



**Evaluación de la sostenibilidad de la expansión urbana de Salamanca (1956-2018)
a través del análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y análisis multicriterio**

*Evaluation of the urban expansion sustainability in Salamanca (1956-2018)
using multi-temporal analysis of land covers changes and multicriteria analysis*

Criado, M. ⁽¹⁾; Santos-Francés, F. ⁽¹⁾; Martínez-Graña, A. ⁽²⁾

(1) Dpto. de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca.
Avenida Filiberto Villalobos, 119, 37007 Salamanca, España; marcofn@usal.es; fsantos@usal.es

(2) Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de
la Merced s/n., 37008 Salamanca, España; amgranna@usal.es

Resumen

La ausencia de sostenibilidad urbana es un déficit muy extendido en las aglomeraciones urbanas. En el presente trabajo desarrollamos una metodología que permite identificar los impactos ocasionados por la expansión urbana a lo largo del tiempo, tomando como área de estudio la ciudad de Salamanca (España) y su zona de influencia. Se realiza una evaluación multitemporal de los cambios en la cobertura del suelo mediante imágenes Landsat y teledetección, mientras que los criterios de sostenibilidad (ecológicos, agrícolas, culturales y riesgos naturales) son analizados mediante análisis multicriterio (AMC) empleando el método de las jerarquías analíticas (AHP) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados muestran un incremento del área urbanizada de un 593% en el periodo estudiado (1956-2018), identificándose hasta un 15% de las edificaciones en zonas con restricción. En el 71% de los casos, la urbanización provocó el sellado de suelos agrícolas fértiles (2,519 ha), de las cuales casi el 20% eran de la mayor calidad. Se identificó un aumento desmedido de la superficie urbanizada en comparación a la dinámica poblacional en los últimos años, provocando un sellado desmedido de suelos que repercute en la producción alimentaria.

Palabras clave: sellado del suelo; expansión urbana; sostenibilidad; teledetección; análisis multicriterio; SIG.

Abstract

The absence of urban sustainability is a widespread deficit in urban agglomerations. In the present work we present a methodology to identify the impacts caused by urban expansion over time, taking as a study area the city of Salamanca and surroundings (Spain). A multi-temporal assessment of land cover changes is



carried out using Landsat images and remote sensing, while sustainability criteria (ecological, agricultural, cultural and natural risks) are analysed by means of multi-criteria analysis (MCA) using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographical Information Systems (GIS). The results show an increase in the urbanized area of 593% in the period studied (1956-2018), with up to 15% of buildings identified in restricted areas. In 71% of the cases, urbanization caused the sealing of fertile agricultural soils (2,519 ha), of which almost 20% were of the highest quality. A disproportionate increase in the urbanized area was identified in comparison to the population dynamics in recent years, causing an excessive sealing of soils that has repercussions on food production.

Key words: soil sealing; urban expansion; sustainability; remote sensing; multicriteria analysis; GIS.

1. Introducción

El progresivo aumento de población y su aglomeración en grandes ciudades, que para 2050 se estima en un 68% y para final del siglo XXI en el 90%, es uno de los principales retos actuales para la humanidad (Ángel *et al.*, 2011, United Nations, 2012). La urbanización desmedida y no planificada provoca multitud de impactos negativos, tanto de tipo socioeconómico —sellado de suelo fértil, muertes relacionadas con la polución y el calor, problemas de movilidad urbana, o mayor exposición a riesgos naturales, potenciado esto además por el cambio climático (Bull-Kamanga *et al.*, 2003; Banister, 2005; Pérez y García, 2016)—, como de tipo ecológico —pérdida o alteración de áreas de calidad ecológica y disminución de la biodiversidad, contaminación del aire, suelos y agua, o alteración de los patrones de precipitación y temperatura local (Cai *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2018; Liu y Ni-yogi, 2019; Qiu *et al.*, 2019)—. El impacto de las grandes aglomeraciones urbanas e industriales sobre el cambio climático es evidente al tratarse del mayor foco emisor de gases invernadero y de consumo de recursos, lo que puede comprometer el desarrollo económico, la seguridad alimentaria o la justicia social (United Nations, 2011).

Históricamente, las ciudades se han extendido generalmente sin criterios planificadores ni restricción, ligadas al desarrollismo indus-

trial y urbano que derivó en ciudades desorganizadas “fruto de un experimento masivo no planificado de cambio del paisaje” (Niemelä *et al.*, 2011). Pronto aparecieron los primeros impactos sobre la población y el medio ligados al binomio industrialización-urbanización. Paulatinamente la sociedad fue exigiendo a los poderes político y económico prácticas más respetuosas y responsables con el medio ambiente, que desembocaron en la aceptación del desarrollo sostenible como único modelo de desarrollo que garantiza el bienestar social, y que precisa de un desempeño urbanístico adecuado y sostenible (Hope, 1986).

La planificación y desarrollo urbano sostenible ha sido un tema muy desarrollado en los últimos años. Muchos autores han empleado técnicas de interpretación de imágenes satelitales, especialmente Landsat, para monitorizar los cambios de usos del suelo ligados a la urbanización (Song *et al.*, 2016; Kabisch *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019). Los análisis multicriterio (AMC) son ampliamente empleados en la planificación urbana y territorial, integrando en el estudio parámetros ambientales y socioeconómicos como factores de decisión (Meng *et al.*, 2011; Criado *et al.*, 2016). Por su parte, otros estudios se centran en la mejora de aspectos concretos con contribución relevante en la sostenibilidad urbana. Unos evalúan el impacto de la accesibilidad a la red de transporte sobre la sostenibilidad de una ciu-

dad, centrándose en la relación entre la tipología urbana y el coste que supone cada una en relación a las infraestructuras o servicios básicos (Rode *et al.*, 2017). La optimización de energía es otro de los pilares de la sostenibilidad urbana, por lo que existe gran cantidad de literatura abordando la eficiencia energética de edificios y viviendas o la implantación de redes de energía renovables (Kammen y Sunter, 2016; Tronchin *et al.*, 2018). Los espacios verdes y su contribución a la sostenibilidad también han sido ampliamente estudiados (Jennings *et al.*, 2016; García, 2017). Además, se ha incrementado el estudio de factores que se verán afectados por el cambio climático y que pueden suponer riesgos futuros para la población, como Berry y BenDor (2015), que consideran el ascenso del nivel del mar como un elemento clave en lugares costeros. Por último, algunos autores han desarrollado herramientas que permiten evaluar y verificar la sostenibilidad de los diferentes elementos de la ciudad, como edificios, arquitectura verde o redes de transporte y de suministro (Teng *et al.*, 2018; Zope *et al.*, 2019).

No obstante, a pesar de estos esfuerzos, aún siguen produciéndose malas prácticas en la planificación urbana y tomas de decisión, con impactos evidentes sobre el medio ambiente y la población. Quizás el evaluar la expansión urbana a lo largo del tiempo, e identificar los impactos generados, sirva de punto de partida para lograr un mayor sostenibilidad futura, así como para poder poner en marcha medidas de mitigación o prevención, cuando fuese necesario. Además, es palpable la necesidad de adaptar el sistema urbano a los objetivos de protección del medio ambiente y de lucha contra el cambio climático si queremos preservar nuestro entorno y bienestar, y el de las generaciones venideras, y evitar los escenarios adversos que se prevén en relación al cambio climático. Por ello, en este trabajo, desarrollado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) los objetivos son: 1) identi-

ficar las áreas restrictivas a la urbanización y sellado del suelo, en base al AMC de cuatro criterios de interés (ecológico, agrícola, cultural y protección de la población frente a riesgos naturales); 2) a partir del estudio de imágenes Landsat y técnicas de teledetección, evaluar los cambios de uso de la tierra en la zona de estudio en el periodo 1956-2018; y 3) empleando el AMC y la evaluación multitemporal, estudiar la sostenibilidad de la expansión urbana de Salamanca y alrededores.

2. Metodología

Salamanca es una ciudad situada al oeste de España, capital de la provincia a la que da nombre, dentro de la Comunidad Autónoma de Castilla y León (Fig. 1), que aglutina, junto a su alfoz, alrededor de 200000 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, INE, 2019). Se trata de la mayor aglomeración urbana de su entorno, eminentemente agrícola y ganadero, y que en las últimas décadas ha acusado un alto envejecimiento poblacional y éxodo rural hacia la ciudad. Además, Salamanca cuenta con un gran patrimonio histórico, artístico y cultural, que la ha llevado a ser declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, y una Universidad con 8 siglos de historia, lo que permiten a la ciudad tener una gran actividad y mezcla cultural, convirtiéndola en versátil y cosmopolita.

2.1. Análisis multitemporal de cambios en las coberturas del suelo

Mediante técnicas multitemporales de teledetección, se ha evaluado la expansión urbana de Salamanca y alrededores y el cambio asociado en los usos del suelo en el periodo 1956-2018. Para ello, se emplearon imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos correspondientes a satélites Landsat de fecha 27 de Julio de 1985 —Landsat 5—, 27 de Agosto de 1999 —Landsat 7— y 7 de Agosto

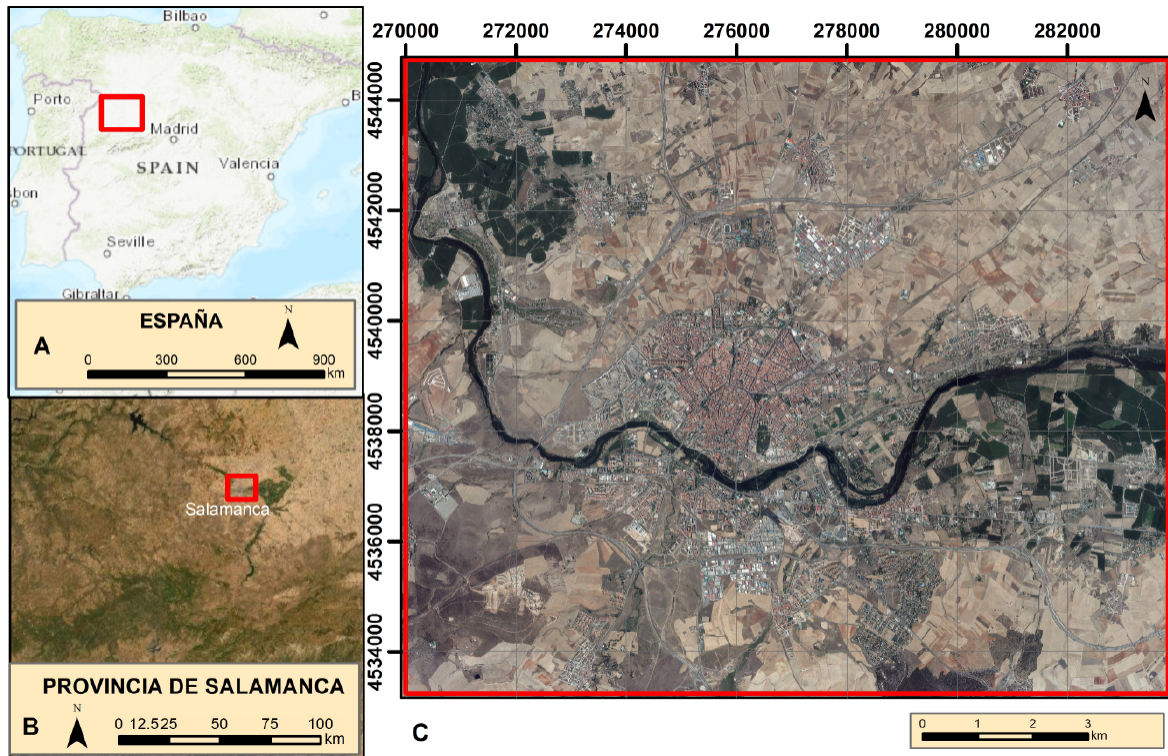


Figura 1: A) Encuadre regional del área estudiada en el territorio español; B) Localización del área de estudio respecto a la provincia de Salamanca; C) Área de estudio: ciudad de Salamanca y alfoz.

Figure 1: A) Regional location of the studied area in the Spanish territory; B) Location of the area of study with respect to the Salamanca province; C) Study area: city of Salamanca and surroundings.

de 2018 —Landsat 8— (USGS, 2019). Por su parte, para el año 1956, se emplea la fotografía aérea a escala 1:33.000 obtenida del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL, 2019).

Tras la recopilación de las imágenes satelitales, se procede a su procesamiento, realizándose la corrección atmosférica mediante el Método DOS-1/CHAVEZ, para lo que se emplea el plugin SCP de QSIG. Posteriormente, se realizan composiciones a color natural y falso color que servirán para identificar y separar los tipos de cobertura objeto de estudio. La composición que ofrezca mejor distinción entre las coberturas será la elegida para realizar la clasificación supervisada. En la imagen aérea del vuelo de 1956 se han digitalizado las zonas urbanizadas hasta la fecha, las cuales se diferencian del resto de usos.

Para la clasificación supervisada, que se realiza por el Método de Máxima Verosimilitud, se utilizaron las composiciones a color natural, empleando la composición de bandas 3,2,1 para las imágenes de los satélites Landsat 5 y 7, mientras que para el caso del Landsat 8 se emplea la combinación 4,3,2. Se establecen para su clasificación cinco categorías de usos del suelo, de acuerdo a las características del sector estudiado, eminentemente agrícola: agua, pastizal, cultivos de secano, cultivos de regadío y áreas urbanas. Los suelos desnudos se integran en las áreas de cultivo de secano, pues se corresponden con las tierras de barbecho, cuya distribución es variable según la rotación de cultivos entre los diferentes años. Para entrenar el modelo previamente a su clasificación supervisada, se generaron 40 áreas de entrenamiento para cada tipo de cobertura.

ra. Las áreas de entrenamiento indican al SIG los niveles digitales de la imagen satelital relativos a cada tipo de cobertura, constituyendo la base de la clasificación supervisada. Finalmente, la precisión de las clasificaciones fue evaluada con el estadístico Kappa, para el que se consideran los siguientes niveles de acuerdo (Landis y Koch, 1977): inexistente (0.00), ligero (0.00-0.20), bajo (0.21-0.40); moderado (0.41-0.60); muy bueno (0.61-0.80); excelente (0.81-1). Para verificar la verosimilitud de la clasificación, mediante el estadístico Kappa se obtienen cien puntos al azar de coberturas obtenidas en la clasificación, las cuales se comparan, con imágenes aéreas de vuelos que se realizaron en fecha coetánea a la de la imagen satelital empleada para la clasificación, obtenidos en el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2019), comprobando la coincidencia o no de coberturas entre ambas. La cartografía multitemporal obtenida muestra los cambios en el uso de la tierra ligados a la urbanización de la ciudad a lo largo del periodo estudiado (1956-2018).

2.2. Análisis multicriterio: identificación de las áreas restrictivas

El AMC permite implementar en la toma de decisiones relacionadas con los procesos de urbanización, las directrices del desarrollo sostenible que permitan una adecuada protección del medio ambiente, de la población y de sus bienes. Mediante el mismo, se delimitan las áreas de mayor interés, ya sea por sus características ecológicas, agrícolas, culturales, o por suponer riesgos para la población. Por tanto, a partir de este AMC se obtienen las áreas con restricciones mediante el estudio de cuatro criterios: agrológico, ecológico, cultural y de protección de la población. Los diferentes criterios son estudiados en campo, posteriormente digitalizados, y además se pondera internamente cada componente de los criterios (peso de 0-5), si es el caso, y según sus características, por

ejemplo, en función de cómo es el riesgo (alto, medio, bajo...).

El criterio ecológico (C1) identifica las áreas de mayor calidad en términos ecológicos, ambientales y de paisaje. Estos espacios son los que mantienen las cualidades de los ecosistemas autóctonos y conservan los procesos naturales en las cercanías de las zonas urbanas. Para ello se estudió la zona y se cartografiaron los Hábitats Naturales (Consejo Comunidad Europea, CCE, 1992). Las zonas donde se conservan los hábitats naturales recibieron la mayor ponderación (5), mientras que el resto recibieron la menor (0). Por otra parte, el paisaje se tiene cada vez más en cuenta en la planificación territorial debido a los múltiples beneficios que proporciona. Las zonas de Salamanca y alrededores fueron puntuadas según su calidad paisajística (Muy alta: 5; Alta: 4; Moderada: 3; Baja: 2; Muy baja: 1). Para la determinación de la calidad paisajística se emplearon la calidad intrínseca del paisaje en base a la litología, geomorfología, vegetación e hidrología, y la calidad extrínseca en función de la localización de los núcleos urbanos y de los elementos del patrimonio natural y cultural.

El criterio agrológico (C2) evalúa la calidad agrícola de los suelos debido a que es importante que los suelos más fértiles sean protegidos de un uso irreversible como es el proceso de urbanización. De acuerdo con la Clasificación de la Capacidad Agrológica de los Suelos (Klingebiel y Montgomery, 1961), los suelos se clasifican según su aptitud agrícola: Clase II (5); Clase III (3); Clase IV (2); Clases V-VI (1) y Clase VII (0). Los suelos agrícolas de la zona de estudio abarcan las Clases II, III y IV, siendo la II la de mayor calidad, presentando los suelos de la Clase IV importantes limitaciones al laboreo, El resto de clases no son aptos para su laboreo. Los suelos de la Clase V y VI suelen poseer usos ganaderos, con pastizales húmedos en la Clase V, y de peor calidad en la Clase VI. La Clase VII presenta grandes li-

mitaciones y su mejor uso es el forestal. No existen suelos de Clase I (los de mayor valor agrícola), debido a limitaciones climáticas, ni de Clase VIII (limitaciones muy severas). Para ello, previamente se hizo un estudio de los suelos representativos del entorno, destacando los Luvisoles, Cambisoles, Regosoles, Leptosoles, Fluvisoles y Gleysoles. Los Luvisoles son los suelos más antiguos y se caracterizan por tener un horizonte B_t o de iluviación de arcilla, siendo suelos desarrollados y profundos. Destacan los luvisoles crómicos, cálcicos y vérticos. Presentan buena aptitud agrícola al retener el horizonte argílico la humedad en los periodos secos, conformando los suelos de Clase III. Los Cambisoles (dístricos, eútricos y crómicos principalmente) son suelos muy extendidos y se caracterizan por poseer un horizonte de cambio (B_w). Se trata de suelos de moderado espesor y desarrollo, que aunque permiten el laboreo, presentan diferentes restricciones (Clase IV). Los Regosoles son suelos de escaso desarrollo y delgados, originados sobre roca blanda. Destacan los regosoles eútricos sobre pizarra destinados a pastos (Clase VI). Los Leptosoles (dístricos y líticos), por su parte, son suelos muy delgados originados sobre roca dura, especialmente cuarcitas, por lo que albergan pastos, y formaciones boscosas donde el solum lo permite (Clase VII). Los Fluvisoles son los suelos que se desarrollan en los depósitos aluviales del Tormes. Son suelos muy profundos con alternancia heterogénea de materiales (arenas, cantos, limos...) que presentan buenas condiciones físicas para el laboreo, aunque las químicas son modestas. Las condiciones llanas, de fácil laboreo y de disponibilidad de agua hacen que estos suelos sean considerados de Clase II. Por último, los Gleysoles se desarrollan sobre los depósitos aluviales de pequeños arroyos, que permiten el desarrollo de pastos de calidad (Clase V).

La conservación del patrimonio histórico-artístico y cultural debe ser otra prioridad en

la planificación urbana debido a su valor intrínseco. A través del criterio cultural (C3) se cartografiaron los sitios y áreas arqueológicas o bienes de interés cultural. Estas áreas recibieron un peso de 5, mientras que en el resto fue de 0.

El criterio de protección de la población (C4) evalúa los riesgos naturales a los que está expuesta la sociedad, cada vez más vulnerable a ellos, de manera que se restringe la urbanización de las zonas en las que pueden producirse esos riesgos. En Salamanca y sus alrededores, los riesgos naturales son las inundaciones y, en menor medida, los desprendimientos de rocas. Para establecer las zonas afectadas por el riesgo de inundación se utilizan los datos de un estudio anterior (Criado *et al.*, 2019), mientras que las zonas afectadas por la caída de rocas se delimitan mediante trabajos de campo y el estudio de las pendientes y buzamientos del terreno. Esas zonas se ponderaron en función del riesgo: (Muy alto: 5; Alto: 4; Moderado: 3; Bajo: 2; Muy bajo: 1; Inexistente: 0).

Finalmente, para el AMC, a cada criterio, según su prevalencia sobre el resto, se le da una ponderación global (k_i), utilizando el Método AHP o de las Jerarquías Analíticas (Saaty, 2013), y por medio del álgebra de mapas, utilizando la Ec. 1, se obtiene un archivo ráster con los resultados del AMC, que se reclasifican en 4 niveles. El nivel que contiene los valores altos se considera que agrupa las áreas de interés, es decir, aquellas que presentan interés ambiental, cultural o agrícola, o riesgo para la población, y por lo tanto se consideran restrictivas para la urbanización.

$$AMC = k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2 + k_3 \cdot C_3 + k_4 \cdot C_4 \quad \text{Ec.1}$$

Con la combinación de ambos procedimientos, análisis multitemporal de coberturas del suelo y análisis multicriterio, se puede comprobar cómo la ciudad de Salamanca se fue expandiendo, y qué superficies fueron

selladas, lo que nos permite hacer una idea de la sostenibilidad del proceso urbanizador. Además, se efectúa un estudio de la dinámica poblacional, basado en datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2019), con el objetivo de relacionar el factor demográfico con el urbanizador.

3. Resultados de las distintas investigaciones realizadas

3.1. Evolución de los usos del suelo (1956-2018)

Las clasificaciones supervisadas en las que se delimitan las cinco coberturas del suelo seleccionadas en los diferentes periodos de tiempo muestran unos niveles de acuerdo adecuados: muy bueno para las clasificaciones de 1985 (Kappa=0.69) y 1998 (Kappa=0.78) y excelente para la de 2018 (Kappa=0.84). Los mapas de coberturas correspondientes a cada uno de los periodos se encuentran en la Figura 2, cuyos datos de extensión (ha), se encuentran resumidos en la Tabla 1. Se observan dos tendencias en los resultados: 1 – aumento progresivo del área urbanizada; 2 – disminución de las áreas de cultivo. La superficie construida se incrementa del 3.8% al 22.3% desde 1956 hasta la actualidad. Por otra parte, las superficies de cultivo disminuyen del 72.9% en 1985 al 60.8% en 2018, por lo que las pérdidas de superficie cultivada sería mayor si pudiera-

mos compararla para el periodo 1956-2018. Respecto a las tierras agrícolas, las mayores pérdidas se producen en las de secano (cereal), cuya extensión disminuyó en 1583 ha, por las 339 ha que se perdió de cultivos de regadío en el periodo 1985-2018. Los pastizales y eriales se mantienen bastante constantes a lo largo del tiempo, y se han observado interacciones y cambios de uso con la agricultura de secano. La superficie del agua, perteneciente exclusivamente al Río Tormes, es relativamente similar, si bien se detecta disminuciones de superficie con el tiempo, lo que puede ser debido a la mejora de los bosque de ribera, que cubren cada vez más superficie del cauce.

Las transformaciones más significativas que experimentan las coberturas del suelo se resumen en la Tabla 2. Para el periodo 1985-1998, sufrieron una transformación de uso casi un 7% de la superficie (1088 ha), mientras que para el periodo 1998-2018, la superficie transformada fue de 1935 ha (12% de la superficie del área de estudio), por lo que en las tres últimas décadas alrededor de un 20% del área estudiada habría sufrido cambios en su cobertura. Los principales cambios están relacionados con pastos y tierras de cultivo, que en general han sido edificados. La principal transformación en ambos periodos fue de cultivos cerealistas en áreas residenciales, con un total de 1098 ha (36% de las transformaciones totales). Se construyeron 253 ha

Uso del suelo	Agua		Pastizal		Cultivos secano		Cultivos regadío		Área urbana		
	Año	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1956	-	-	-	-	-	-	-	-	-	596	3.8
1985	238	1.5	2423	15.3	9288	58.5	2290	14.4	1630	10.3	
1998	230	1.4	2604	16.4	8755	55.2	2059	13.0	2219	14.0	
2018	226	1.4	2455	15.5	7705	48.5	1951	12.3	3532	22.3	

A: Área, en hectáreas; %: Porcentaje de área de cada cobertura respecto a la superficie total estudiada

Tabla 1: Extensión, en hectáreas, y porcentaje de las diferentes coberturas del suelo en cada periodo.

Table 1: Extension, in hectares, and percentage of different land cover categories in each period.

	Agua		Pastizal		Cultivo seco		Cultivo regadío		Áreas urbanas	
Agua	-		NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²
Pastizal	NR ¹	NR ²	-		96 ¹	135 ²	NR ¹	NR ²	68 ¹	442 ²
Cultivos secano	NR ¹	NR ²	241 ¹	423 ²	-		6 ¹	71 ²	414 ¹	684 ²
Cultivos regadío	NR ¹	NR ²	95 ¹	8 ²	29 ¹	14 ²	-		117 ¹	136 ²
Áreas urbanas	NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²	NR ¹	NR ²	-	

Tabla 2: Principales transformaciones en la cobertura del suelo: A) Desde 1985 hasta 1998; B) Desde 1998 hasta 2018.

¹Cambio en la cobertura del suelo (1985-1998); ²Cambio en la cobertura del suelo (1998-2018); NR: No hay cambios representativos en la cubierta terrestre.

Table 2: Main land cover transformations: A) Since 1985 to 1998; B) Since 1998 to 2018. ¹Land cover change (1985-1998);

²Land cover change (1998-2018); NR: No representative land cover change.

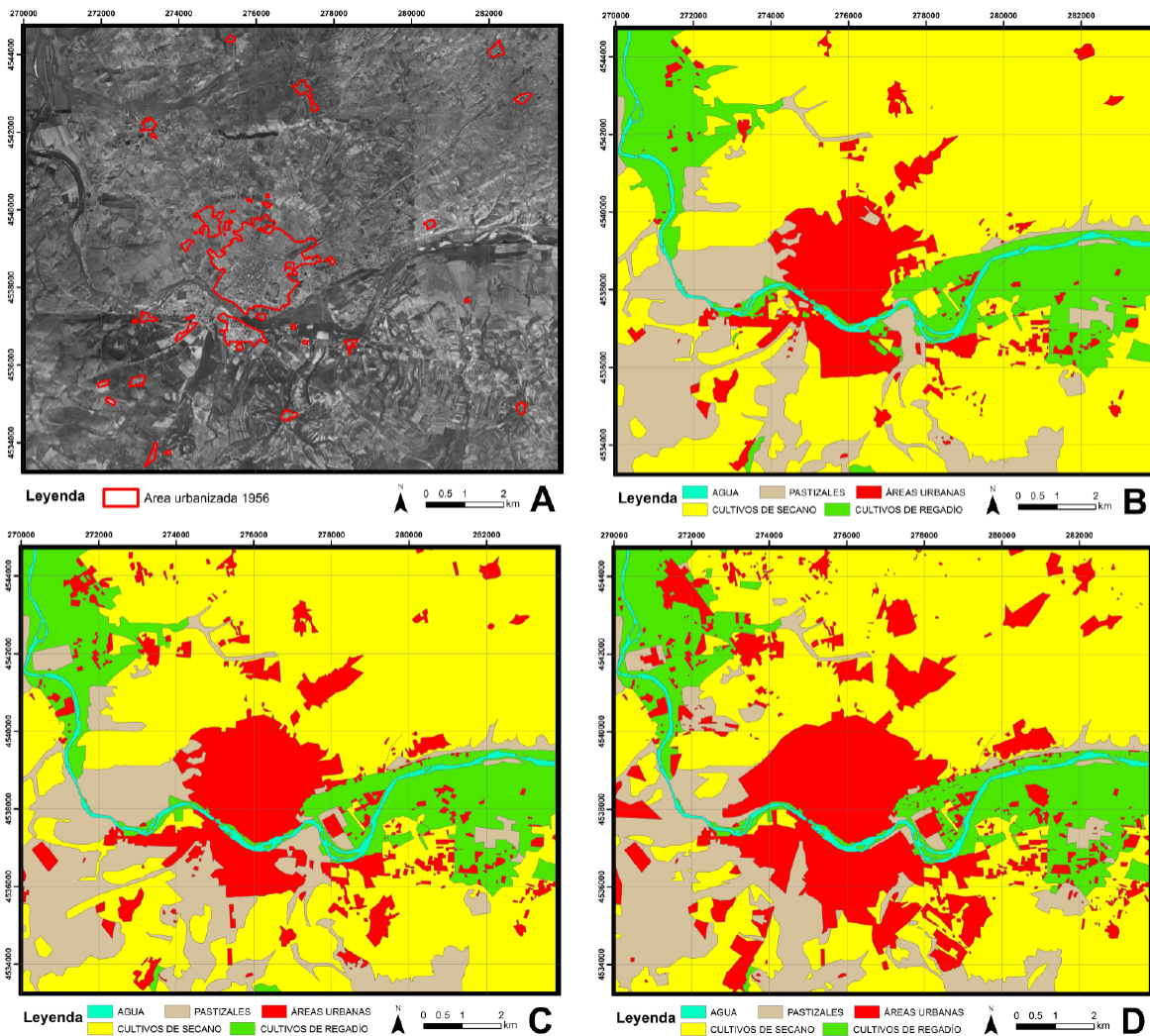


Figura 2: Evolución espaciotemporal de los usos del suelo: A) Superficie construida en 1956; B) 1985; C) 1998; D) 2018.

Figure 2: Land use spatiotemporal evolution: A) Built up areas in 1956; B) 1985; C) 1998; D) 2018.

(8%) dedicadas anteriormente a cultivos de regadío. Un total de 510 ha de pastos y eriales fueron edificadas en este periodo, lo que supone el 17% de los cambios de cobertura observados. El resto de transformaciones significativas se produce entre los diferentes tipos de áreas de cultivo y los pastizales y eriales, destacando la conversión de zonas de cultivo cerealista en pastizales y eriales con 664 ha (22%), lo que se relaciona con el abandono de las zonas de cultivo de menor calidad y producción.

3.2. Dinámica poblacional

En relación con la población del área de estudio (INE, 2019), también ha manifestado cambios para este periodo, incluso a nivel regional (Fig. 3). Para el periodo desde mediados de los años 50 hasta la actualidad, la población del área estudiada se ha multiplicado por 2.5, pasando de 80,000 habitantes a los 190,000 actuales, si bien el máximo, ligeramente superior a la población actual, se alcanzó a principios de la década del 2010. En comparación con la dinámica poblacional de su entorno, se muestra un claro aumento de la población en el área de estudio en contraposición con el fuerte y prolongado descenso a nivel regional. El área de estudio ha pasado

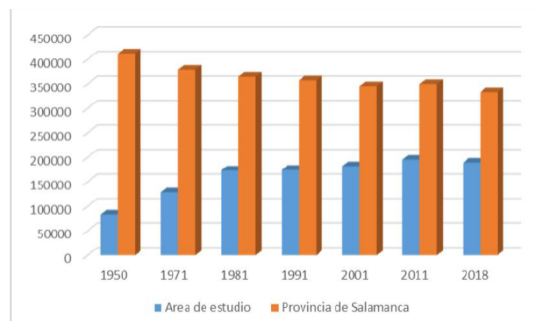


Figura 3: Dinámica poblacional del área estudiada y de la provincia de Salamanca a lo largo del periodo seleccionado.

Figure 3: Population dynamics of the studied area and of the Salamanca province throughout the selected period.

en este tiempo de estudio de albergar el 20% de la población de la provincia, a casi el 60% actual.

3.3. Análisis multicriterio y evaluación de la sostenibilidad de la expansión urbana

En relación a la distribución y caracterización de los criterios estudiados, los hábitats naturales, con una extensión de 683 ha, se relacionan con el cauce del Tormes y sus formaciones de ribera, así como a pastos y bosques mediterráneos (Fig. 4A). Las áreas de mayor calidad paisajística (981 ha) se encuadran en zonas de mayor vegetación natural y con orografía diversa (Fig. 4A). Respecto a los suelos agrícolas, los suelos de mejores cualidades agrícolas (Clase II) suponen 1872 ha, mientras que los de Clase III aglutinan 2580 ha y los de Clase IV 6828 ha. Los suelos de Clases V, VI y VII comprenden, respectivamente, 966, 3180 y 404 hectáreas (Fig. 4B). Las áreas de interés histórico, artístico y cultural abarcan 471 ha del territorio estudiado (Fig. 4C). Por último, se han identificado 1552 ha como zonas con riesgo de inundación (Criado *et al.*, 2019), y las zonas con riesgos de desprendimiento (145 ha), se asocian a escarpes fluviales principalmente (Fig. 4D).

Como resultado de aplicar el método AHP para asignar los pesos de cada criterio para efectuar el análisis, el criterio ecológico y el de protección de la población obtuvieron los pesos más elevados (35%), mientras que el criterio agrícola y el cultural, respectivamente, 20% y 10%. Como resultado final de este AMC, se obtienen las áreas restrictivas, no recomendadas para la urbanización, que conforman estos cuatro criterios, con una extensión de 3747 ha (Figura 5A).

Para comprender la sostenibilidad del proceso urbanizador, se evalúa cómo han ido invadiendo las nuevas edificaciones las áreas restrictivas. La superficie edificada en zonas con limita-

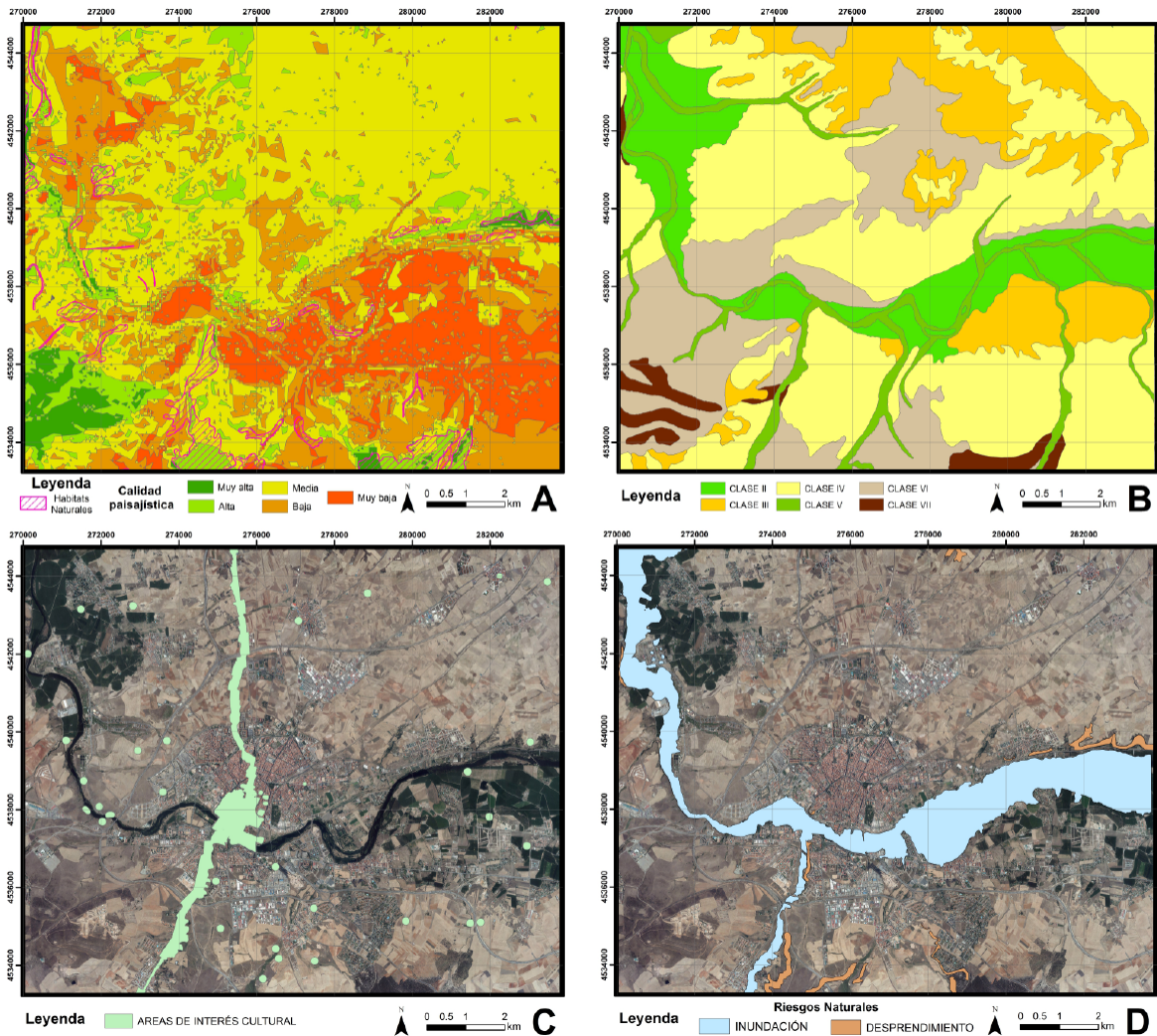


Figura 4: Criterios empleados en el AMC: A) Calidad paisajística y hábitats naturales; B) Clases Agrológicas; C) Yacimientos y áreas de interés histórico, artístico y cultural; D) Riesgos naturales: zonas inundables y desprendimientos.
 Figure 4: Criteria used in the MCA: A) Landscape quality and natural habitats; B) Land Capability; C) Areas of historical, artistic and cultural interest; D) Natural risks: flooding and rock-fall areas.

ciones ha ido creciendo paulatinamente: 218 ha en 1985 (Fig. 5B); 347 ha en 1998 (Fig. 5C); y 541 ha en 2018 (Fig. 5D), lo que supone que el 15 % de las edificaciones actuales se encuentren sobre áreas restrictivas. En relación con el sellado de suelos agrícolas (Clases II, III y IV), se han perdido a lo largo del tiempo hasta 2466 ha en el área estudiada. Las edificaciones también han prosperado en áreas con riesgos naturales: 187 ha edificadas en zonas inundables, y 6 ha en áreas de peligro de desprendimien-

tos. Menor es la afección encontrada sobre las áreas de mayor calidad paisajística (43 ha edificadas), y sobre los hábitats naturales (29 ha), siendo en estas los pastos de interés comunitario los que más retroceso han sufrido.

La Figura 6 muestra la afección que ha supuesto la urbanización a los suelos según su capacidad agrológica, y se presenta la extensión de suelo sellada en cada periodo, así como el total de suelo impermeabilizado has-

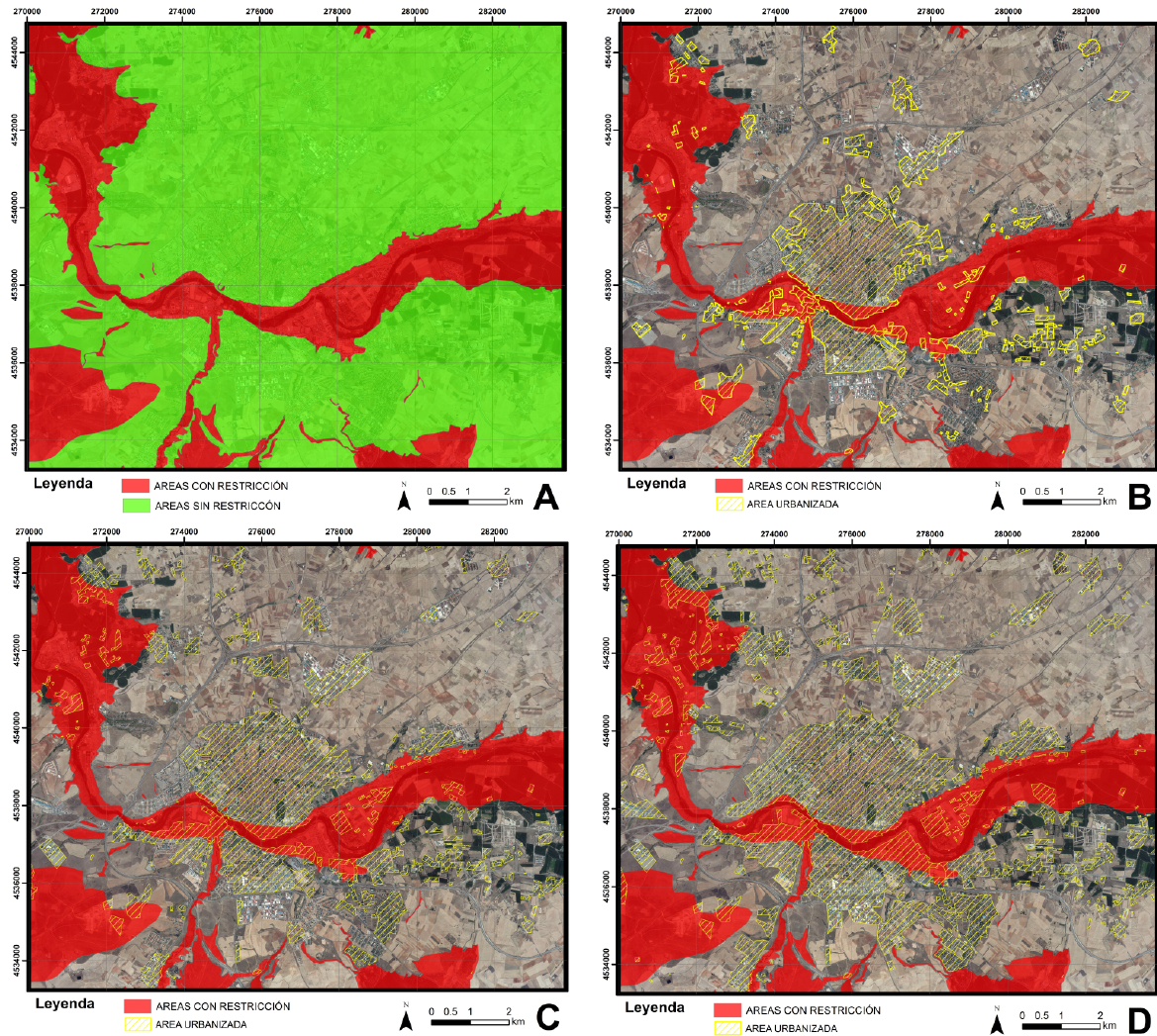


Figura 5: Evolución de la superficie construida en las zonas con restricción: A) Áreas restrictivas y sin restricción; B) 1985; C) 1998; D) 2018.

Figure 5: Built-up areas evolution in areas with restrictive conditions: A) Areas with restrictions and without restrictions; B) 1985; C) 1998; D) 2018.

ta cada momento (1985, 1998 y 2018) (Tabla 3). Hasta 1956, un total de 596 ha fueron selladas, afectando principalmente a suelos de la Clase IV (Fig. 6A). En el periodo 1956-1985 se sellaron debido a la urbanización 1034 ha de suelo, de las cuales 729 ha tenían buena aptitud agrícola (Fig. 6B). En el siguiente periodo de estudio (1985-1998), casi el 80% (455 ha) de la nueva superficie edificada (589 ha) correspondía a tierras agrícolas (Fig. 6C). Por su parte, en el periodo 1998-2018 hasta

914 ha agrícolas fueron urbanizadas, de un total de 1313 ha (Fig. 6D). En definitiva, a lo largo del ciclo urbanizador, en Salamanca y alrededores se han sellado 3532 ha de suelo, de las cuales tenían aptitud agrícola 2519 ha, de las que 426 pertenecían a los suelos de mayor productividad (Clase II). Las 1013 ha restantes que han sido selladas corresponden a suelos que albergan, principalmente, pastizales (Clases V y VI), y de forma casi testimonial, masas forestales de escasa entidad (Clase VII).

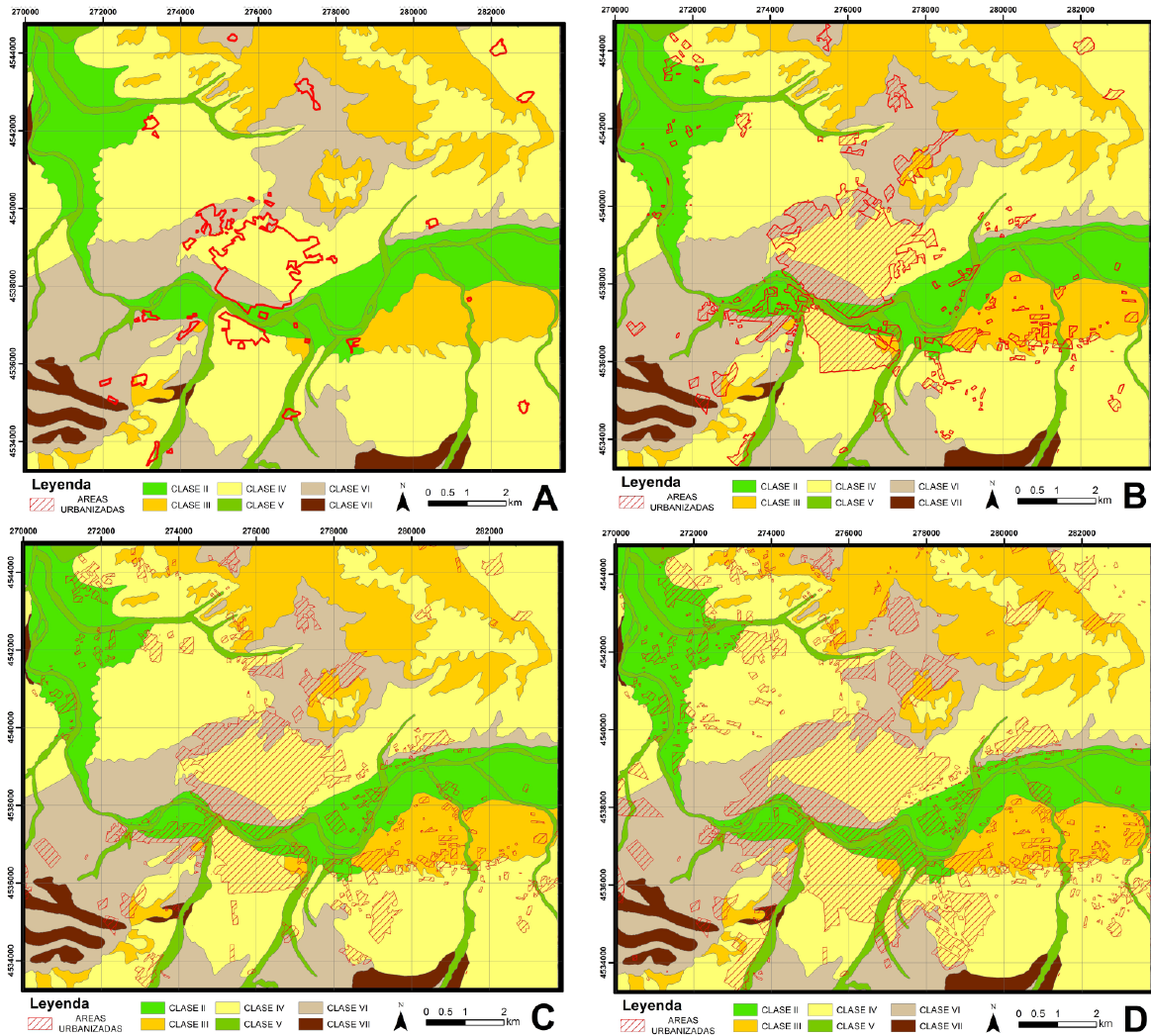


Figura 6: Sellado del suelo en cada periodo de acuerdo a la calidad agrícola de los suelos: A) Hasta 1956; B) Hasta 1985; C) Hasta 1998; D) Hasta 2018.

Figure 6: Soil sealing in each period according to land capability: A) Until 1956; B) Up to 1985; C) In 1998; D) Until 2018.

Periodo de tiempo	Clases de Calidad Agrícola								Suelo sellado (Ha)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Hasta 1956	-	18	6	400	9	163	-	-	596
1956-1985	-	128	144	454	45	257	6	-	1034
Hasta 1985	-	146	150	854	54	420	6	-	1630
1985-1998	-	109	43	303	22	108	4	-	589
Hasta 1998	-	255	193	1157	76	528	10	-	2219
1998-2018	-	171	139	604	48	340	11	-	1313
Hasta 2018	-	426	332	1761	124	868	21	-	3532

Tabla 3: Extensión (ha) afectada por la urbanización de cada clase agrológica a lo largo del periodo de estudio.

Table 3: Extension (ha) of land capability classes affected by urbanization in the studied period.

Respecto a los tipos y asociaciones de suelos afectados, destaca el sellado de fluvisoles (426 ha) en las zonas de vega, al tratarse de los suelos más productivos debido a su gran espesor, adecuadas características fisicoquímicas y disponibilidad de agua (Clase II). En la Clase III se encuentra la mayor parte de los luvisoles, siendo estos los suelos más antiguos y de mayor desarrollo y espesor, y también con buenas condiciones fisicoquímicas. Debido a la expansión urbana, se perdieron 332 ha de suelos de esta clase. Los suelos de la Clase IV son aquellos que, aunque son aptos para el laboreo, presentan ciertas limitaciones. Son suelos de menor desarrollo y espesor que los anteriores, pertenecientes a los cambisoles, y son los suelos que mayor impacto han sufrido (1761 ha urbanizadas). Las Clases V, VI y VII no son suelos con aptitud agrícola. La Clase V se corresponde con Gleysoles desarrollados en depósitos aluviales ligados a cursos de agua de pequeña entidad, y su extensión es reducida. Suelen ser suelos con diversa composición textural y de escaso espesor, siendo la presencia de arcillas un factor importante en su comportamiento. 124 ha de la Clase V fueron selladas en el periodo estudiado, dedicadas anteriormente a pastizales húmedos. La Clase VI presenta una considerable extensión en el área de estudio y agrupa a suelos de escaso desarrollo y espesor con presencia de pastizales secos. Son en su mayoría regosoles y cambisoles de escaso desarrollo, y en el periodo estudiado se impermeabilizaron 868 ha de estos. Los suelos de la Clase VII tienen escasa representación en Salamanca y alrededores. Son suelos delgados y escasamente desarrollados, generalmente situados sobre rocas duras (Leptosoles) asociados a las zonas de sierra. Únicamente se han identificado 21 ha edificadas sobre esta clase agrológica donde generalmente se desarrolla el bosque mediterráneo y pastos secos. No se identificaron suelos pertenecientes a la Clase I ni a la Clase VIII.

4. Discusión

El análisis de los usos del suelo mediante tratamiento de imágenes aéreas se considera adecuado y aceptado para conocer la evolución de una ciudad y su entorno y poder realizar un análisis de la sostenibilidad de los cambios que ha ido experimentando con el tiempo. La principal tendencia observada en este análisis multitemporal es el aumento de la superficie urbana en detrimento de las tierras de labor. La expansión urbana y el suelo sellado también se ha corroborado en otros lugares de España, como Madrid, cuya superficie aumentó del 15% al 24% entre 1984-2013 (García y Pérez, 2016); Valencia, que triplicó su superficie urbana entre 1956 y 2012 (Lozano *et al.*, 2019), o Cartagena (Región de Murcia), donde el sellado aumentó un 362% en el período 1981-2007 (Romero-Díaz *et al.*, 2011).

Respecto a la relación observada entre la dinámica poblacional y el incremento del sellado del suelo, como hecho principal se destaca que, a pesar del parón observado en la población residente en la zona en los últimos años (que apenas ha aumentado en 10 000 habitantes), el área urbanizada ha crecido significativamente, pasando del 14.0% al 22.3% en el periodo 1998-2018. Esta anomalía puede relacionarse con la mejora económica de la población a principios de siglo y la burbuja inmobiliaria española, lo que provoca una explosión en la construcción de viviendas unifamiliares, dúplex y chalets, especialmente en zonas tranquilas alejadas de la ciudad. Esto demuestra la dinámica creciente y generalizada que aún mantiene la urbanización, a pesar de sus efectos adversos (EEA, 2016).

En relación a los suelos del área, son de moderada y buena calidad (Santos-Francés *et al.*, 2019), siendo por tanto espacios de buena aptitud agrícola, lo que explica que lleven siglos cultivándose, siendo ya una de las principales fuentes de alimento del imperio roma-

no a su llegada a Hispania, que consideraban estas zonas como el granero de España (Peña-Sánchez 1987). No obstante, la abundancia de suelos agrícolas no debe ser excusa para propiciar el sellado de estos, y especialmente de los de mayor calidad. La expansión de núcleos urbanos irregulares a lo largo de la vega del río han propiciado la desaparición de gran cantidad de suelos fértiles (426 ha). Esto es importante en el contexto actual de aumento de la población y rápida urbanización. Debe garantizarse la producción alimentaria de la sociedad, por ello, para evitar los impactos más graves de la ocupación y el sellado del suelo, proponemos proteger los suelos de alta calidad y orientar el desarrollo urbano hacia los de menor calidad, siempre y cuando se hayan agotado las oportunidades de urbanizar o reurbanizar en el interior del casco urbano. Por otro lado, los análisis de riesgos naturales tampoco han sido tenidos en cuenta en los procesos de expansión de la ciudad hasta el momento, ya que se han identificado hasta 187 ha edificadas en zonas inundables, lo que ya fue demostrado en estudios anteriores (Criado *et al.*, 2019). En definitiva, la expansión de Salamanca y alfoz no ha seguido criterios sostenibles rigurosos tal y como muestra la tendencia ascendente de invasión de las áreas de mayor calidad agroambiental y de peligro para la población (áreas restrictivas), que se han multiplicado por 2.5 en el periodo 1985-2018. Además, el parón poblacional que ha sufrido el área se contrapone a esto.

Respecto al modelo, encontramos una parte que analiza la evolución de las coberturas, y otra que evalúa los impactos pasados, y que también puede servir para orientar el proceso urbanizador futuro. La evaluación multi-temporal ha sido ampliamente utilizada para estudiar los cambios en las coberturas de la tierra, especialmente mediante el análisis de imágenes Landsat. Recientemente, algunos estudios incorporan para el estudio de los

cambios más recientes imágenes Sentinel de mayor resolución, con las que se pueden obtener resultados más precisos (Ettehad-Osgouei *et al.*, 2019). En este trabajo se opta por mantener como fuente de datos las imágenes obtenidas por la serie Landsat, que si bien su resolución es menor que Sentinel, la consideramos adecuada para el análisis teniendo en cuenta la extensión de nuestro área de estudio. Por otro lado, la utilización de análisis multicriterio en el estudio se considera oportuno, al ser empleados y aceptados como herramienta en la búsqueda de la sostenibilidad urbana y desarrollo sostenible en múltiples estudios, destacando su capacidad de incorporar diferentes escenarios a la evaluación. Además, analizar los impactos provocados por la urbanización pasada se considera interesante, ya que contribuirá a la mejora de la sostenibilidad urbana futura. Distinguir los defectos y carencias del proceso urbanizador puede servir para cimentar un modelo urbanizador más sostenible. Finalmente, los gobiernos y planificadores encargados del desarrollo urbano podrán acceder a esta metodología de gestión sostenible del territorio, si bien el desarrollo de acciones locales originales más concretas queda fuera del alcance de este trabajo.

5. Conclusiones

Lograr la sostenibilidad en las ciudades debe ser una prioridad para los gobernantes y planificadores, ya que de ello depende el bienestar de gran parte de la población, así como, en buena medida, la lucha contra el cambio climático. La búsqueda de la sostenibilidad urbana debe efectuarse a todos los niveles y escalas. Este estudio proporciona una metodología orientativa que permite asignar un uso sostenible al suelo. La protección del medio ambiente y de la población son especialmente tenidas en cuenta en el trabajo, al considerarse clave para alcanzar el bienestar social y la sostenibilidad. Los plani-

ficadores y gobernantes pueden disponer de esta herramienta sencilla que combina herramientas SIG y de teledetección, de bajo costo y adaptable a múltiples escenarios para: 1) identificar los impactos causados por el proceso urbanizador; y 2) orientar el desarrollo urbano futuro hacia las áreas con mejores capacidades de acogida. Así mismo, se anima a los gobernantes a diseñar y aplicar medidas complementarias y concretas para avanzar hacia la sostenibilidad urbana. No obstante, se recomienda, siempre que sea posible, agotar las posibilidades de urbanización (espacios vacíos, abandonadas o con potencial de edificación) localizadas en el interior del entramado urbano, y apostar por un crecimiento vertical, en detrimento de uno horizontal.

En la zona estudiada, la evolución de los usos de la tierra ligada al proceso urbanizador muestra un claro consumo de terrenos agrícolas que han sido edificados. El área urbana se ha incrementado un 593% en el periodo 1956-2018, mientras que la población lo ha hecho en un 238%. Se ha identificado el mayor aumento de tierras urbanizadas en los últimos años, coincidiendo con un parón poblacional, lo que refleja la construcción de gran cantidad de viviendas unifamiliares en zonas alejadas del centro urbano. Además, se han contabilizado 193 ha urbanizadas amenazadas por riesgos naturales, así como 2,519 ha de suelos agrícolas selladas, de las cuales 426 correspondían a los suelos de mayor calidad. Mediante el análisis multicriterio, las zonas con condiciones restrictivas fueron identificadas (5960 ha), en las cuales no se recomienda la expansión urbana futura. Por tanto, el análisis de los usos del suelo mediante tratamiento de imágenes aéreas se considera adecuado y aceptado para conocer la evolución de una ciudad y su entorno y poder realizar un análisis de la sostenibilidad de los cambios que ha ido experimentando con el tiempo.

Bibliografía

- Angel, S.; Parent, J.; Civco, D.L.; Blei, A.; Pote-re, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Prog. Plan.* 75, 53-107. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001>
- Banister, D. (2005). *Unsustainable transport: city transport in the new century*, 1st ed.; Routledge, London, England, 314 p.
- Berry, M.; BenDor, T. K. (2015). Integrating sea level rise into development suitability analysis. *Comput. Environ. Urban Syst.* 51, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbysys.2014.12.004>
- Bull-Kamanga, L.; Diagne, K.; Lavell, A.; Leon, E.; Lerise, F.; MacGregor, H.; Maskrey, A.; Meshack, M.; Pelling, M.; Reid, H.; Satterthwaite, D.; Songsore, J.; Westgate, K.; Yitambe, A. (2003). From everyday hazards to disasters: the accumulation of risk in urban areas. *Environ. Urban.* 15(1), 193-204. <https://doi.org/10.1630/095624703101286457>
- Cai, G.; Du, M.; Xue, Y. (2011). Monitoring of urban heat island effect in Beijing combining ASTER and TM data. *Int. J. Remote Sens.* 32(5), 1213-1232. <https://doi.org/10.1080/01431160903469079>
- CCE (1992). *Directiva 92/43/CEE, del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres*. Diario Oficial de las Comunidades europeas, 7-50.
- Criado, M.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Veleda, S.; Zazo, C. (2016). Multi-Criteria Analyses of Urban Planning for City Expansion: A Case Study of Zamora, Spain. *Sustainability*, 9, 1850. <https://doi.org/10.3390/su9101850>
- Criado, M.; Martínez-Graña, A.; San Román, J.S.; Santos-Francés, F. (2019). Flood Risk Evaluation in Urban Spaces: The Study Case of Tormes River (Salamanca, Spain). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 5. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010005>
- EEA (2016). *Urban Sprawl in Europe. Joint EEA-FOEN Report*. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Ettehadi Osgouei, P.; Kaya, S.; Sertel, E.; Alganci, U. (2019). Separating Built-Up Areas from Bare Land in Mediterranean Cities Using Sentinel-2A Imagery. *Remote Sens.* 11, 345. <https://doi.org/10.3390/rs11030345>

- García, P.; Pérez, E. (2016). Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain). *Geoderma*, 268, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.012>
- García, D. A. (2017). Green areas management and bioengineering techniques for improving urban ecological sustainability. *Sustain. Cities Soc.* 30, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.008>
- Hope, K. R. (1986). Urbanization and economic development in the Third World: An overview. *Cities*, 3(1), 41-57. [https://doi.org/10.1016/0264-2751\(86\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0264-2751(86)90005-3)
- INE (2019). Disponible online: http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176951&menu=ultiDatos&idp=1254735572981 [consultado el 10 Mayo 2019].
- IGN, Instituto Geográfico Nacional (2019). Disponible online: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> [consultado el 24 Abril 2019].
- ITACyL, Instituto Tecnológico y Agrario de Castilla y León (2019). Disponible online: [http://ftp.itacyl.es/cartografia/01_Ortofotografia/1956/Mosaico%20de%20los%20fotogramas%20de%20cuencas%20del%20duero%20\(C.H.D.\)/](http://ftp.itacyl.es/cartografia/01_Ortofotografia/1956/Mosaico%20de%20los%20fotogramas%20de%20cuencas%20del%20duero%20(C.H.D.)/) [consultado el 21 Abril 2019].
- Jennings, V.; Larson, L.; Yun, J. (2016). Advancing Sustainability through Urban Green Space: Cultural Ecosystem Services, Equity, and Social Determinants of Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13, 196. <https://doi.org/10.3390/ijerph13020196>
- Kabisch, N.; Selsam, P.; Kirsten, T.; Lausch, A.; Bumberger, J. (2019). A multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach to detect land cover change dynamics in heterogeneous urban landscapes. *Ecol. Indic.* 99, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.033>
- Kammen, D. M.; Sunter, D. A. (2016). City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science*, 352(6288), 922-928. <https://doi.org/10.1126/science.aad9302>
- Klingebiel, A. A.; Montgomery, P. H. (1961). *Land-capability classification*. Soil Conservation Service: US Department of Agriculture.
- Landis, J. R.; Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Li, G., Sun, G. X., Ren, Y., Luo, X. S., & Zhu, Y. G. (2018). Urban soil and human health: a review. *Eur. J. Soil Sci.* 69(1), 196-215. <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>
- Liu, J.; Niyogi, D. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Sci. Rep.* 9(1), 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>
- Lozano, A. V.; Vidal, C. A.; Díaz, J. S. (2019). Urban growth (1956-2012) and soil sealing in the metropolitan area 720 of Valencia (Eastern Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 9(2).
- Meng, Y.; Malczewski, J.; Boroushaki, S. (2011). A GIS-based multicriteria decision analysis approach for mapping accessibility patterns of housing development sites: a case study in Canmore, Alberta. *Journal of Geographic Information System*, 3(01), 50. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.31004>
- Niemelä, J.; Breuste, J. H.; Guntenspergen, G.; McIntyre, N. E.; Elmqvist, T.; James, P.; McIntyre, N.E. (2011). Introduction. In: *Urban ecology: patterns, processes, and applications*. Oxford University Press: New York, USA, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199563562.003.0001>
- Peña Sánchez, M. (1987). *Tierra de Campos. La integración de un espacio rural en la economía capitalista*. Serie Geográfica n° 5 Secretariado de Publicaciones Universidad de Valladolid, pp. 468.
- Pérez, E.; García, P. (2016). Monitoring soil sealing in Guadarrama River basin, Spain, and its potential impact in agricultural areas. *Agriculture*, 6 (1), 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture6010007>
- Qiu, G.; Song, R.; He, S. (2019). The aggravation of urban air quality deterioration due to urbanization, transportation and economic development-Panel models with marginal effect analyses across China. *Sci. Total Environ.* 651, 1114-1125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.219>
- Rode, P.; Floater, G.; Thomopoulos, N.; Docherty, J.; Schwinger, P.; Mahendra, A.; Fang, W. (2017). Accessibility in cities: transport and urban form. In: *Disrupting mobility*. Lecture Notes in Mobility; Springer, Cham, pp. 239-273. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51602-8_15
- Romero Díaz, A.; Belmonte Serrato, F.; Docampo Calvo, A. M.; Ruiz Sinoga, J. D. (2011). Consecuencias del sellado de los suelos en el Campo de Cartagena (Murcia). In *Urbanismo expansivo, de la utopía a la realidad*. Proceedings of the XXII Congreso de Geógrafos Españoles, Univ Alicante, Spain; Gonzalez-Pérez, V., Marco-Molina, J.A. (Eds.).

- Saaty, T.L. (2013). The Modern Science of Multicriteria Decision Making and Its Practical Applications: The AHP/ANP Approach. *Oper. Res.* 61, 1101-1118. <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1197>
- Santos-Francés, F.; Martínez-Graña, A.; Ávila-Zarza, C.; Criado, M.; Sánchez, Y. (2019). Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma*, 354, 113872. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.030>
- Song, X. P.; Sexton, J. O.; Huang, C.; Channan, S.; Townshend, J. R. (2016). Characterizing the magnitude, timing and duration of urban growth from time series of Landsat-based estimates of impervious cover. *Remote Sens. Environ.* 175, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.027>
- Teng, J.; Xu, C.; Wang, W.; Wu, X. (2018). A system dynamics-based decision-making tool and strategy optimization simulation of green building development in China. *Clean Technol. Environ. Policy*, 20(6), 1259-1270. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1550-2>
- Tronchin, L.; Manfren, M.; Nastasi, B. (2018). Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies-A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renew. Sust. Energy Rev.* 95, 341-353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.060>
- United Nations (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*. Routledge, Washington, USA.
- United Nations (2012). *World Urbanization Prospects. The 2011 Revision*. Department of Economic and Social Affairs, New York.
- USGS (2019). Disponible online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> [consultado el 17 Abril 2019].
- Zhao, Y.; Feng, D.; Yu, L.; Cheng, Y.; Zhang, M.; Liu, X.; Xu, Y.; Fang, L.; Zhu, Z.; Gong, P. (2019). Long-Term Land Cover Dynamics (1986-2016) of Northeast China Derived from a Multi-Temporal Landsat Archive. *Remote Sens.* 11, 599. <https://doi.org/10.3390/rs11050599>
- Zope, R.; Vasudevan, N.; Arkatkar, S. S.; Joshi, G. (2019). Benchmarking: A tool for evaluation and monitoring sustainability of urban transport system in metropolitan cities of India. *Sustain. Cities Soc.* 45, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.011>

Recibido el 18 de marzo de 2020
Aceptado el 12 de mayo de 2020

