FAHRIG & MERRIAM 1985). Y es que la conectividad juega un papel esencial en la búsqueda de alimento y cobijo, determina la capacidad de respuesta ante perturbaciones, la

posibilidad de colonización de nuevos territorios y es un factor clave para el intercambio de flujo genético entre poblaciones.

En el ámbito forestal, la mejora del estado de conservación de los ecosistemas y de las funciones ecológicas de los bosques constituye actualmente un gran desafío para científicos y gestores vinculados a la planificación y ordenación de los recursos forestales. La búsqueda de soluciones debe centrarse en conectar regiones de gran riqueza biológica, como son las masas boscosas españolas, que albergan buena parte de la biodiversidad de nuestro país. De este modo surge la necesidad de integrar la conservación de la diversidad biológica en los instrumentos de planificación forestal, hasta ahora principalmente centrados en garantizar la persistencia y estabilidad de la masa arbolada, a pesar de que el objetivo final que persiguen es el del “cumplimiento continuado y pleno de las múltiples funciones de los montes” (MADRIGAL 1994), entre las que se incluiría la protección de la zoocenosis del sistema.

Por otra parte, las escalas de estudio consideradas tradicionalmente en la ordenación forestal (escala monte) no permiten caracterizar y abordar correctamente los procesos y funciones asociados a la conectividad. Para ello es preciso ampliar la planificación de los recursos forestales a escalas más amplias. En este sentido, los nuevos Planes de Ordenación de los Recursos Forestales contemplados en la reciente Ley de Montes (de 2003) son una buena oportunidad para considerar aspectos relacionados con la conectividad y avanzar hacia una gestión más “ecológica” o integral. También la Estrategia Española para la Conservación y el Uso Sostenible de la Diversidad Biológica establece la necesidad de llevar a cabo acciones para evitar la fragmentación de poblaciones silvestres y facilitar el intercambio genético entre ellas, para lo cual insiste en la importancia de lograr una mayor conectividad entre territorios a través de una adecuada planificación y gestión.

En este contexto, el mantenimiento y mejora de la conectividad ha pasado a convertirse en uno de los objetivos prioritarios de las políticas de conservación y ordenación de los recursos forestales y del territorio en general, que tratan de incorporar medidas de conectividad como un criterio o indicador de sostenibilidad (RAISON 2001). Sin embargo, estas demandas actuales chocan con la carencia de procedimientos operativos que permitan cuantificar e incorporar de manera efectiva criterios de conectividad en la toma de decisiones. Por todo ello, se pretende desarrollar una metodología adecuada y eficiente para llevar a cabo estos análisis, ya que las utilizadas hasta ahora presentan limitaciones importantes, en especial en lo que se refiere a la identificación y priorización de teselas de hábitat más relevantes para la conservación y posible mejora de la conectividad global y al análisis de la conectividad en ámbitos geográficos amplios.

2. ESTRUCTURAS DE GRAFOS Y ANÁLISIS DE LA CONECTIVIDAD DEL PAISAJE

En el ámbito de la teoría de grafos, un grafo G consiste en una serie de nodos o vértices $V(G)$ y una serie de aristas $E(G)$ tal que cada arista $e = v_i v_j$ conecta los nodos v_i y v_j , que son adyacentes (HARARY 1969).

Un paisaje o hábitat puede ser caracterizado adecuadamente a través de estructuras de grafos. Tanto los distintos elementos (teselas) que conforman el mosaico, como la composición y configuración espacial de los mismos pueden quedar adecuadamente reflejados en una estructura de grafos bien diseñada. En este contexto, un *grafo* representa un paisaje de teselas de hábitat (*nodos*) conectadas (mediante *aristas*) o no entre sí. La existencia o no de aristas entre cada par de teselas se determina en función de las distancias entre las teselas (euclídeas o de mínimo coste) y los usos del suelo intermedios y costes de desplazamiento (distancias efectivas) de la especie, de manera que si la distancia entre un par de teselas está por debajo de las capacidades de dispersión de la especie, existiría una arista entre ellas representando la conexión funcional entre ese par de nodos. Por lo tanto, la existencia de una arista entre un par de nodos representa la capacidad de un organismo para cruzar el territorio inhóspito (la matriz de no-hábitat con los distintos usos del suelo que puedan estar presentes) y desplazarse directamente desde una tesela de bosque hasta otra. Una región funcionalmente conexas (*componente*) está formada por un conjunto de teselas interconectadas de manera que existe un camino a través del cual un animal pueda dispersarse desde una tesela de hábitat a otra cualquiera del mismo componente, lo cual no necesariamente implica que exista una conexión directa (arista) entre ellas.

Mediante esta analogía grafo-paisaje es posible esquematizar las posibles relaciones funcionales y topológicas que existen entre los elementos de un mosaico forestal. De ahí la idoneidad de aplicar la teoría de grafos en el estudio de procesos ecológicos complejos y que operan en escalas amplias como es la conectividad funcional, lo cual implica generalmente la existencia de un gran número de teselas y de una red de conexiones considerablemente intrincada.

La potencialidad de utilizar estructuras de grafos para estudios de conectividad radica en la capacidad de simplificar la representación de patrones de paisaje, de almacenar la información de las propiedades o atributos de los elementos del paisaje que se consideren relevantes para el análisis de la conectividad y, sobre todo, de implementar algoritmos de cálculo complejos y eficientes. La aplicación de las potentes técnicas desarrolladas dentro de la teoría de grafos, ampliamente desarrolladas para otros campos de conocimiento, permite optimizar el almacenaje y procesamiento de gran cantidad de datos, combinando información tanto ecológica como topológica para dichos fines. Este enfoque metodológico basado en estructuras de grafos supera distintas limitaciones que se presentan en el habitual análisis de conectividad realizado exclusivamente a partir de las estructuras de datos típicas (matriciales o vectoriales) de los sistemas de información geográfica.

3. PROGRAMA INFORMÁTICO SENSINODE

Para llevar a cabo las complejas operaciones matemáticas relacionadas con la metodología propuesta, se ha desarrollado una nueva versión del programa informático Sensinode modificando la versión 1.0 de este programa desarrollada por Dean Urban (Universidad de Duke, EE.UU.). Esa primera versión de Sensinode fue concebida como un módulo del complejo paquete para análisis de conectividad basado en teoría de grafos *Landgraphs*, e incluía tres índices relacionados con la conectividad (URBAN & KEITT 2001; KEITT ET AL. 1997). La última versión del software Sensinode incluye distintos nuevos índices de conectividad desarrollados en el ámbito del proyecto CONEFOR. Además, las modificaciones o mejoras de este programa ya implementadas o en desarrollo incorporan algoritmos de cálculo más eficientes y una mejor optimización de las estructuras de almacenamiento de datos, que le dotan de mayor potencialidad computacional, llegando a manejar con éxito conjuntos de datos más amplios.

Los datos de entrada que requiere este software comprenden tres tipos de información, que debe ser convenientemente procesada (principalmente dentro de sistemas de información geográfica) previamente al propio análisis de las estructuras de grafos (Figura 1). Por una parte, el conocimiento de los requerimientos de hábitat de la especie de estudio, que proporcionará la serie de teselas de hábitat potencial (archivo de nodos). Este mosaico de teselas de hábitat puede obtenerse mediante análisis simples de cartografía temática diversa en un sistema de información geográfica. Por otra parte, es necesario calcular las distancias (euclídeas o de mínimo coste) entre cada par de teselas (archivo de distancias), también mediante un sistema de información geográfica. Por último, debe introducirse información acerca de las características de dispersión de la especie en cuestión (distancias de dispersión, valores de coste de desplazamiento en distintas cubiertas, etc.)

(Figura 1)

A partir de estos datos de entrada Sensinode determina la red de aristas o conexiones entre nodos, identificando las subregiones funcionalmente conexas y las posibles rutas de dispersión entre las teselas de hábitat. Una vez construido y analizado el grafo, Sensinode genera dos tipos de resultados.

En primer lugar, el valor global de cada uno de los índices de conectividad del paisaje considerados, que indica simplemente y de forma numérica el grado de conectividad existente en ese mosaico de teselas de bosque tal y como es percibido por la especie de estudio.

A continuación, y mucho más útil para la toma de decisiones de cara a la planificación forestal, Sensinode proporciona la importancia relativa de cada una de las teselas de bosque (hábitat) para el mantenimiento de la conectividad global del sistema (paisaje forestal). Es decir, sugiere una priorización de teselas en base a las consideraciones específicas de cada índice de conectividad. Obviamente, puede obtenerse una diferente priorización de teselas para cada uno de los índices. Las teselas de mayor

importancia relativa deben entenderse como las teselas de conservación prioritaria, lo cual debe tenerse en cuenta de cara a la planificación. Las menos importantes o menos críticas son aquellas que, siempre según un determinado índice y para una especie en concreto, no contribuyen de manera decisiva al mantenimiento del estado actual de conectividad, por lo que su pérdida o deterioro no influiría de manera tan drástica en la pérdida de conectividad global del paisaje.

La importancia relativa de cada tesela (dX_i) se obtiene calculando el valor del índice con y sin esa tesela según la siguiente ecuación:

$$dX_i = 100 \cdot \frac{X - X'}{X}$$

siendo dX_i la disminución porcentual en la conectividad global del sistema que se produciría en caso de pérdida de la tesela de bosque i , X el valor del índice global para todo el grafo (paisaje) calculado cuando la tesela i está presente en el mismo y X' el valor del índice global para ese mismo grafo pero tras eliminar esta tesela i .

4. ÍNDICES DE CONECTIVIDAD

Actualmente existen multitud de índices de conectividad disponibles en la bibliografía, la mayoría de ellos basados en relaciones espaciales más o menos simples tales como distancias medias entre teselas o número de conexiones funcionales (JORDAN ET AL. 2003, RICOTTA ET AL. 2000, McGARIGAL ET AL. 2002). Es decir, no siempre consideran las relaciones espaciales con otras teselas que, aun estando espacialmente distantes e incluso aparentemente aisladas, pueden estar vinculadas funcionalmente a través de conexiones entre otras teselas intermedias. Dado que estas metodologías no consideran todos los aspectos relacionados con la gran complejidad de las redes y flujos ecológicos, su uso no parece plenamente adecuado para el diseño de medidas ecológicas integrales relativas a la conectividad, y más aún cuando se trata de gestionar un territorio amplio.

Además, en general sólo proporcionan un valor medio de conectividad para toda la zona estudiada, no permitiendo detectar ni concretar qué zonas o teselas de bosque son las más relevantes para el mantenimiento de la conectividad global, lo cual requiere un análisis mucho más complejo, y sería el resultado más interesante de cara a la planificación y conservación de las funciones de los ecosistemas forestales.

A pesar de que estos son los métodos comúnmente usados en los análisis de conectividad habituales, el comportamiento de estos índices frente a distintos tipos de cambios espaciales que pueden darse en el paisaje no se conocen suficientemente y por ello su uso indiscriminado en los diversos análisis de conectividad puede llevar a obtener resultados engañosos o de escaso rigor.

En el contexto del proyecto CONEFOR se han desarrollado varios nuevos índices que a la vez que calculan un valor global de conectividad, también facilitan la priorización de teselas en base a su importancia relativa (PASCUAL-HORTAL & SAURA 2005). Además se ha analizado y comparado el comportamiento de los índices ya existentes (PASCUAL-HORTAL & SAURA 2005), e incluso la influencia de la escala (concretamente de la unidad mínima cartografiada) en los resultados de priorización, lo cual supone un avance en la interpretación y utilidad práctica de los resultados que proporcionan estos índices.

Un ejemplo sencillo de los nuevos índices propuestos dentro del proyecto CONEFOR es la Probabilidad de Coincidencia en el Paisaje (PCP), generalización del índice de JAEGER (2000) mediante la consideración de componentes (regiones conexas) en lugar de teselas individuales al incorporarse al análisis el concepto de distancia de dispersión. PCP se define como la probabilidad de que dos puntos escogidos al azar dentro del paisaje pertenezcan a una misma región conexa (teselas de bosque pertenecientes a un mismo componente), y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$PCP = \sum_{i=1}^{nc} \left(\frac{c_i}{A_L} \right)^2$$

donde c_i es el área de cada una de las regiones conexas i y A_L es la superficie total del área de estudio. PCP se interpreta directamente como una probabilidad, y por tanto su rango de variación es de 0 a 1. PCP es sensible a cualquier cambio en los elementos que configuran el paisaje forestal, lo que incluye tanto cambios en las teselas (pérdida total o parcial de alguna de ellas) como en las aristas existentes entre las mismas (que pueden desaparecer por cambios de usos del suelo en las zonas no forestales como la construcción de una carretera entre dos teselas de bosque). PCP se puede considerar englobado en el concepto de disponibilidad de hábitat forestal (que depende tanto de la abundancia de hábitat como de la conectividad del mismo) para una especie determinada, y evalúa de manera integrada y conjunta la cantidad o abundancia de superficie total de hábitat y las conexiones existentes entre las distintas teselas y componentes, lo que se puede relacionar con la capacidad ecológica de un paisaje forestal para albergar una determinada población. La variable c_i puede adaptarse para reflejar no simplemente el área de las teselas de hábitat forestal sino también alguna medida relacionada con la calidad del bosque para ser utilizado como hábitat por una determinada especie o grupo de especies (típicamente en función del grado de desarrollo del bosque y de las especies vegetales presentes), manteniéndose la interpretación y propiedades del índice descritas.

Teniendo en cuenta que cada especie animal presenta distintos requisitos en cuanto a su hábitat potencial (distinto conjunto de teselas) y que es capaz de alcanzar distintas distancias en sus movimientos de dispersión (por lo tanto, distinta determinación de interrelaciones espaciales), es obvio que cada análisis de conectividad es específico de una especie concreta, o de un conjunto limitado de especies con requerimientos y comportamientos similares. De ahí que un mismo paisaje pueda resultar funcionalmente conexo para una especie con suficientes capacidades de migración pero fragmentado para otra que presente un menor alcance en su dispersión. Por tanto, la aplicación de esta metodología, y en general de cualquier análisis de conectividad, debe realizarse para una especie o grupo de especies en concreto (TISCHENDORF & FAHRIG 2000). En la planificación de una ecorregión en la que deba considerarse de forma conjunta la mejora de la conectividad para especies con distintas características de dispersión, la tarea del gestor será la de, tras identificar las zonas críticas para cada especie, combinar esa información y diseñar estrategias de conservación integrales que garanticen la preservación de la conectividad ecológica de los hábitats de las distintas especies objetivo.

5. CONCLUSIONES

El mantenimiento y mejora de la conectividad de los bosques debe considerarse como uno de los objetivos prioritarios de los planes de conservación y ordenación de los ecosistemas forestales. En el marco del proyecto CONEFOR se desarrolla una metodología eficiente y operativa para llevar a cabo los análisis necesarios relacionados con la conectividad del paisaje forestal, en especial en lo que se refiere a la identificación y priorización de teselas de bosque más relevantes para la conservación de la conectividad y a la extensión de los análisis de conectividad a escalas amplias. Dicha metodología se basa en la potencia y eficiencia de los algoritmos de grafos, que permite acometer análisis complejos de la conectividad del paisaje no abordables con otros procedimientos basados sólo en SIG y caracterizar la contribución de cada tesela (local) al mantenimiento de la conectividad del sistema o paisaje forestal (global). Por otro lado, el desarrollo de nuevos índices de conectividad del paisaje mejorados puede beneficiarse de la adaptación de medidas de conectividad desarrolladas en el ámbito de la teoría de grafos, combinando conceptos matemáticos y particularidades del ámbito de la conectividad ecológica. En este sentido, índices como PCP constituyen una buena herramienta para la planificación, al abordar el problema de la conectividad desde un punto de vista integral; es decir, enfocando el problema desde el punto de vista de la disponibilidad de hábitat (abundancia y conectividad) para una mejor toma de decisiones en el ámbito de la conservación de los bosques. La metodología e índices propuestos se han incorporado o se están incorporando en una nueva versión del programa informático Sensinode que permitirá su puesta en práctica para estos fines.

Agradecimientos

El presente estudio se desarrolla en el marco del proyecto CONEFOR (REN2003-01628) del Plan Nacional de I+D+I (Programa de Recursos Naturales) y se financia a través del mismo. Agradecer al Dr. Dean L. Urban (Universidad de Duke, EE.UU.) el haber proporcionado los códigos fuente de la versión 1.0 del paquete LandGraphs, a partir de los cuales se está desarrollando la nueva versión mejorada del programa informático Sensinode.

BIBLIOGRAFÍA

FAHRIG, L. & MERRIAM G.; 1985. Habitat patch connectivity and population survival. *Ecology* 66(6): 1762-1768.

GARCÍA MORA, M. R. C.; 2003. Conectividad Ambiental: Las Áreas Protegidas en la Cuenca Mediterránea. Dirección General de la RENP y Servicios Ambientales. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.

HARARY, F.; 1969. Graph Theory. Addison-Wesley. Reading, MA.

JAEGER, J. A. G.; 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecol* 15(2): 115-130.

JORDAN, F., BALDI, A., ORCI, K. M., RACZ, I., VARGA, Z.; 2003. Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a Pholidoptera transsylvanica (Orthoptera) metapopulation. *Landscape Ecol* 18(1): 83-92.

KEITT, T., URBAN, D. & MILNE, B.T.; 1997. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conserv Ecology* 1(1): art4. <http://www.consecol.org/Journal/vol1/iss1/art4>

MADRIGAL COLLAZO, A.; 1994. Ordenación de montes arbolados. Madrid.

MCGARIGAL, K., CUSHMAN, S.A., NEEL, M. C. & ENE, E.; 2002. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Amherst. University of Massachussets.

PASCUAL-HORTAL, L. & SAURA, S.; 2005. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches for conservation. Enviado a *Landscape Ecol* (en revisión).

RAISON, R. J., BROWN, A.G. & FLINN, D.W.; 2001. Criteria and indicators for sustainable forest management. CAB Publishers. Reino Unido.

RICOTTA, C., STANISCI, A., AVENA, G.C. & BLASI, C.; 2000. Quantifying the network connectivity of landscape mosaics: a graph-theoretical approach. *Community Ecology* 1(1): 89-94.

TISCHENDORF, L. & FAHRIG, L.; 2000. How should we measure landscape connectivity? *Landscape Ecol* 15(7): 633-641.

URBAN, D. & KEITT, T.; 2001. Landscape connectivity: A graph-theoretic perspective. *Ecology* 82(5): 1205-1218.

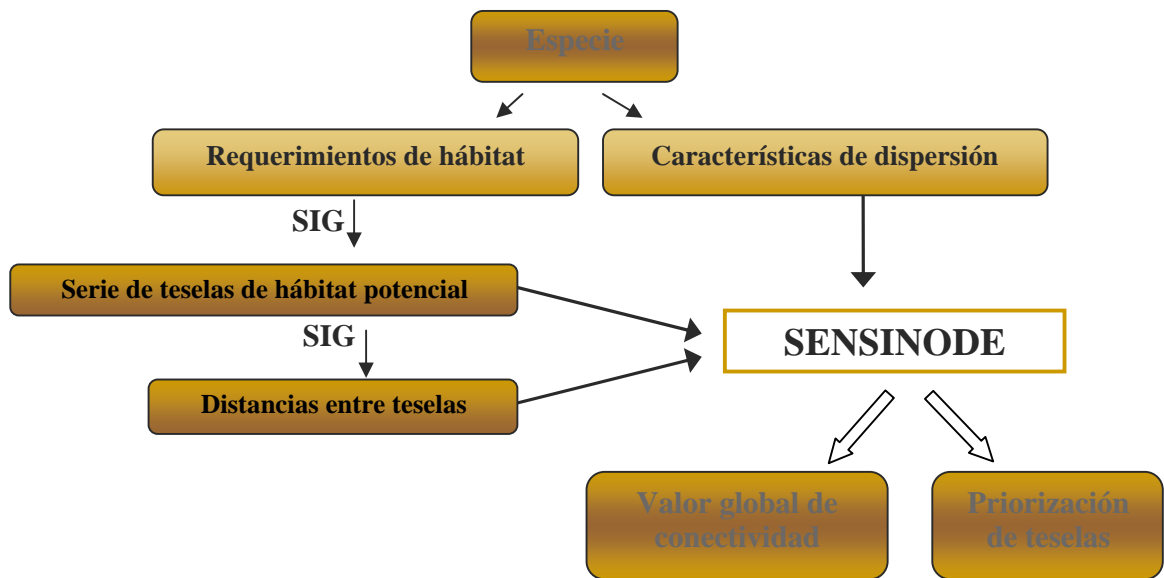


Figura 1. Datos de entrada y salida (resultados) del programa informático Sensinode.

