CAMBIOS DE USOS DEL SUELO EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE BARCELONA: ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DEL PAISAJE ENTRE 1956 Y 2005

AUTOR: Irene Fabricante
DIRECTOR DEL PROJECTO: Joan Pino

RESUMEN La Región Metropolitana de Barcelona (RMB) experimentó intensos cambios en los últimos 50 años. Las superficies agrícolas disminuyeron y las superficies urbanas y bosques aumentaron. Cuatro índices que representan la configuración del paisaje se calcularon en el año 1956 y el 2005. Los índices de tamaño del grano medio, *effective Mesh Size* y número de polígonos en relación al número de cubiertas dan medida de la fragmentación del paisaje. El índice de diversidad de Shannon tiene en cuenta la riqueza y equitatividad de las cubiertas. La diversidad y el tamaño de grano medio y el número de polígonos/número de cubiertas aumentaron indicando un incremento de la fragmentación. Contrariamente, aumentó el *effective mesh size*, relacionado inversamente con la fragmentación. Estos resultados evidencian que los procesos no son homogéneos en el territorio. La variación espacial de los índices apoya la idea de que en la RMB ocurren procesos opuestos de modificación del paisaje. Mientras que las áreas de montañas y las áreas urbanas tienden a homogeneizarse, las áreas llanas tienden a diversificarse.

1. INTRODUCCIÓN

Los cambios en la cobertura y el uso del suelo son las fuentes más importantes de alteración de la superficie terrestre (Vitousek et al., 1997). La velocidad de los cambios, la frecuencia y la magnitud aumentaron de una manera sin precedentes en la segunda mitad del siglo 20 (Antrop, 2004). Los nuevos elementos y estructuras se imponen sobre el paisaje tradicional que se vuelve altamente fragmentado y pierde su identidad. Frecuentemente, los procesos acelerados de cambios en las cubiertas llevan a una sustitución de los hábitats naturales o seminaturales por otros antrópicos. Estos cambios alteran el funcionamiento y los servicios que proveen los ecosistemas como la provisión de agua, la fertilidad del suelo y son especialmente críticos en la región mediterránea (Schroter et al. 2005).

El análisis del paisaje provee una escala adecuada para análisis de los cambios de la cobertura del suelo. La estructura del paisaje está caracterizada por la composición y la configuración. La composición es la proporción del paisaje ocupada por elementos de diferentes tipos. La configuración es la disposición espacial de los elementos y determina el grado de fragmentación o de conectividad de un paisaje (Forman, 1995). Diversos trabajos muestran que la configuración del paisaje afecta la distribución y la persistencia de las especies. Por ejemplo, aspectos como el tamaño de las teselas o manchas de hábitat o la distancia entre ellas tienen efectos sobre abundancia de especies de borde o las de interior (Turner 2005). La configuración del paisaje también influye en los efectos o en la dispersión de perturbaciones como vientos, incendios o en la colonización de especies invasoras (Pino et al. 2006).

Los patrones de paisaje y los cambios pueden considerarse variables integrativas que dependen tanto de factores naturales como de socioeconómicos. Black et al. (2003) evaluaron el papel de factores económicos, demográficos, culturales, topográficos y geológicos sobre los cambios del patrón espacial de bosque desde 1930 a 1990. Sus resultados muestran que los factores sociales como el sistema propiedad de la tierra, la estructura de los mercados y los sistemas de valoración cultural se imponen sobre las variables biofísicas en los cambios de patrones de paisaje en todas las escalas. Interacciones entre la posición en el paisaje y la propiedad de la tierra resultaron factores determinantes de los patrones de las cubiertas y de los cambios (Wear y Bolstad, 1998).

La Región Metropolitana de Barcelona

La región metropolitana de Barcelona (RMB) es una de las zonas más urbanizadas de Europa. En una superficie de 3.200 km² tiene una densidad de 1.300 habitantes por km² (Pino et al, 2000). Actualmente, la estructura de la RMB es un gran centro compacto formado por la ciudad de Barcelona y ciudades adyacentes, rodeados por dos anillos de diferente densidad de ocupación y finalmente 7 sub-centros auto-suficientes en

términos de ocupación y servicios (Catalán et al, 2008). La RMB alberga espacios naturales de una considerable diversidat y valor ecológico como el Montseny, Sant Llorenç del Munt, el Corredor del Montnegre, la Sierra de Collserola o el Massís del Garraf.

Al igual que en regiones del mediterráneo, desde la década de 1950 la RMB ha experimentado un proceso acelerado de cambios del uso del suelo (Antrop 2004, Gerard et al. 2010). Resultados recientes del análisis de cambio en la composición del paisaje en la RMB en los últimos 44 años evidencian procesos de abandonamiento e incremento de los bosques en las zonas de montaña que determinan una disminución gradual de la diversidad y de la complejidad de paisaje. En áreas relativamente llanas y en las costas se observan procesos de intensificación agrícola y de expansión urbana (Pino et al., 2008, Pino y Basnou 2010). En 1956 el paisaje consistía principalmente en un 47% de campos agrícolas y 35% de bosques mientras que las áreas urbanas cubrían solamente 4% del territorio. En el año 2000, los campos agrícolas cubrían el 21% y en su mayoría se han convertido en Bosques o en áreas Urbanas cuya proporción en la RMB pasó a se de 39% y 17.6% respectivamente.

Este trabajo de master pretende complementar los análisis de composición del paisaje de la RMB recientemente realizados (Pino y Basnou 2010). La cartografía temática de alta resolución del mapa de cubiertas del suelo de 1956 (CREAF, 2010) y del 2005 (CREAF, 2005- 2007) generada recientemente siguiendo la misma metodología brinda la posibilidad de estudiar el paisaje de manera continua para toda la RMB. Este trabajo de master representa la primera aproximación al análisis de la configuración del paisaje y los cambios ocurridos en los últimos 50 años en la RMB.

Las preguntas se buscan responder este trabajo son: ¿Como era la configuración paisaje de la región Metropolitana de Barcelona en el año 1956 y en el año 2005? ¿Cuales fueron los cambios en la configuración del paisaje y cual es su distribución espacial? ¿Cómo se relaciona la configuración del paisaje con variables fisiográficas?

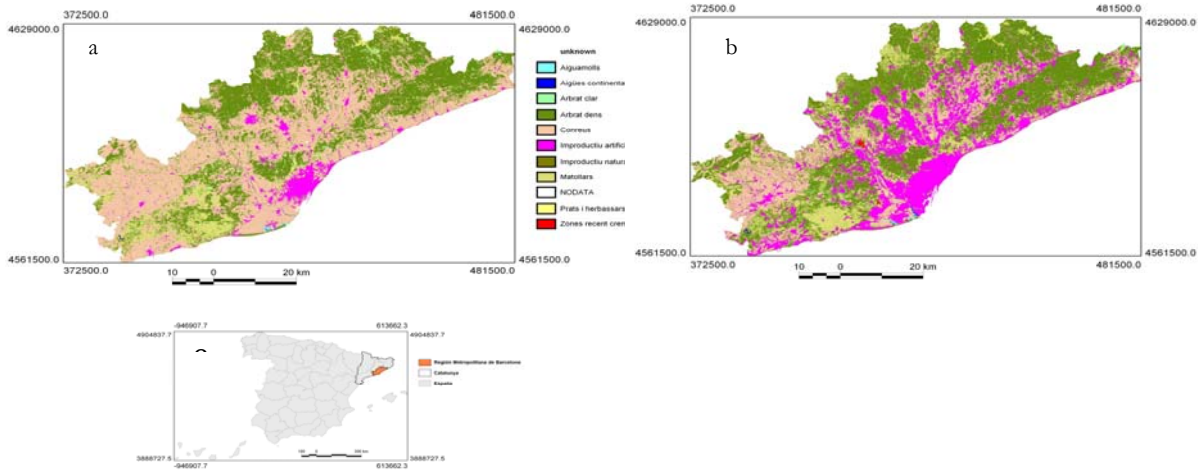

Figura 1: Mapa de cubiertas del suelo de la Región Metropolitana de Barcelona. Leyenda Nivel 1F del MSC 2005. a. Año 1956. b.2005 c. Ubicación de la región metropolitana de Barcelona en España.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Cálculo de los Índices de Configuración del Paisaje

Con el fin de facilitar la comparación entre el Mapa de Cubiertas del Suelo del año 1956 y el del año 2005 y de reducir el tiempo de cálculo de la métricas de paisaje se han generado los Mapa de Cubiertas del Suelo de la RMB con leyenda nivel 1F, ampliación forestal (Figura 1 a y b). Estos mapas se obtuvieron a partir del Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña del año 2005 (MCSC 2005, CREAF 2005-2007), cuya leyenda tiene un Nivel 5 de complejidad con 226 categorías y del Mapa de Cubiertas del Suelo de la RMB del año 1956 (MCSC 1956, CREAF 2010), con leyenda Nivel 3 de 49 categorías. Las leyendas de estos mapas son complejas y poseen múltiples tablas asociadas que dificultaban los procesos de cálculo subsiguientes. Para simplificar los datos, tanto los polígonos como las tablas, el primer paso fue fusionar y modificar los enlaces a las tablas asociadas. Este proceso y todos los proceso de análisis subsiguientes de este trabajo se realizaron con el programa Miramon v7 (Pons, 2010), en particular este proceso se realizó con los módulos MIRADADES y GEMM. El segundo paso fue

reciclar los polígonos con el módulo CICLAR. Se utilizó como criterio de fusión el campo de la leyenda Nivel 1F. Además, se eliminaron los registros múltiples para un mismo identificador gráfico, manteniendo el primer registro, con el módulo GESTAD. Las leyendas nivel 1F de cada uno de los mapas diferían levemente en el número y tipo de clases. Fue necesario homogeneizar las leyendas mediante una reclasificación del mapa del 2005 nivel 1F (Tabla 1).

Categoria 1F del MCS 2005	Reclasificación a cNivel 1F del MCS 1956
Aiguamolls	Aiguamolls
Aigues continentals	Aigues continentals
Arbrat clar	Arbrat clar
Arbrat dens	Arbrat dens
Improductiu natural	Improductiu natural
Matollars	Matollars
Prats i herbassars	Prats i herbassars
Zones cremades	Zones recent cremades
Improductiu artificial	Improductiu artificial
Assentament agrícola residencial	Improductiu artificial
Conreus	Conreus
Horta familiar	Conreus
Mar	NODATA
Piscifactories i conreus agrícoles marins	NODATA

Tabla 1: Reclasificación del mapa de cubiertas del suelo de la Región metropolitana de Barcelona, leyenda 1f. En negritas se resaltan las clases reclasificadas.

2.2 Índices de Configuración del Paisaje

Se calcularon cinco métricas de paisaje que capturan los aspectos más importantes la configuración del pasaje y que presentan baja correlación entre si: El tamaño de las manchas, la Diversidad y la Fragmentación (Turner et al. 2001, McGarigal y Marks, 1995, Jaeger 2000). El tamaño de las manchas, provee una idea del grado de subdivisión del paisaje. Un paisaje caracterizado por manchas pequeñas (grano fino) posee un alto grado de subdivisión contrariamente a un paisaje con manchas de gran tamaño (grano grueso). Para este trabajo se estimó el tamaño de mancha o grano, máximo y promedio (Gmax y Gmean). La diversidad del paisaje, medida a partir del índice de Shannon, considera tanto la riqueza como la equitatividad. El índice aumenta a medida lo hace el número de cubiertas diferentes (aumento de la riqueza) y/o a medida que la distribución proporcional del área entre las diferentes cubiertas se vuelve más equitativa. Como indicadores de la fragmentación se calcularon el número de polígonos en relación al número de cubiertas del suelo (PolCob) y el effective mesh size (Mesh, Jaeger 2000). Mientras que el PolCob tiene en cuenta el número de elementos y aumenta con el grado de fragmentación, el Mesh tiene en cuenta la superficie y sus valores se interpretan como el tamaño de un área que es accesible cuando comienza el movimiento en un punto elegido al azar sin encontrar una barrera física dentro del área analizada. Por lo tanto, a mayores valores de Mesh menor es la fragmentación. Este índice es utilizado actualmente por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA: European Environment Agency) como medida de la fragmentación. La conectividad del paisaje es otra métrica fundamental pero la falta de medidas estándar y el extenso tiempo de cálculo que requiere este índice, excedía los plazos del trabajo de master.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de cada métrica fueron:

- Tamaño de grano máximo (ha): Máximo del área de las manchas / 10000
- Tamaño de grano promedio (ha): Promedio del área de las manchas / 10000
- Índice de Shannon: Suma (P_i* ln P_i) donde P_i = es la proporción del paisaje ocupada por un determinado tipo de cubierta.
- PolCoB: Número de polígonos/ Número de cubiertas
- Effective Mesh size: Suma (área polígono^2)/ 10000 * suma (área polígono)

Las métricas del paisaje fueron calculadas de manera independiente para el año 1956 y 2005 utilizando un proceso BAT específico. Los cálculos se realizan mediante el procedimiento de "ventana móvil" en el cual una ventana de tamaño y forma específico recorre el área de estudio generando valores de cada métrica del paisaje dentro del ámbito de la ventana. Los datos de entrada del programa fueron los mapas RMB2005_1F y RMB1956_1F en formato vectorial y en formato raster y un mapa de 51.885 puntos distribuidos uniformemente cada 250m sobre toda la RMB. La forma de la ventana móvil fue un área circular de 1,5km de diámetro con centro en cada uno de los puntos (Figura 2b). Las ventanas de puntos adyacentes superponen gran parte del área de muestreo (Figura 2c). En cada iteración, todos los polígonos contenidos dentro de la ventana se incluyeron de forma completa en el cálculo de las métricas. Los polígonos pudieron intervenir más de una vez en los cálculos de las métricas de paisaje si estaban incluidos en el ámbito de la ventana de las iteraciones subsiguientes. Como salida del proceso BAT se generó un archivo de puntos con los resultados del cálculo de las 4 métricas de paisaje para cada punto considerando el paisaje del ámbito de la ventana (Figura 2). A partir de estos puntos, con el módulo TIRAVEC se generaron 4 mapas utilizando cada uno de los índices de paisaje en cada caso como campo para generar el raster. El costado de celda fue 250m. Estos mapas permitieron visualizar la variación espacial de los índices de paisaje de manera continua para la RMB. Se realizó una descripción estadística de los valores obtenidos

para cada índice de paisaje. Dadas las características de los datos, en el caso del Tamaño de Grano Medio se realizó una trasformación aritmética aplicando sobre el mapa el logaritmo neperiano con el fin de lograr una mejor visualización de los mapas.

a b

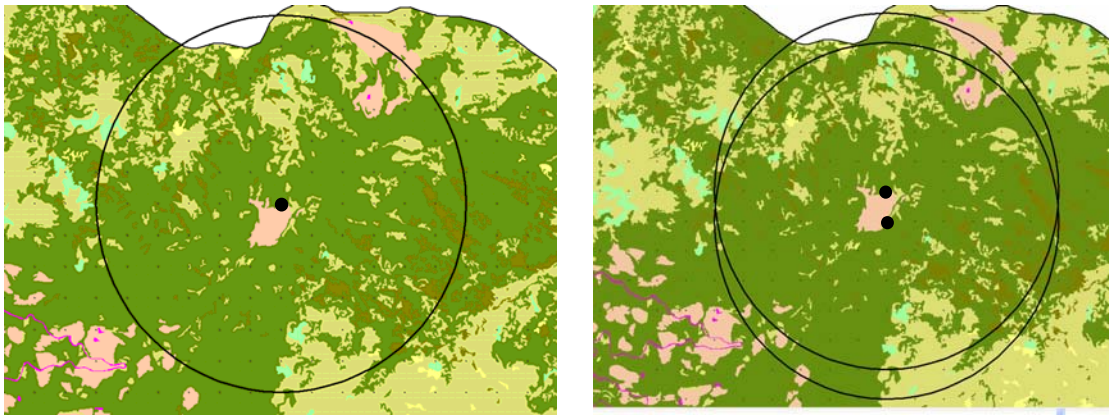

Figura 2: Punto central y área circular sobre el cual se calcularon las métricas de paisaje. a. Primera iteración. b. Segunda iteración visualizando iteración anterior.

Los resultados obtenidos para el Tamaño de Grano Máximo se excluyeron del trabajo. Los patrones de GMAX y del índice Mesh resultaron muy similares entre si. Ambas variables presentaron una alta correlación tanto para el año 1956 como para el 2005 (Tabla 2).

2.3 Análisis de los cambios en la configuración del paisaje entre 1956 y 2005

La variación temporal entre 1956 y 2005 de cada una de las métricas de paisaje se calculó a partir de los mapas formato raster como porcentaje de cambio relativo al año 1956 utilizando la fórmula: (valor de índice 2005 – valor del índice 1956 *100/ valor del índice 1956). La evaluación del cambio fue píxel a píxel y para realizar los cálculos se utilizó el módulo CALCIMG de Miramon. Esta variable de cambio, toma valores positivos cuando el índice de paisaje fue mayor en el 2005 que en 1956 y negativos cuando el índice de paisaje fue mayor en 1956 respecto al 2005. De la misma manera que para los índices de paisaje se realizó una descripción estadísticas de los datos obtenidos. Para obtener una mejor visualización de los patrones de cambio se aplicó sobre los mapas la transformación: Log (valor + 101).

2.4. Relación entre los índices de paisaje y las variables fisiográficas

Como variables fisiográficas se incluyeron en el análisis la elevación, la pendiente, la distancia a Barcelona, la distancia a la costa, la distancia a las vias de comunicación existentes en el año 1956 y la distancia a centros urbanos existentes en el año 1956. La información de estas variables se obtuvo a partir de mapas en formato raster. El Modelo Digital de Elevaciones (ICC, Versión 2) tiene una resolución espacial de 30 m. El Modelo digital de pendientes deriva del Modelo de elevaciones (ICC, Versión 1 - 1992-93), los valores están en calculados como porcentaje y la resolución es de 45 m. El resto de los mapas de distancia fueron generados por el grupo de trabajo (Figura 3). Las vías de comunicación y los centros urbanos del año 1956 se obtuvieron a partir del MCS56 (CREAF, 2010) mediante una selección por atributos de los polígonos identificados como carreteras, vías de ferrocarril y de urbano compacto. A partir de estos vectores y del de la línea de costa y del límite de la cuidad de Barcelona se generó el mapa de distancias con el módulo BUFDIST.

Mediante un análisis multivariante se analizó la relación entre los índices de paisaje y las variables fisiográficas (Leps y Smilauer, 2003). Se realizó un RDA (Redundancy Analysis) con 500 puntos de muestreo seleccionados al azar a partir de los puntos obtenidos como resultado del cálculo de los índices del paisaje del año 1956 y del 2005. La información de estos puntos fue enriquecida con las variables fisiográficas mediante sucesivas combinaciones analíticas de capa, módulo COMBICAP de Miramon. Previamente se testeó la correlación entre todas las variables (Tabla 2). Se consideraron variables correlacionadas las que tuvieron un índice de correlación de Pearson mayor a 0.7. El Grano máximo presentó una alta correlación con el Índice Mesh y fue excluido de los resultados. El RDA, se realizó con el programa CANOCO V 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002). Las variables se estandarizaron y centraron debido a las diferencias intrínsecas de los valores. Se usó un procedimiento Foward, con test de permutaciones de Monte Carlo, k: 6 y 499 permutaciones.

	GRMAX_05	*GRMEAN_05*	*SHA_05*	*POLCOB_05*	*MESH_05*	*GRMAX_56*	*GRMEAN_56*	*SHA_56*	*POLCOB_56*	*MESH_56*
GRMAX_05	1									
GRMEAN_05	0.05	1								
SHA_05	0.38	-0.28	1							
POLCOB_05	0.13	-0.22	0.59	1						
MESH_05	**0.99**	0.07	0.39	0.11	1					
GRMAX_56	0.05	0.02	-0.16	-0.11	0.00	1				
GRMEAN_56	0.02	0.48	-0.17	-0.18	0.01	0.20	1			
SHA_56	0.12	-0.18	0.44	0.23	0.11	-0.17	-0.25	1		
POLCOB_56	-0.04	-0.10	0.03	0.42	-0.05	-0.02	-0.24	0.21	1	
MESH_56	-0.06	0.05	-0.26	-0.19	-0.11	**0.97**	0.21	-0.21	-0.04	1

Tabla 2: Análisis de correlación (coeficiente de correlación de Pearson) entre las variables del año 1956 (_56) y 2005 (_05). Las variables con un coeficiente de correlación mayor a 0.7 se resaltan en negritas.

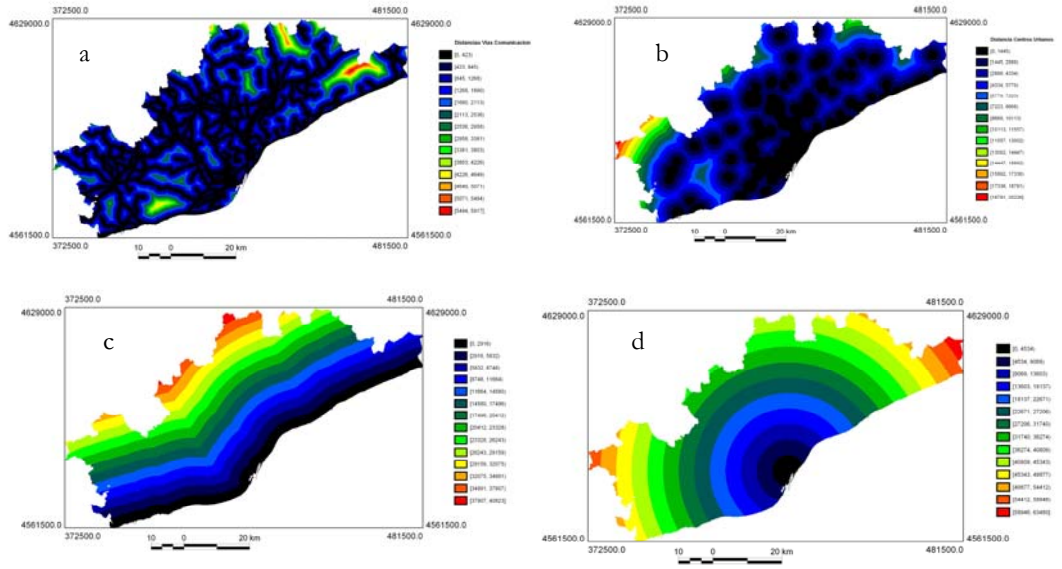

Figura 3: a) Distancia a carreteras del año 1956. b) Distancia a centros Urbanos mayores a 10 ha del año 1956. c) Distancia a la Costa. d) Distancia a Barcelona.

3. RESULTADOS

3.1 Índice de Tamaño de Grano Medio

En el año 1956 el tamaño del grano medio más frecuente en la región metropolitana de Barcelona estuvo entre 1.5 y 2 km² (Tabla 3, Figura 4a). La variación de los tamaños de grano medio fue de 0.02 a 136.17 km². La distribución fue asimétrica y por lo tanto la representatividad de los tamaños medios y mayores fue baja. El 90.4% de los datos estuvieron entre 2 y 4 km². En el año 2005, aumentó el tamaño promedio respecto a 1956 (Tabla 3). El tamaño medio más frecuente fue 2.5 y 3km² (Figura 4b). La variabilidad espacial reflejada por el coeficiente de variación fue 6.1%, tres veces mayor que en el año 1956 donde fue 1.9 % (Tabla 3). El rango también aumento, con valores entre 0.01 y 628.19 km² (Tabla 3). La distribución de los valores también fue asimétrica pero con mayor peso en la cola de la distribución ya que aumentó la frecuencia de sitios con tamaño de grano medio mayores a 10km² (Figura 4b).

Grano Medio	1956 (km2)	2005 (km2)
Media	2.08	6.79
Mediana	1.49	2.45
Desviación estándar	4.01	41.26
CV%	1.9	6.1
Rango	136.15	628.18
Mínimo	0.02	0.01
Máximo	136.17	628.19

Tabla 3. Estadística de las imágenes de Tamaño de Grano Medio del año 1956 y 2005. n: 51885 píxeles

La visualización de la variación espacial del tamaño de grano medio mejoró al aplicar la transformación logarítmica (Figura 5). Mediante esta transformación disminuyó la distancia entre los extremos normalizando la distribución de los datos (Figura 4c y d). La representatividad de los valores medios mejoró permitiendo visualizar la heterogeneidad espacial del tamaño de grano medio en la RMB.

Tanto en 1956 como en el 2005 los valores de grano medio más altos estuvieron concentrados en la ciudad de Barcelona (Figura 5c y d). Algunas áreas del Valles Oriental y del Maresme como las de las Serres de Montnegre-el Corredor, municipios de San Celoni, La Garriga, Sant Feliu de Codines, Vilalba Sasserra, Llinars del Vallès y Dos Rius presentaron también un grano medio relativamente alto. Esto implica un bajo grado de subdivisión del paisaje en estas zonas. Los tamaños de grano medio más pequeños tuvieron un patrón más disperso en la RMB. Las áreas de menor tamaño en 1956 se presentaron en la zona del Vallés Occidental (ej. Massis del Montseny, Matadepera), Alt Pendes (Sant Llorenç d'Hortons), el Maresme (ej. Palafolls y Tordera) y Massís del Garraf (Alt Penedès y el Baix Llobregat). En el 2005, estas áreas se redujeron a la zona del Massís del Garraf (Alt Penedès y el Baix Llobregat) y zonas de Sant Llorenç del Munt i l'Obac y Gallifa en el Vallès Oriental.

El cambio entre 1956 y 2005, se caracterizó por una mayor proporción de aumentos del tamaño de grano medio. El rango de variación fue grande de -99 a 64948 % (Tabla 4). La distribución de los porcentajes de cambio fue asimétrica con una mayor proporción de cambios entre 0 y 200%. Sin embargo, los valores extremos de la distribución mayores a 300%, también tuvieron una frecuencia relativamente alta (Figura 6a).

Cambio 1956- 2005	%
Media	284
Mediana	48
Desviación estándar	1485
CV%	5.2
Rango	64948
Mínimo	-99
Máximo	64849

Tabla 4: Información estadística de la imagen de cambio entre 1956 y 2005 del Tamaño de Grano Medio. n:51885 píxeles

Dadas las características de la distribución de los datos, la transformación logarítmica mejoró la visualización de la variación espacial de los cambios (Figura 7). La distribución de los datos tendió a una distribución Normal (Figura 6b). Esto permitió discriminar en el mapa las disminuciones del tamaño de grano medio entre 1956 y 2005 que luego de la transformación logarítmica quedaron comprendidos en valores entre 0.35 y 2.

El tamaño medio del grano disminuyó principalmente en Valles Oriental, municipios de Tagamanent, Sant Quirze Safaja, Sant Feliu de Codines, la Garriga. También en el macizo del del Montnegre- Corredor. Los mayores aumentos ocurrieron la comarca del Barcelonés, en los municipios de Barcelona, l'Hospitalet de Llobregat, Sant Adrià de Besòs y también en el Maresme, en parte de los municipios de Palafolls y Tordera (Figura 7b).

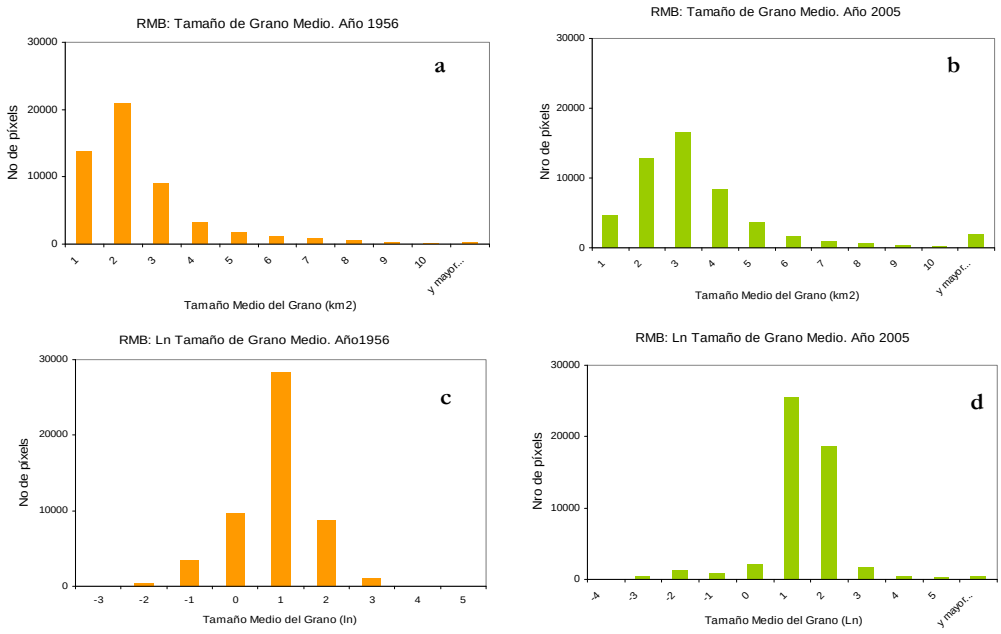

Figura 4: Histograma de la distribución del Tamaño de Grano Medio, n: 51885 pixeles. Datos Originales: a. Año 1956 y b. Año 2005. Datos transformados: ln (x). c. Año 1956 y d: Año 2005. Nótese que las escalas de los gráficos difieren entre sí.

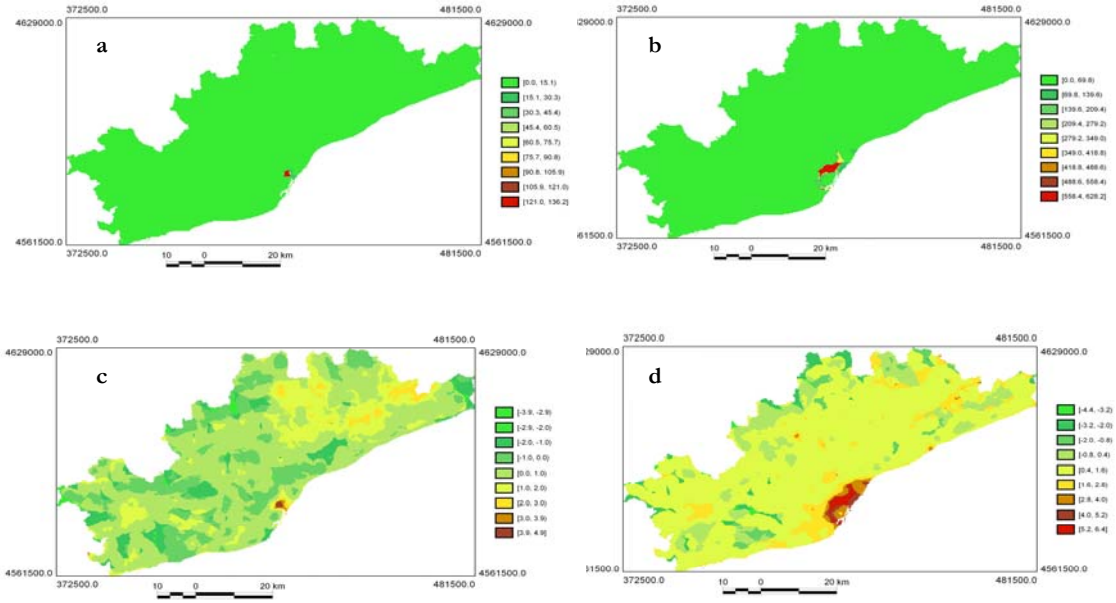

Figura 5: Variación espacial del Índice de Tamaño de Grano Medio en el año 1956 y en el 2005. a y b. Imagen sin transformar, valores en km². c y d. Imagen transformada: ln (x)

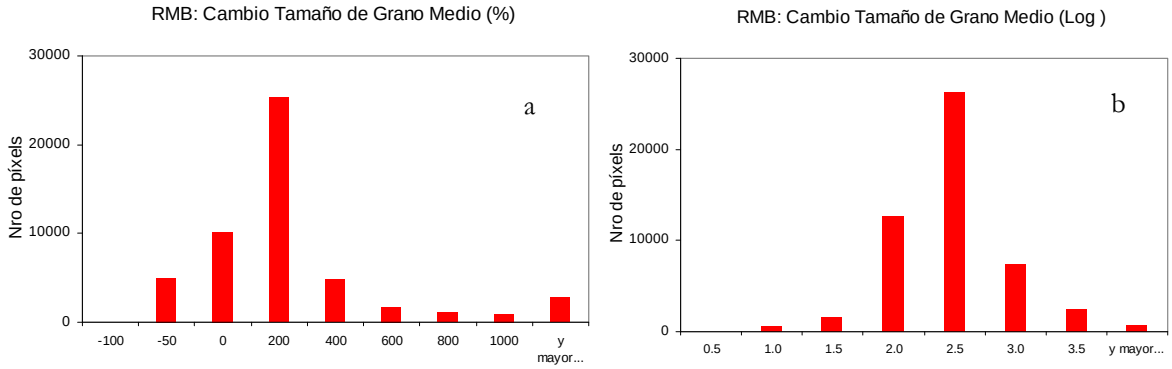

Figura 6: Histograma de la imagen de Cambio de Tamaño de Grano Medio entre 1956 y 2005, n= 51885 píxeles.
a. Imagen original (%). b. imagen transformada: Log (x+ 101)

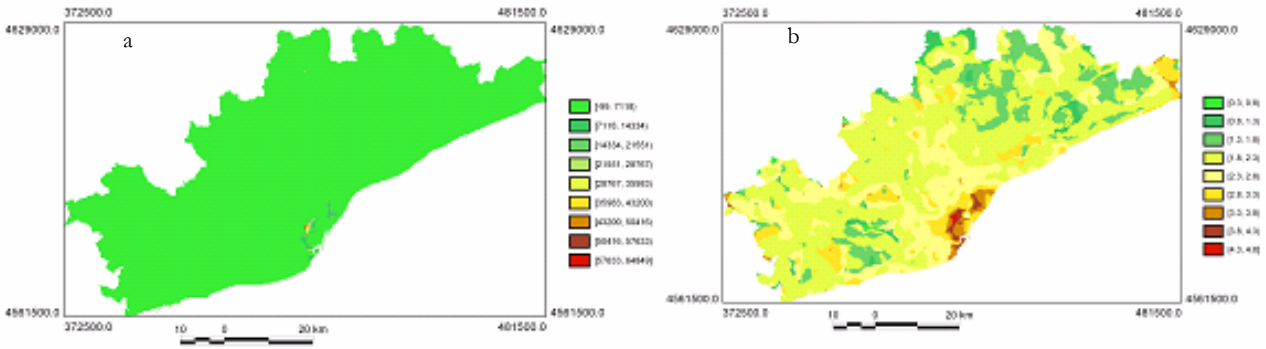

Figura 7: Variación Espacial del Cambio del Tamaño de Grano Medio entre 1956 y 2005. a. imagen sin transformar. b. imagen resultado de la transformación: Log (x+ 101)

3.2 Índice de Diversidad de Paisaje

La diversidad de Paisaje en el año 1956, tomó valores entre 0 y 2.87 (Tabla 5). La mayor frecuencia estuvo entre 1 y 1.5 (Figura 8a). En el año 2005, si bien el rango fue similar al de 1956, los valores tendieron a aumentar. La distribución de los datos fue simétrica y la mayor frecuencia estuvo entre 1.5 y 2.5 (Figura 8b). Al incluir en el análisis todos los tipos de cubiertas el índice de diversidad evidenció como áreas de baja diversidad las zonas homogéneas, tanto de áreas urbanas como naturales, con baja riqueza de tipos de cubiertas y/o desigualmente distribuidas. Por el contrario, una alta diversidad implicó tanto una heterogeneidad de cubiertas como cubiertas igualitariamente distribuidas. Por ejemplo, en 1956 los municipios del Prat de Llobregat, Santa Coloma de Gramenet y Moncada i Reixac tuvieron la mayor diversidad de paisajes (Figura 9a). Algunas áreas de baja diversidad fueron del macizo de lMontnegre- Corredor y la ciudad de Barcelona.

En el 2005, la diversidad aumentó en todo el territorio (Figura 9b). La mayor diversidad ocurrió en el municipio de Castellbisbal, en parte de Moncada i Reixac y en el Delta del Llobregat.

Valores altos de diversidad se ven a lo largo de la costa del Maresme, desde Caldes d'Estrac a Malgrat de Mar y hacia el sur de la RMB. Al igual que en 1956 se observan áreas de baja diversidad en Barcelona, en el Massís del Montseny y también Sant Llorenç del Munt y l'Obac.

Índice de Shannon	1956	2005
Media	1.22	1.55
Mediana	1.25	1.67
Desviación estándar	0.40	0.54
CV	0.3	0.3
Rango	2.87	2.91
Mínimo	0.00	0.00
Máximo	2.87	2.91

Tabla 5: Información estadística de las imágenes del año 1956 y 2005 del índice de Shannon

El 65% de la RMB registró un aumento de la diversidad entre 25 y 100% (Figura 10). Disminuciones de diversidad ocurrieron solamente en el 12% del territorio y fueron entre 25 y 50% (Figura 10). En la escala logarítmica los cambios negativos quedaron representados por los valores menores a 2. Estos valores se ubicaron en la ciudad Barcelona y el macizo del Montseny. Los mayores cambios ocurrieron principalmente en el interior del municipio de Gavá, de Vilanova i la Geltrú y en Sant Boi de Llobregat (Figura 10).

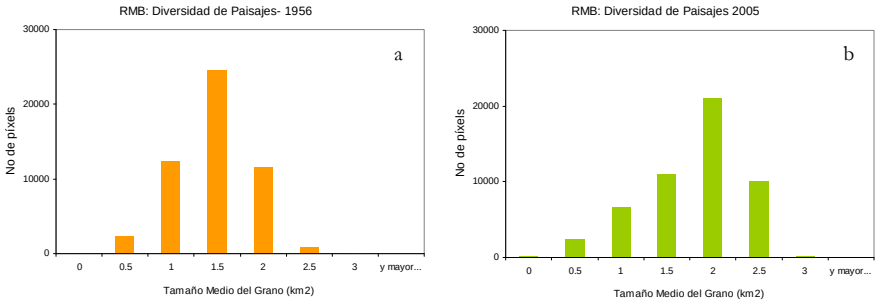

Figura 8: Histograma de la imagen del Índice de Diversidad de Shannon. n= 51885 pixeles. a. Año 1956 b. 2005.

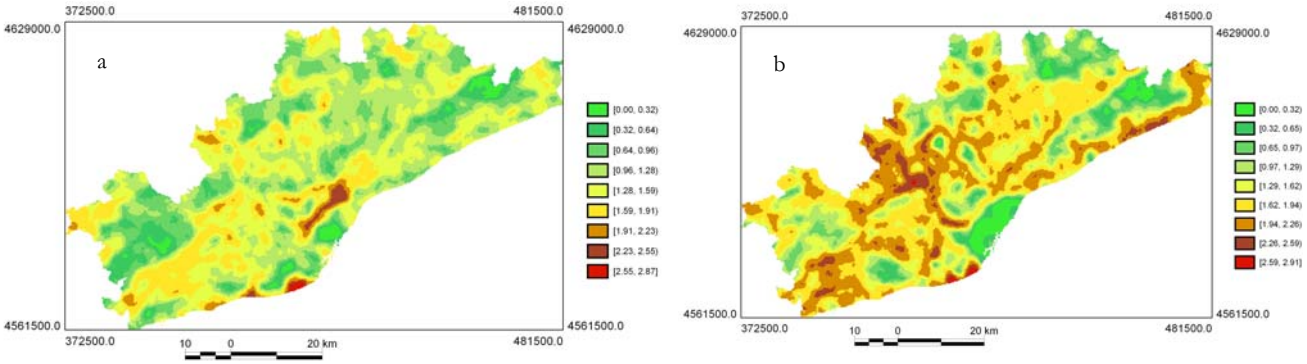

Figura 9: Diversidad de Paisaje de la Región Metropolitana de Barcelona (Índice de Shannon). a. Año 1956 b. Año 2005

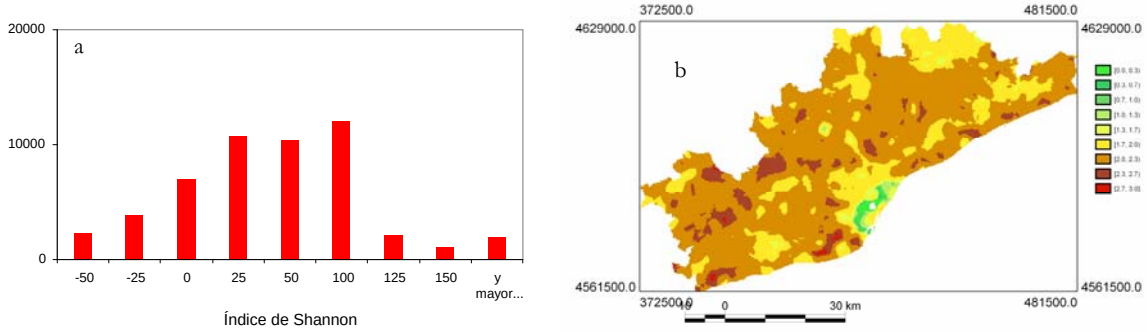

Figura 10: Cambios entre 1956 y 2005 de la diversidad de paisaje. a. Histograma de la imagen de cambios n= 51885 píxeles. b. Variación espacial de los cambios (Log).

3.3. Índice de Fragmentación del paisaje

El índice PolCob (Número de polígonos/ Número de cubiertas) esta directamente relacionado con la fragmentación. En el año 1956, valores de PolCoB entre 15 y 20 tuvieron una mayor frecuencia en la RMB (Tabla 6, Figura 11 a). En el año 2005, la mayor frecuencia estuvo en valores de PolCob de entre 35 y 40 (Tabla 7, Figura 11b). Tanto en el 1956 como en el 2000, la variabilidad espacial fue relativamente baja casi 0.6 y 0.5 % respectivamente (Tabla 6). Los valores máximos fueron similares entre ambos años y se ubicaron en el municipio de Matadepera (Figura 12). Los patrones incipientes del 1956 se intensificaron en el 2005 donde hubo incrementos del PolCob en los municipios de Olèrdola y Canyelles, en el Alt Penedés-Garraf y en al norte de la RMB desde Sant Vicenç de Montalt hasta Calella (Figura 12). La ciudad de Barcelona, apareció como un área homogénea, poco fragmentada en ambos años.

Los cambios fueron relativamente moderados y en mayor proporción aumentos entre 50% y 100% (Figura 13a). Los mayores cambios ocurrieron en tres zonas: En el Valles, en parte de los municipios de Castellterçol, Sant Feliu de Codines, Caldes de Montbui, en el Alt Penedés-Baix Llobregat, municipios de Olesa de Bonesvalls y Vallirana, y en el Garraf , interior de Vilanova i la Geltrú. (Figura 13b).

PolCob	*1956*	*2005*
Media	19.32	35.62
Mediana	17.50	34.29
Desviación estándar	10.73	16.87
CV	0.6	0.5
Rango	146.67	151.80
Mínimo	1.00	1.00
Máximo	147.67	152.80

Tabla 6: Información estadística de las imágenes del año 1956 y 2005 del índice PolCob: nro de polígonos/ nro de cubiertas

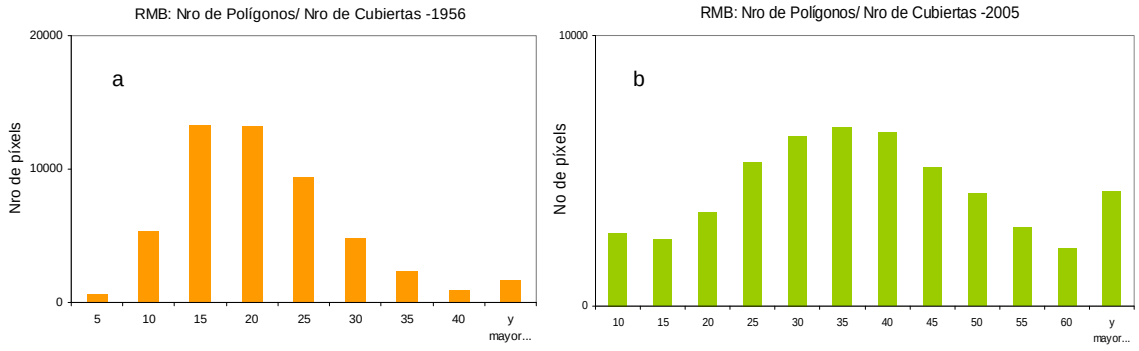

Figura 11: Histograma de la imagen del Índice PolCob: número de de poligonos/ número de cubiertas. n= 51885 pixeles. a. Año 1956 b. Año 2005. Nótese que las escalas de los gráficos difieren entre sí.

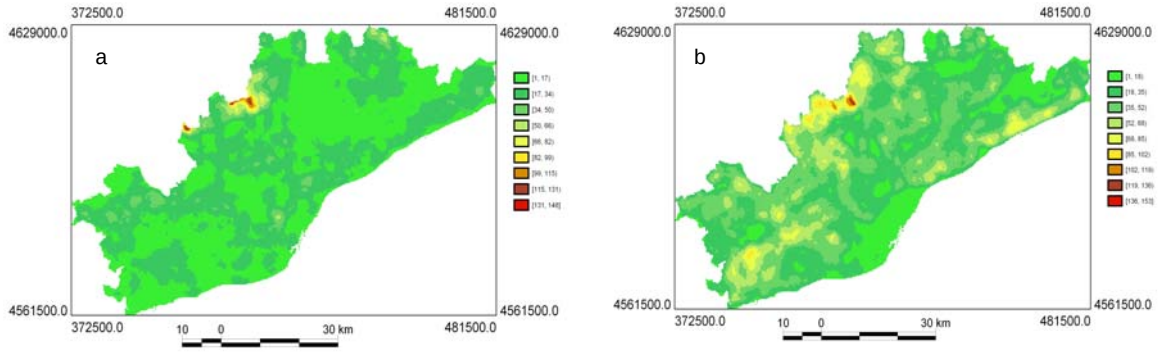

Figura 12: Variación Espacial del Índice de Fragmentación del Paisaje PolCob: número de Polígonos/ numero de cubiertas. a. Año 1956 b. Año 2005.

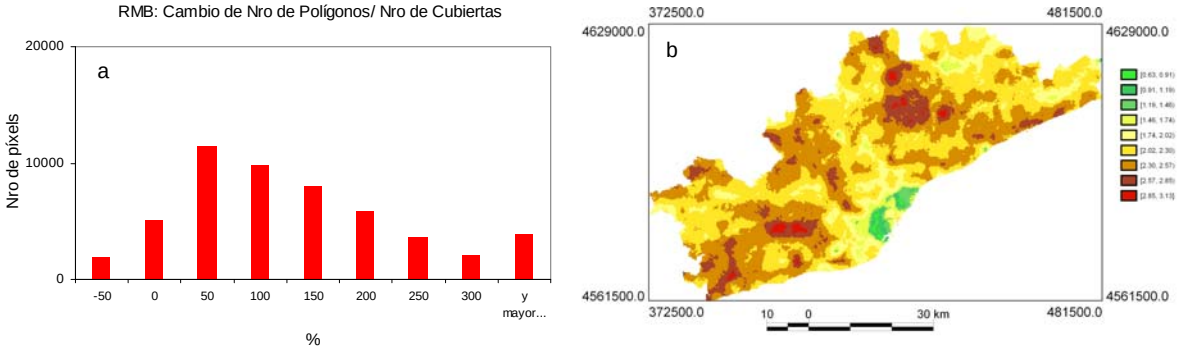

Figura 13: Cambio entre 1956 y 2005 del Índice de Fragmentación del Paisaje PolCob. a. Histograma de la imagen de cambios, n: 51885. b. Variación espacial de los cambios (Log)

El *Effective Mesh Size* (Mesh) esta inversamente relacionado con la fragmentación. Los valores de Mesh más frecuentes en el año 1956 estuvieron entre 100 y 150 km² (Tabla 7, Figura 14a). Las zonas de mayor Mesh, se ubicaron al norte de la RMB principalmente en del macizo del Montnegre-Corredor y en el macizo del Montseny (Figura 15a). En el 2005, los valores fueron aproximadamente 6 veces más altos y estuvieron entre 600 y 650 km² (Figura 14b). La distribución de los valores altos fue casi total en la RMB exceptuando principalmente las Serres de Montnegre-el Corredor, el macizo del Montseny y Garraf (Figura 15b).

El Mesh estuvo altamente correlacionado con el Tamaño del grano máximo (r_{2005}= 0.99, r_{1956}= 0.97, Tabla 2) por lo tanto, valores altos de Mesh estuvieron asociados a tamaños de manchas grandes. Esto es compatible con la interpretación del índice ya que refleja el tamaño de un área que resulta accesible sin encontrar una barrera física. Al incluir en el cálculo del Mesh todos los tipos de cubiertas (bosque, improductivo artificial, etc.), el área accesible puedo ser la de cualquier tipo de cubierta. En el año 1956, altos valores de Mesh podrían estar reflejando las manchas extensas de Bosques en el norte de la RMB contrariamente a los valores bajos de Mesh en el centro y en el sur de la RMB compuesto por manchas de menor tamaño de diferentes cubiertas (Figura 1a). En el 2005, los valores de mesh probablemente estén asociados a las manchas de gran extensión de la clase improductivo artificial y las extensiones continuas de cultivos en la zona del Alt Penedés (Figuras 1b). Las áreas del macizo del Montnegre y el Corredor, el macizo del Montseny y el del Garraf, presentan valores altos de Mesh en 1956 y contrariamente bajos en el 2005. Sin embargo, resultan bajos en términos relativos al resto de los valores de la imagen. El cambio entre ambos años de esas áreas fue muy bajo o nulo (Figura 16b). La variación del mesh entre años fue muy grande con aumentos del 600% en la mayor parte del territorio (Figura 16). Estos aumentos probablemente se asocien conjuntamente al aumento del tamaño del grano máximo y al cambio de tipos de cubiertas entre 1956 y 2005.

Mesh	*1956*	*2005*
Media	112.8	534.6
Mediana	113.8	603.8
Desviación estándar	45.4	171.3
CV%	0.4	0.3
Rango	206.82	627.61
Mínimo	0.40	0.58
Máximo	207.22	628.19

Tabla 7: Información estadística de las imágenes del año 1956 y 2005 del índice Effective Mesh Size

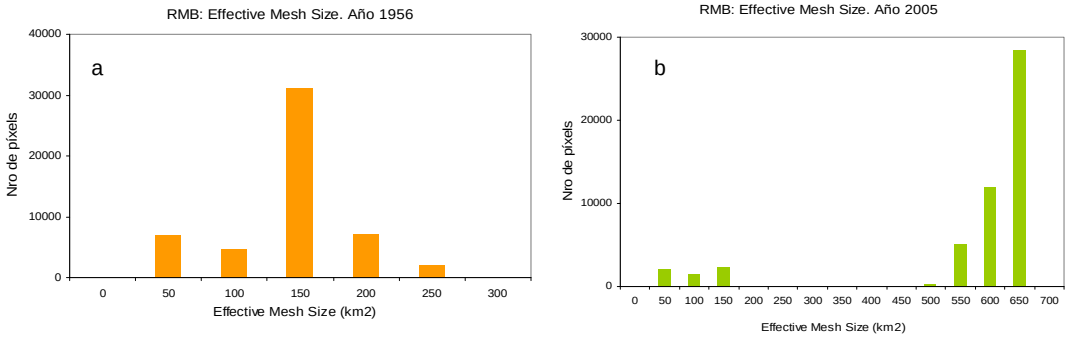

Figura 14: Histograma de la imagen Effective Mesh Size. n= 51885 píxeles. a. Año 1956 b. Año 2005. Nótese que las escalas de los gráficos difieren entre sí.

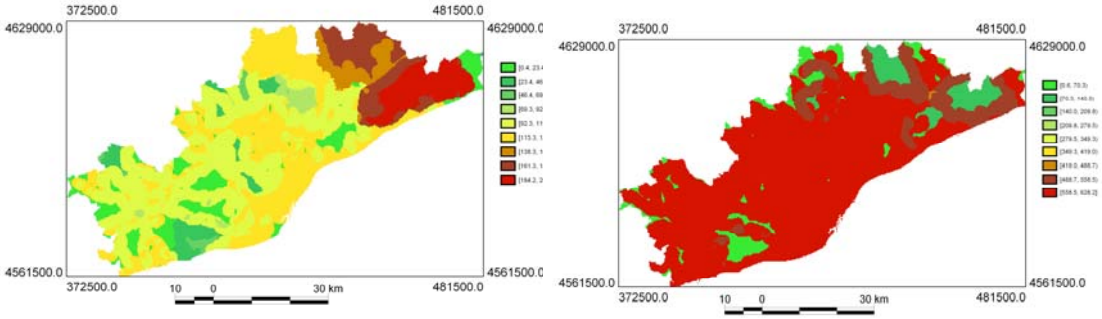

Figura 15: Variación Espacial de la Fragmentación. Effective Mesh Size. a. Año 1956 b. Año 2005.

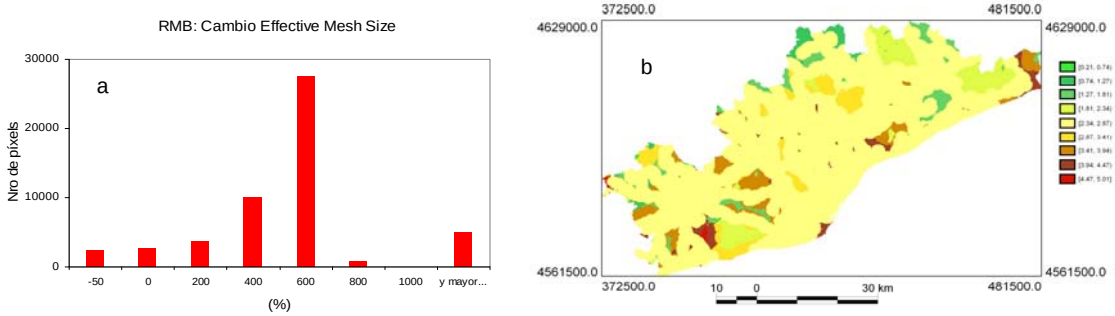

Figura 16: a. Histograma de la imagen de cambios, n: 51885 b. Cambio entre 1956 y 2005 del Índice de Fragmentación.

3.4. Relación entre los Índices de Paisaje y las Variables Fisiográficas

Todas las variables propuestas menos la pendiente estuvieron relacionadas ($p<0.05$) con los índices de paisaje (Tabla 8). El conjunto de la explica el 14.1 % de la variación de los índices de paisaje (Tabla 9).

Según el RDA, se pueden destacar 3 grupos principales de índices de paisaje (Figura 17):
El primer grupo (cuadrante superior izquierda) formado por el conjunto del índice de Nro. de polígonos/ Nro. de cubiertas del 1956 y del 2005 (PCOB_56 y PCOB_05) y el Índice de Shannon de 1956 (SHA 56). Este grupo estuvo relacionado significativamente con la distancia a la costa ((D_COSTA), la distancia a centros urbanos de 1956 (DUR 56) y elevación (ELEV). El PCOB estuvo asociado en mayor medida con las distancias medias a la costa, y en términos relativos, el PCOB_05 con menores distancias a la costa respecto al PCOB_56.
El segundo grupo (en el cuadrante inferior de la derecha) formado por el Effective mesh size (MESH 56) y con menor peso en el modelo, el Tamaño de grano promedio de 1956 (GMEAN 56) estuvieron relacionados con la distancia a las vías de comunicación de 1956 (DVIA_56) y la distancia a Barcelona (D_BCN).
El tercer grupo (cuadrante inferior izquierda) formado por Effective mesh size y el índice de

Shannon del 2005 (MESH_05 y SHA 05) con una distribución opuesta al segundo grupo en el espacio de los ejes.

El índice Shannon de 1956 y el tamaño del grano medio de 1956 y del 2005 tienen menos peso en el análisis, su distribución por lo tanto, podría estar relacionada con variables que no se han incluido en el modelo.

Variables	Efectos Condicionados. Var.N	Lambda A	P	F
Distancia a vias de comunicación del 56 (DVIA_56)	**4**	**0.09**	**0.002**	**48.6**
Elevación (ELEV)	**5**	**0.03**	**0.002**	**19.61**
Distancia a la costa (D_COSTA)	**1**	**0.02**	**0.002**	**9.15**
Distancia a Barcelona (D_BCN)	**2**	**0.01**	**0.002**	**8.68**
Distancia a centros Urbanos de 1956 (DUR_56)	**3**	**0.02**	**0.002**	**7.47**
Pendientes	6	0	0.06	1.89

Tabla 8: Nivel de significación de las variables del modelo. Las variables significativas (P≤ 0.05) se resaltan en negritas.

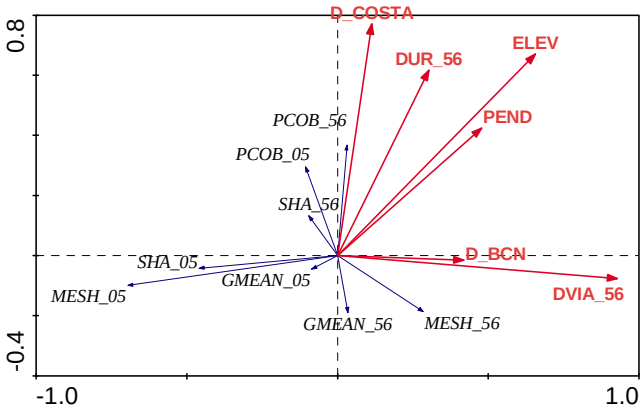

Figura 17: Diagrama de Ordenación de las variables basado en el RDA (Redundancy Analysis). Índices de paisaje (negro): Tamaño de grano promedio (Gmean), Índice de Shannon (SHA_año), Nro. de polígonos/ Nro. de cubiertas (PCOB_año), Effective mesh size (Mesh_año). Variables Fisiográficas (rojo): Elevación (ELEV), Pendiente (PEND), Distancia a Barcelona (D_BCN), Distancia a la costa (D_COSTA), Distancia a vías de comunicación del año 1956 (DVIA_56)y Distancia a centros urbanos del año 1956 (DUR_56). La escala de los ejes corresponde a la desviación estándar.

Ejes	1	2	3	4	Varianza Total
Eigenvalues	0.1	0.04	0.02	0.007	1
Correlación Especie-Ambiente	0.7	0.40	0.38	0.26	
Porcentaje de la varianza acumulado					
Variables de Paisaje	10.1	14.1	16	16.7	
Suma de los eigenvalues					1
Suma de eigenvalues canonicos					0.17

Tabla 9: Porcentaje de la varianza explicada por las variables ambientales. La varianza de los dos primeros ejes se resalta en negritas.

4. Discusión

¿Cómo cambió la configuración paisaje de la región Metropolitana de Barcelona en los últimos 50 años?

Los resultados de este trabajo muestran que lo que ha ocurrido con mayor frecuencia fue un aumentó del Tamaño de grano medio y la diversidad de las cubiertas. Este aumento podría deberse a un incremento de la riqueza clases en el paisaje o por a una distribución más equitativa de las mismas. También se han registrado aumentos en el número de polígonos en relación al número de cubiertas, mostrando un aumento de la fragmentación. Contrariamente, se vio un aumento del effective mesh size que tiene una relación inversa con la fragmentación. Sin embargo. Este resultado podría deberse a la formula utilizada para el cálculo del Mesh que incluyo la cubierta improductivo artificial. Esta cubierta, disminuyó su fragmentación, aumentó su tamaño y conectividad en estos años. La correlación del Mesh con el tamaño del Grano máximo apoya esta idea. Los resultados evidencian que los procesos no son homogéneos en el territorio (Figuras 4- 15). La variación espacial de los índices apoya la idea de que en la RMB ocurren procesos opuestos de modificación del paisaje. Mientras que las áreas de montañas y las áreas urbanas tienden a homogeneizarse, las áreas llanas tienden a diversificarse (Pino et al. 2010)

¿Cómo se relacionó la configuración del paisaje con las variables fisiográficas?

Los índices relacionados con la fragmentación fueron los que mayor relación tuvieron con las variables propuestas. El Effective mesh size estuvo relacionado con la distancia a las vías de comunicación y con la distancia a Barcelona manera opuesta según el año (Figura 18). El Mesh del 56 mostró una asociación positiva con la distancia mostrando que zonas más alejadas tuvieron mayor mesh o sea menor fragmentación. El Mesh del 2005 mostró una relación inversa donde zonas cercanas a las vías de comunicación mostraron mayor mesh. Esta asociación inversa puede estar apoyando la idea propuesta de la relación entre el Mesh del 2005, el tamaño de grano máximo y el incremento de la cubierta improductivo artificial en el 2005. Al igual que el Mesh del 2005, la diversidad del 2005 también mostró una relación inversa con la distancia. Esto indicaría que las áreas más cercanas a las vías de comunicación serían más heterogéneas o bien la distribución de las cubiertas en esas áreas sería poco equitativa. El número de polígonos/ número de cubiertas estuvo relacionado positivamente con la distancia a la costa tanto en 1956 como en el 2005 reflejando que la fragmentación fue mayor la zonas media de la

RMB. Este resultado apoya la idea comentada anteriormente que en las áreas llanas tiende a ser más heterogéneas.

La varianza total explicada por las variables fisiográficas fue relativamente baja. Sin embargo, este resultado es representativo de este tipo de estudios donde los procesos no son fáciles de cuantificar dada la extensión del territorio. Seguramente los procesos del paisaje están relacionados con diferentes variables en distintas partes del territorio. Además, diversos trabajos mostraron que los factores socioeconómicos y culturales pueden tener mayor peso que las variables ambientales en los cambios que ocurren en el paisaje (Black et al. 2003). Estos factores deberían tenerse en cuenta en trabajos subsiguientes. La dificultad de conseguir ese tipo de información de manera continua y a la escala RMB dificulta la incorporación en este tipo de análisis.

En particular el cálculo del índice effective mesh size y el de diversidad de Shannon utilizados en este trabajo incluyeron a la cubierta improductivo artificial. La mayoría de los trabajos en los que se calcula estos índices consideran las cubiertas urbanas y de vías de comunicación como fuentes de fragmentación del paisaje excluyéndolos del cálculo (Moser et al. 2007). De esta manera, el Mesh permite evaluar la fragmentación del resto de las cubiertas como bosques, matorrales y cultivos como consecuencia del desarrollo urbano. Dado que gran parte de los cambios ocurridos en la RMB entre 1956 y el 2005 tienen que ver con el incremento de las cubiertas urbanas (Pino et al. 2010) este análisis seguramente arrojaría resultados diferentes a los hallados en este trabajo.

El estudio de los cambios en el tiempo utilizando mapas de distintas fuentes puede conducir a errores producidos por la falta de consistencia de los datos. Algunas interpretaciones de cambios pueden deberse a diferencias en asignación de clases los mapas originales o diferencias en la georreferenciación (Lunetta et al. 1991, Gerard et al 2010). Si bien, los mapas de cubiertas del suelo MCSC 1956 y 2005 (CREAF 2005-2007, CREAF 2010) se han controlado los errores con revisiones a campo o con interpretadores independientes, no poseen una estimación del error numérica. En este trabajo se han considerado algunas medidas tendientes a minimizar los posibles errores del cruce de información. En primer lugar, los mapas utilizados han sido generados con los mismos criterios de fotointerpretación y se basan la identificación de las mismas cubiertas al nivel de leyenda 3. En segundo lugar, la simplificación de la leyenda a nivel 1F realizada en este trabajo minimizan el error de la asignación a clases erróneas ya las cubiertas son muy contrastantes. En tercer lugar, los resultados del trabajo son producto de cálculos realizados dentro de una superficie de 7km2, escala a la cual las diferencias generadas por el error de los polígonos pueden ser consideradas poco relevantes.

Los resultados del presente trabajo permiten generar hipótesis para investigaciones futuras. Estudios subsiguientes pueden realizarse con otros índices de paisaje complementarios como la conectividad del paisaje o considerando el *Effective mesh size* o el índice de Shannon exclusivamente para las cubiertas naturales. Generar los resultados aumentando el nivel de detalle con el fin de analizar los cambios en la red de áreas protegidas o resultados que puedan ser utilizados por gestores a niveles administrativos.

4. CONCLUSIONES

Los índices utilizados evidenciaron cambios en la configuración del paisaje ocurridos en los últimos 50 años. Algunos procesos pueden resultar contradictorios si se analizan en términos de los valores promedio de los índices. Si se tiene en cuenta la variabilidad espacial de los índices, se pone en evidencia la diversidad de procesos que ocurren en la RMB. Los cambios revelados en la configuración del paisaje apoyan la idea de procesos opuestos en la región metropolitana. Las áreas de montañas y las áreas urbanas tienden a homogeneizarse mientras que las áreas planas tienden a diversificarse. Modificaciones del cálculo de los índices que excluyan cubiertas antrópicas podrían evidenciar cambios en la configuración del paisaje completamente diferentes. La distancia a las vías de comunicación de 1956, la elevación y la distancia a la costa fueron las variables que más relación tuvieron con los índices de paisaje.

5. BIBLIOGRAFIA

Antrop, M. 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. Landscape and Urban Planning 67: 9-26.

Black, A.E., Morgan, P. y Hessburg, P.F. 2003. Social and biophysical correlates of change in forest landscapes of the interior Columbia Basin, USA. Ecol. Appl. 13:51–67.

Catalán, B., Saurí, D. y Serra, P. 2008. Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona Metropolitan Region 1993-2000. Landscape and Urban Planning 85: 174-184.

Gerard, F., Petit, S., Smith, G. et al. 2010. Land cover change in Europe between 1950 and 2000

determined employing aerial photography. Progress in Physical Geography 34: 183-205.

Jaeger, J.A.G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. Landscape Ecology 15: 115-130.

Lunetta, R.S., Congalton, R.G., Fenstermaker, L.K., Jensen J.R., McGwire K. C. y Tinney L.R. 1991. Remote sensing and geographic information system data integration: Error sources and research issue. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 57: 677-687.

McGarigal, K., y B.J. 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.

Moser B., J.A.G. Jaeger, U. Tappeiner, E. Tasser and B. Eiselt, 2007. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. LandscapeEcology**22:**447–459

Pino, J., Rodà, F., Ribas, J. y Pons, X. 2000. Landscape structure and bird species richness: implications for conservation in rural areas between natural parks. Landscape and Urban Planning 49: 35-48.

Pino, J., Segui, J.M., Álvarez, N. 2006. Invasibility of four plant communities in the Llobregat delta (Catalonia, NE of Spain) in relation to their historical stability. Conference Information: 11th International Symposium on Aquatic Weeds, Date: SEP 02-06, 2002 Moliets et Maa FRANCE. Hydrobiologia 570: 257-263

Pino, J. 2007. Primera proposta de bases cartogràfiques,criteris mètodes per a l'avaluació de l'estat ecològic del bosc a l'àmbit SITxell i de les seves tendències a curt termini. Informe inèdit. Àrea d'Espais Naturals, Diputació deBarcelona.

Pino, J., Basnou, C., Banqué, M. y Molowny, R. 2008. Desenvolupament del mapa de cobertes del sòl de 1956 de la província de Barcelona (MCS56_B). Informe inèdit. Diputació de Barcelona.

Pino, J., Basnou, C., Guirado, M. y Rodà, F. 2008b.Canvis en la superfície i el grau de fragmentació del bosc a la plana del Vallès entre els anys 1993 i 2000. Documents d'Anàlisi Geogràfica 51:59-77.

Pino y Basnou 2010. Desenvolupament del mapa de cobertes del sòl de 1956 de la província de Barcelona (MCS56_B). Anàlisi dels canvis en les cobertes del sòl a la Regió Metropolitana de Barcelona . Informe Conveni 2010 CREAF-Diputación de Barcelona.

Schroter, D, Cramer, W, Leemans, R, Prentice IC et al. 2005. Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. Science 25: vol. 310 5752:1333-1337

Turner, M. G., y R. H. Gardner, editors. 1991. Quantitative methods in landscape ecology. Springer-Verlag, New York.

Turner, M.G., Gardner, R.H. y O'Neill, R.V. 2001. Landscape Ecology: in Theory and Practice. Springer-Verlag, New York.

Turner, M. G. 2005. Landscape ecology: what is the state of the science? Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics 36: 319-344.

Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J. y Melillo J. M. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. Science 277: 494-499.

Wear, D.N., Bolstad, P. 1998. Land-use changes in southern Appalachian landscapes: spatial analysis and forecast evaluation. Ecosystems 1: 575–94