



Revista Internacional de
**Sostenibilidad,
Tecnología y Humanismo**
año 2009 n° 4

Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos.

Aguilera Benavente, F.¹; Plata Rocha, W.²; Bosque Sendra, J.² y Gómez Delgado, M.²

1 Laboratorio de Planificación Ambiental. Universidad de Granada
Campus de Fuente Nueva S/N Edificio Politécnico 18071 Granada

2 Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.
Colegios, 2, Alcalá de Henares 28801 Madrid
e-mail¹: franab@ugr.es

Resumen

La generación y simulación de escenarios exploratorios externos es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones, de especial relevancia en el ámbito territorial y metropolitano (Peterson *et al*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009), cuyo calado en el proceso de planificación en España es escaso hasta la fecha (Valenzuela, Aguilera, Soria y Molero, 2008).

En este artículo se presenta un modelo basado en Dinámica de Sistemas para estimar las demandas de nuevo suelo urbano en ámbitos metropolitanos. El modelo se ha desarrollado concretamente para dos ámbitos metropolitanos españoles (Región Urbana de Madrid y Aglomeración Urbana de Granada) para los cuales se ha realizado un proceso de calibración individual,

Una vez calibrado el modelo para dichos ámbitos, y a través del planteamiento de tres escenarios futuros, se han simulado las posibles tendencias de las demandas de ocupación urbana que podrían derivarse de las premisas establecidas en cada escenario, con unos resultados satisfactorios. Dichos resultados podrán ser empleados en otros trabajos que permitirán localizar espacialmente, mediante modelos de simulación espacial, las demandas estimadas, para mostrar y evaluar posibles consecuencias espaciales y territoriales de los procesos de crecimiento metropolitano.

Palabras clave: *Scenario planning*, Escenarios exploratorios externos, dinámica de sistemas, planificación, áreas metropolitanas.

* * *

Title: Design and Simulation of Metropolitan urban growth demands scenarios

Abstract: The design and development of future explorative external scenarios are useful tools for the spatial planning and even more for the metropolitan planning (Peterson *et al*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009). However, spatial planning policy and practices in Spain lack of this instruments (Valenzuela, Aguilera, Soria y Molero, 2008)

This paper shows a System Dynamics-based model designed to estimate urban growth demands in metropolitan areas. This model has been specifically developed for Madrid and Granada metropolitan areas (Spain), where the model has been calibrated.

After the calibration, three future urban growth demands scenarios has been designed and simulated using the model developed. The urban growth demands obtained may be used in later research to spatially locate that demands using spatial simulation models.

Keywords: Scenario planning, explorative external scenarios, system dynamics, spatial planning, metropolitan areas.

1 Introducción: Dinámica de sistemas y SIG en la generación de escenarios para la planificación metropolitana

La generación y simulación de escenarios exploratorios externos¹ es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones en el ámbito territorial y metropolitano ((Peterson *et al*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009) que se encuentra bien extendido en el contexto europeo (ESPON Project 3.2, 2006), formando parte de enfoques de la planificación como el *scenario planning* (Stillwell *et al*, 1999). Estos instrumentos pueden ayudar a disminuir la incertidumbre inherente al proceso de planificación (Prato, 2007; Aguilera, 2008; Carsjens, 2009), especialmente en momentos como los actuales. Sin embargo, su falta de aplicación en el contexto metropolitano español, queda patente en la mayor parte de los documentos de planificación existentes tanto a escala regional, supramunicipal o local (Soria *et al*, 2009), siendo los dos ámbitos de estudio seleccionados en este trabajo claros ejemplos de ello.

Es posible achacar en cierta forma la incapacidad del planeamiento metropolitano español (De Miguel, 2008) a la falta de innovación metodológica en el empleo de instrumentos de este tipo. En este sentido consideramos oportuno explorar las posibilidades de aplicación de instrumentos útiles para el proceso de planificación metropolitana en España tales como el diseño de modelos de simulación (Aguilera, 2008), la generación de los escenarios normativos o exploratorios (Nijkamp y Blaas, 1994, Borjerson *et al*, 2006), o el empleo de modelos de ayuda a la decisión (Hendriks y Vriens, 2000) o de ayuda a la planificación (Carsjens, 2009), especialmente ante etapas de gran desarrollo metropolitano como las acontecidas en los últimos años (OSE, 2006) y/o la situaciones de incertidumbre como la actual.

Algunas de las herramientas más importantes que pueden emplearse para la concreción de instrumentos como los escenarios futuros son, entre otras, la Dinámica de Sistemas (DS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En primer lugar los SIG, de acuerdo con su elevada capacidad de análisis y de integración diversas fuentes de información geográfica, proporcionan un soporte amplio para el diseño y aplicación de modelos de localización óptima (Gómez y Barredo, 2005), o los modelos de simulación espacial de la expansión urbana, (Aguilera, 2008; Barredo y Gómez, 2008) en el que la componente espacial de la información geográfica es fundamental. Sin embargo, uno de los principales hándicap que presentan los SIG en este campo lo constituye la inherente dificultad para el tratamiento de la cuestión temporal (Ott y Swiaczny 2001; López y Bosque, 2005).

La dinámica de sistemas por su parte, sin una preocupación expresa por el tratamiento de las cuestiones espaciales, se presenta como un instrumento útil para el estudio del comportamiento de sistemas complejos a partir de la identificación de las relaciones entre la estructura del sistema, su comportamiento, y la determinación de los valores que las variables adoptan, a lo largo del tiempo (Aracil, y Gordillo 1997). No en vano, algunas de las primeras aplicaciones de la DS fueron en el campo de los sistemas urbanos (Forrester, 1969).

Así pues, de acuerdo con el enfoque temporal de la DS y el eminentemente espacial de los SIG, es posible abordar, a partir del uso conjunto de estas herramientas, procesos de degeneración y simulación temporal y espacial de escenarios aplicados a la planificación territorial y metropolitana, línea de una relevancia importante como revelan proyectos Europeos como PLUREL (Ravetz, 2009), PRELUDE (JRC, 2007) o ESPON 3.2.(2006) impulsados por la Comisión Europea.

Este trabajo, y de acuerdo con lo anteriormente expuesto, tiene como objetivo principal el diseño de tres escenarios externos futuros (Dreborg, 2004; Borjerson *et al*, 2006) en relación con el contexto socioeconómico, así como la simulación de las demandas de crecimiento metropolitano para los tres escenarios en dos zonas metropolitanas Españolas. Estas áreas, de características muy diferentes, son la región urbana de Madrid y el Área Metropolitana de Granada. Al tratarse de escenarios prospectivos externos, y de acuerdo con Borjerson *et al*, (2006) deben ser entendidos en el contexto del pensamiento futuro exploratorio, y por tanto posible, pero nunca como una realidad futura. La representación de estos futuros hipotéticos permite esclarecer la acción presente (planificadora) a la luz de futuros posibles (Goded, 2000) y, por tanto constituye un enfoque exploratorio, y no normativo.

Para ello se construirá un modelo sencillo que pueda generar valores de demanda de ocupación del suelo en entornos metropolitanos, para el que no se considerarán limitaciones físicas, a partir de variables de fácil disponibilidad, principalmente de naturaleza socioeconómica, que permitan la simulación de las condiciones establecidas en los tres escenarios y por tanto su materialización en diferentes intensidades de ocupación urbana asociadas.

2 Ámbito de estudio y datos de partida

2.1 Ámbito de estudio: Las áreas metropolitanas de Madrid y Granada

El ámbito de estudio y laboratorio de pruebas del modelo de simulación de demandas y de los escenarios de desarrollo territorial está configurado por dos áreas metropolitanas españolas de características diferentes, como son la Región Urbana de Madrid y la Aglomeración Urbana de Granada, que bien pueden ser ejemplo de las grandes áreas metropolitanas consolidadas Españolas (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Bilbao) o las nuevas áreas metropolitanas emergentes (Málaga, Vigo-Pontevedra, Elche-Alicante, etc) (Feria, 2004).

Con respecto a la Comunidad de Madrid, ésta tiene una extensión territorial de 8.025 km² (figura 1), repartida en un total de 179 municipios. Su población estimada es de aproximadamente 6 millones de habitantes (INE, 2008), gran parte de la cual se concentra en el área metropolitana, aunque a partir de la década de 1990 se evidenciaron fuertes procesos de descentralización hacia algunos municipios del oeste, norte y sureste de la región, que incidieron en el desarrollo de nuevos espacios urbanos.

El sector productivo (industrial y comercial) está caracterizado por una distribución espacial cada vez más extensa, dispersa y fragmentada, lo que conlleva a crecientes necesidades de transporte, tanto para los trabajadores y sobre todo para las mercancías (Gutiérrez Puebla, 2004, De Santiago, 2007). Esto a su vez también produjo una importante ampliación de la infraestructura de transporte, donde cabe mencionar que hacia el año 2000 la red vial alcanzaba aproximadamente 584 kilómetros de extensión mientras que la red de metro y ferrocarriles se acercaba a los 530 kilómetros, posicionándose como la segunda infraestructura de transporte más importante de la región (López de Lucio, 2003).

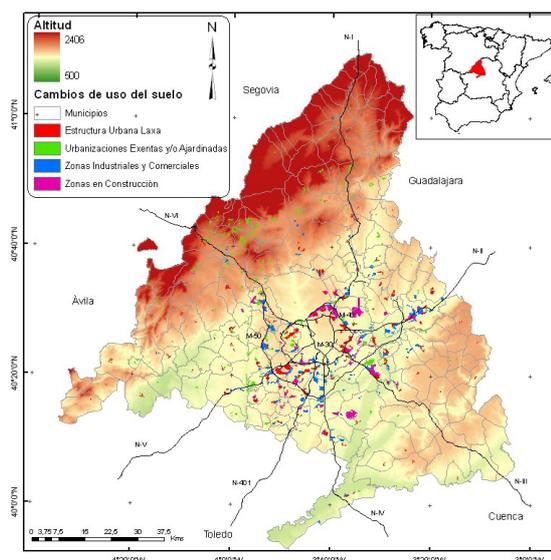


Figura 1: La región Urbana de Madrid.

En este contexto la Comunidad de Madrid se consolida como uno de los territorios de mayor dinamismo del arco mediterráneo, con un crecimiento de las superficies artificiales aproximado del 48 % durante la década de los 90, muy lejos del 25% de crecimiento medio registrado en el territorio nacional y del 5,4% de la Unión Europea (EEA, 2006; OSE, 2006; Plata *et al*, 2009), fenómeno que no ha venido acompañado del mismo crecimiento en términos de población, pues ésta sólo creció un 9% entre las mismas fechas.

Por su parte, el Área de Metropolitana de Granada (Figura 2), tradicionalmente denominada comarca de la Vega de Granada, con una superficie de 859,34 km² y 32 municipios (Consejería de Obras Públicas, 1999), ha experimentado en las últimas décadas una serie de transformaciones especialmente vinculadas a la ocupación de suelo con funciones urbanas (Aguilera 2008). Situada en la depresión del río Genil, en el sudeste de la península Ibérica dicha región posee un importante valor agroproductivo (Menor, 2000), de tal forma que su organización territorial a lo largo de la historia ha reflejado la importancia económica de la explotación agraria, que sin embargo se encuentra en franca regresión (Consejería de Obras Públicas, 1999; Fernández, 2004)

Tradicionalmente, y hasta dicha década de los 70, la población, servicios y actividades se concentraban en la ciudad de Granada, mientras que a su alrededor orbitaban en torno a una decena de pequeños núcleos urbanos de marcado carácter agrícola. Sin embargo, desde finales esta década de los 70 y comienzos de la de los 80, de acuerdo con un proceso de aceleración de la ocupación de suelo (incremento de la ocupación urbana del 117 %, Aguilera 2008), una política de incremento de las infraestructuras de la movilidad, y un declive de la producción agrícola, dicha comarca ha dado lugar a la realidad metropolitana actual que, como tercera área metropolitana de Andalucía, alberga una población superior al medio millón de habitantes (INE,2008).

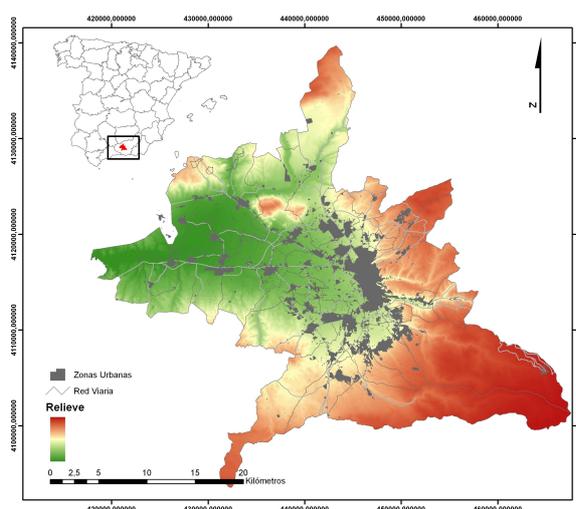


Figura 2. El Área Metropolitana de Granada

2.2 Los datos de partida

El diseño de un modelo de simulación para estudiar los cambios que tienen lugar en un área metropolitana, de naturaleza especialmente compleja (Verburg, Schot, Dijst, y Veldkamp 2004), requiere del planteamiento previo de un conjunto de factores con posible influencia en el proceso de cambio en cuestión (Cheng y Masser, 2003).

De acuerdo con el enfoque del trabajo, que se aleja de la dimensión espacial en esta primera etapa², el conjunto de variables seleccionado resume de manera muy sencilla algunos de los posibles factores motrices del crecimiento en las áreas metropolitanas de Granada y Madrid, además de ser fácilmente accesibles, haciendo reproducible los resultados obtenidos en otros ámbitos metropolitanos. Así pues, la mayor parte de estos datos pueden ser obtenidos a través del Instituto Nacional de Estadística así como de los Institutos de Estadística regionales de las diferentes comunidades autónomas.

El conjunto comprende variables que van desde los valores de nacimientos y defunciones hasta los valores de renta, pasando por el número de viviendas, o el número de hogares. Estos factores quedan recogido en la tabla 1, en la que además se han dividido entre *variables primarias*, las cuales se han obtenido directamente de la información estadística disponible; *variables derivadas*, obtenidas a partir y por combinación de las variables básicas, y *variables de calibración*, cuyo valor se obtiene a partir de observaciones empíricas del cambio experimentado en períodos pasados. Igualmente se ha recogido en dicha tabla el tipo de instrumento con el que dicha variable se ha implementado en el modelo de DS elaborado (*niveles, flujos, variables auxiliares y tasas*)

Variable	Nombre	Descripción	Unidades	Tipo de Variable	Tipo modelo	Siglas variable
POB	Población	Población residente	Personas	Primaria	Nivel	POB
REN	Renta	Renta (€)	Euros	Primaria	Nivel	REN
HOG	Hogares	Hogares	Nº de Hogares	Primaria	Nivel	HOG
SP	Suelo Productivo	Suelo comercial e industrial	Ha	Primaria	Nivel	SP
SR	Suelo residencial	Suelo destinado a actividades residencial	Ha	Primaria	Nivel	SR
NV	Número de viviendas	Número de viviendas totales	Nº de viviendas	Primaria	Nivel	NV
TBN	Tasa Natalidad	Tasa de Natalidad en tanto por mil	Adimensional	Primaria	Tasa	TBN
TBM	Tasa Mortalidad	Tasa de Mortalidad en tanto por mil	Adimensional	Primaria	Tasa	TBM
TSM	Tasa Migratoria	Tasa Migratoria en tanto por mil	Adimensional	Derivada	Tasa	TSM
Nac	Nacimientos	Nacimientos obtenidos a partir de la TBN	Nº Nacimientos	Derivada	Flujo	Nac
Def	Defunciones	Defunciones obtenidas a partir de la TBM	Nº defunciones	Derivada	Flujo	Def

SM	Saldo Migratorio	Saldo Migratorio	Nº inmigrantes	Derivada	Flujo	SM
IncP OB	Aumento de la población	Incremento de Población	Nº de personas	Derivada	Variable auxiliar	IncPOB
PH	Personas por Hogar	Población entre Nº de Hogares en 1991	Nº de personas	Derivada	Tasa	PH
HEC E	Hogares por cambio estructura	Nuevos hogares por escisión de núcleos familiares	Nº Hogares	Derivada	Tasa	HECE
NH	Nuevos Hogares	Igual a los nuevos hogares por cambio estructura más nuevos hogares por crecimiento poblacional	Nº de hogares/año	Derivada	Flujo	NH
DesR EN	Disminución de Renta	Disminución de la renta en euros por año	Euros/Año	Derivada	Flujo	DesREN
IncR EN	Incremento de Renta	Incremento de la renta en euros por año	Euros/Año	Derivada	Flujo	IncREN
Tinc REN	Tasa de Incremento de renta	% de Aumento de la renta/año	% Euros/Año	Derivada	Tasa	TincREN
Tdes REN	Tasa de Disminución de renta	% de Descenso de la renta/año	% Euros/Año	Derivada	Tasa	TdesREN
VHR	Variación de renta por Habitante	Cambio en la renta en euros por persona	Euros/Persona	Derivada	Variable Auxiliar	VHR
AVR	Aumento de viviendas por renta	Población por renta por tasa de aumento vivienda/euro persona	Nº de Viviendas/euro persona	Derivada	Variable auxiliar	AVR
Nviv	Nuevas viviendas	Nuevas viviendas en el área metropolitana	Nº de Viviendas	Derivada	Flujo	Nviv
SCV	Suelo consumido por vivienda	Se obtiene como cociente entre la superficie de suelo residencial y el número de viviendas	Metros cuadrados/vivienda	Derivada	Tasa	SCV
NSR	Nuevo suelo residencial	Nuevo suelo residencial por año	Metros cuadrados	Derivada	Variable auxiliar	NSR
NSP V	Suelo productivo por vivienda	Nuevo suelo productivo por año	Metros cuadrados/vivienda	Derivada	Tasa	NSPV
ISP	Incremento Suelo productivo	Nuevo suelo productivo tanto industrial como comercial	Metros cuadrados	Derivada	Flujo	ISP

Tabla 1: Variables empleadas en el modelo y sus principales características (Fuente IECM e IEA)

3 Metodología: El modelo de DS y la generación de los escenarios futuros

3.1 Descripción del modelo. El funcionamiento del modelo

Desde el punto de vista del diseño conceptual del modelo, éste se compone de 3 bloques básicos que al relacionarse entre sí dan lugar a otros dos bloques que generan los resultados finales del modelo. Éste ha sido implementado en el software Vensim PLE (Ventana Systems, Inc), dado su facilidad de manejo, amplia difusión, disponibilidad y gratuidad, además, por supuesto, de su diseño específico para el trabajo con modelos basados en Dinámica de Sistemas.

En total constituyen 5 bloques diferenciados (Figura 3) pero interrelacionados entre sí.

- El primer bloque básico se encarga de **estimar la evolución de la población en función de las tasas de natalidad, mortalidad y emigración.**
- El segundo bloque aborda **la modificación del número de hogares, producto de los cambios en la estructura familiar** (escisiones de hogares, por ejemplo) así como de la evolución poblacional.
- El tercer bloque básico **estima la evolución de los niveles de renta.**

Como producto de la relación entre estos tres bloques los dos bloques resultado serán:

- Un bloque de **estimación del número de viviendas y superficie urbana destinada a usos residenciales**, como producto de la relación entre los bloques de evolución de los hogares y de evolución de niveles de renta.
- Un bloque de **estimación de las superficies urbanas destinadas a usos productivos (industrial comercial, servicios, ocio...)**, como producto tanto del tercer bloque básico (evolución del nivel de renta) así como del bloque de estimación de viviendas.

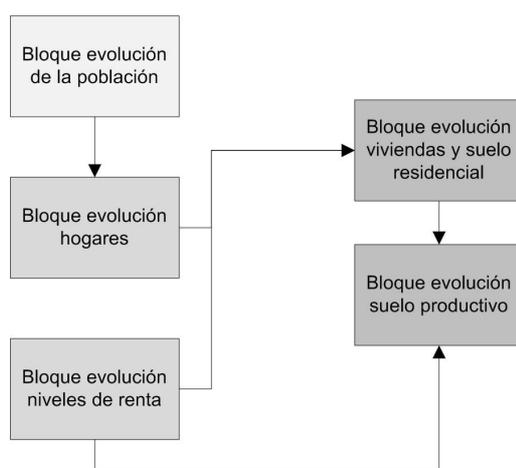


Figura 3: Diseño conceptual del modelo.

3.1.1 La estimación de la evolución de la población

El primero de los bloques básicos del modelo es el de estimación de la evolución de la población. Este obtiene los crecimientos poblacionales a lo largo del tiempo mediante la estimación del saldo migratorio, defunciones y nacimientos (flujos, en color verde), empleando para ello unas tasas de natalidad, mortalidad y migratoria que consideramos se mantienen constantes (en color rojo) (Figura 4). Igualmente, este bloque también permite estimar el incremento neto de población, que será almacenado a través de la variable auxiliar Incremento de población (en azul).

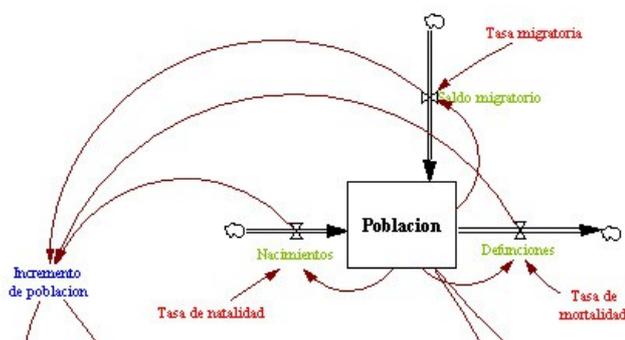


Figura 4: Bloque 1: Evolución de la población.

3.1.2 La estimación de la evolución de los hogares

El segundo bloque estima el cambio en el número de hogares con el tiempo empleando para ello diversas variables (Figura 5). En primer lugar, se estima el número de nuevos hogares como consecuencia de los crecimientos poblacionales estimados en el primer bloque. Para ello se divide el incremento de población entre un número de personas por hogar (en rojo). Igualmente se considera como factor de incremento del número de hogares la aparición de nuevos hogares generados por cambios en la estructura tradicional del hogar (disminución del número de

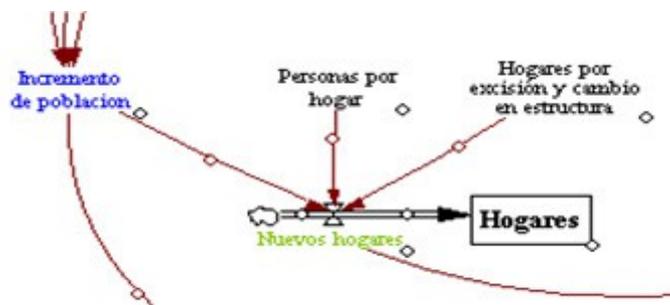


Figura 5: Bloque 2. La evolución del número de hogares.

personas por hogar, separaciones, etc). Para ello se introduce la variable auxiliar “Hogares por escisión y cambio en la estructura” (**HECE**), que se ha calculado a partir de los nuevos hogares aparecidos en el período 90-2000 que no se explican de acuerdo con el crecimiento poblacional, sino con una disminución del número de personas por hogar. Los nuevos hogares se obtendrían como la suma de los nuevos hogares producto del incremento poblacional así como de los nuevos hogares por escisión de los existentes.

3.1.3 La estimación de la evolución de los niveles de renta

El tercero de los bloques básicos (figura 6) estima el cambio de los valores de renta a partir únicamente del flujo del incremento de renta.

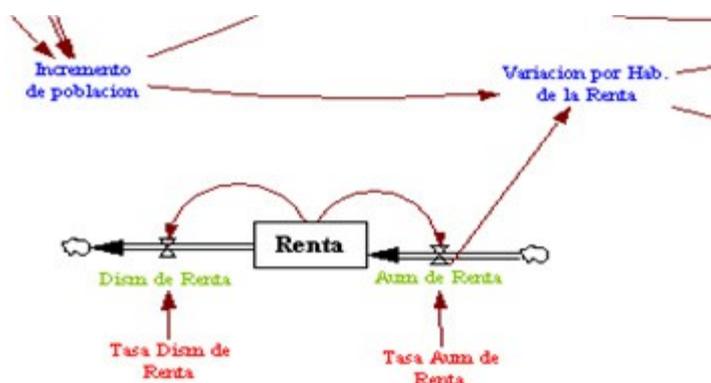


Figura 6: Bloque 3. Estimación de la evolución de los niveles de renta.

3.1.4 La estimación de la evolución de las viviendas y el suelo residencial

El bloque de estimación de las viviendas y ocupación de suelo se apoya en los diferentes bloques básicos detallados anteriormente. Para ello estima el incremento de nuevas viviendas a partir de dos procesos: el incremento de viviendas motivado por el incremento de hogares, así como el incremento de viviendas con motivo del incremento de renta disponible (Figura 7).

La determinación del número de viviendas generadas por los nuevos hogares se apoyará en la **estimación del número de hogares calculada en el segundo bloque (en azul) junto con una tasa de viviendas por hogar**, que en principio se fijó de acuerdo con los valores existentes en 1991 (en rojo); así como en **el número de viviendas generadas por el incremento de renta**. Este valor deberá ser calibrado.

A partir de la estimación de las viviendas, y mediante un valor de suelo consumido por vivienda (en rojo) se puede obtener igualmente las nuevas demandas de suelo para uso residencial.

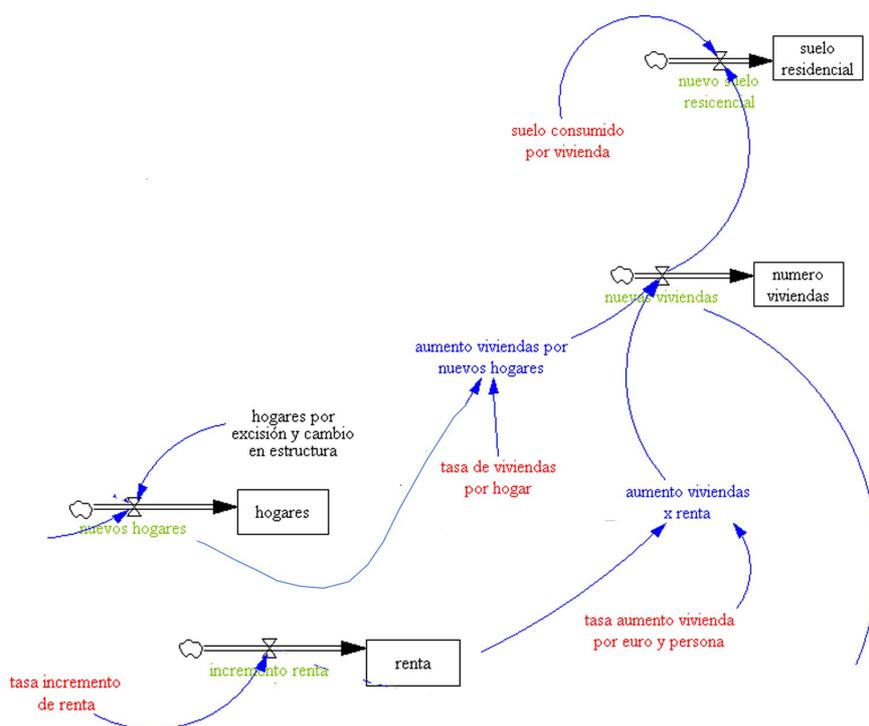


Figura 7: Bloque 4. Estimación de las nuevas viviendas y suelo residencial

3.1.5 La estimación de la evolución del suelo productivo.

El último de los bloques del modelo (figura 8) estimaría los valores de nuevas demandas de suelo productivo (suelos industriales y comerciales) como combinación del tercer bloque básico (incrementos de renta) así como del bloque anterior. Así pues, los nuevos suelos productivos podrían ser estimados a partir de las demandas de tejido productivo generadas por las nuevas viviendas obtenidas en el bloque 4, así como por los incrementos de renta generados en el bloque 3.

Las demandas de suelo productivo por viviendas se estiman a partir de los valores de viviendas anteriormente obtenidos junto con un valor de relación suelo productivo/vivienda. Por su parte el nuevo suelo productivo como consecuencia del incremento de renta, necesita del incremento de renta anteriormente estimado junto con una tasa de incremento de suelo productivo por /incremento de renta, que deberá ser calibrada.



Figura 8: Bloque 5. Estimación de las demandas de suelo productivo

De esta forma, y de acuerdo con los bloques descritos anteriormente, la Figura 9 muestra el aspecto final del modelo como relación de los comentados bloques.

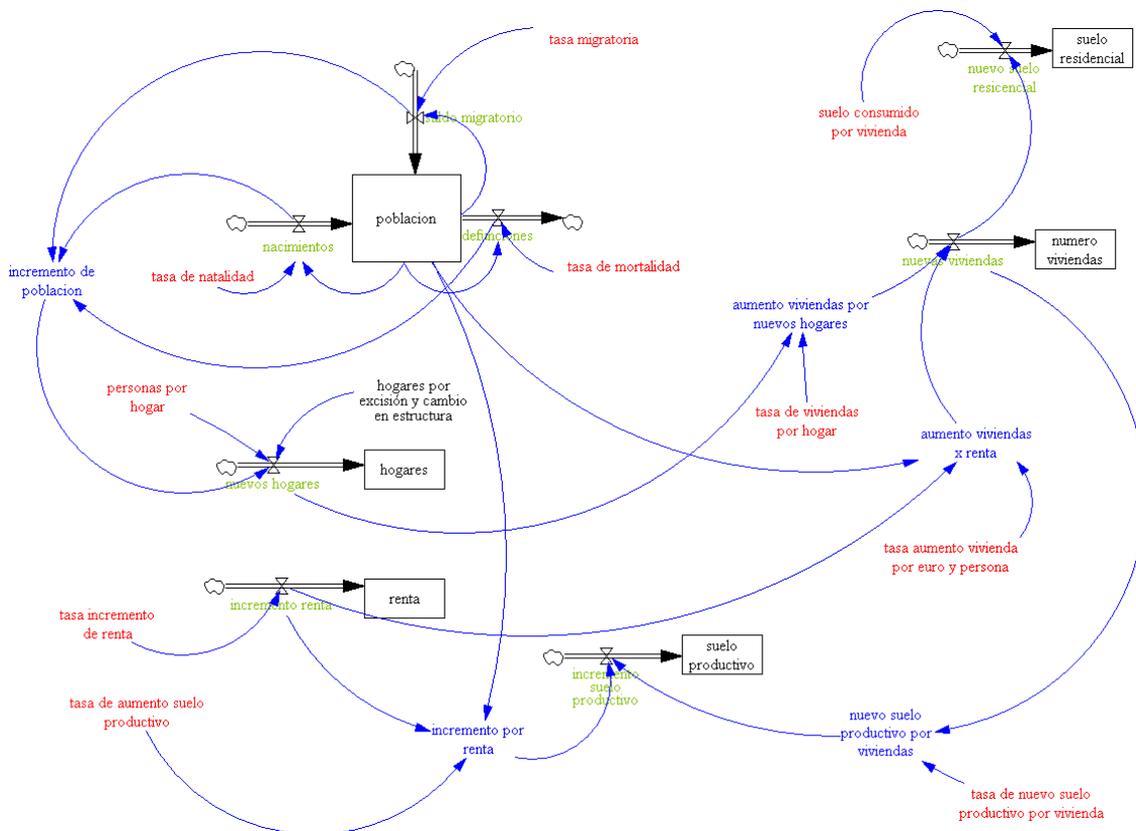


Figura 9: Aspecto del modelo implementado en el Software VenSIMPLE.

En esta primera aproximación a la simulación de las demandas de crecimiento de suelo residencial y productivo, las interacciones implementadas en el modelo son solo en una dirección, de tal modo que no existe una modificación de los variables de entrada como podrían ser las tasas de natalidad o inmigración, o el incremento de renta por parte de las variables de salida como las superficies residenciales o productivas. Estos aspectos se abordarán en sucesivas etapas de modificación del modelo propuesto.

3.2 La calibración del modelo

Para poder realizar las simulaciones de los escenarios futuros, así como para poder estimar los valores de algunas de las tasas comentadas anteriormente, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del modelo que permita mostrar su capacidad para simular dinámicas pasadas de demandas de suelos urbanos. Este proceso de calibración se ha desarrollado entre dos fechas, 1991 y 2001, para las cuales el volumen de información disponible era importante (datos socio demográficos censales), así como por la disponibilidad de información cartográfica que permita valorar las superficies de suelos tanto residenciales como productivos (CORINE LandCover 1990 y 2000). Este proceso de calibración además permitirá aplicar el mismo modelo a dos áreas

metropolitanas de características y entidad claramente diferenciadas.

Los valores de estas variables quedan recogidos en la tabla 2

VARIABLES	Región Urbana de Madrid	Aglomeración Urbana de Granada
Población 1991 (hab)	4.947.555	408.444
Población 2001 (hab)	5.423.384	436.025
Hogares 1991	1.534.362	118.969
Hogares 2001	1.873.792	148.141
Viviendas 1991	2.478.145	165.968
Viviendas 2001	4.947.555	219.925
Renta 1991 ³	31.319.804,03	3091,15
Renta 2001	60.502.118,95	4993,03
Suelo Residencial 1991 en ha	41.801,75	5.292
Suelo Residencial 2001 en ha	56.127,25	6.155,89
Suelo Productivo 1991 en ha	6.486	795,20
Suelo Productivo 2001 en ha	14.195,75	1048,25

Tabla 2. Variables socio demográficas y de ocupación del suelo para Madrid y Granada

A partir de estos valores de las variables para el período 1991-2001, se han obtenido los valores medios observados de las diferentes tasas descritas tanto en la tabla 1 como a lo largo de la descripción del modelo. Con estos datos se han realizado diferentes simulaciones para el período 1991-2001, realizándose algunos pequeños ajustes en los valores de las diferentes variables (en particular de los valores de las tasas de calibración) para tratar de ajustar los resultados obtenidos por el modelo para el año 2001 a los cambios realmente acontecidos. En la tabla 3 se muestran los valores de las tasas calculados de acuerdo con los datos reales para 1991 y 2001, así como los valores obtenidos tras el proceso de calibración, tanto para el Área Metropolitana de Madrid como la de Granada.

Tasas	Valores Reales Madrid	Tasas Ajustadas Madrid	Tasas reales Granada	Tasas Ajustadas Granada
Tasa de natalidad (TBN)	0,011	=	0,012	=
Tasa de mortalidad (TBM)	0,00785	=	0,00785	=
Tasa de saldo migratorio (TSM)	0,004	=	0,00376	=
Tasa de aumento de renta (TCR)	6,36 %	=	6,15 %	=
Tasa de decrecimiento de renta (TDR)	0	=	0	=
Tasa de aumento de suelo productivo (TASP)	2.92023e-009	=	6,33E-010	=
Tasa de viviendas por hogar (TVH)	1.29643	=	1,40	=
Tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV)	0.014	0.013	0,05	0,050
Tasa de aumento de la vivienda por euro y persona (TAVEP)	1,7174e-007	=	1,69E-006	=
Personas por hogar (PH)	3.06	=	3,19	=
Hogares por escisión y cambio en estructura (HECE)	33.943	=	2.114	=
Suelo Consumido por vivienda (SCV) (ha)	0.023	0.024	0,03	=

Tabla 3. Cálculo de las tasas reales observadas y calibradas para la realización de las simulaciones 90-2000.

A partir de los valores reales para el año 1991 (tabla 2) y los ajustados de las diferentes tasas para Madrid y Granada (tabla 3), se han generado las simulaciones para el año 2000 empleando como datos de entrada los reales para el año 1991. La tabla 4 muestra los resultados para Granada y Madrid, así como el porcentaje de ajuste del modelo mediante su comparación con la situación real en el año 2000.

	Población	Hogares	Renta	Viviendas	Suelo Residencial (ha)	Suelo Productivo (ha)
Madrid 1990	4.947.560	1.534.36	31.319.800	1,949,160	41.801,8	6.486
Madrid 2000	5.312.910	1.993.190	58.023.300	2.544.620	55.427,0	14.833
Madrid 2000 Estimado	5.423.384	1.873.792	60.502.118,95	2.478.145	56.127,25	14.195,75
% Ajuste sobre cambios 90-2000	76,8	64,8	91,5	87,4	99,8	99,5
Granada 1990	408444	118.969	3091,15	165968	5292	795,20
Granada 2000	436025	148.141	4989,14	219925	6155,89	1048,25
Granada 2000 Estimado	437.579	148.603	4992.95	211.179	6.196,23	1021,7
% Ajuste sobre cambio 90-2000	94,4	98,4	99,9	83,8	95,3	89,5

Tabla 4. Valores obtenidos tras el proceso de calibración 1991 – 2001 para Madrid y Granada.

3.3 Los escenarios futuros

Una vez establecida la calibración del modelo para el período 1991-2001, a continuación se describen los tres escenarios exploratorios externos que se plantean como posible evolución futura de la dinámica de las áreas metropolitanas de estudio, así como su relación con las diferentes variables manejadas por el modelo.

3.3.1 Escenario de Tendencia

La superación de cualquier incertidumbre o crisis económica por parte del modelo que ha permitido el extraordinario desarrollo experimentado en los últimos 15 años, junto con el mantenimiento de la primacía de los intereses económicos sobre cuestiones ambientales o sociales, constituye la base del escenario tendencial, considerando siempre que el año de partida es el año 2000.

Así pues, este escenario supone la confirmación y consolidación de los modelos e intensidades de crecimiento mostradas para el período 90-2000. En este sentido, se establece un comportamiento que se mantendrá elevado en lo que respecta a las demandas de crecimiento de los suelos residenciales y productivos, de acuerdo con el mantenimiento de las tasas de incremento de la población (especialmente gracias a la tasa de inmigración), el alza de los niveles de renta disponibles, la favorable calificación de suelo establecida en los planeamientos y las altas demandas de suelo productivo (especialmente comercial y terciario) generadas por las nuevas viviendas.

3.3.2 Escenario de Crisis

El agotamiento del modelo de desarrollo experimentado en los últimos años supone el advenimiento de un período dilatado de crisis con consecuencias importantes en los procesos de crecimiento metropolitano. De esta forma, este escenario supone un cambio importante en las formas, pautas e intensidades de crecimiento mostradas en los períodos anteriores. Las demandas de suelo productivo y residencial se verán ampliamente reducidas como consecuencia de la menor presión demográfica (generada por un estancamiento del proceso migratorio), así como por la disminución en los incrementos de los niveles de renta, y unas pautas de crecimiento más compactas que disminuirán las zonas productivas asociadas a las zonas residenciales.

3.3.3 Escenario de innovación y sostenibilidad local

La búsqueda de nuevos modelos y fórmulas de crecimiento y diversificación económica dará lugar a un giro en el modelo de desarrollo metropolitano, en el que el crecimiento residencial predominante dará paso a un mayor desarrollo productivo que permita dar acogida al nuevo tejido empresarial de innovación que sustentará el crecimiento económico. Así pues, las demandas de suelo para crecimiento metropolitano se centran principalmente en el crecimiento de nuevas áreas productivas generadas por los incrementos de rentas derivadas de la innovación como motor económico, mientras que las demandas residenciales se ven reducidas de acuerdo con un mantenimiento de la población.

3.4 Escenarios futuros y variables del modelo de DS

Descritos los escenarios, es necesario explicitar sus diferencias a través de la modificación de las principales tasas que controlan el funcionamiento del modelo. La tabla 5 muestra los valores que se mantendrían constantes para los diferentes escenarios así como aquellos que se incrementarían, disminuirían o incluso se harían cero. Se trata de la tasa de saldo migratorio (TSM), tasa de aumento de renta (TCR), tasa de decrecimiento de renta (TDR), tasa de viviendas por hogar (TVH), tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV), suelo consumido por vivienda (SCV).

Tasas	Tendencial	Crisis	Innovación y Sostenibilidad
Tasa de natalidad (TBN)	=	=	=
Tasa de mortalidad (TBM)	=	=	=
Tasa de saldo migratorio (TSM)	=	↓	↓
Tasa de aumento de renta (TCR)	=	0	↑
Tasa de decrecimiento de renta (TDR)	=	↑	0
Tasa de aumento de suelo productivo (TASP)	=	=	=
Tasa de viviendas por hogar (TVH)	=	1	1

Tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV)	=	=	↓
Tasa de aumento de la vivienda por euro y persona (TAVEP)	=	=	=
Personas por hogar (PH)	=	=	=
Hogares por escisión y cambio en estructura (HECE)	=	=	=
Suelo Consumido por vivienda (SCV) (ha)	=	↓	↓

Tabla 5: Cambios en las tasas para los diferentes escenarios futuros.

Para cada una de estas tasas propuestas para su modificación, se ha asignado un valor de cambio preliminar del 20 %, ya sea de incremento o disminución según corresponda. Estos cambios son resultado de un análisis de sensibilidad previo, en el que se han valorado los cambios generados en las demandas con motivo de la modificación de los valores de las tasas, estimándose el 20 % como el valor más adecuado para generar escenarios de características diferenciales que por otra parte supongan unos cambios razonables en las tasas estimadas para el período 90-2000.

Así pues, finalmente los valores empleados de las tasas para la simulación de los escenarios futuros quedan recogidos en la tabla 6.

Tasas	Madrid			Granada		
	Escenario Tendencial	Escenario Crisis M	Escenario Innovación y Sostenibilidad	Escenario Tendencial	Escenario Crisis	Escenario Innovación y Sostenibilidad
TBN	0,011	=	=	0,012	=	=
TBM	0,00785	=	=	0,00785	=	=
TSM	0,004	0,0032	0,0032	0,00376	0,003008	0,003008
TCR	0,063	0	0,076	0,061	0	0,073759
TDR	0	0,03	0	0	0,0123	0
TASP	2,92E-9	=	=	6,32E-10	=	=
TVH	1,29	1	1	1,40		
TNSPV	0,0145	=	0,0112	0,05	0,05	0,04
TAVEP	1,72E-7	=	=	1,688e-006	=	=
PH	3,40	=	=	2,94	=	=
HECE	33,943	=	=	2.114	=	=
SCV	0,023	0,0184	0,0184	0,02	0,016	0,016

Tabla 6: Valores de las tasas para la simulación de los escenarios futuros.

4 Resultados de la simulación de los escenarios

Una vez establecidos los valores de las tasas, se han realizado las simulaciones de los diferentes escenarios para las dos áreas objeto de estudio. Los valores obtenidos para los principales parámetros estimados por el modelo quedan recogidos en la tabla 7.

VARIABLES	TEND	CRISIS	INNOV + SOST	% CRECIM TEND	% CRECIM CRISIS	% CRECIM INNOV + SOST
GRANADA						
DEMANDA RESIDENCIAL	8012,22	7141,47	7459,29	30	16	21
DEMANDA PRODUCTIVO	1534,3	1294,62	1310,19	46	24	25
VIVIENDAS	312786	281580	285140	42	28	30
HOGARES	212334	209796	209796	43	42	42
POBLACIÓN	500448	492986	492986	15	13	13
MADRID						
DEMANDA RESIDENCIAL	84,541.41	73,646.97	73,744.76	50.6	31.2	31.4
DEMANDA PRODUCTIVO	31,551.42	27,525.97	25,031.41	122.3	93.9	76.1
VIVIENDAS	3,713,543	3,430,304	3,435,618	49.9	38.4	38.6
HOGARES	2,824,074.5	2,791,850.2	39,086.3	50.7	49.0	49.0
POBLACIÓN	6,253,936.9	6,155,330.5	6,155,330.5	15.3	13.5	13.5

Tabla 7. Resultados de las simulaciones de demandas de suelo residencial y productivo para los tres escenarios establecidos en las dos áreas de estudio. Los porcentajes de crecimiento en los escenarios se refieren al dato del año 2000.

De forma gráfica y para los resultados referentes a las demandas de suelo productivo y residencial, las Figuras 10 y 11 muestran las diferencias observadas entre los tres escenarios futuros, tanto para Madrid como para Granada.

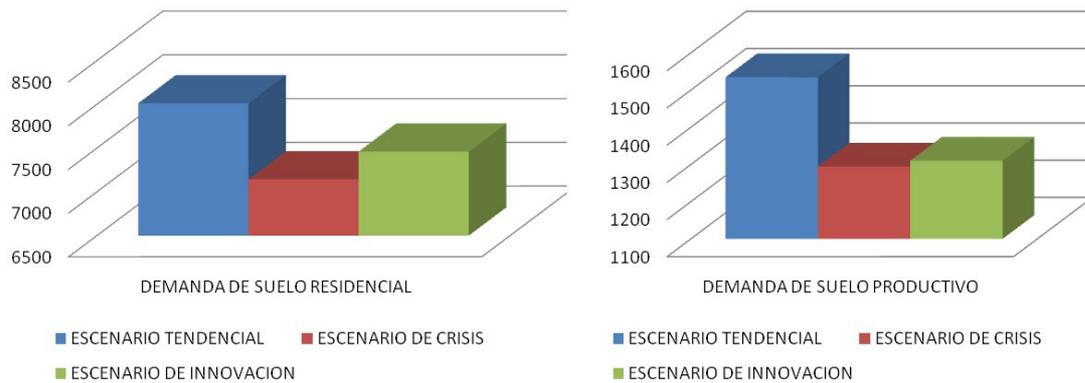


Figura 10: Demandas de suelo residencial (izquierda) y productivo (derecha) para la Aglomeración Urbana de Granada

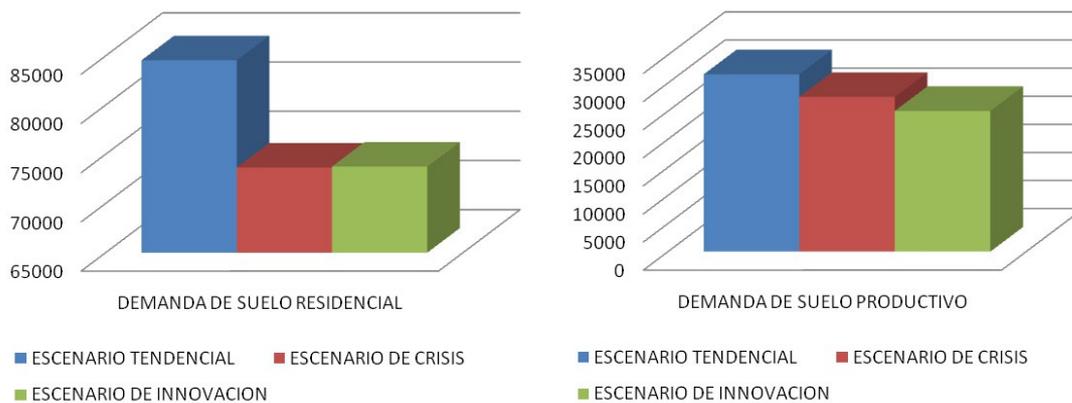


Figura 11: Demandas de suelo residencial (izquierda) y productivo (derecha) para la región urbana de Madrid

Igualmente también pueden ser representadas de forma gráfica la evolución de estas demandas a lo largo de los 20 años de horizonte de los escenarios establecidos. En la Figura 12 quedan recogidos estos valores de demanda residencial para las dos zonas de estudio.

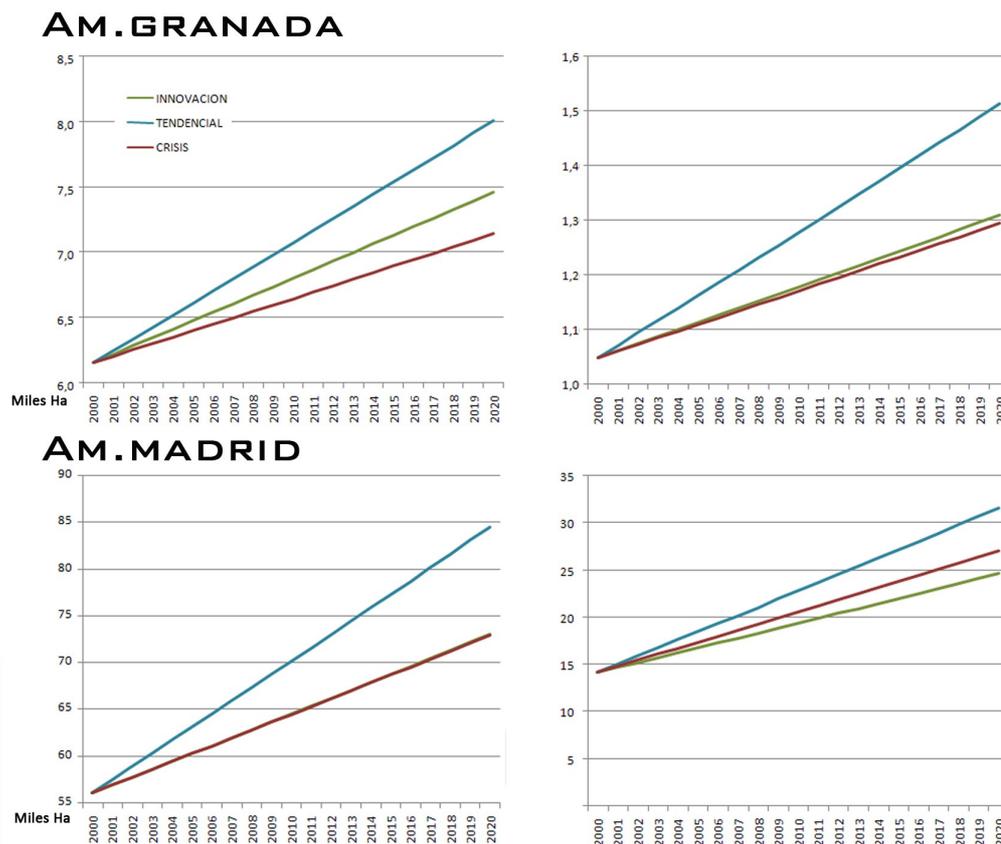


Figura 12: Evolución temporal de la superficie residencial (izquierda) y productiva (derecha) en los tres escenarios y las dos áreas de estudio.

Se puede observar para el caso de Granada como las diferencias en los cambios en las demandas son más acusadas en el caso del suelo residencial, especialmente entre los escenarios de innovación y de crisis, aunque el escenario tendencial muestra en el caso del suelo productivo una mayor diferencia con respecto a los demás. Queda de manifiesto la disminución de las demandas que suponen tanto el escenario de crisis (valores mínimos de las demandas de los usos residenciales y productivos), así como el escenario de innovación y sostenibilidad.

Por su parte, en el caso de Madrid la disminución de las demandas es similar a lo comentado para el caso de Granada en lo que a las diferencias con el escenario tendencial se refiere. Sin embargo, para el suelo productivo los valores de demanda son muy similares para los escenarios de crisis y de innovación y sostenibilidad. Por su parte, en el caso del suelo productivo es este último escenario el que presenta los valores más bajos, al contrario que para el caso de Granada. De acuerdo con la descripción del escenario de innovación y sostenibilidad, debería ser el escenario de crisis el que menor crecimiento de suelo productivo presentase, dado que en el escenario de innovación los crecimientos productivos cobran más relevancia que los residenciales. La revisión del proceso de calibración, y de la definición de los cambios introducidos en cada escenario podrían ayudar a comprender mejor el comportamiento de las demandas en este último caso.

5 Discusión y conclusiones

El diseño de un modelo sencillo, aplicable en entornos metropolitanos que permita la estimación de demandas de suelo urbano en el contexto de diferentes escenarios futuros; y que además lo haga a partir de información fácilmente accesible, constituye el principal objetivo inmediato de este trabajo. Para ello se han empleado dos laboratorios metropolitanos como son la Región Urbana de Madrid y la Aglomeración Urbana de Granada.

En este sentido, y a la vista de los resultados mostrados, se puede concluir que el modelo, de una forma muy sencilla, reproduce el comportamiento para el período comprendido entre los años 1990 y 2000, y que posteriormente simula unos resultados claramente diferenciados para los tres escenarios establecidos, tanto a nivel de demandas residenciales como productivas, en las dos áreas de estudio. Se muestra así como una herramienta exploratoria útil para complementar el diseño de los escenarios, ya de por sí interesante para su aplicación en la planificación metropolitana.

No obstante las limitaciones del modelo son amplias, derivadas en un primer lugar de la falta de una fecha adicional para la validación de los resultados; o de la falta de ciertos factores con una relación evidente, como podrían ser todos aquellos aspectos relacionados con el planeamiento.

Otro objetivo final del trabajo, y del proyecto de investigación en el que se enmarca el planteamiento de los modelos y escenarios (Proyecto SIMURBAN) es la inclusión de nuevos instrumentos facilitadores de las decisiones en el planeamiento, y el incremento de la capacidad de adaptación y respuesta de los planes. En este contexto el diseño y planteamiento de escenarios futuros, en este caso escenarios exploratorios externos, unido a la obtención de diversos “perfiles” de demandas de ocupación de suelo, podría constituir un instrumento útil para la ayuda en la toma de decisiones metropolitanas, y ser incorporado, con mayor o menor grado de adaptación, en los instrumentos de planeamiento, como posible avance hacia planes más flexibles o adaptables a la realidad (Soria, Valenzuela y Aguilera, 2009) que hacen más operativo el actual “Plan Ley”. No en vano, un claro ejemplo de ello queda patente en las previsiones de calificación de suelo llevadas a cabo en múltiples planes (territoriales y sobre todo municipales) redactados y aprobados recientemente, que sin embargo hoy día resultan ciertamente inadecuadas en el contexto económico actual. En este sentido y de forma práctica, la disposición de diversos escenarios de demanda podría, por ejemplo, establecer diferentes etapas sucesivas de calificación y ocupación de suelo en los planes, que se irían activando a medida que la situación real se dirige hacia uno u otro escenario, y se cumplen los objetivos del plan, que podrían ser monitorizados igualmente.

Finalmente, el último de los objetivos del trabajo está en relación con la integración de estas demandas futuras, generadas a través de la Dinámica de Sistemas, con modelos de simulación y localización espacial basados en SIG y EMC, autómatas celulares, etc; permitiéndose así una integración del factor tiempo en estos últimos. A este respecto consideramos que los resultados de este trabajo, unidos a las simulaciones espaciales, podrían ayudar a localizar espacialmente las

características territoriales de estos escenarios y a evaluar sus consecuencias (ya sean positivas o negativas) sobre la accesibilidad, el riesgo, el paisaje, etc, que podrían facilitar la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones (Faludi y Van der Valk, 1994; Prato, 2007; Carsjens, 2009), y por tanto una mejora de las condiciones decisorias en las que los procesos de planeamiento tienen lugar.

6 Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto SIMURBAN del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria de 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (Referencia SEJ2007-66608-C04-00/ GEOG).

Referencias bibliográficas

- Aguilera, F (2008): Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Aracil, J. y Gordillo, F. (1997): Dinámica de Sistemas. Alianza Universidad Textos. Madrid.
- Barredo, J.I y Gómez, M. (2008): "Toward a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region". En Paegelow, M and Camacho, M.T (Eds) Modelling Environmental Dynamics. Springer-Verlag. Berlín
- Borjerson, L.; Hojer, M.; Dreborg, K.H.; Ekvall, T y Finnveden, G. (2006): Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, vol 38, pp 723-739.
- Carsjens, G.J (2009): Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes. Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen,
- Cheng, J; Masser, I (2003): "Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China". *Landscape and Urban Planning*, vol 62, 199-217.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes (1999): Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada. Junta de Andalucía.
- De Miguel, R. (2008) Planificación territorial, gobierno y gobernanza metropolitana en las grandes ciudades españolas. *Boletín de la AGE*, Nº 48, pp 355-374
- De Santiago Rodríguez, E. (2007): "Madrid, 'ciudad única'. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña", *Urban*, nº 12, pp. 8-33.
- Dreborg, K.H. (2004): Scenarios and structural uncertainty: explorations in the field of sustainable transport. Tesis doctoral. Real Instituto Tecnológico de Estocolmo.
- European Environment Agency (2006) Urban Sprawl in Europe. EEA Report Nº10/2006.
- ESPO Project 3.2, (2006) Spatial scenarios and orientations in relation to the ESPD and Cohesion policy. Final Report. European Spatial Planning Observation Network, Bruselas.
- Faludi, A. y Van der Valk, A. (1994): Rule and order. Dutch planning doctrine in the Twentieth century. Kluwer Academic Publishers.

- Feria, J. M. (2004): "Problemas de definición de las áreas metropolitanas en España". *Boletín de la A.G.E*; No 38 , pp. 85-99.
- Fernández, D. (2004): "Bases para la evaluación ambiental y territorial del Área Metropolitana de Granada". Congreso Nacional de Medio Ambiente. Colegio Nacional de Físicos. Madrid.
- Forrester, J (1969): *Urban Dynamics*, Productivity Pres. Portland.
- Goded, M (2000): *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*. Cuadernos de LIPS.
- Gómez, M. y Barredo J.I. (2005): *Sistemas De Información Geográfica y Evaluación Multicriterio En La Ordenación Del Territorio*. Ed. Ra-Ma, Madrid.
- Guhathakurta, S, (2001). "Urban Modelling as Story telling: Using Simulation Models as a Narrative", Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper No. 37, ISSN: 1467-1298.
- Gutiérrez Puebla, J., (2004). "Producción de suelo industrial en la Comunidad de Madrid". *Anales de Geografía*, 24, 169-192.
- Hendriks, P y Vriens, D (2000): "From Geographical Information Systems to Spatial Group Decision Support Systems. A Complex Itinerary". *Geographical and Environmental Modelling*, vol 4, no 1m pp 83-104.
- INE (Instituto nacional de Estadística) (2008). Padrón de habitantes 2008. www.ine.es.
- JRC (Joint Research Centre) (2007): PRELUDE PROJECT.
<http://www.eea.europa.eu/multimedia/interactive/prelude-scenarios/> [Junio 2009]
- Lopez Klocker, C. y Bosque Sendra, J, (2005): "SIG y Dinámica de sistemas", X Conferencia Iberoamericana de SIG, San Juan de Puerto Rico, septiembre de 2005, 10 p.
- López de Lucio, R. (2003). "Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid", *Urban*, 8, pp. 124-161.
- Menor, J. (2000): *La Vega de Granada: transformaciones agrarias recientes en un espacio periurbano*. Ed Universidad de Granada, Granada.
- Ministerio de Vivienda (2006): *Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas en España 2004*. Ministerio de Vivienda. Madrid.
- Nijkamp, P. y Blaas, E. (1994). *Input Assessment and Evaluation in Transportation Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Luca, C(2007): "Generative platform for urban and regional design". *Automation in Construction*, vol 16, pp 70– 77
- OSE (2006): *Informe de la Sostenibilidad en España 2006*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Ott, T. y Swiaczny, F. (2001). *Time-Integrative geographic information systems. Management and analysis of spatio-temporal data*. Springer-Verlag, Berlin.
- Peterson, G.D.; Cumming, G.S. y Carpenter, S.R (2003) Scenario Planning: a tool for conservation in a uncertain world. *Conservation biology*, vol 17, n°2, pp 358-366
- Pettit, C. y Pullar, D. (2004) A way forwar for land use planning to achieve policy goals by using spatial modelling scenarios. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol 31, pp 213-233.
- Plata Rocha, W; Gómez Delgado, M y Bosque Sendra J (2009) "Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000)." *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, vol. XII, núm. 293. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>
- Prato, T. (2007): "Evaluating land use plans under uncertainty". *Land Use Policy*, vol 24, pp 165–174.

- Ravetz, J. (2009): Agenda for Integration with Peri-urban land-use relationships. PLUREL MEETING.
- Soria, J.A.; Valenzuela, L.M. y Aguilera, F. (2009): "The incidence of planning in the growth and change of the Metropolitan Area of Granada". City Futures. Madrid, Junio 2009.
- Stillwell, J.S. Geertmaan, S. y Openshaw, S. (eds) (1999): Developments in geographical information and planning. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Valenzuela, L.M; Aguilera, F; Soria, J.A. y Molero, E. (2008): "Designing and assessing of development scenarios for metropolitan patterns". En Paegelow, M. y Camacho, M.T (eds.): Modelling Environmental Dynamics. Springer .
- Verburg, P.H., Schot, P., Dijst, M., y Veldkamp, A. (2004): "Land use change modelling: current practice and research priorities". *Geojournal*, vol 61(4), pp. 309-324.

Notas:

- 1 Entendidos como escenarios posibles (es decir, que se mueven en el pensamiento futuro de lo hipotético) en los que los factores condicionantes se encuentran del alcance de la acción del planificador (en este caso se trata de factores en relación con la situación socioeconómica).
- 2 El Proyecto SIMURBAN en ulteriores etapas trabajará con modelos de simulación espacial para ubicar las diferentes demandas de crecimiento establecidas en los escenarios planteados en este trabajo.
www.geogra.uah.es/simurban/
- 3 Los valores de renta para la Comunidad de Madrid: Renta bruta disponible en los hogares.
<http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/economicas/datosimpositivos/estructuirfdm.htm>. Los valores de renta para Granada están expresados en Renta declarada en el IRPF municipal/persona