

Evolución del sellado de suelos en Colmenar Viejo (Madrid) entre 1861 y 2011

Andrés Arístegui Cortijo^{a*}, María Eugenia Pérez González^b

^aInstituto Geográfico Nacional - Archivo Topográfico y Cartoteca

^bUniversidad Complutense de Madrid - Dpto. Análisis Geog. Reg. y Geografía Física

Resumen

El trabajo analiza el sellado antropogénico del suelo en los últimos 150 años como consecuencia del crecimiento urbano en uno de los municipios de Madrid de mayor valor ambiental: Colmenar Viejo. La magnitud y las pautas de la expansión urbana se estudian de manera retrospectiva a partir de una base cartográfica de referencia actual. Este análisis evolutivo espacio-temporal ha requerido una minuciosa recopilación –fundamentalmente en el Instituto Geográfico Nacional (IGN)- de fuentes cartográficas generadas por topografía, fotogrametría y teledetección, algunas de las cuales apenas han sido utilizadas hasta el momento. Estos documentos han sido georreferidos y tratados en programas GIS y de teledetección, y para su estudio se ha aplicado un sistema de indicadores. La expansión del núcleo urbano de Colmenar ha sido progresiva y exponencial, con una pérdida de suelo por sellado que pasa del 0,14 % de la superficie municipal en 1870 al 2,64% en 2011, y ha seguido pautas similares a otros núcleos españoles afectados por procesos metropolitanos.

Palabras clave: sellado antropogénico del suelo; cartografía; topografía; fotogrametría; teledetección; GIS (sistemas de información geográfica)

* *E-mail:* aaristegui@fomento.es

1. Introducción

La sociedad europea del último siglo y medio ha experimentado transformaciones demográficas que han comportado relevantes cambios en los usos y cubiertas del suelo. Uno de los cambios más preocupantes es la expansión urbana, ya que implica un sellado antropogénico del suelo que produce daños casi irreversibles al ecosistema edáfico (Scalenghe & Ajmone-Marsan, 2009; AEMA, 2012). En España, el sellado de suelos por urbanización afecta intensamente a las regiones costeras y a algunas ciudades del interior, especialmente a Madrid.

El estudio de la dinámica espacio-temporal del sellado antropogénico de suelos suele abordarse empleando cartografía, fotografía aérea, ortofotografía e imágenes de satélite (García & Pérez, 2007, 2011 y 2014; Ojeda & Villar, 2006; Valera *et al.*, 2011, etc.). Sin embargo, pocas veces se dispone de información anterior a mediados del siglo XX. Este trabajo quiere incorporar cartografía desde mitad del siglo XIX para analizar las pautas del crecimiento urbano y el alcance del sellado antropogénico del suelo en los últimos 150 años en uno de los municipios de Madrid de mayor valor ambiental. Para ello, se elige un núcleo urbano, Colmenar Viejo, por ofrecer características particulares, entre las que destacan:

- Un interesante medio físico y una gran extensión (18.256 ha).
- Proximidad a Madrid (31 km) y a varios Reales Sitios, con buenas comunicaciones por ferrocarril y carretera.
- Ha sufrido cambios administrativos: pertenecía a Guadalajara en el siglo XVIII; pasó a Madrid en el siglo XIX; se integró en el Área Metropolitana en el siglo XX.
- Presenta características urbanas desde el inicio del periodo estudiado -era cabecera comarcal en el siglo XIX-, y actualmente continúa manteniendo una fisonomía desvinculada de otros núcleos -lo cual facilita su estudio diferenciado-.
- El IGN dispone de abundante cartografía histórica.

El análisis de la dinámica espacio-temporal en el pasado resulta necesario para planificar el territorio en el futuro.

2. Metodología, materiales, datos y herramientas

La medición y análisis del sellado de suelos se elabora a partir de fuentes de diversa índole: cartografía clásica (algunos mapas inéditos hasta la fecha) y digital, fotografía aérea e imágenes de satélite (Tabla 1 y Figs. 1 a 7). Toda la información es georreferida y tratada mediante los programas ArcGIS 10.1, GlobalMapper14 y Erdas Imagine 2011. Metodológicamente, el trabajo se realiza con las siguientes fases:

1.1. Selección de capas y fuentes utilizadas

La capa que sirve de base cartográfica se descarga de la sede electrónica del Catastro. Es un mapa en formato vectorial poligonal *.shp* que representa las parcelas urbanas del año 2011 (Fig. 1).



Fig. 1. Mapa de parcelas urbanas (2011). Fuente: Catastro

Del IGN, se obtiene la cartografía en formato ráster empleada para observar la evolución del sellado en cada fecha, que se agrupa en tres bloques dependiendo de las técnicas empleadas en su confección: topografía, fotogrametría y teledetección.

1.1.1. Cartografía generada mediante topografía (1861-1952)

1.1.1.1. Topografía Catastral de España (1861-1870)

- 249 hojas kilométricas; escala 1:2.000
- 37 hojas del parcelario urbano; escala 1:500 (Fig. 2)

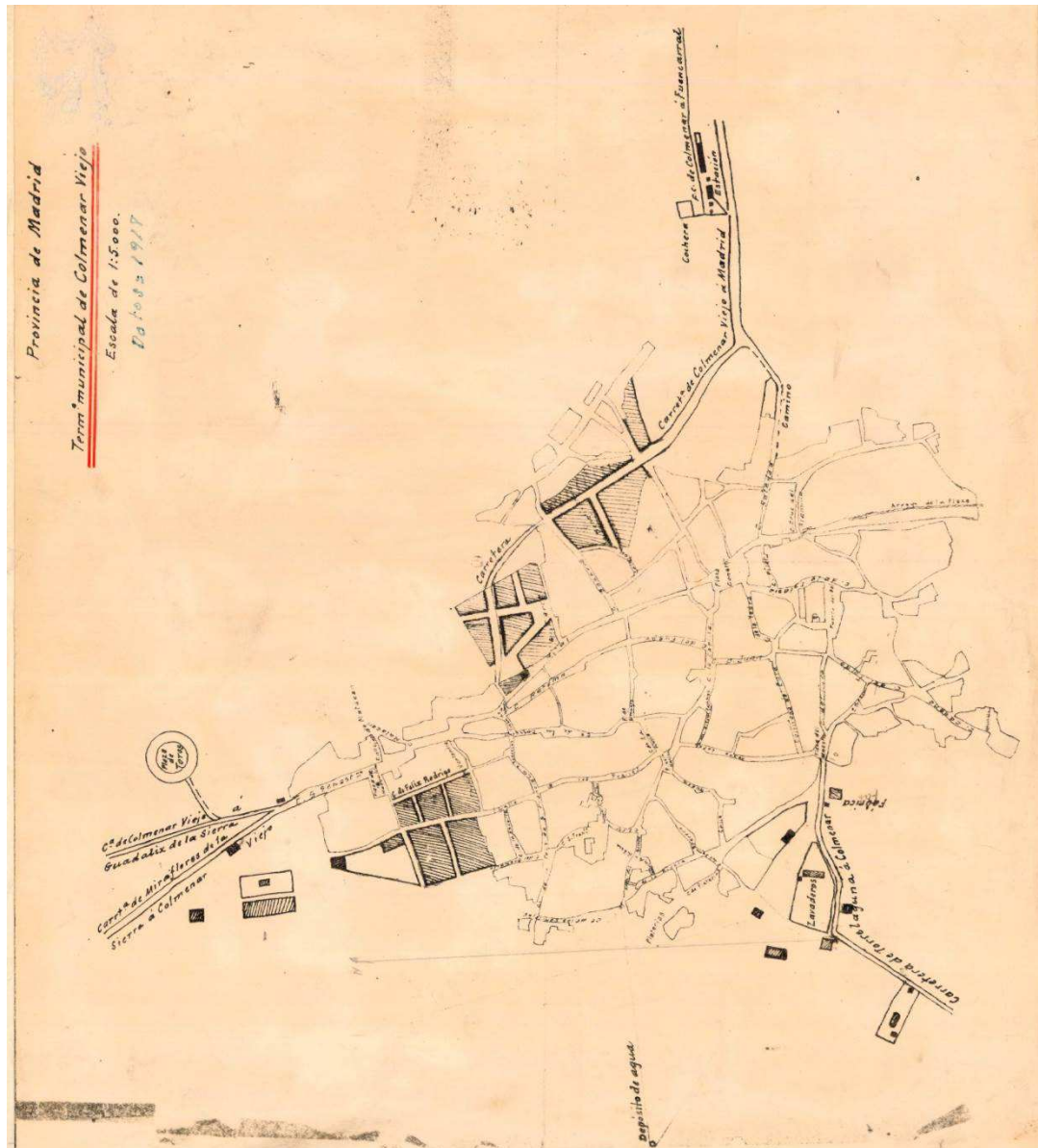


Fig. 3. Plano de población (1918). Fuente: IGN

1.1.1.3. Hoja 534 del MTN50; ediciones 1875 (Fig. 4), 1929, 1936 y 1937

COLMENAR VIEJO.

534

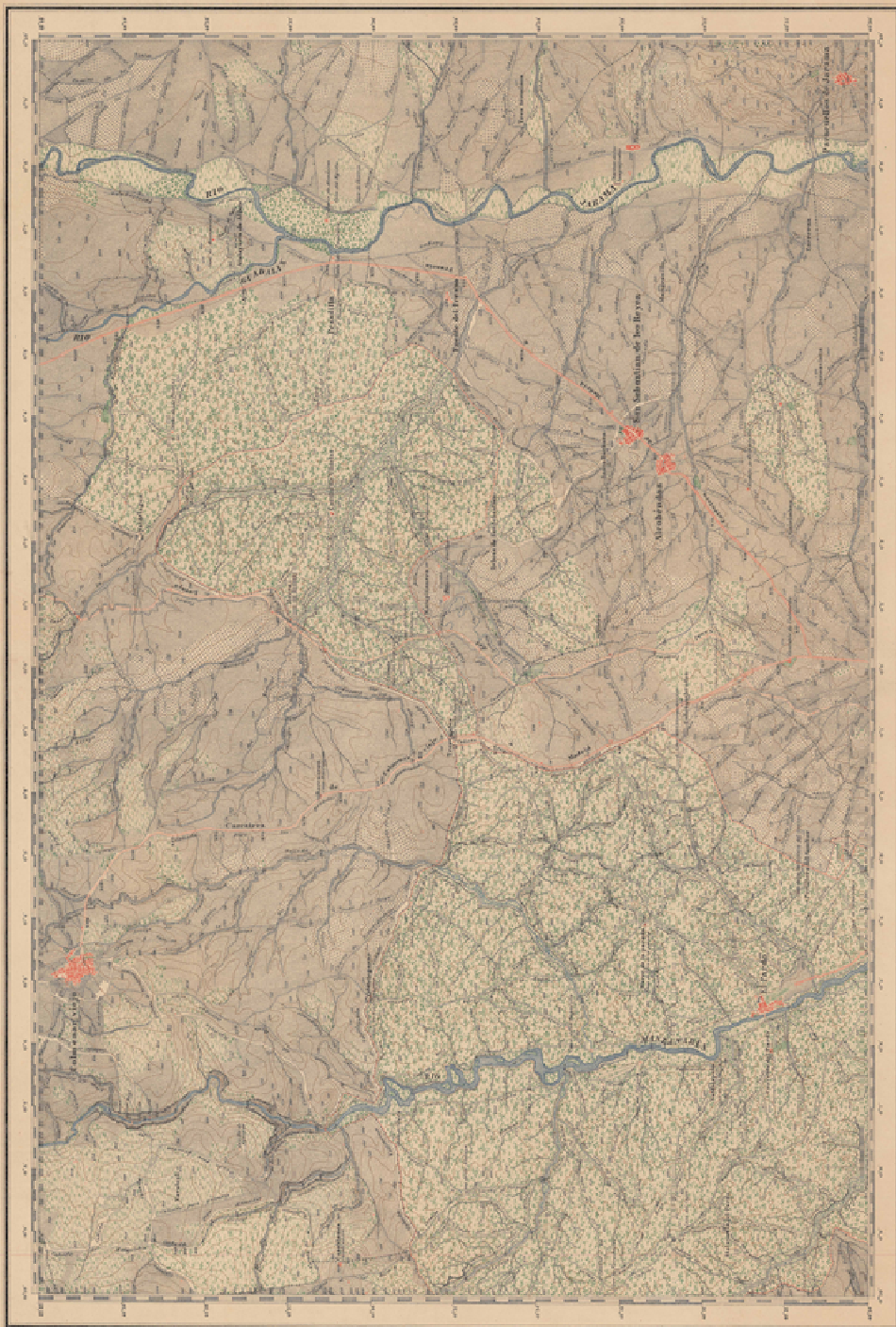


Fig. 4. Hoja 534 del MTN50 (1875). Fuente: IGN

1.1.1.4. Catastro Topográfico Parcelario (1949-1952)

- 1 plano director; escala 1:50.000
- 65 hojas de polígonos rústicos; escala 1:5.000 (Fig. 5)

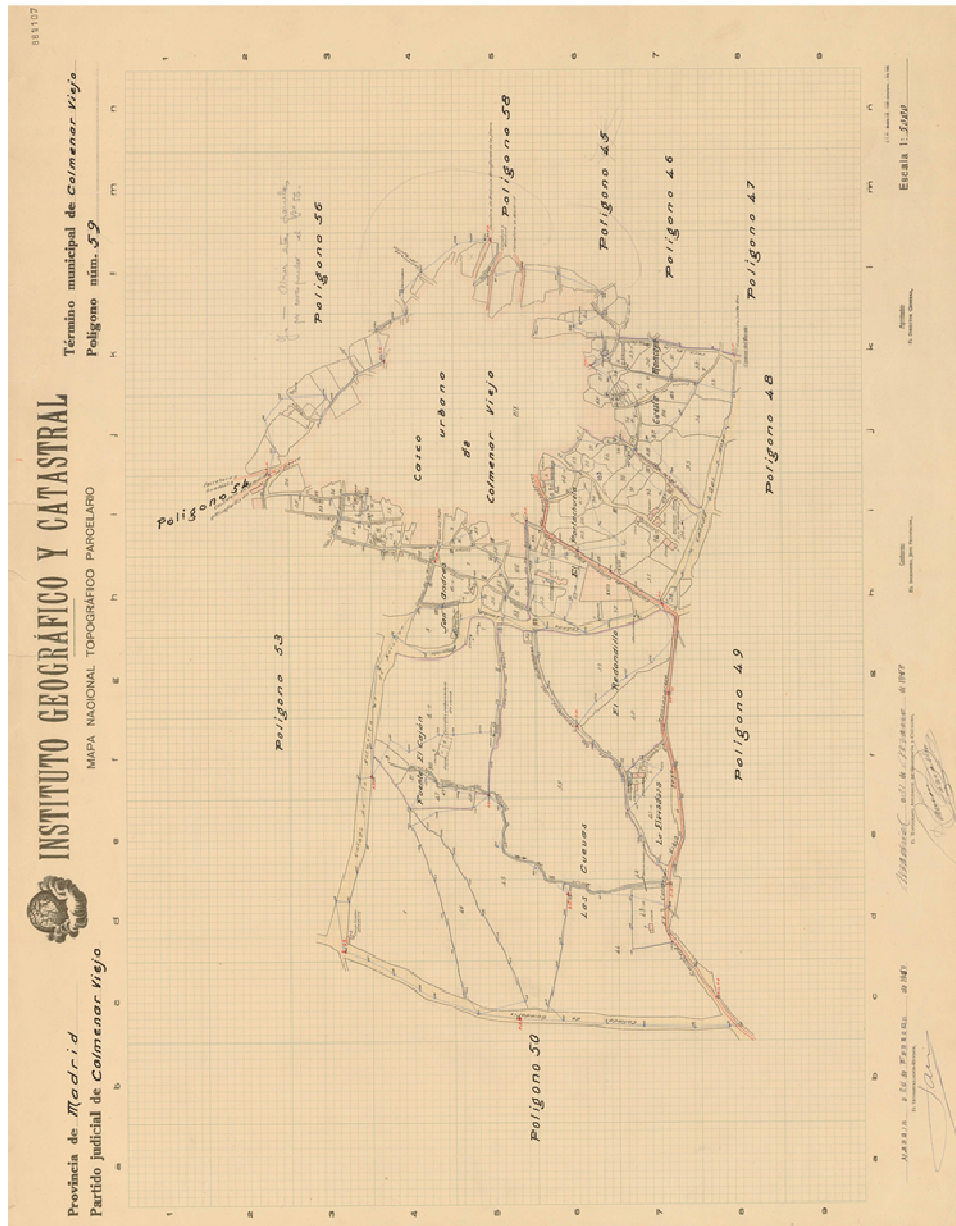


Fig. 5. Hoja del polígono 59 (1952). Fuente: IGN

1.1.2. Vuelos fotogramétricos (1968-2002): uno por década (Fig. 6 y Tabla 1)

Fig. 6. Fotograma analógico (1968). Fuente: IGN

Tabla 1. Vuelos fotogramétricos (Fuente: IGN)

Fecha	Formato	Escala
1968	analógico	1:18.000
1979	digital	1:18.000
1983	digital	1:30.000
1991	analógico	1:40.000
2002	analógico	1:40.000

1.1.3. Imágenes del satélite Spot 5 (2011): fila 268, columna 033; facilitadas por el IGN - Plan Nacional de Teledetección

- Pancromática con resolución espacial de 2,5 m (Fig. 7)
- Multiespectral con resolución espacial de 10 m en combinación de bandas 1-2-3



Fig. 7. Detalle de imagen pancromática del satélite Spot 5 (2011). Fuente: IGN

Además, en el IGN se obtiene la ortofoto del 2011 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) coincidente con la Hoja 534. Está georreferida en datum ETRS89 proyectado sobre UTM huso 30 zona T, y sirve para el proceso de georreferenciación.

1.1.4. Censos de Población

De la sede electrónica del Instituto Nacional de Estadística (INE), se extraen los datos de los censos de población (Tabla 2).

Tabla 2. Habitantes censados (Fuente: INE)

Fecha	Habitantes	Fecha	Habitantes
1857	5.115	1940	7.951
1860	4.415	1950	8.239
1877	4.425	1960	8.375
1887	4.885	1970	12.910
1897	4.863	1981	20.927
1900	5.255	1991	23.558
1910	5.753	2001	34.176
1920	6.402	2011	44.749
1930	7.999		

1.2. Georreferenciación de la cartografía

Georreferenciación en datum ETRS89, proyección UTM, huso 30, zona T: en la aplicación GIS *GlobalMapper14* se carga tanto la ortofoto del PNOA, que sirve como capa base, como el mapa/fotograma/imagen que se desea georreferenciar. Posteriormente, se asignan entre 30 y 50 puntos de control, y se aplica el método de *rubber sheeting* con rectificación por triangulación; es decir, se aplican rotaciones, traslaciones y cambios de escala locales y direccionales. Por último, se guarda el mapa/fotograma/imagen georreferenciado en formato *.ecw*.

1.3. Edición y ajuste de la cartografía a la mancha urbana según fechas

Se sigue, en parte, la metodología propuesta por Valera *et al.* para estudiar el crecimiento urbano de Valencia: primero, el mapa vectorial del Catastro de 2011 es la base cartográfica para todas las fechas; segundo, la mancha urbana se estudia a través de la cartografía de 1870, 1918 y 1952, los fotogramas de 1968, 1979, 1983, 1991 y 2002, y las imágenes de satélite de 2011; tercero, el mapa base descrito en primer lugar, cargado en la aplicación GIS *Global Mapper 14*, se edita progresivamente en orden cronológico inverso mediante interpretación visual en función de los mapas/fotogramas/imágenes descritos en segundo lugar. Así, se adecúa la mancha urbana a cada fecha, de tal manera que, para la fecha anterior, se sustraen las parcelas con respecto a la fecha inmediatamente posterior. Que siempre se sustraigan -nunca se agreguen- parcelas se debe a que la mancha urbana siempre crece -nunca mengua-.

Para editar la capa vectorial respecto a la imagen de satélite de 2011, se trabaja, adicionalmente, con análisis espectral empleando el programa de teledetección *Erdas Imagine 2011*.

Para editar la capa base conforme a la mancha urbana de 1952, al no disponerse de cartografía rústica, sino sólo urbana, se eliminan aquellas parcelas que aparecen en la capa vectorial correspondiente a 1968 y que claramente no constan en el mapa de 1952 por hallarse en zonas todavía rústicas en la fecha más antigua. Sin embargo, las áreas del interior del núcleo urbano no se pueden modificar porque no se dispone de información de 1952. Por tanto, se opta por dejarlas igual que en 1968.

Para editar la capa vectorial con respecto al plano de población de 1918, surge el problema de que la información no hace referencia a las parcelas, sino a las manzanas. Por tanto, caben dos opciones: o se cambia el mapa base y pasa a utilizarse cartografía según manzanas, o se eliminan o mantienen todas las parcelas de una manzana en su conjunto, sin posibilidad de discriminar. Ambas opciones presentan ventajas e inconvenientes. Sin embargo, teniendo en cuenta las variaciones que podrían surgir en la siguiente fase de la metodología, se decide emplear la segunda opción y continuar usando mapas parcelarios, ya que se estima que el error es menor en la segunda opción.

1.4. Cuantificación y análisis de las pautas del crecimiento urbano:

Se emplea el programa GIS *ArcGIS 10.1*, y se aplica un sistema de nueve indicadores similares a los utilizados por Valera *et al.* [para conocer las variables incluidas en cada indicador, ver Valera *et al.*, 2011], que sintetizan la información relativa a dos aspectos:

- El crecimiento bidimensional, entendiéndose como dimensiones x,y la longitud y la latitud. Así, se cuantifica la magnitud del proceso de sellado antropogénico del suelo por urbanización.
- El crecimiento tridimensional, entendiéndose como dimensión z la altitud o altura. Así, se analizan las pautas del crecimiento urbano. No obstante, ya que sólo se dispone de cartografía bidimensional, este análisis se apoya en una información auxiliar relacionada directamente con el crecimiento en altura: la población y la densidad de población. Para estudiar la población, se observan los dos censos más cercanos en el tiempo a la fecha del mapa, y, a partir de una función lineal entre ambos, se estima la población de Colmenar en el año del mapa correspondiente. Al aplicar esta función, no se consideran ni el día ni el mes exactos, sino sólo los años de las diferentes fuentes de información, ya que en la mayoría de los casos no se dispone de estos datos. Para analizar la densidad, se observa la población y la superficie de la mancha urbana en cada fecha.

1.5. Reconocimiento de la verdad terreno para verificar los datos obtenidos.

3. Resultados

En primer lugar, se analiza el crecimiento bidimensional de la mancha urbana (Tabla 3 y Fig. 8):

- El casco histórico presenta un tamaño reducido en relación a la superficie urbanizada actualmente, y afectaba a 25,3 ha (sólo un 0,14%) de la extensión municipal en 1870.
- Hasta 1918, el crecimiento urbano fue modesto, con un crecimiento total de la superficie construida del 40%, lo que implica crecimientos medios anuales inferiores a 0,20 ha. Esto conlleva que en 1918 el sellado de Colmenar apenas alcanzara un 0,19% de la superficie municipal.
- Entre 1952 y 1991, sufrió una expansión notable, triplicándose ampliamente la superficie del núcleo urbano. Los crecimientos medios anuales fueron cada vez mayores, pasando de 3 ha inicialmente a casi 6 ha en la etapa final. El porcentaje de superficie construida al inicio de los años noventa suponía un 1,31% de la extensión municipal.

- En las últimas dos décadas, se ha registrado la mayor expansión urbana, duplicándose la superficie urbanizada en 20 años, y registrándose crecimientos medios anuales entre 9 y 16 ha. Al final del periodo, el porcentaje de superficie construida alcanzaba ya el 2,64%.

Por tanto, a lo largo del período estudiado, el crecimiento bidimensional de la superficie urbanizada es progresivo -registra crecimientos positivos en todas las épocas-, y se rige por una función exponencial -los crecimientos medios anuales van aumentando sobre una superficie cada vez mayor-, llegando a duplicarse la mancha urbana en su etapa de máximo vigor, entre 1991 y 2011-. Esto da lugar a que, actualmente, el 2,64% de los suelos del término municipal estén sellados como consecuencia de la urbanización. Este valor es sensiblemente inferior al de otras ciudades europeas -con cifras de sellado de suelos del 6% al 9% entre 1990 y 2006 (AEMA, 2012)- y al de otros sectores de la Comunidad de Madrid -varían del 8,5% al 13,5% entre 1989 y 2010 (García & Pérez, 2014)-. Por consiguiente, se podría concluir que los datos registrados en Colmenar no son excesivamente preocupantes. Sin embargo, al ser su término municipal el segundo de mayor extensión de la provincia, cantidades limitadas en términos relativos resultan muy significativas en términos absolutos.

Tabla 3. Crecimiento urbano. Clave: SC = Superficie Construida (ha); CSC = Crecimiento total de la Superficie Construida (%); ASC = Crecimiento Anual de la Superficie Construida (ha/año); PSC = Porcentaje de Superficie Construida (%); P = Población (hab); CP = Crecimiento de la Población (%); AP = Crecimiento Anual de la Población (hab/año); DP = Densidad de la Población (hab/km²); ADP = Crecimiento Anual de la Densidad de Población (%)

Fecha	Crecimiento bidimensional					Crecimiento tridimensional			
	SC	CSC	ASC	PSC	P	CP	AP	DP	ADP
1870	25,3			0,14	4.421			17.473,4	
1918	35,4	39,92	0,19	0,19	6.272	41,87	38,56	17.736,6	0,03
1952	69,4	96,05	1,00	0,38	8.266	31,79	58,65	11.904,0	-0,97
1968	116,0	67,15	2,91	0,64	12.003	45,21	233,56	10.352,0	-0,81
1979	170,7	47,16	4,97	0,93	19.469	62,20	678,73	11.407,7	0,93
1983	192,8	12,95	5,53	1,06	21.453	10,19	496,00	11.128,9	-0,61
1991	238,4	23,65	5,70	1,31	23.558	9,81	263,13	9.881,7	-1,40
2002	346,3	45,26	9,81	1,90	35.233	49,56	1.061,36	10.174,0	0,27
2011	482,5	39,33	15,13	2,64	44.749	27,01	1.057,33	9.274,5	-0,98

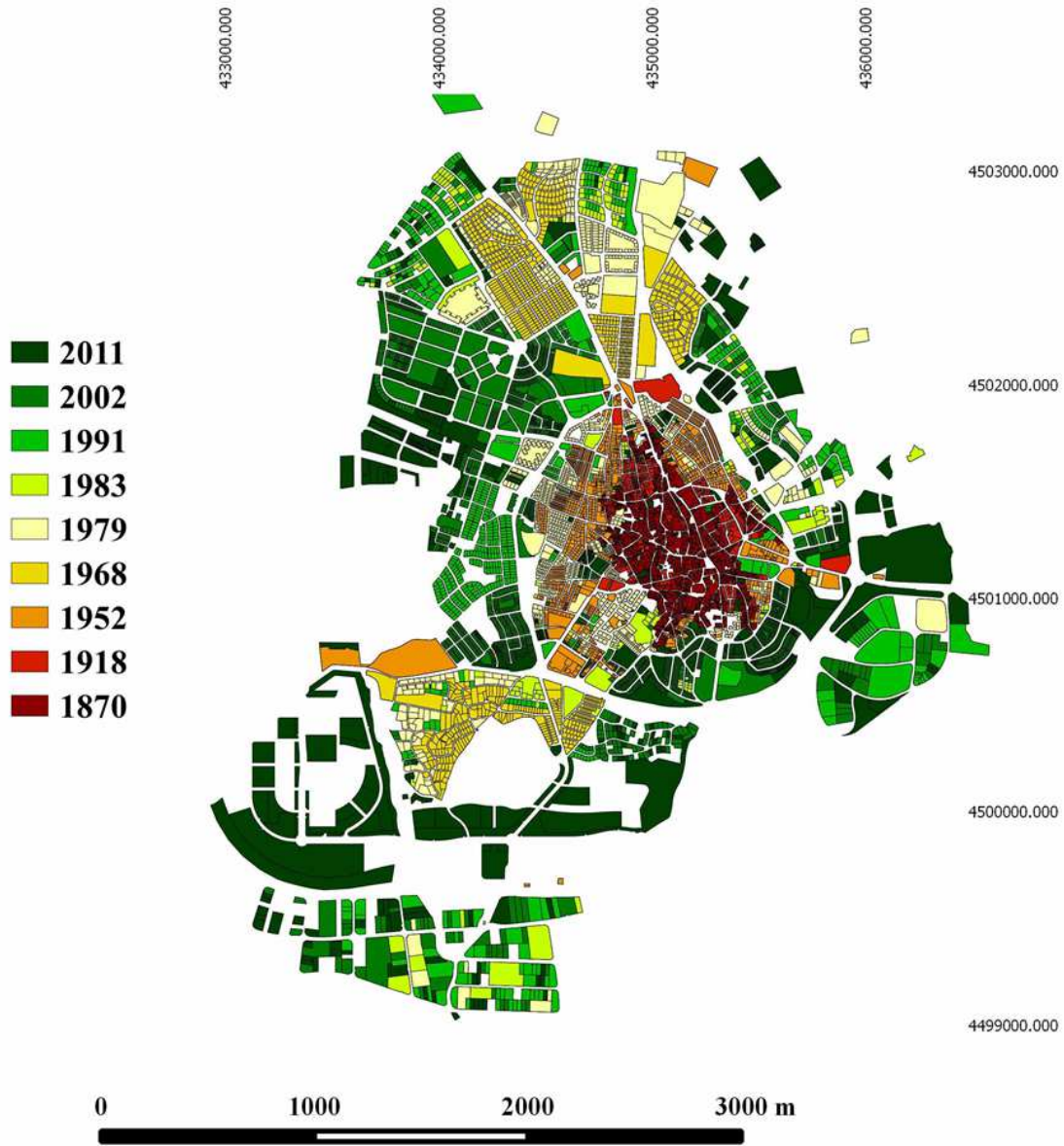


Fig. 8. Mapa del crecimiento urbano bidimensional

En segundo lugar, se estudia el crecimiento tridimensional de la superficie urbanizada. Por una parte, la población crece de manera constante a lo largo del periodo, siendo su crecimiento medio anual máximo en la época *desarrollista* -cerca a 700 hab/año- y en la etapa final –superior a 1000 hab/año-. Por otra parte, la densidad de población varía de la siguiente manera:

- La tendencia es cambiante, pues se suceden los signos positivo y negativo (aumentos y retrocesos en la densidad de población).
- La magnitud permanece modesta, pues se registran variaciones anuales del crecimiento inferiores a $\pm 1,5\%$.

Por tanto, atendiendo estrictamente a la estadística de población, se puede deducir que, mientras la población aumenta progresivamente en número, no sigue la misma pauta en densidad. Por consiguiente, cabe inferir que la expansión urbana se ha producido, en unas épocas, extendiendo la superficie construida y descendiendo la densidad de población, y, en otras etapas, incrementando la altura de las edificaciones, consumiendo menos suelo y aumentando la densidad de población. Si, además, estos datos se pormenorizan según los periodos determinados por la cartografía disponible, y se complementa la estadística con la verdad terreno, se observa que los procesos dominantes son coherentes con el modelo general de expansión urbana registrado en las grandes periferias metropolitanas españolas:

- Periodo inicial 1870-1918: expansión modesta, pero constante, siguiendo las mismas pautas observadas hasta entonces: calles estrechas y edificios de una planta.
- Etapas de mayor crecimiento en altura:
 - 1968-1979: torres de pisos sin apenas jardines ni zonas de esparcimiento propios de la época *desarrollista* (Gavira, 1999).
 - 1991-2002: urbanizaciones de bloques de 3-4 alturas con zonas ajardinadas.
- Etapas de mayor crecimiento en superficie:
 - 1918-1952: casas semejantes a las del núcleo histórico, pero con mayores huertos y corrales.
 - 1952-1968: urbanización de chalets individuales para residencia vacacional.
 - 1979-1991: chalets individuales y pareados con amplios jardines.
 - 2002-2011: expansión del espacio urbanizado y ocupación del suelo sin precedentes en España; tejido residencial extensivo, con predominio de la vivienda unifamiliar (Dematteis, 1998; Santos & García, 2012).

4. Discusión

Los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología empleada es razonable y que las diferentes fases en que se divide resultan fundamentales.

La elección del municipio parece acertada: permite analizar el crecimiento exponencial de un núcleo plenamente diferenciado, y posibilita el estudio del sellado antropogénico del suelo en un espacio de alto valor ambiental, relativamente alejado de la Capital, aunque dentro de una región intensamente urbanizada, que cuenta con abundante cartografía histórica.

Las fuentes empleadas resultan oportunas, ya que integran varias tecnologías de la información geográfica -topografía, fotogrametría, teledetección y GIS-, algunas de las cuales son, además, bastante novedosas.

El datum y proyección empleados tras los procesos de reducción -propio de la geodesia- y proyección – característico de la cartografía matemática- parecen convenientes, pues el trabajo se ajusta a las normas que regirán en España la cartografía oficial a partir del año 2015.

Emplear parcialmente la metodología de Valera et al. (2011) para la edición y ajuste de la cartografía a la mancha urbana según fechas resulta adecuado, ya que utilizar siempre la misma capa como cartografía base evita la aparición de slivers. Asimismo, emplear una capa vectorial de detalle parcelario permite disponer de una gran riqueza informativa para realizar la fase de cuantificación y análisis del crecimiento urbano, aunque en ningún caso cabe interpretar que los deslindes de las parcelas permanecen inalterados a lo largo del tiempo, sino que el terreno que ocupan esas parcelas actualmente estaba incluido en la mancha urbana en la fecha correspondiente. Sin embargo, con respecto a la metodología de Valera et al., este artículo presenta algunas variantes: por una parte, este trabajo aporta la novedad de incluir cartografía histórica –no sólo fotografía aérea-, lo cual permite prolongar el análisis retrospectivo un siglo más atrás; por otra parte, Valera et al. emplean cartografía temática del proyecto Corine Land Cover para clasificar el suelo urbano según subtipos, mientras en este caso no se plantea tal diferenciación; por último, dichos autores plantean una primera fase de digitalización vectorial y asociación de bases de datos que en este caso no es necesaria, pues la capa base ya tiene formato vectorial poligonal.

La cuantificación del proceso de sellado antropogénico del suelo mediante el análisis del crecimiento urbano bidimensional es acertada, ya que aporta resultados congruentes. En cambio, el análisis de las pautas de ese crecimiento mediante el estudio de la población y la densidad de población resulta insatisfactorio por sí mismo, y, para ser válido, ha de complementarse con la verdad terreno.

5. Conclusiones

Este trabajo analiza la dinámica espacio-temporal del proceso de sellado antropogénico del suelo como consecuencia del crecimiento urbano en los últimos 150 años en una de las zonas de Madrid de mayor valor ambiental, Colmenar Viejo, donde actualmente el 2,64% de la superficie municipal se encuentra sellada. La magnitud del proceso se revela progresiva y exponencial, pues la superficie de la mancha urbana se ha multiplicado por 19 (ha pasado de 25,3 a 482,5 ha, o del 0,14 al 2,64 % de la extensión del término municipal). Las pautas del proceso se ajustan al modelo general de crecimiento urbano registrado en las grandes periferias metropolitanas de España en sus diferentes etapas.

En este artículo se aplica un sistema de indicadores a diversos documentos cartográficos del IGN, generados u operados mediante las diferentes técnicas existentes a lo largo del último siglo y medio (topografía, fotogrametría, teledetección y GIS), algunos de los cuales apenas habían sido utilizados hasta el momento para realizar estudios de detalle de núcleos urbanos.

Este trabajo plantea estudiar la evolución de un núcleo urbano del Área Metropolitana de Madrid en el pasado (tendencias y procesos espacio-temporales) como herramienta para proyectar su crecimiento urbano futuro (planificación).

Agradecimientos

Este estudio se ha realizado dentro del grupo de investigación Teledetección y Cambio Global y ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Proyecto: CSO2012-34785.

Referencias

- Scalenghe, R.; Ajmone-Marsan, F. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape Urban Planning*, 9 (1–2), 1–10.
- AEMA, CE, (2012): Documento de trabajo de los servicios de la Comisión. Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo. Bruselas, 15.5.2012, SWD (2012) 101 final/ 2.
- García Rodríguez, M.P.; Pérez González, M.E. (2007). Changes in soil sealing in Guadalajara: cartography with Landsat images. *Science of total Environment*, 41. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.048.
- García Rodríguez, M.P.; Pérez González, M.E. (2011). Sellado de fluvisoles en la Comunidad de Madrid. Análisis a partir de imágenes Landsat. *Anales de Geografía*, 31 (2), 125–137.
- García Rodríguez, M.P.; Pérez González, M. E.; Guerra Zaballos, A.M. (2014). Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma* 214–215, 135–140.
- Ojeda Zújar, J.; Villar Lama, A. (2006). Evolución del suelo urbano alterado en el litoral de Andalucía. 1988-2002. *Rev. Int. de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 7:73-99.
- Valera Lozano, A.; Añó Vidal, C.; Sánchez Díaz, J. (2011). Cincuenta años (1956-2006) de crecimiento urbano y degradación de suelos por sellado antropogénico en el término municipal de Valencia. *Anales de Geografía*, vol. 31, núm. 2, Madrid (pp. 177-191).
- Gavira Golpe, C. (1999). Las redes de la capital en la capital de redes. Madrid 1979-1999, la transformación de la ciudad en veinte años de ayuntamientos democráticos, Gerencia Municipal de Urbanismo del Ayuntamiento de Madrid. Madrid (pp. 70-94).
- Dematteis, G. (1998). Suburbanización y periurbanización: ciudades anglosajones y latinas. La ciudad dispersa: suburbanización y nuevas periferias, F.J. Monclús (Ed). Centro de Cultura Contemporánea. Barcelona (pp. 5-15).
- Santos Preciado, J. M., García Lázaro, F. J. (2012). La vivienda unifamiliar, fenómeno característico de la ciudad dispersa: contrastes sectoriales en la aglomeración urbana de Madrid. *Anales de Geografía*, 32-1 (pp. 153-179).

