

Memorias del

**PRIMER SEMINARIO ARGENTINO
DE
GEOGRAFÍA CUANTITATIVA**

Gustavo D. Buzai
compilador

GEPAMA
Grupo de Ecología del Paisaje y
Medio Ambiente
www.gepama.com.ar



- 2004 -

Publicación Especial de Fronteras
ISSN 1667-3999

Los índices de configuración del mosaico como herramienta para el estudio de las relaciones patrón - proceso.

**Silvia D. Matteucci
CONICET- GEPAMA, FADU, UBA**

Resumen

La cuantificación de la estructura del mosaico se ha convertido en una herramienta para la descripción de la configuración espacial y para la interpretación de las asociaciones entre patrón y procesos. En los últimos años han proliferado tanto los índices como los programas para su cálculo. Esto estimula su uso; sin embargo, el cálculo de los índices sin una hipótesis previa no resulta eficaz ni eficiente.

En este capítulo, luego de presentar algunos conceptos previos, se analiza la utilidad de los índices, se describen los más usados y se discuten sus limitaciones.

Introducción

El cálculo de los índices de estructura, patrón espacial o configuración del mosaico formado en un territorio por la yuxtaposición de elementos que contienen ecosistemas y usos de la tierra, es una de las tantas herramientas cuantitativas para comprender, describir, interpretar y modificar los fenómenos espaciales. Esta herramienta surge en la ecología por las dificultades que conlleva el estudio de los procesos ecológicos a gran escala (en territorios extensos) y se apoya en el principio que establece que la configuración espacial influye grandemente en los procesos ecológicos al nivel de mosaico y, a la inversa, los procesos ecológicos pueden modificar el patrón espacial del mosaico. Esta relación dialéctica, trasladada a la asociación naturaleza-sociedad, es también válida por cuanto la ocupación del territorio es afectado por su configuración y las actividades económicas modifican el patrón espacial del territorio. De modo que la cuantificación del patrón espacial adquiere importancia porque permite inferir los tipos de procesos ecológicos o económicos, su operatividad y grado de eficacia en el diseño de un territorio. Estas inferencias constituyen hipótesis que deben ser validadas mediante investigaciones independientes, ya que el conocimiento de la estructura por sí solo no basta para confirmar las asociaciones patrón-procesos.

Los estudios de las relaciones entre patrón y procesos ecológicos adquieren interés a partir del reconocimiento de que: a) la modificación de los patrones espaciales por las actividades humanas causa alteraciones importantes en el funcionamiento del sistema natural, lo cual puede causar reveses ecológicos en detrimento de la economía a mediano y largo plazo; b) el conflicto entre protección de los mecanismos naturales de regulación y las actividades económicas puede reducirse considerablemente, y hasta eliminarse, si se respetan algunos flujos horizontales entre ecosistemas naturales y usos de la tierra; esto es, si se planifica sobre un mosaico bien estructurado.

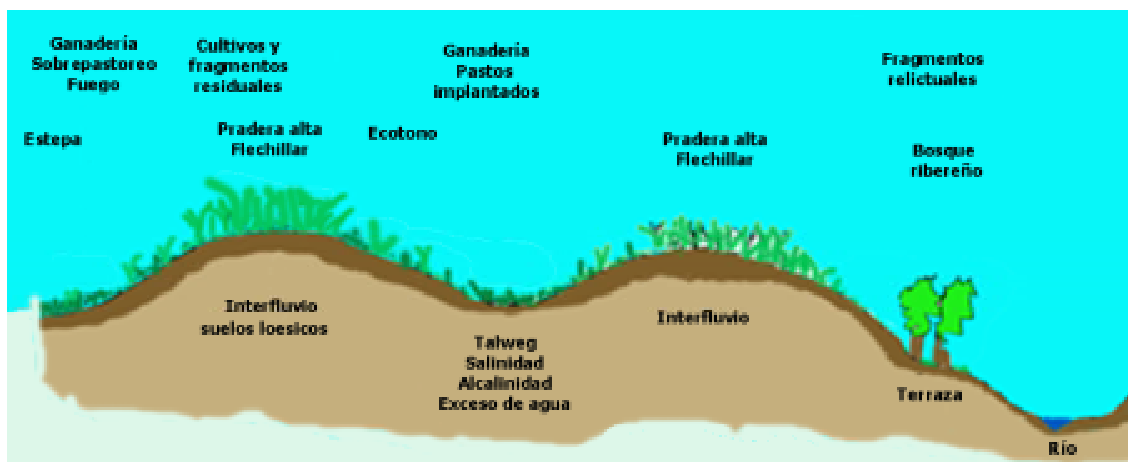
En años recientes han proliferado los programas de computación que calculan en corto tiempo gran cantidad de índices a partir de mapas en formato raster, sin necesidad de trabajo manual. Esto tiene sus ventajas pero también grandes desventajas porque existe la tendencia a calcular todos los índices posibles y luego tratar de encontrar una explicación a los resultados. No promocio esta manera de trabajar. Es importante partir de una hipótesis y seleccionar las variables y métodos que permitan demostrarla. De esta manera se evita la pseudo-investigación o investigación espuria dirigida al "blanco ciego". Además, es imprescindible saber qué calcula el programa, qué formulas y algoritmos aplica, qué criterios de selección y conteo emplea y por sobre todo, qué indica cada variable así calculada.

En este trabajo se describen y discuten algunos de los índices más empleados en los estudios de ecología de paisajes. Los detalles de los modos de conteo de píxeles y de contactos entre píxeles fueron descritos en un trabajo anterior (Matteucci, 1998a) y no se repiten aquí.

Paisaje o Mosaico

En la literatura ecológica se denomina "índices del paisaje" a estas variables derivadas que permiten cuantificar la configuración espacial de los elementos que conforman un territorio. Sin embargo, esta herramienta puede aplicarse a todo territorio, cualquiera sea su tamaño, y siempre que presente heterogeneidad espacial. Por ello, prefiero llamarlos índices o medidas de mosaico, para no contribuir a la confusión generada recientemente en torno al concepto de "paisaje", y que ha llevado al vaciamiento del vocablo. En efecto, llegando al colmo de la simplificación, en un texto reciente se define paisaje como "un área que es espacialmente heterogénea en al menos un factor de interés" (Turner et al., 2001).

El concepto científico de paisaje fue introducido por los geógrafos rusos a comienzos del siglo XX. Desde sus orígenes la definición de paisaje fue criticada, aún por los propios científicos rusos; se le adosaron adjetivos para otorgarle exactitud, y se introdujeron muchas modificaciones (Matteucci, 2003). Con el desarrollo de la ecología de paisajes, en la interfase entre la ecología y la geografía, el significado de paisaje ha sido modificado numerosas veces y el término ha ido perdiendo exactitud. Creo que es más apropiado conservar el concepto original de paisaje, con toda su riqueza, porque es útil a la ecología y a la geografía: es un territorio genéticamente homogéneo, en el cual se observa la recurrencia regular y típica de las mismas combinaciones de interrelaciones entre estructura geológica, forma de relieve, agua superficial y subterránea, microclima, variedades de suelo y fito- y zoocenosis (Comunidades vegetales y animales) (Fig. 1). Por lo tanto, un paisaje debe cumplir 4 condiciones para ser considerado como tal: 1) el mismo conjunto de ecosistemas (y usos de la tierra) se repite a través del espacio; 2) los flujos o interacciones entre los ecosistemas que conforman el paisaje son los mismos en todas las interfases; 3) en toda su extensión está sujeto al mismo tipo climático y tiene geología común; esto es, la misma roca madre y origen común, por lo tanto igual conjunto de geoformas; 4) está sometido a un conjunto único de regímenes de perturbación.

Figura 1: Esquema del paisaje de la pampa ondulada

Un mosaico, a diferencia del paisaje, es independiente de su tamaño, origen, evolución o condiciones climáticas, y puede ser recurrente o no, natural o humanizado. Puede ser una región, un paisaje, un lote, un municipio. Está delimitado por el investigador en función de los objetivos de su trabajo, y se corresponde con el área de estudio.

Los biólogos de la conservación, que visualizan el paisaje como un mosaico de hábitat¹, se enfrentan con una gran diversidad de escalas (extensión y grano), ya que el hábitat se delimita de acuerdo a la percepción que la especie de la fauna o flora tiene de él. El hábitat percibido por un insecto es de tamaño mucho más reducido que aquel percibido por un mamífero grande. En este caso, el área de estudio puede ser el entorno de un conjunto de hormigueros, o un bosque de gran extensión. Conviene mucho más calificar de mosaico al espacio para independizarse de la escala.

El paisaje no se define por su tamaño, sino por las interrelaciones entre los factores físicos, bióticos y humanos y por su origen y desarrollo. El mosaico es un término más amplio que puede variar mucho en su tamaño, dependiendo del objeto de estudio. Común a ambos es la heterogeneidad espacial, que puede ser funcional, como en el caso en que se enfatice la percepción del hábitat por el organismo o la escala de variación del atributo, como fenomenológica, en el caso en que prevalezca el enfoque antropocéntrico (Matteucci, 1998b).

El Modelo Espacial

El patrón del mosaico es el ordenamiento de los elementos que lo componen en el espacio; es sinónimo de configuración y de estructura espacial. Los elementos son unidades territoriales cualquiera sea su tamaño, forma y contenido, que son internamente homogéneas a la escala de observación y diferentes de los elementos vecinos en cuanto a su contenido. Los contenidos

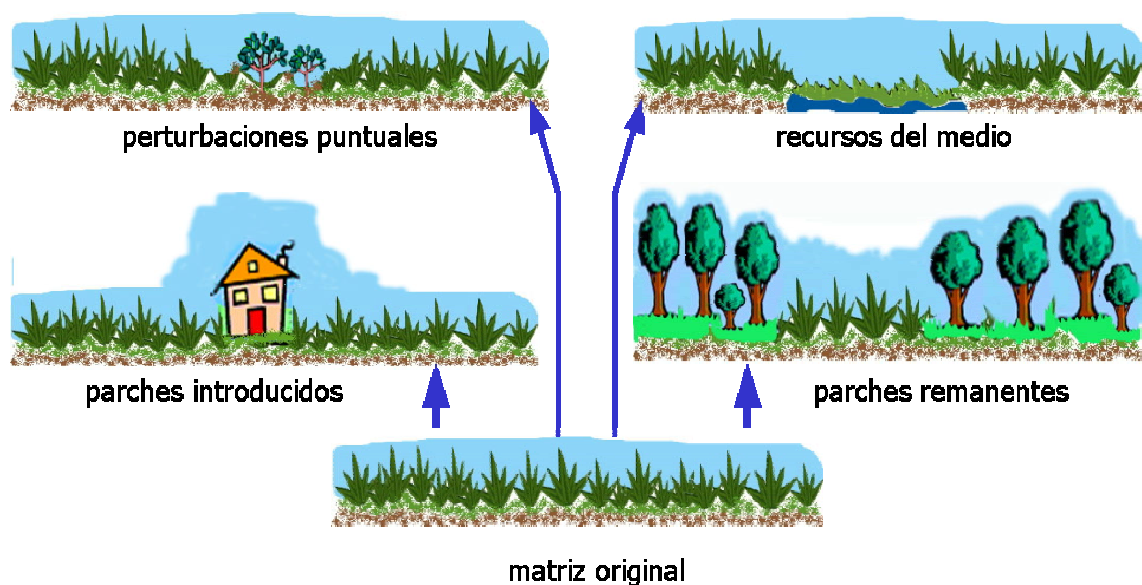
¹ Hábitat: elemento que provee supervivencia, natalidad y movimiento a una población dada.

de los elementos pueden ser usos de la tierra en una región; individuos de una especie de arbusto en una sabana; un río en una llanura; etc., etc.

En el modelo matriz-parche-corredor (Forman y Godron, 1981; Forman, 1995), que se emplea hasta el presente, los elementos del mosaico han sido clasificados en matriz, parche y corredor, dependiendo de sus características físicas y funcionales.

Los parches son unidades espaciales relativamente singulares en relación con el entorno. El parche puede tener tamaños, formas y tipos de borde muy variados. Difieren asimismo en cuanto a su origen. Un parche puede ser natural o antrópico. Los parches naturales pueden originarse por la singularidad local de los sitios causada por variaciones en el microhábitat (topografía, suelo, microclima); por diferencias de fases (ecosistemas en diversos estadios de la sucesión ecológica); por efectos de la dispersión, o por movimientos diferenciales de diversos organismos y por ocurrencia de perturbaciones. Si los efectos naturales o antrópicos son extensivos y modifican el entorno, el parche puede ser un ecosistema remanente en una matriz modificada. Un parche puntual introducido, constituye una perforación en una matriz natural (Fig. 2).

Figura 2: Origen de los parches



Los parches funcionan como hábitat, fuente o destino de especies. Su rol en el mosaico depende de su tamaño, su contenido, su forma y las propiedades de su borde (Forman, 1995). Por ejemplo, los parches grandes conectan los cursos de agua de orden inferior, protegiendo la integridad de la cuenca; protegen la calidad de agua de los acuíferos y lagos; mantienen los regímenes de perturbación natural; contribuyen a la purificación del aire; proveen hábitat y protección de animales que requieren espacios amplios; constituyen una fuente

de especies que se dispersan por la matriz; proveen proximidad de hábitats diversos favoreciendo a las especies multihábitat; amortiguan la extinción durante los cambios ambientales. Los parches pequeños, por otro lado, constituyen pasaderas para la dispersión de especies y para la recolonización de parches grandes; proveen hábitat para especies restringidas a parches pequeños; incrementan la heterogeneidad del territorio y contribuyen a disminuir la erosión y a proveer cobertura para que algunos animales puedan escapar de los depredadores.

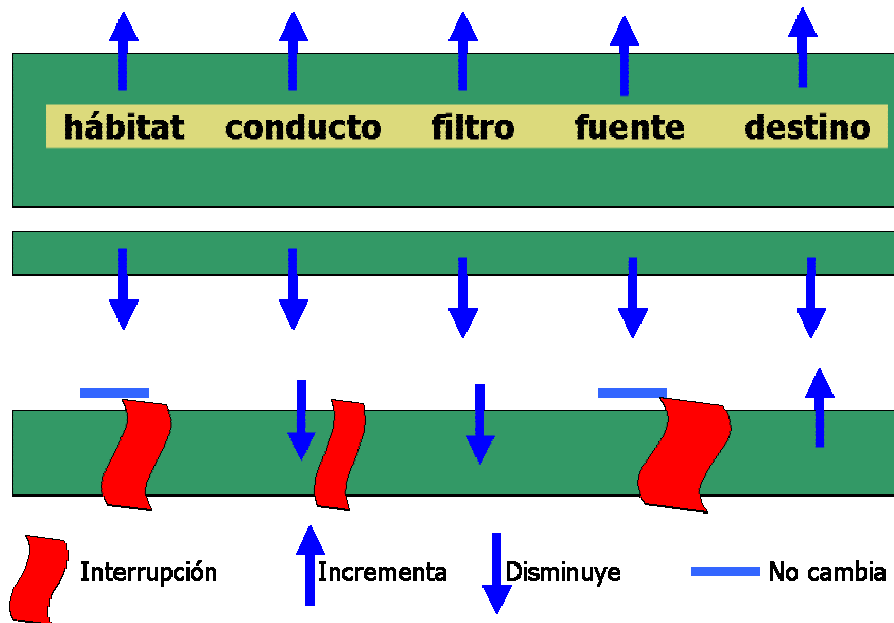
La matriz constituye el fondo del mosaico. Es el tipo de ecosistema dentro del cual se insertan los parches y corredores. A veces es difícil identificar la matriz. Algunos autores asignan la categoría de matriz al ecosistema dominante en extensión; sin embargo, dado que la matriz juega un rol dominante en el funcionamiento del mosaico por proveer conectividad, estimo que el criterio de identificación debe ser el grado de conectividad, que no siempre se asocia positivamente con la dominancia en extensión. La conectividad, que es esencial para la integridad del ecosistema, es muy afectada por la fragmentación de la matriz.

La matriz funciona como hábitat, fuente o destino de especies. De acuerdo al grado de contraste de contenidos entre parches y matriz, y a los hábitos de la especie, la matriz funciona como corredor o como barrera entre parches.

Los corredores son fragmentos alargados que atraviesan el mosaico y cuyo contenido difiere del de los elementos vecinos. Pueden ser naturales (cursos de agua, vegetación ribereña o de albardón) o antrópicos (vías de comunicación, ductos, tendidos eléctricos). Los atributos de los corredores son el ancho y la longitud, el grado de ondulación, el grado de continuidad (frecuencia y tamaño de interrupciones), el contenido e intensidad (contraste de contenidos) y presencia de corredores internos. Las redes son entramados de corredores y a los atributos mencionado se agregan la frecuencia de intersecciones y de nodos.

Los corredores y redes funcionan como conducto, barrera o filtro, hábitat, fuente, y destino. Su rol en el mosaico es incrementar la conectividad del mismo facilitando los flujos. La eficacia en sus funciones depende del valor de sus atributos y del comportamiento de los organismos que utilizan el corredor o de las propiedades de los materiales que circulan por ellos (Fig. 3). Por ejemplo, la función de conducto entre dos parches grandes se ve facilitada para las especies de interior cuando la arquitectura de la vegetación del corredor es similar a la de los parches. La función de barrera es más eficaz cuanto mayor es el contraste entre el contenido del corredor y el de los elementos vecinos, tanto para el flujo de especies como de materiales. Las redes, como los entramados de parches lineales debajo de los alambrados o los setos vivos que separan parcelas, son hábitat de especies dañinas y benéficas para los cultivos, ya que algunas malezas provienen de ella, algunas especies de insectos que atacan a los cultivos pasan parte de su ciclo de vida en el borde y algunos organismos que funcionan como controles biológicos de plagas de los cultivos también viven allí. Las intersecciones de la red pueden presentar mayor diversidad de especies porque son espacios de mayor tamaño que los conductos lineales y también se ha demostrado que tienen influencia en los ciclos bioquímicos y afectan los cultivos.

Figura 3: Efecto del ancho del corredor y de la presencia de interrupciones sobre sus funciones



La Escala

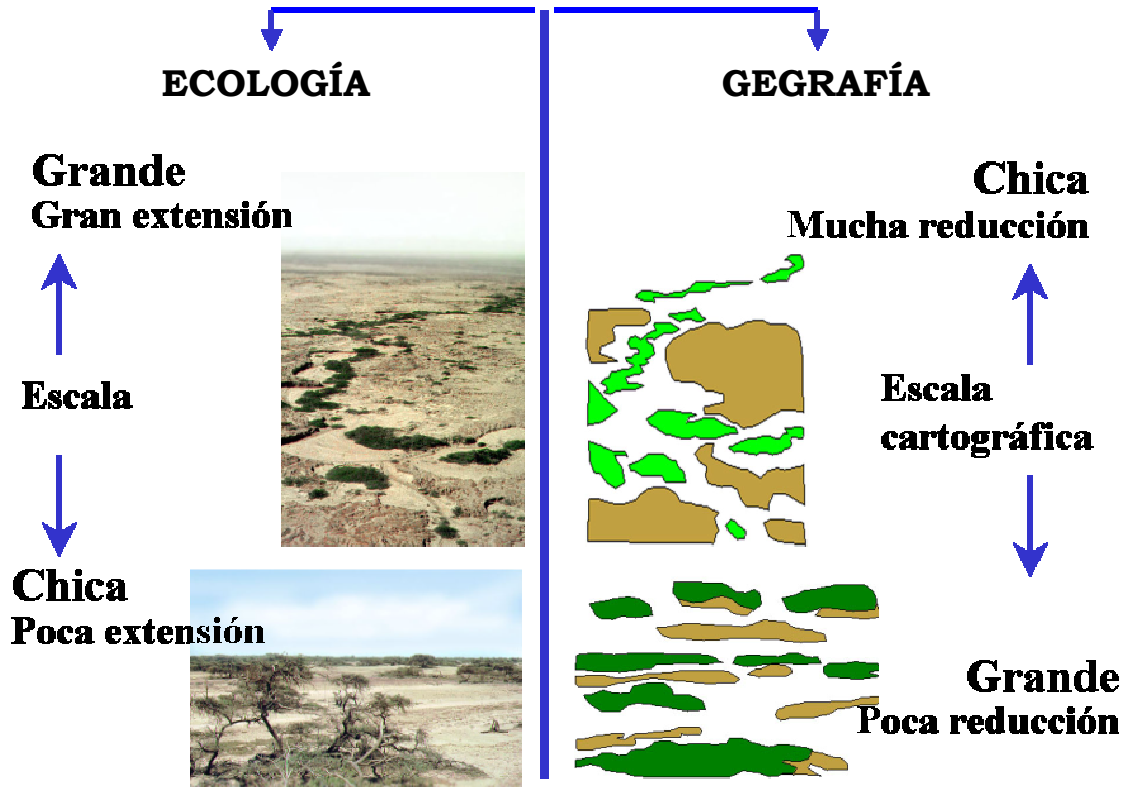
En las ciencias naturales, escala se refiere a la magnitud de un fenómeno o proceso. La escala tiene dos componentes: la extensión y el grano. Un fenómeno de escala grande es aquel que ocurre en grandes extensiones y en tiempos largos; uno a escala pequeña ocurre en espacios reducidos y tiempos cortos. Al representarlos en un papel, los fenómenos a gran escala deben reducirse bastante por razones prácticas y la escala de representación es pequeña, ya que se expresa como centímetros de papel requeridos para representar kilómetros del espacio real. Esto es lo que llamamos escala cartográfica (Fig. 4).

El grano es la unidad de información: el píxel en los sistemas raster o el polígono de menor tamaño en los espacios representados en sistemas vectoriales. Una imagen spot de 5 m de resolución es de grano más fino que una Landsat de 30 m.

Es importante que la extensión y el grano se definan previamente ya que de ellos depende la metodología de estudio y, especialmente, los costos del mismo. La selección de la escala debe ajustarse a la escala de variación del fenómeno que se estudia. Si la escala de observación es más grande que la de variación del fenómeno, no se observará la variación y se pierde el trabajo realizado. Si la escala de observación es inferior a la de variación, se corre el riesgo de obtener más información de la requerida y perder tiempo y presupuesto innecesariamente. Si la escala no es la adecuada, seguramente se encontrarán patrones espaciales, pero estos no tendrán significado en relación

con el proceso o factor que se estudia y difícilmente se pueda encontrar una relación patrón-proceso.

Figura 4: Escala y escala cartográfica



La Cuantificación de la Estructura del Mosaico

La fragmentación es un proceso al nivel de mosaico por el cual una clase² de cobertura, especialmente un hábitat particular, se subdivide progresivamente en parches cada vez más pequeños, complejos y aislados, tanto por causas naturales como antrópicas. Con el avance acelerado de las fronteras agrícola y urbana, la fragmentación del hábitat es considerada una amenaza para la biodiversidad de especies y grupos funcionales³, y se ha convertido en uno de los temas prioritarios de la conservación. La cantidad total de hábitat disponible en un mosaico para un organismo es la variable considerada más importante para la persistencia de la población en el largo plazo. Sin embargo, ante las condiciones actuales de fragmentación del territorio por la apropiación de los sistemas ecológicos nativos, el patrón espacial ha adquirido importancia en la agenda de planificación del uso sustentable y la conservación de recursos y servicios ecológicos. Las poblaciones locales que quedan aisladas por la fragmentación, están en riesgo de extinción local debido a causas genéticas (disminuye la posibilidad de recombinación genética), demográficas (disminuye

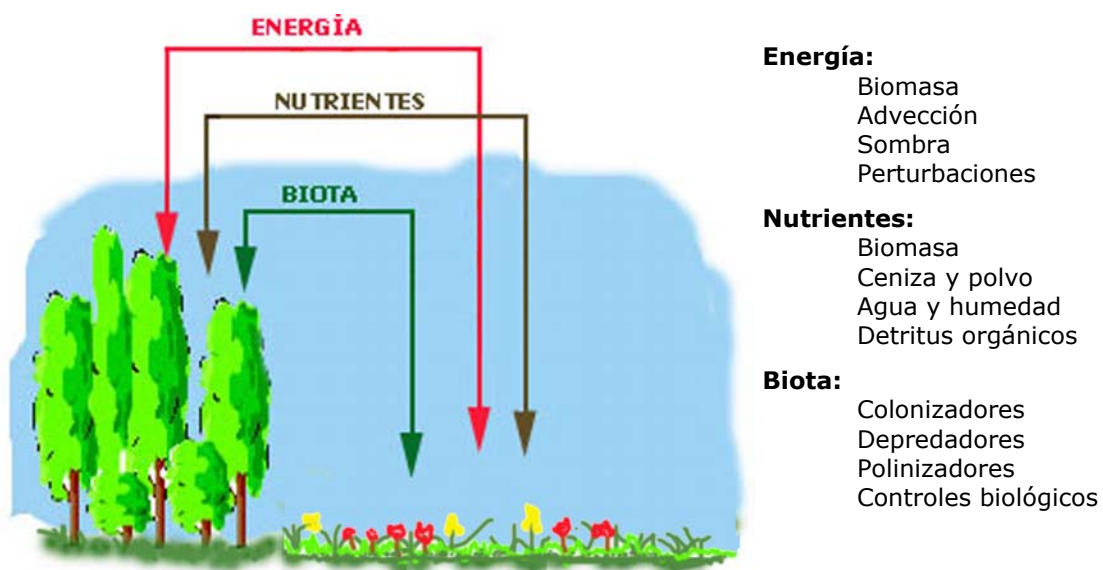
² Clase, categoría y tipo de parche se refieren a la variable nominal que caracteriza a los polígonos de un mapa de patrón areal.

³ Grupo funcional es un conjunto de especies que cumplen el mismo rol en un ecosistema

la tasa de natalidad; se modifican las interacciones interespecíficas) y estocásticas (incrementa la vulnerabilidad a las perturbaciones naturales y antrópicas). La única salvación es la migración y el consiguiente flujo genético entre fragmentos de hábitat. La capacidad de movimiento de los organismos entre parches depende de su comportamiento biológico y del patrón del mosaico. La variable más importante de la estructura del mosaico desde este punto de vista es su conectividad, que se define como el grado al cual el mosaico facilita o retarda el movimiento entre los parches de hábitat (Taylor et al., 1993) y debe medirse a la escala compatible con la de la entidad ecológica que se estudia, ya sea ésta una población, una especie, un grupo funcional, etc.; esto es, la conectividad es una propiedad emergente que surge de la interacción entre la estructura del mosaico y el comportamiento de la entidad ecológica. La conectividad depende de la organización de los parches y corredores en el mosaico, de la cantidad, tamaño, forma y bordes de los elementos, de la intensidad del mosaico o contraste entre los contenidos de los parches. Los índices de estructura han adquirido importancia porque miden estas propiedades de los mosaicos y permiten sugerir posibles causas y consecuencias en relación con la integridad ecológica de los mismos.

Los índices del paisaje también permiten describir mosaicos, comparar mosaicos de distintas zonas geográficas, y seguir su evolución en el tiempo. Todos estos aspectos entran dentro de lo que se conoce como enfoque estructural, que es independiente de los objetos (Fig. 5) involucrados. Sin embargo, cuando el objetivo es comprender procesos, como en el párrafo anterior, el enfoque es funcional, ya que se analiza el patrón en relación con un proceso dado (dinámica de una población, flujo de nutrientes, etc) y en este caso la escala y patrón espacial debe concordar con la escala y patrón del movimiento.

Figura 5: Objetos sujetos al movimiento en un mosaico



El cálculo de los índices de configuración se realiza en un mosaico de parches discretos. Los parches son polígonos en un mapa vectorial o conjuntos de píxeles contiguos pertenecientes a la misma categoría o clase. Este tipo de patrón es areal y temático. Cada tipo o clase de polígono (parche) tiene un valor nominal, que puede ser un tipo de cobertura de la tierra, un tipo de bosque, un uso particular de la tierra, un tipo de suelo, un intervalo de altitudes expresado en una escala nominal, entre otros. Existen otros tipos de patrones (puntuales, de superficie, redes lineales), para cuya descripción y análisis existen diversos tipos de herramientas estadísticas y matemáticas (Matteucci, 1998c; Turner et al., 2001).

Clasificación de los Índices

Los índices o medidas de la configuración de los parches y del mosaico pueden clasificarse con diversos criterios. La clasificación es útil para organizar el conocimiento; no tiene importancia para la elección ni para el cálculo.

En trabajos anteriores he clasificado los índices según el nivel jerárquico en aquellos que describen las categorías y los globales (Matteucci, 1998a); en este trabajo incluyo tres niveles: elemento, clase y mosaico (Tabla 1), siguiendo a McGarigal y Marks (1995). Las categorías "clase" y "mosaico" corresponden a "categóricos" y "globales", respectivamente.

También puede hacerse una división entre los índices que se calculan a partir del conteo de píxeles, o de las superficies y perímetros de elementos en los mapas vectoriales, y aquellos que se computan a partir de conteos de contactos entre píxeles. Los primeros describen la composición del mosaico, en tanto que los segundos miden el grado de entremezclado de las clases en el mapa.

Según el aspecto que se considere en relación con la configuración del mosaico (McGarigal et al., 2002), las medidas se pueden clasificar en Índices de (Tabla 1):

1. Área y Borde.
2. Forma
3. Área Interior
4. Aislamiento
5. Contraste
6. Intrincación
7. Conectividad
8. Diversidad

Sólo describiré aquí los índices surgidos más recientemente, o que tienen interés especial y no fueron tratados en publicaciones anteriores (Matteucci, 1998a; Matteucci et al., 2004).

No todos los índices se expresan a los tres niveles jerárquicos (Tabla 1). Algunos son propiedades emergentes de un nivel dado, como ocurre por ejemplo con la diversidad y la equidad, que sólo tienen sentido al nivel del mosaico. La descripción completa de gran parte de los índices y sus fórmulas de cálculo pueden encontrarse en el manual del programa Fragstats, que puede bajarse de la página: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/Metrics/Metrics%20TOC.htm>. Continuamente surgen índices nuevos para objetivos específicos, para conocerlos se recomienda revisar la revista periódica "Landscape Ecology" (<http://www.kluweronline.com/issn/0921-2973/contents>).

Las Variables Directas

Las medidas de cada elemento individual son su extensión y su perímetro, junto con su tipo o clase. La extensión puede medirse en unidades de superficie en un mapa vectorial o como cantidad de píxeles en una representación raster. De la misma manera, el perímetro se mide en unidades de longitud o en cantidad de lados de píxel que bordean el elemento. Estas medidas se obtienen de las tablas asociadas al mapa en el SIG, si se trata de una representación vectorial, o mediante cálculos de conteo de píxeles, que realiza el mismo SIG en un mapa raster.

El **Área** y el **Perímetro** de cada parche o polígono son variables directas de las cuales derivan los demás índices, incluyendo aquellos que evalúan los niveles jerárquicos clase y mosaico, y otros aspectos de la configuración a los tres niveles. Sin embargo, ambas tienen interés ecológico por sí mismas. La medida de superficie del parche es importante en los estudios biológicos de poblaciones y de comunidades ya que su persistencia y la integridad del sistema ecológico que habita dependen del tamaño mínimo del hábitat. Existen evidencias de que la riqueza específica de especies nativas decrece al disminuir el tamaño del parche; que la riqueza total, incluyendo especies ajenas al ecosistema, puede incrementar; y que, por lo tanto, la composición específica se modifica. El flujo de materiales, la cantidad de materiales trasladados, los ciclos de nutrientes y la productividad neta, así como la infiltración de agua y otras funciones ecológicas, también se modifican con cambios de tamaño del parche. Esta medida se usa en la planificación de la conservación de especies, para el diseño de reservas naturales y de corredores de reservas, para la planificación de actividades productivas y de conservación de servicios ecológicos. Se puede usar tanto para elegir, dentro de un área dada, el parche (o parches) adecuado para una función particular según su tamaño; o para determinar si un parche focal⁴ tiene el tamaño adecuado para el propósito en cuestión. Por ejemplo, en el diseño de un corredor para la protección de una especie particular, se tratará que el corredor una todos aquellos parches de tamaño adecuado para la supervivencia (natalidad y mantenimiento) de dicha especie.

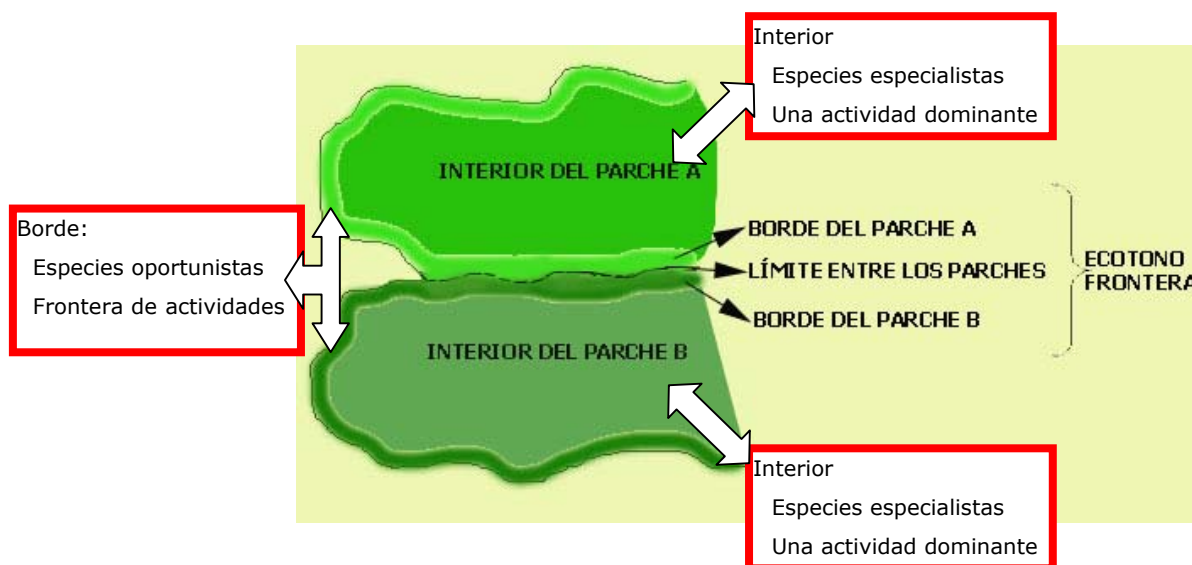
El perímetro del parche representa el borde del mismo. No es una línea neta, sino una zona de transición o ecotono, que puede funcionar como corredor, hábitat, filtro o barrera. Las propiedades del borde (ancho, contenido, contraste, grado de irregularidad) determinan la velocidad de movimiento de

⁴ Especie, parche, clase o proceso focal es aquel que tiene interés particular.

materiales, energía y organismos a través o a lo largo de su recorrido. Al nivel de parche, esta medida contribuye a seleccionar el parche adecuado para un propósito particular. Al nivel de clase y de mosaico, expresa el grado de fragmentación de la clase o del mosaico. Junto con el dato de contraste (intensidad), dará una idea del grado de permeabilidad del mosaico al flujo de organismos, materiales y energía.

El ancho de borde, que se evalúa con el **Índice de Profundidad de Borde**, es una variable de interés en sí misma. Las propiedades ecológicas, como composición de especies, ciclos biogeoquímicos y productividad, difieren en el centro con respecto al borde del parche, ya que las condiciones físicas y microclimáticas difieren (Fig. 6). Las diferencias son mayores cuanto mayor es el contraste entre los contenidos vecinos. Las especies de borde tienen características biológicas diferentes de las especies de interior; en general en el borde predominan especies adaptadas a microclimas más severos y variables, pertenecen al grupo de malezas, o ruderales, o generalistas, u oportunistas y son de estrategia r^5 . Las especies de interior son especialistas, están adaptadas a condiciones microclimáticas menos fluctuantes y de estrategia K.

Figura 6: Esquema de los bordes de parches vecinos



El ancho de borde es de suma importancia en las normas de protección, como por ejemplo, el ancho establecido para las selvas protectoras de riberas o para las fajas ecológicas (fajas de selva nativa entre plantaciones forestales). En un diagnóstico, puede determinarse si los bosques de borde existentes son adecuados o sería necesario ampliarlos. Muchas veces, como ocurre en la Provincia de Misiones, Argentina, se establecen anchos sin un conocimiento previo del funcionamiento del sistema ecológico. Según establece la Ley 3426

⁵ En el estudio de la dinámica de poblaciones, las especies de estrategia r son las que producen muchos descendientes, los cuales tienen una alta tasa de mortalidad en edades tempranas. Las de estrategia K producen poca descendencia pero ésta tiene alta supervivencia hasta la adultez y las crías son protegidas por los padres.

de Misiones, el ancho de las fajas ecológicas es 50 a 100 metros; el de los bosques protectores de bordes embalses y de lagunas de 100 m y el de márgenes de canales de 20 m. Estos valores son arbitrarios y podría ocurrir que toda la faja tuviera las condiciones de borde y, si esto es así, no funciona como bosque protector ni puede ser autosustentable. La misma situación se da en las selvas ribereñas. Hasta que no se hagan estudios de campo para medir el ancho de las selvas ribereñas y el área y forma mínima crítica de las selvas nativas, estas normas son sin sentido.

Al nivel de elemento del mosaico, las **variables de desviación**, que evalúan el grado de desviación de cada una de las medidas del parche de interés en relación con el valor promedio de cada medida para la clase o para el mosaico, también constituyen índices. Comprenden la desviación estándar (con intervalo de $-\infty$ a $+\infty$) y el percentil (con intervalo entre 0 y 100). Se pueden calcular para todas las variables del parche. Cuando el objetivo es el manejo de una población, comunidad o servicio ecológico ubicados en un parche particular, puede resultar necesario conocer si este parche es representativo o no del conjunto de parches. El grado de desviación puede servir para elegir un parche representativo de la clase o del mosaico.

Al nivel de clase (categoría) y de mosaico, los **parámetros estadísticos** de primer y segundo orden de cada variable al nivel de los elementos que integran la clase o el mosaico, respectivamente, resumen los datos de extensión y cantidad de borde: promedio, promedio ponderado por el área, mediana, intervalo (valores máximo y mínimo), desviación estándar y coeficiente de variación. Este resumen puede hacerse con otros índices de estructura del parche (Tabla 1: resaltado en verde).

La **Cantidad de Parches** o elementos (polígonos) también es una variable directa, que surge de la tabla de datos asociada al mapa en todo SIG. Este índice da una medida de la fragmentación de la clase o del mosaico. Los efectos de la cantidad de parches sobre los procesos ecológicos se deben a la reducción del hábitat (cuánto más fragmentado es un ecosistema, más reducido queda el hábitat para las especies de interior) y al incremento del efecto de borde, ya que junto con la multiplicación de los parches incrementa la cantidad de perímetro. La fragmentación afecta el comportamiento individual de las especies y también las interrelaciones entre las mismas, así como los flujos de otros materiales y de energía.

Índices de Área Interior

El **Tamaño del Interior** (*core*) de un parche es también una variable directa que se obtiene restando al tamaño del parche el espacio ocupado por el borde, el cual es descrito por el Índice de Profundidad de Borde. La idea de esta variable surge porque el borde del parche constituye un ecotono o transición entre tipos de parches vecinos de contenido diferente (Fig. 6).

Para establecer el ancho del borde, que es una decisión del investigador, se requiere el conocimiento de la extensión del efecto de borde, el cual depende del organismo o proceso considerado. En el diseño de reservas y en los programas de conservación, el tamaño del interior es más importante que el

tamaño del parche ya que refleja mejor las condiciones de hábitat de las especies de interior, que son las que se quieren proteger.

El tamaño interior depende del área del parche, de la longitud y ancho de borde y de la forma del parche, de modo que este índice integra estas 4 variables.

Otra manera de evaluar el área interior es mediante la **Transformación** del parche **al Eje Medio**, que consiste en dibujar el esqueleto del parche (Fig. 7). Se construye un mapa de profundidad del parche en que cada píxel del parche representa la distancia al borde más cercano medida en cantidad de píxeles. El esqueleto es la figura formada por los píxeles de mayor valor local (píxeles que no tienen vecinos con valores mayores que el suyo). El índice de profundidad promedio y el índice de profundidad máxima, que se expresan en metros, son dos maneras de evaluar la distancia al esqueleto o centro del parche. Para ambos el valor cero indica un parche lineal de un píxel de ancho. El primero representa la distancia promedio al centro del parche, mientras que el segundo describe la parte más compacta y ancha del parche. Ambos son sensibles al tamaño y a la forma del parche. Si se mantiene constante la forma, la profundidad promedio incrementa con el incremento del tamaño del parche. Si se mantiene constante el tamaño, las formas más compactas y euclidianas tienen una profundidad promedio mayor.

Índices de Forma

Las formas de los parches son muy variadas y junto con la superficie, afectan muchos procesos ecológicos. Entre dos parches con la misma superficie, aquel que tenga forma más irregular, con más salientes, presentará un mayor efecto de borde, favoreciendo los flujos transversales y perjudicando la persistencia de las especies de interior. Muchos procesos ecológicos, como la dispersión de los organismos, la migración entre parches, las interacciones entre especies, la colonización, son afectados por las formas de los parches, en la mayoría de los casos por el efecto de borde.

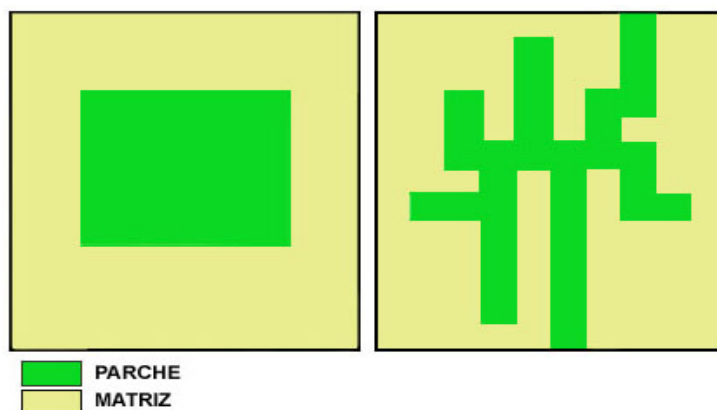
La forma del parche da una idea de su origen natural o antrópico, ya que estos últimos tienen bordes relativamente rectos, aún siendo lobulados o estrellados. En este sentido, la forma tiene carácter diagnóstico. Por ejemplo, permitió descubrir las granjas nabateas en las primeras fotos aéreas del desierto del Negev, y las chinampas, en imágenes de México.

Los índices de forma miden la geometría de los parches; esto es, si tienden a ser simples y compactos o irregulares y entreverados. Existen varios algoritmos que evalúan la complejidad en términos de las relaciones entre cantidad de perímetro y área (**Razón Perímetro/Área; Dimensión Fractal**). Algunos ponderan el grado de desviación de éstos índices en comparación con el valor de los mismo en una figura euclidiana (circunferencia o rectángulo). En términos generales, cuanto mayor el valor del índice, más irregular es el parche (Matteucci, 1998a).

El **Radio de Giro** de un parche evalúa la distancia promedio entre todos los píxeles y el centroide del parche. Puede considerarse un índice de forma o de superficie, ya que es una medida de cuánto se extiende un parche en el mosaico independientemente de que lo llene o no. En un parche de un píxel, el

radio de giro es igual a cero; al incrementar el área, manteniendo la forma compacta, incrementa el radio de giro. A medida que el parche se aleja de la forma euclidiana manteniendo su área, su radio de giro aumenta (Fig. 7).

Figura 7: Parches de igual tamaño y diferente Radio de Giro



El parche de la derecha, con mayor Radio de Giro, atraviesa todo el mosaico, aunque su área es igual a la del parche compacto de la izquierda

Al nivel de clase o mosaico, el radio de giro constituye una medida de la conectividad, que representa la posibilidad que tiene un objeto confinado a un parche dado de atravesar el mosaico. Este índice puede ser importante al evaluar la posibilidad de construir corredores de conexión entre grandes parches de ecosistemas naturales.

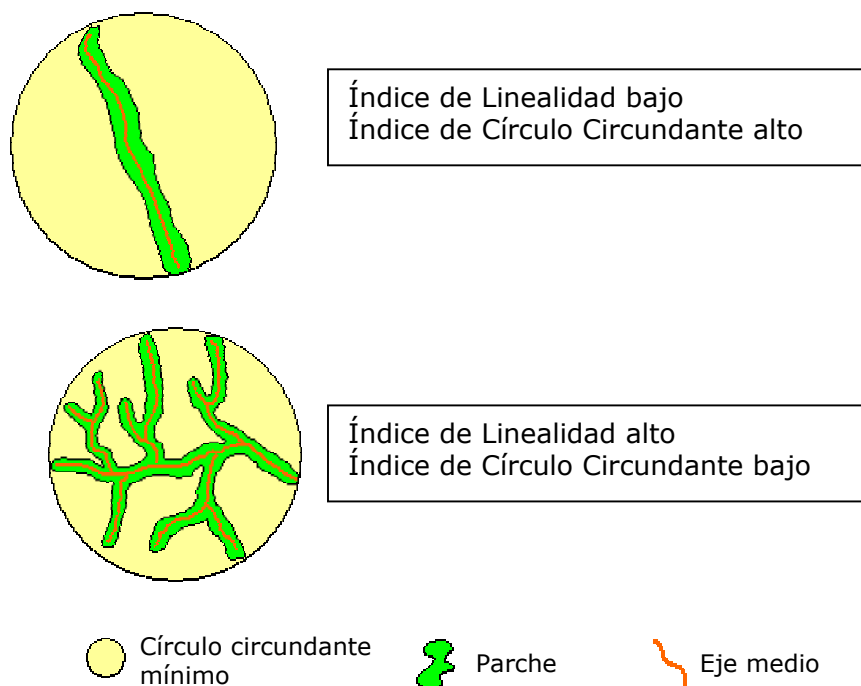
El **Índice de Linealidad** describe las características lineales del parche, aún cuando no se trate de parches globalmente lineales (Fig. 8). Este índice se computa a partir del esqueleto del parche, el cual se obtiene por transformación en el eje medio, y se basa en el hecho de que los parches alargados tienen su eje medio más cercano al borde que los parches rectangulares de la misma superficie.

El índice **Círculo Circundante** se basa en la razón entre el área del parche y el área mínima circunscripta alrededor del mismo; se calcula como 1 menos esta razón. El diámetro del círculo se computa como la distancia máxima entre píxeles del borde. El valor del índice es 0 para parches circulares y se aproxima a 1 para parches delgados. A diferencia del Índice de Linealidad, detecta los parches que son delgados y alargados (Fig. 8).

El **Índice de Contigüidad** es una medida de la configuración del borde del parche, y por lo tanto de su forma, que se obtiene evaluando el grado de conectividad estructural de los píxeles en el parche. En primer lugar se construye un mapa binario en el cual se asigna un valor de 1 a los píxeles del tipo de parche de interés y un valor de 0 a los demás píxeles (las demás clases). Luego se construye una plantilla de 3x3 celdas, a la cual se asigna un valor de 2 a las celdas horizontales y verticales y un valor de 1 a las diagonales y a la central. Se hace circular la plantilla sobre cada parche de la capa binaria y se obtiene una imagen en la cual cada píxel contiene un valor **C** que es la suma de los productos del valor de cada celda de la plantilla por el valor de cada uno de los 9 píxeles de la capa binaria superpuesta. El Índice de Contigüidad del parche es la sumatoria de todos los **C** del parche de hábitat

normalizada por el área del parche en cantidad de píxeles; a esta división se le resta 1 y luego se divide por la suma de los valores de la plantilla, que en este caso es 13. De este modo los parches grandes compactos tienen valores altos del Índice de Contigüidad mientras que los parches con formas irregulares y huecos internos, tienen valores bajos.

Figura 8: Transformación al eje medio, y relaciones entre los Índices de Linealidad y de Círculo Circundante



Índices de Aislamiento

El grado de aislamiento de los parches influye en el intercambio de materiales y organismos entre parches de la misma categoría. Los resultados de investigaciones muestran que la dinámica de algunas poblaciones dentro de un parche es influida por la proximidad de parches de igual contenido, con las mismas especies o con especies depredadoras o competitivas. Este concepto se ha usado para la conservación de especies en peligro en zonas donde existe competencia entre actividades económicas y conservación (por ejemplo, Noon y McKelvey, 1996), y ha modificado la filosofía del diseño de reservas. Para muchas especies un conjunto de parches de hábitat ubicados a distancias adecuadas son suficientes para su conservación, lo cual permite intercalar actividades silviculturales, forestales, agrícolas, con parches protegidos. El valor de la proximidad o aislamiento de los parches sólo puede interpretarse ecológicamente en función del comportamiento espacial del organismo, población, especie o proceso que se analice.

El aislamiento es una consecuencia de la fragmentación y conversión de los ecosistemas naturales. A medida que avanzan las fronteras agrícolas o

forestales, los ecosistemas naturales se fragmentan y los parches remanentes se hacen cada vez más distantes entre sí, de modo que el grado de aislamiento de parches del ecosistema original es una medida del grado de conversión. El aislamiento, junto con la reducción del tamaño de los parches disminuye las posibilidades de persistencia de muchas especies, especialmente las adaptadas a condiciones físico-bióticas del interior y las que requieren espacios grandes para su ciclo vital. Desde el punto de vista funcional, el grado de aislamiento de los parches depende no sólo de la distancia mínima entre parches similares, sino también del contraste entre el parche y las áreas entre parches (impermeabilidad de los espacios entre parches) y de las características biológicas y el comportamiento espacial del organismo u objeto particular. El contenido del espacio entre parches puede ser hostil para la supervivencia o el movimiento del organismo en cuestión, u ofrecer resistencia al flujo de algunos materiales.

El aislamiento puede evaluarse de diferentes maneras, dependiendo del objetivo del estudio, del cual depende el concepto del aislamiento. Si el objetivo es descriptivo, el enfoque será estructural y se medirá la distancia al vecino más cercano. Si el objetivo es funcional, será necesario tener en cuenta alguna variable que describa el comportamiento de la especie o grupo focal.

El índice más sencillo es la **Distancia Euclidiana** al vecino más cercano. En este caso, se considera que el tipo de parche de interés se encuentra en una matriz que agrupa a los restantes tipos de parches; esto es, se construye un mapa binario de tipo focal por un lado y otros tipos por otro. La distancia al vecino más o se define como la distancia más corta en línea recta entre el parche focal y su vecino más cercano de igual categoría. La medición se hace de borde a borde, entre los puntos centrales de los píxeles del borde. El valor del índice, que se expresa en m, se aproxima a cero a medida que disminuye la distancia al vecino más cercano; no llega a cero porque el valor mínimo depende del tamaño del píxel y del criterio de conteo de contactos entre píxeles (Matteucci, 1998a). El valor máximo depende del área del mosaico y es indefinido si el parche focal no tiene vecinos.

La distancia estructural más corta puede no ser la distancia ecológica más corta; y de hecho, tiene valores diferentes para diferentes organismos. Por ello, la distancia euclidiana al vecino más cercano se modifica para obtener una medida funcional. En vez de medir la distancia más corta, se mide la distancia de menor costo y para asignar un costo es necesario conocer la resistencia de la matriz al organismo focal.

Otros indicadores del aislamiento tienen en cuenta el área de los parches, como por ejemplo el **Índice de Proximidad** y el **Índice de Similitud**. En este caso, el investigador debe asignar un radio de búsqueda y se computa la distancia entre el parche focal y los parches de la misma categoría cuyos bordes estén a una distancia igual o menor que el radio de búsqueda. Se divide la superficie del parche del mismo tipo que el focal por la distancia de borde a borde entre este parche y el focal elevada al cuadrado. El valor del índice es cero cuando no hay parches similares al focal dentro del radio de búsqueda e incrementa a medida que incrementa la cantidad de parches de la misma categoría dentro del radio de búsqueda y cuando esos parches se hacen más próximos (disminuye la

fragmentación). El Índice de Similitud, considera el tamaño de todos los parches dentro del radio de búsqueda, independientemente de su categoría. Ambos índices son adimensionales y sólo sirven para comparar patrones areales, pero no tienen significado para la interpretación de comportamientos biológicos.

Índices de Contraste

El contraste, que confiere intensidad al patrón (Matteucci, 1998a), se refiere al grado de diferencias en atributos ecológicos entre los elementos vecinos. Esta variable afecta los flujos entre parches y se relaciona con el efecto de borde, descrito más arriba. Cuánto más difieren los parches, por ejemplo en cuanto a la estructura vertical de la vegetación, mayor es el efecto de borde y éste puede funcionar como barrera para ciertos organismos y materiales, como filtro para otros, y aún como corredor alrededor del parche para otros. Otras variables de la configuración pueden verse influidas por el contraste, como por ejemplo el aislamiento funcional, que es mayor cuando el contraste entre el hábitat y la matriz es grande.

Dado que son muchos los atributos ecológicos que pueden ser tenidos en cuenta para la evaluación del contraste, existen varias maneras de medirlo. En el momento de la elección del índice debe tenerse en cuenta el aspecto funcional, esto es, cuál de los atributos ecológicos está involucrado en el proceso que se estudia. Queda en el criterio del investigador asignar valores de ponderación, llamados coeficientes de disimilitud, para representar el grado de contraste. Los coeficientes de disimilitud deben variar entre 0 y 1. Por ejemplo, si estamos estudiando una población de una especie del interior de un bosque, el cual linda con un cultivo herbáceo, la disimilitud podrá valer 1 si los individuos de dicha población no utilizan el cultivo o son depredados en cuanto entran a éste. Si el parche vecino es un bosque de otro tipo, pero no interfiere con la dinámica poblacional de nuestra población, la disimilitud podría ser 0; o 0,3 si el cultivo funciona como filtro débil. La mayoría de las veces no existen datos empíricos sobre el comportamiento del proceso frente a la existencia de contraste, por lo cual los valores asignados son subjetivos y se basan en consideraciones teóricas.

Para el cálculo del **Índice de Contraste de Borde** de un parche focal, primero se multiplica la longitud de cada segmento de contacto entre dos parches por la disimilitud asignada al contacto; luego se suman todos los valores así obtenidos y la suma se divide por el perímetro del parche y se convierte a porcentaje multiplicando por 100. El índice varía entre 0 y 100. Es cero cuando el mosaico tiene un solo parche y por lo tanto no hay borde (se da un valor 0 a las áreas fuera del mosaico) y también cuando se asigna disimilitud 0 a los contactos con los parches adyacentes. El máximo 100 corresponde al caso en que en que todo el perímetro tiene una disimilitud máxima.

Al nivel de la clase y del mosaico, se emplea la **Densidad del Contraste de Borde Ponderado** (m/ha), para cuyo cálculo se multiplica la longitud total de los bordes entre parches de la clase focal con el resto y se multiplica por el coeficiente de disimilitud, luego se suman estos valores y la suma se divide por la superficie total del mosaico. Al nivel de clase la suma incluye sólo los

contactos de la clase focal con todas las demás, mientras que al nivel del mosaico se computan todos los contactos entre todas las clases. Al normalizar los valores por la superficie del mosaico, este índice sirve para comparar mosaicos de distinta extensión. El índice varía entre 0 e infinito. Incrementa a medida que aumenta la cantidad de borde y/o a medida que el coeficiente de disimilitud se aproxima a 1 (incrementa en contraste entre parches vecinos).

Si en vez de dividir por el área del mosaico se divide por la longitud total de los bordes de la clase focal o de la longitud total de los bordes en el mosaico, se obtiene el **Índice Total de Contraste de Borde** para la clase y el mosaico, respectivamente. Este valor se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje. Varía entre 0, si no hay bordes o si la disimilitud es 0, y 100 cuando la disimilitud se aproxima a 1.

Índices de Intrincación

Estos índices evalúan la textura del mosaico; esto es, el grado de agregación o entremezclado del mosaico, que se produce por la tendencia de las clases a formar parches aglutinados o a dispersarse en parches pequeños de diversos tipos, respectivamente.

La textura es importante en muchos procesos ecológicos. La persistencia de muchas poblaciones depende de su éxito en la dispersión y de la tasa de colonización de los parches. Cuanto más intrincado es el mosaico; esto es cuanto más pequeños y entremezclados estén los parches de distintos tipos, menor es el éxito de la dispersión y por lo tanto decrece la tasa de colonización. Si el hábitat de una especie se fragmenta mucho los efectos mencionados pueden redundar en una disminución de la población y hasta en extinción local, no sólo por la disminución del tamaño de los parches de hábitat por debajo del área crítica mínima sino por la disminución del éxito de la dispersión al tener que atravesar parches de tipos diferentes de los del hábitat. Existen especies que son beneficiadas por una textura entremezclada porque su vida depende de actividades que se realizan de parches de diversos tipos. También se cree que la biodiversidad al nivel de mosaico incrementa cuando hay gran entremezclado de tipos de parches. Estas consideraciones son tenidas en cuenta en el diseño de reservas biológicas.

Los procesos de propagación de perturbaciones (fuego o plagas) también son muy afectados por la textura del mosaico. Si el mosaico es intrincado, el avance de la perturbación puede ser dificultado, si ella fluye por los parches óptimos y los espacios entre parches funcionan como barreras o filtros. Por ejemplo, el fuego avanza saltando de parche inflamable a parche inflamable; si la clase inflamable está aglutinada en pocos parches grandes, el fuego avanza con mayor facilidad. Los índices de intrincación al nivel de clase pueden dar pautas acerca de los efectos de las perturbaciones al nivel del área de estudio.

Hay una variedad índices de intrincación, que pueden dividirse en tres grandes grupos: aquellos que se basan en el conteo de adyacencias y se calculan a partir de la matriz de probabilidades (Matteucci, 1998a); aquellos que consideran las longitudes de contactos entre parches y aquellos tienen en cuenta las áreas de los parches. Entre los primeros, los más usados son los

Índices de Porcentaje de Adyacencias Similares y de Contagio; entre los segundos, el de Intercalación, y entre los terceros, los Índices de División y de Tamaño Efectivo de Malla.

El **Índice de Porcentaje de Adyacencias Similares** fue descrito como Índice de Homogeneidad y es el segundo momento angular de la matriz de probabilidades (Matteucci, 1998a). Se puede calcular tanto al nivel de clase como de mosaico. En el primer caso, que mide el grado de agregación del tipo de parche focal, se cuentan sólo las adyacencias entre píxeles de la clase focal, entre sí y con las demás categorías; en el caso del mosaico, que mide el grado de agregación de todas las clases, se miden todos los pares posibles de contactos. El valor se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje. El valor mínimo, 0, indica desagregación máxima; esto es, cada píxel es un parche de tipo diferente y no existen adyacencias similares. El valor tiende al máximo, 100, si predominan las adyacencias entre píxeles del mismo tipo; esto es, hay un solo parche grande y compacto de cada tipo.

El **Índice de Contagio**, que fue extensamente descrito en trabajos anteriores (Matteucci, 1998a), mide el grado de agregación de los píxeles de igual categoría y por lo tanto es una medida del aglutinamiento de las clases. Se calcula a partir de la proporción de adyacencias similares entre píxeles, sin importar a qué parche pertenecen ni cuántos parches existen. Sin embargo, la cantidad y tamaño de los parches afectan al índice indirectamente, a través de la proporción de adyacencias similares. Los mosaicos con parches grandes y compactos producen valores altos del Índice de Contagio; mientras que manteniendo constante la cantidad y el tamaño de los parches, si estos son de formas irregulares con brazos lineales (por ejemplo parches de selvas ribereñas de diseño dendrítico), el valor es bajo porque hay menor cantidad de adyacencias similares.

El Índice de Contagio al nivel del mosaico refleja tanto la distribución espacial como el entremezclado y de cierta forma incluye la Intercalación. Puede expresarse en porcentaje, multiplicando el valor por 100. El valor mínimo, 0, indica una desagregación máxima (cada píxel es un tipo de parche) e intercalación máxima (iguales proporciones de todos los tipos de contacto); el valor máximo, 100, indica agregación máxima e intercalación mínima; esto es, cada tipo de parche está representado por un solo parche grande.

Este índice podría calcularse para una clase, pero tiene un significado distinto. Al nivel de clase, el cálculo se enfoca hacia el tipo de parche focal (en general, los relictos del ecosistema nativo) y sólo se computa la frecuencia de adyacencias de esta clase con las demás. Mide la tendencia de este tipo de parche a aglutinarse; por lo tanto el Contagio no incluye la Intercalación. Es una medida indirecta de la fragmentación de la clase.

El **Índice de Intercalación y Yuxtaposición** se basa sobre la longitud de los segmentos de contacto entre parches. A diferencia del índice de Contagio, que se basa sobre el contacto entre píxeles, la Intercalación se basa sobre el contacto entre parches. Por esta razón, refleja sólo el entremezclado de tipos de parche y no el aglutinamiento de las clases. El cálculo parte de la proporción de longitud borde entre dos tipos de parche en relación con la longitud total del

borde. Al nivel de clase se computa el contacto entre el tipo de parche focal y los demás y el borde total de la clase focal; al nivel de mosaico se miden las longitudes de todos los pares de contactos disímiles y la longitud total de borde del mosaico. El valor obtenido al aplicar la ecuación correspondiente, que mide la intercalación observada en relación con la máxima posible para la cantidad de clases en el mosaico, se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje. El Índice de Intercalación de una clase se aproxima a 0 cuando el tipo de parche focal está en contacto con sólo un tipo de parche diferente y la cantidad de parches aumenta, y tiende a 100 a medida que la distribución de las longitudes de contactos entre el tipo de parche focal y los demás tipos se hace equitativa. Para el mosaico, el valor tiende a 0 cuando la distribución de la longitud de adyacencias se hace crecientemente dispar y tiende a 100 cuando ésta se hace equitativa.

El **Índice de División** mide el grado de subdivisión de una clase en muchos parches, independientemente del tamaño, la ubicación o la configuración espacial de esos parches. Está influido por la cantidad y tamaño de los parches. Se basa en la proporción de cada parche en relación con el Área Total. Estas razones se elevan al cuadrado y se suman. El valor del índice es igual a 1 menos la suma. Al nivel de la clase, la suma incluye todos los parches del tipo focal; al nivel del mosaico, la suma incluye todos los parches del mosaico. El valor varía entre 0 y 1; es 0 cuando el mosaico está formado por un único parche. Al nivel de clase, tiende a 1 a medida que la cantidad y tamaño de los parches focales disminuye. Al nivel del mosaico, el valor es 1 cuando cada píxel es un parche diferente; esto es, cuando la subdivisión es máxima. La División se interpreta como la probabilidad de que dos píxeles seleccionados al azar no estén ubicados en el mismo parches.

El **Índice de Tamaño Efectivo de Malla** y el Índice de División son redundantes; esto es, correlacionan perfecta e inversamente. Sin embargo, se interpretan de manera diferente. Mientras que División se interpreta como una probabilidad, el Tamaño Efectivo de Malla es un área. El área de cada parche se eleva al cuadrado y la suma de estos valores se divide por el área total del mosaico. Al nivel de clase, la suma incluye todos los parches de la clase focal; al nivel de mosaico incluye todos los parches del mosaico. El valor varía entre un mínimo que depende del tamaño del píxel (tamaño del píxel/área total) y el área total del mosaico. El valor mínimo se alcanza cuando la clase tiene un solo parche de un píxel (al nivel de clase) o cuando cada píxel es un parche (al nivel del mosaico). El valor máximo se alcanza cuando todo el mosaico es un solo parche.

Índices de Conectividad

La conectividad se refiere al grado de permeabilidad de un mosaico en relación con el movimiento de organismos o materiales. Aunque la conectividad estructural del mosaico se mide con mejor resultado a partir de la teoría de la percolación y de la teoría de grafos (Keitt et al., 1997), existen cientos de índices que evalúan esta propiedad (Gustafson, 1998; Goodwin, 2003).

La teoría de la percolación se aplica a un mapa raster binario, con píxeles de la clase focal y píxeles que no pertenecen a esta clase, donde p es la proporción

de píxeles ocupados por hábitat (la clase de interés) y q la proporción de píxeles que no son de interés, siendo $p+q=1$. Un parche está formado por un agrupamiento de píxeles de hábitat que comparte un borde en las direcciones vertical u horizontal (no se cuentan las diagonales). A medida que incrementa p , incrementa el tamaño de los parches, hasta que llega un nivel de ocupación en que todo el mosaico está cubierto por un solo parche de la clase hábitat, p se aproxima a 1 y se dice que el hábitat percoló el mosaico; que es lo mismo que decir que la conectividad de la clase hábitat es máxima. Se ha demostrado que, para los mapas infinitos con distribución aleatoria de los parches focales, existe un valor crítico de p por encima del cual la conectividad se hace máxima. Este valor crítico es $p=0.5928$ (Stauffer y Aharony, 1985). En ecología de paisajes, la dispersión de las especies o la propagación de las perturbaciones puede verse como un fenómeno de percolación y puede predecirse la evolución probable del fenómeno comparando el p del mosaico con el p crítico, ya que si el mosaico presenta un p cercano al valor crítico, se produce un cambio cualitativo. En los mapas reales (no aleatorios y finitos) puede usarse este criterio porque también existe el valor crítico cercano a 0.59. Si pensamos en una matriz de ecosistema natural que ocupa todo el área y ésta se va fragmentando por apropiación de la tierra por los humanos, p va disminuyendo al dividirse y achicarse los fragmentos de ecosistema natural y la conectividad entre los parches de clase hábitat disminuye; si se alcanza un valor de p cercano al crítico, una mínima reducción de los parches naturales producirá un cambio cualitativo irreversible con la desconexión total la clase de ecosistema natural.

Muchos de los índices de conectividad se basan en cálculos de los índices que describen el patrón espacial como variables proxy de la conectividad, ya que ésta evade las mediciones directas a campo. Estos índices sirven para las descripciones y comparaciones pero tienen poco valor funcional. El problema es que los índices son estáticos, representan una imagen instantánea de algo que es muy cambiante y resulta difícil estudiar las asociaciones entre los procesos ecológicos y la estructura; por eso hay pocos datos que reflejen la conectividad a partir de asociaciones entre patrón y procesos (Tishendorf, 2001).

En la perspectiva funcional, la conectividad se refiere a la unión funcional entre los parches de hábitat, ya sea porque existen conexiones estructurales entre los parches (corredores) o porque la capacidad de migración de los organismos les permite atravesar sin riesgo las zonas entre parches, lo cual equivale a decir que perciben los parches como funcionalmente conectados. En el último caso, el mosaico no es inherentemente fragmentado o conectado, sino que su naturaleza depende del organismo y de escala a la cual el organismo o el proceso ecológico interactúa con el patrón. Esta correspondencia de escalas es fundamental porque parches funcionalmente conectados para el movimiento de un mamífero grande no lo estarán para la dispersión de un reptil pequeño; parches conectados para la propagación de un incendio puede que no lo estén para el flujo de agua.

La conectividad estructural puede evaluarse mediante una combinación de Índices de Área de hábitat, de División y de Contagio, con el énfasis en la continuidad de un tipo de parche particular, aquel que se estima como hábitat natural. La conectividad funcional puede basarse en adyacencias similares

(Índice de Cohesión) o una distancia umbral equivalente a la distancia máxima de dispersión (Índice de Conectancia); alguna función decreciente de la distancia que refleje la probabilidad de conexión a una distancia dada o una función de la distancia y la resistencia al movimiento, en la cual la distancia entre dos parches se calcula como la distancia de menor costo (Índice de Atravesamiento).

El **Índice de Cohesión** mide la unión física de un tipo de parche particular. Por debajo del umbral de percolación es sensible a la agregación y el índice incrementa a medida que la clase se hace más aglutinada o agregada. Por encima del umbral de percolación, el índice no responde a agregación de la clase.

El cálculo se hace para la clase focal, y en primer lugar se obtiene la suma de los perímetros de cada parche, la cual se divide por la suma del producto del perímetro y la raíz cuadrada del área de cada parche. Este valor se resta de 1, y se normaliza dividiéndolo por 1 menos la inversa de la raíz cuadrada del área del mosaico. Este valor se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje. El valor varía entre 0 y 100.

El índice de Cohesión se aproxima a 0 a medida que la proporción de la clase focal disminuye en el mosaico y se subdivide y disminuye la conectividad física. Incrementa monótonicamente a medida que aumenta la proporción de la clase focal en el mosaico hasta que alcanza un plateau en las proximidades del umbral de percolación. Por ello, por encima de este umbral el índice es insensible a la aglutinación de la clase. El índice podría calcularse al nivel del mosaico, pero aún se desconoce su comportamiento.

El **Índice de Conectancia** es la cantidad de uniones funcionales entre parches de una clase, donde cada par de parches está conectado o no a una distancia especificada por el investigador. Queda a criterio del investigador elegir esa distancia, la cual depende de la movilidad del organismo, material o perturbación en el espacio entre parches. Esto es, si se sabe que un objeto puede pasar de un parche a otro siempre que el tiempo en que está fuera de su medio natural sea inferior a 1 hora, conociendo la velocidad de movimiento del objeto, puede estipularse una distancia máxima segura para el objeto. El Índice se expresa como porcentaje de la conectancia máxima posible para la cantidad de parches observada.

Para el cálculo, primero se establece la distancia crítica, se suma la cantidad de uniones funcionales entre pares de parches dentro de dicha distancia y se divide por la cantidad máxima de uniones posibles: $n(n-1)/2$; donde n es la cantidad de parches focales. El valor se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje. Se puede calcular al nivel de clase o de mosaico. En el primer caso, se suman todos los contactos entre parches focales y n es la cantidad de parches focales; para el mosaico se suman los pares de contactos entre todos los pares de parches y la cantidad máxima de contactos está dada por la suma $[\sum n(n-1)/2]$ de todos los parches de cada clase.

Al nivel de clase, el valor mínimo, 0, se obtiene o bien cuando la clase focal consiste de un solo parche o cuando no existen conexiones entre los parches

focales dentro del valor de distancia asignado, y el máximo, 100, cuando todos los parches están conectados. Al nivel de mosaico, el valor 0 se obtiene cuando el mosaico consiste de un parche o cuando cada clase tiene un solo parche o cuando ninguno de los parches del mosaico presenta conexiones, y el valor 100 indica que todos los parches están conectados.

El **Índice de Atravesamiento** mide el grado de dificultad que presenta un mosaico para el movimiento de un objeto. Para el cálculo, el investigador debe crear una matriz de resistencias en la cual asigna un valor de resistencia de movimiento a cada par de combinaciones de tipo de parche, dado que la resistencia seguramente varía en cada clase. También debe asignar el investigador un factor para establecer el tamaño del área que rodea el píxel focal que es accesible a una la resistencia mínima dada, la cual se basa en una distancia máxima que debe ser asignada por el investigador. El cálculo de este índice se realiza al nivel de píxel y luego se promedia para todos los píxeles del parche focal, por lo tanto se requiere mucha computación y puede requerir mucho tiempo su cálculo para mosaicos grandes. La consideración de las resistencias variables de las distintas clases de cobertura al movimiento de la especie focal parece ser un avance para el cálculo de la conectividad funcional con respecto al índice anterior, que solo tiene en cuenta las distancias, ya que tiene mayor valor de predicción (Chardon et al., 2003).

El Índice de Atravesamiento, que se normaliza en relación con valor máximo de atravesamiento dada una resistencia mínima, se expresa en porcentajes. Es 0 cuando el parche focal está formado por un solo píxel y rodeado de tipos resistentes que funcionan como barreras para el movimiento del objeto y alcanza el valor máximo, 100, cuando el parche focal está rodeado de clases de resistencia mínima.

Índices de Diversidad

Esta categoría reúne un conjunto de índices (Tabla 1) que no son espacialmente explícitos ya que describen la composición del mosaico, en términos de la proporción de territorio que ocupa cada categoría, la riqueza o cantidad de tipos de parche y la equidad o tasa de distribución de los parches entre las categorías, independientemente de la cantidad o forma de los parches y de la configuración del mosaico. Sólo tienen sentido al nivel del mosaico.

Los índices de diversidad fueron descritos en detalle en trabajos anteriores (Matteucci, 1998a), bajo el nombre de índices globales, ya que resumen la composición del mosaico en un sólo número. Aunque desde entonces han aparecido otros índices, los allí tratados siguen siendo los más usados.

El Cálculo de los Índices

Todos los índices descritos se pueden calcular con programas especialmente diseñados, entre los cuales los más usados son Fragstats (McGarigal et al., 2002) y Patch Analyst (Rempel, 2003). Los programas de SIG también pueden calcular los índices ya que la mayoría de ellos provienen de operaciones entre capas temáticas. Aunque el programa no incluya el algoritmo específico, seguramente tiene las herramientas de cómputo y funciones de operaciones

entre capas. Es importante comprender cómo es el algoritmo para poder reproducirlo en un SIG.

La cuantificación de los índices presenta la ventaja de permitir la aplicación de análisis multivariado para comparar mosaicos ubicados en regiones diferentes o de épocas diferentes y, especialmente, para encontrar asociaciones entre el patrón y diversos procesos ecológicos y sociales.

Limitaciones al Uso de los Índices

El cálculo de los índices de configuración del mosaico no garantiza la predicción de la relación entre patrón y proceso. No existe suficiente información de campo como para generalizar los comportamientos de los objetos (organismos, materiales o procesos) en respuesta a los cambios de patrón. Sólo permite plantear hipótesis que deberán validarse con un conjunto independiente de datos.

Los valores de los índices son muy sensibles a la escala, tanto a la extensión como al grano, a la cantidad de categorías consideradas y a los criterios empleados para definir el borde. En los enfoques funcionales estas variables son fijadas por el comportamiento del organismo o proceso que se estudia. En los enfoques estructurales, se corre el riesgo de tener una descripción rigurosa y detallada pero sin mayor aplicación práctica. Para facilitar las comparaciones entre regiones o realizar secuencias históricas es importante definir el mosaico; esto es, explicitar la extensión, la ubicación de los límites, el grano, la cantidad de categorías y la selección de anchos de borde, así como los radios de búsqueda y los niveles aceptados de heterogeneidad interna.

El tipo de formato del mapa puede tener influencia en los valores de los índices. La longitud de los bordes se sobre-estima en el formato raster, según el tamaño del píxel. El tamaño del píxel afecta la proporción de adyacencias similares, por lo tanto, los índices que se basan en este conteo, como el Índice de Contagio, serán afectados. Cuánto menor es el tamaño del píxel (mayor resolución) mayor es el porcentaje de adyacencias similares e incrementa el Índice de Contagio. Este hecho es importante al comparar mosaicos trabajados a diferentes resoluciones. Cuando se transforman mapas vectoriales al formato raster para ser comparados, hay que tener la precaución de usar siempre el mismo tamaño de píxel.

Todos los índices provienen de unas pocas variables medidas en el mapa (área, perímetro y contenido de los polígonos), sometidas a una variedad de algoritmos. Por ello, hay índices que son inherentemente redundantes (correlacionan perfectamente entre sí). Otros índices pueden correlacionar en algunos mosaicos y no en otros, dependiendo del patrón (Riitters et al., 1995). En todo caso, es recomendable hacer un análisis de correlación para eliminar redundancias, seleccionando aquellos índices que sean más sensibles a las variaciones del proceso que se estudia.

La limitación más importante es quizá la falta de un conocimiento teórico del comportamiento de los índices en respuesta a los cambios de patrón, lo cual puede conducir a interpretaciones erróneas. En muchos casos se desconocen las propiedades estadísticas de los índices; por ejemplo, no se sabe en qué

medida debe cambiar el mosaico para que el cambio se refleje en el valor de los índices. Si en la comparación de dos mosaicos se obtienen valores diferentes de un índice, no se sabe si el cambio es ecológicamente importante o estadísticamente significativo. Esta es una rama del conocimiento en pleno desarrollo y a veces tenemos la sensación de que son más las preguntas que las respuestas. Algunos investigadores (Turner et al., 2001) propician la acumulación de casos en un banco de datos lo suficientemente amplio como para poder llegar a generalizaciones a partir del análisis del conjunto de casos.

La recomendación general es que la selección de índices debe responder a una hipótesis acerca del patrón del mosaico y de cuáles son los posibles factores responsables del mismo. Conviene tomarse un tiempo para analizar qué es lo que cada índice refleja y, sobre todo, usar la menor cantidad de índices que sea posible.

Bibliografía Citada

Chardon, P.J.; F. Adriaensen y E. Matthysen. 2003. Incorporating landscape elements into a connectivity measure: a case study for the speckled wood butterfly (*Pararge aegeria* L.). *Landscape Ecology* 18: 561-573.

Forman, R.T.T. 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña.

Forman, R.T.T y M. Godron. 1981. Patches and structural components for a landscape ecology. *Bioscience* 31: 733-740

Goodwin, B.J. 2003. Is landscape connectivity a dependent or independent variable? *Landscape Ecology* 18: 687-699.

Gustafson, E.J. 1998. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art. *Ecosystems* 1:143-156 (URL: link.springer-ny.com/link/service/journals/10021/)

Keitt, T.H.; D.L. Urban y B.T. Milne. 1997. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology* [online]1(1): 4. Disponible en el Sitio <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art4>

Matteucci, S.D. 1998a. La cuantificación de la estructura del paisaje. En: S.D. Matteucci y G.D. Buzai (Eds.) *Sistemas Ambientales Complejos: Herramientas de Análisis Espacial*. EUDEBA, Buenos Aires. Pp. 271-291. (Se anexa)

Matteucci, S.D. 1998b. El análisis regional desde la ecología. En: S.D. Matteucci y G.D. Buzai (Eds.) *Sistemas Ambientales Complejos: Herramientas de Análisis Espacial*. EUDEBA, Buenos Aires. Pp. 117-150. (Se anexa)

Matteucci, S.D. 1998c. La cuestión del patrón y la escala en la ecología del paisaje y de la región. En: S.D. Matteucci y G.D. Buzai (Eds.) *Sistemas Ambientales Complejos: Herramientas de Análisis Espacial*. EUDEBA, Buenos Aires. Pp. 219-248. (Se anexa)

Matteucci, S.D. 2003. El paisaje visto por un ecólogo. *Contextos, Revista de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires*. Nº 12; Pp. 68-73.

Matteucci, S.D.; J. Morello, A. Rodriguez y N. Mendoza. 2004. *Mosaicos de Paisaje y Conservación Regional: El Alto Paraná Encajonado Argentino-Paraguayo*. Editorial de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires, en prensa.

McGarigal y Marks. 1995. *Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. Gen. Tech. Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.

McGarigal, K.; S.A. Cushman; M.C. Neel y E. Ene. 2002. *Fragstats: Spatial pattern analysis program for categorical maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Disponible del Sitio: www.umass.edu/landeco/research/fragstats.html

Noon, B.R. y K.S. McKelvey. 1996. Management of the spotted owl: A case history in conservation biology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 27: 135-162. (Se puede obtener pagando U\$15 en el URL: <http://arjournals.annualreviews.org/toc/ecolsys/27/1>)

Rempel, R. 2003. *Patch Analyst 3.0*. (Se puede bajar del URL: <http://flash.lakeheadu.ca/~rrempe/patch/#WhatsNew>)

Riitters, K.H.; R.V. O'Neil; C.T. Hunsacker; J.D. Wickham; D.H. Yankee; S.P. Timmons; K.B. Jones y B.L. Jackson. 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology* 10: 23-40.

Stauffer, D. y A. Aharony. 1985. *Introduction to percolation theory*. Taylor and Francis, London.

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

Tishendorf, L. 2001. Can Landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology* 16: 235-254.

Turner, M.G.; R.H. Gardner y R.V. O'Neill. 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice*. Springer, New York, Berlin, Heidelberg.

Anexo

Tabla 1: Lista de los índices de estructura del mosaico y niveles jerárquicos a los cuales se puede calcular cada uno (Fuente: MacGarigal, et al., 2002)

	ÍNDICE	NIVEL JERÁRQUICO		
		ELEMENTO	CLASE	MOSAICO
Índices de Área y Borde	Área	SI	SI	SI
	Longitud de borde	SI	SI	SI
	Densidad de borde (longitud/área)	NO	SI	SI
	Radio de giro	SI	SI	SI
	Porcentaje del mosaico (área de la clase/ÁreaTotal*100)	NO	SI	NO
	Cantidad de parches	NO	SI	SI
	Densidad de parches (cantidad de parches/área)	NO	SI	SI
	Índice de Forma del Mosaico	NO	SI	SI
	Índice de Forma del Mosaico normalizado	NO	SI	NO
	Parche Máximo (área del parche de mayor tamaño)	NO	SI	SI
Índices de Forma	Razón Perímetro/Área	SI	SI	SI
	Forma	SI	SI	SI
	Dimensión Fractal	SI	SI	SI
	Linealidad	SI	SI	SI
	Círculo circundante	SI	SI	SI
	Contigüidad	SI	SI	SI
	Dimensión Fractal Perímetro-Área	NO	SI	SI
Índices de Área Interior	Superficie interior	SI	SI	SI
	Superficie interior total	NO	SI	SI
	Cantidad de superficies interiores	SI		
	Índice de área interior	SI	SI	SI
	Profundidad promedio	SI	NO	NO
	Profundidad máxima	SI	NO	NO
	Porcentaje del mosaico	NO	SI	NO
	Cantidad de superficies interiores disjuntas	NO	SI	SI
	Densidad de superficie interiores disjuntas	NO	SI	SI
Índices de Aislamiento	Proximidad	SI	SI	SI
	Similitud	SI	SI	SI
	Distancia euclidiana al vecino más cercano	SI	SI	SI
	Distancia funcional al vecino más cercano	SI	SI	SI
Índices de Contraste	Contraste de borde	SI	SI	SI
	Densidad de borde ponderado por el contraste	NO	SI	SI
	Contraste de borde total		SI	SI
Índices de Intrincación	Porcentaje de adyacencias similares	NO	SI	SI
	Aglutinamiento	NO	SI	NO
	Agregación	NO	SI	SI
	Intercalación y yuxtaposición	NO	SI	SI
	Dimensión fractal masiva	NO	SI	NO
	División del mosaico	NO	SI	SI
	Partición	NO	SI	SI
	Tamaño efectivo de malla	NO	SI	SI
	Contagio	NO	NO	SI

		NIVEL JERÁRQUICO		
ÍNDICE		ELEMENTO	CLASE	MOSAICO
Índices de Conectividad	Cohesión de parches	NO	SI	NO
	Conectancia	NO	SI	SI
	Atravesamiento	NO	SI	SI
Índices de Diversidad	Riqueza de Parches	NO	NO	SI
	Densidad de Riqueza de Parches	NO	NO	SI
	Riqueza Relativa	NO	NO	SI
	Índice de Diversidad de Shannon	NO	NO	SI
	Índice de Diversidad de Simpson	NO	NO	SI
	Índice de Equidad de Shannon	NO	NO	SI
	Índice de Equidad de Simpson	NO	NO	SI

Indica las variables que se resumen como parámetros estadísticos de primer y segundo orden promedio, promedio ponderado por el área, mediana, intervalo (valores máximo y mínimo), desviación estándar y coeficiente de variación