

Diseño de un modelo de demanda de superficie para la simulación geoespacial de usos de suelo en Novolato y Culiacán, Sinaloa, México.

*Gabriela Corrales Barraza*¹

*Wenseslao Plata Rocha D.*²

*Sergio Alberto Armenta Monjardin*³

*José de Jesús Uriarte Adrian*³

*José Carlos Beltrán González*³

Recibido: 16 de enero, 2017

Aceptado: 5 de mayo, 2017

RESUMEN

Actualmente las transformaciones de los usos de suelo están impactando de manera contundente los diferentes ecosistemas y su biodiversidad. Es por ello que resulta importante plantear modelos territoriales de futuro para visualizar el comportamiento de los diferentes usos y coberturas de suelo, con la finalidad de poder tomar decisiones a nivel territorial y que estos sean un instrumento valioso para sensibilizar y establecer estrategias de protección de los recursos naturales municipales, estatales, nacionales y globales. La generación y simulación de escenarios exploratorios futuros es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones, de especial relevancia en el ámbito territorial y metropolitano.

Para la generación de escenarios futuros, es necesario en primer lugar, simular o calcular la demanda de superficie que debe de tener cada uso de suelo en el o los diferentes escenarios planteados. En este trabajo se presenta un modelo basado en Dinámica de Sistemas para estimar las demandas que diferentes categorías de usos de suelo deberán de tener en un escenario planteado. El modelo se ha desarrollado concretamente para los municipios de Novolato y Culiacán, Sinaloa, México.

¹ Máster en Geomática, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Correo electrónico: gabriela.corrales@info.uas.edu.mx.

² Doctor en Geomática, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Correo electrónico: wenses@uas.edu.mx.

³ Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

*Trabajo realizado en el Marco del PROFAPI 2014/160: "Simulación de 3 escenarios (Tendencia, Crisis y Sostenibilidad) de usos de suelo mediante Técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio: el Estado de Sinaloa, México. Asimismo, al CONACYT por haber otorgado la beca para estudios de Maestría en Ciencias de la Información.

Palabras clave | *Dinámica de Sistemas, escenarios futuros, usos de suelo, SIG.*

ABSTRACT

Design of a surface demand model for the geospatial simulation of land uses in Navolato and Culiacán, Sinaloa, México.

Currently the transformations of land uses are impacting sharply the different ecosystems and their biodiversity. This is why it is important to propose future territorial models to visualize the behavior of different uses and land cover, in order to be able to make decisions at the territorial level and that these are a valuable tool to raise awareness and establish strategies to protect the Municipal, state, national and global natural resources. The generation and simulation of future exploratory scenarios is a useful tool in the planning and decision-making processes, of special relevance in the territorial and metropolitan area.

For the generation of future scenarios, it is necessary firstly to simulate or calculate the surface demand that each land use should have in the different scenarios. In this paper we present a model based on Systems Dynamics to estimate the demands that different categories of land use should have in a scenario. The model has been developed specifically for the municipalities of Navolato and Culiacán, Sinaloa, Mexico.

Keywords | *Systems Dynamics, future scenarios, land uses, GIS.*

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, todo el planeta ha sufrido cambios considerablemente graves, como son la pérdida de biodiversidad, daños al medio ambiente y el calentamiento global o cambio climático (Vitousek, Mooney, Lubchenco & Melillo, 1997). De igual forma los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, siendo su principal agente transformador los cambios de cobertura y uso del suelo, los cuales, representan las consecuencias más claras de la intervención humana sobre el medio ambiente (Mustard, Defries, Fisher & Moran, 2004).

Por ello, se ha reconocido a nivel mundial la importancia de estudiar y comprender las dinámicas del cambio de cobertura y uso del suelo y su efecto e impacto sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Lambin, Helmut & Lepers, 2003). Sin embargo, no basta el monitoreo y análisis de los cambios de

uso y cobertura de suelo ocurridos en el pasado, sino que también es necesario realizar estudios prospectivos a mediano y largo plazo que permitan estudiar el efecto de su dinámica futura sobre el medioambiente, los ecosistemas y en general el cambio climático (Henriquez, Azócar & Romero, 2006; Jat, Garg & Deepak, 2008).

Una alternativa puede ser optar por la nueva generación de modelos geoespaciales que ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores (económicos, ambientales, sociales, entre otros), representativos de las dinámicas territoriales, que permitan obtener imágenes alternativas de futuro, a partir de la simulación de diferentes escenarios. Dichos modelos se han convertido en una poderosa herramienta de análisis espacial y son considerados por diversos autores como modelos dinámicos, capaces de pronosticar posibles comportamientos futuros, representar y estimar la magnitud de los cambios ocurridos y sus patrones espaciales (Henriquez, *et al.*, 2006; Houet, Verbug & Loveland, 2009).

El proceso de diseño e implementación de los escenarios en el contexto de la planificación territorial ha sido analizado en diversos trabajos (Dreborg, 2004; Carsjens, 2009; Aguilera Benavente, Valenzuela Montes, Soria Lara, Gómez Delgado & Plata Rocha, 2011), en los que se suele sintetizar en varias etapas, que incluyen desde la identificación de las temáticas de los escenarios, la determinación de los factores motrices que pueden dirigir o marcar la evolución, la elaboración de una descripción más o menos detallada de ellos, el cálculo de la demanda de superficie del escenario planteado y la simulación espacial que representen los escenarios.

En este sentido, para estimar la demanda de superficie de suelo que consumirá cada escenario, generalmente los autores se basan en los planes de desarrollo territorial, modelos macroeconómicos o proyecciones de población (Aguilera, 2008; Barredo & Gómez, 2008; Pettit & Pullar, 2004; Verbug, Schot, Dijst & Veldkamp, 2004; de Nijs, de Niet & Crommentuijn, 2004; Molero Melgarejo, Grindlay Moreno & Asensio Rodríguez, 2007). Otros investigadores han empleado modelos estadísticos para correlacionar variables demográficas y socioeconómicas con los usos de suelo (Reginster & Rounsevell, 2006).

Por su parte, el modelo de dinámica de sistemas ha sido una técnica pionera en estudios urbanos (Forrester, 1969) y ahora representan una herramienta útil para el establecimiento de relaciones entre las variables socioeconómicas y demográficas y los usos de suelo a simular en los escenarios de futuro (Guhathakurta, 2002;

Han, Hayashi, Cao & Imura, 2009). No obstante, en el diseño de dichos modelos de trabajo se han utilizado variables externas (socioeconómicas y demográficas, principalmente) para intentar obtener la demanda de suelo futuro para cada escenario, lo que implica dificultad de replicar dichos modelos debido a la falta de información a nivel de detalle para otras áreas de estudio.

Es por ello que este trabajo tiene como objetivo el diseño de un modelo que permita simular la demanda de superficie de suelo para cada escenario considerando solamente los mapas de usos de suelo de dos fechas diferentes (1993 y 2011), mismo que son utilizados implícitamente en los escenarios, es decir, sin necesidad de introducir otro tipo de variables externas. Para alcanzar lo anterior se diseña un modelo de simulación utilizando herramientas como la Dinámica de Sistemas (DS) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), mismo que será parte fundamental para la simulación geoespacial de escenarios territoriales de futuro.

Área de estudio

El área de estudio del modelo de simulación de demandas de uso de suelo está configurado para los municipios de Culiacán y Navolato en el Estado de Sinaloa, México (ver Figura 1), los cuales ostentan un 14.67% del territorio estatal, con una superficie de 8,760.74 km², en los cuales se distribuye un total de 994,241 habitantes (INEGI, 2010).

Figura 1: Municipios de Culiacán y Navolato.



Fuente: Elaboración propia

Los cambios más representativos se presentan en estos municipios, donde se encuentra la Ciudad de Culiacán, capital del Estado, y el municipio de Navolato, que siendo el más joven de los 18 municipios, mantiene una intensa dinámica debido a su cercanía con la capital y a su potencial agrícola y la inversión en proyectos turísticos relacionados con el Mar de Cortes. Actualmente, el aglomerado urbano en torno a Culiacán es consecuencia de las dinámicas urbanas que la ciudad promueve desde hace más de seis décadas y que tienden a la articulación del espacio rural y del litoral, lo cual induce a la conformación de un área metropolitana en diferentes direcciones, principalmente, en el corredor Culiacán-Navolato (Roldán López, 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo de dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas 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.

De acuerdo con el enfoque de la DS y el eminentemente espacial de los SIG, es posible abordar, a partir del uso conjunto de estas herramientas, procesos de generación y simulación temporal y espacial.

En este sentido, Vensim es una herramienta visual de modelización que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Dicho sistema provee una forma simple y flexible de construir modelos dinámicos de simulación mediante diagramas de influencias y diagramas de Forrester, mismos que constan de tres etapas fundamentales: a) Formulación y elaboración del modelo estructural del sistema, b) Introducción del modelo matemático y c) Ejecución de la simulación (Forrester, 1969).

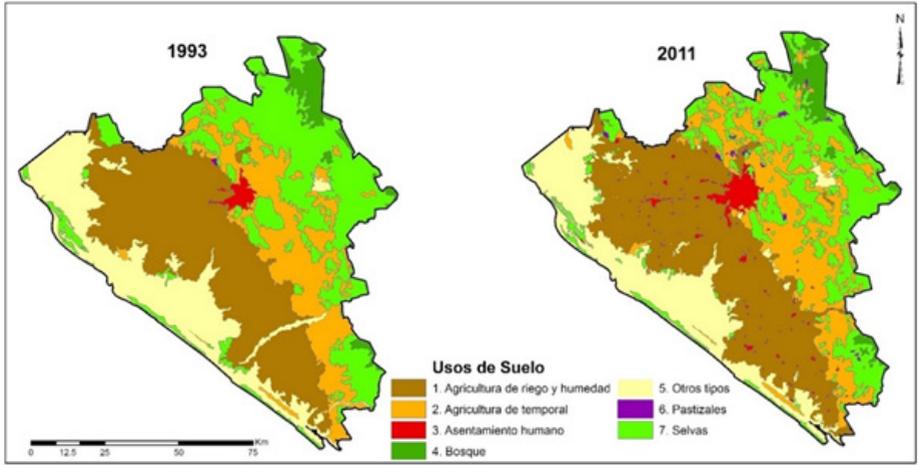
Área de estudio y datos

Mediante el estudio de la evolución que han seguido los cambios de usos de suelo históricamente en los municipios de Culiacán y Navolato, se realizan dos escenarios futuros que representan, por un lado, la *tendencia* ocurrida en el pasado y, por otro, la *sostenibilidad* futura del territorio. En este caso se considera como año base para la simulación al 2011 y como horizonte futuro hasta el año 2030.

Para ello, se ajusta el modelo de demanda de superficie en base al comportamiento del territorio entre 1993 y 2011, utilizando una leyenda temática de 7 categorías

derivadas de los mapas de usos de suelo (ver Figura 2).

Figura 2: Mapas de usos de suelo de 1993 y 2011



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1: Matriz de tabulación cruzada para dos mapas de diferente fecha

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6	Categoría 7	Total T ₂
Categoría 1	P ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	A ₁₇	T ₁₁ ^(T2)
Categoría 2	A ₂₁	P ₂₂	A ₂₃	A ₂₄	A ₂₅	A ₂₆	A ₂₇	T ₂₂ ^(T2)
Categoría 3	A ₃₁	A ₃₂	P ₃₃	A ₃₄	A ₃₅	A ₃₆	A ₃₇	T ₃₃ ^(T2)
Categoría 4	A ₄₁	A ₄₂	A ₄₃	P ₄₄	A ₄₅	A ₄₆	A ₄₇	T ₄₄ ^(T2)
Categoría 5	A ₅₁	A ₅₂	A ₅₃	A ₅₄	P ₅₅	A ₅₆	A ₅₇	T ₅₅ ^(T2)
Categoría 6	A ₆₁	A ₆₂	A ₆₃	A ₆₄	A ₆₅	P ₆₆	A ₆₇	T ₆₆ ^(T2)
Categoría 7	A ₇₁	A ₇₂	A ₇₃	A ₇₄	A ₇₅	A ₇₆	P ₇₇	T ₇₇ ^(T1)
Total T ₁	T ₁₁ ^(T1)	T ₂₂ ^(T1)	T ₃₃ ^(T1)	T ₄₄ ^(T1)	T ₅₅ ^(T1)	T ₆₆ ^(T1)	T ₇₇ ^(T1)	

Fuente: Elaboración propia

P_{ii} – Superficie que no cambia entre el Tiempo 1 y el Tiempo 2.

A_{ij} – Transición de la Categoría i a la j .

A_{ji} – Transición de la Categoría j a la i .

$T_{11}^{(T1)}$ – Total de la categoría i en el Tiempo 1.

$T_{11}^{(T2)}$ – Total de la categoría i en el Tiempo 2.

Para generar los datos cuantitativos para el modelo de DS, se calculó una matriz de tabulación cruzada entre los 2 mapas de usos de suelo en Sistemas de Información Geográfica, específicamente en el Software IDRISI mediante el comando *Crosstab*, con la finalidad de obtener las transiciones entre las 7 categorías (ver Tabla 1).

A partir de dicha matriz de transiciones se calculan las tasas anuales de cambio entre el periodo analizado (ver Tabla 3), mediante la siguiente ecuación:

$$T_{ij} = \frac{A_{ij}}{n}$$

Donde: A_{ij} son los elementos de la matriz de cambios; n es el número de años entre el periodo de estudio y T_{ij} es la tasa de cambio.

Tabla 2: Matriz de tasas anuales para cada transición entre usos de suelo.

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6	Categoría 7
Categoría 1	---	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}	T_{17}
Categoría 2	T_{21}	---	T_{23}	T_{24}	T_{25}	T_{26}	T_{27}
Categoría 3	T_{31}	T_{32}	---	T_{34}	T_{35}	T_{36}	T_{37}
Categoría 4	T_{41}	T_{42}	T_{43}	---	T_{45}	T_{46}	T_{47}
Categoría 5	T_{51}	T_{52}	T_{53}	T_{54}	---	T_{56}	T_{57}
Categoría 6	T_{61}	T_{62}	T_{63}	T_{64}	T_{65}	---	T_{67}
Categoría 7	T_{71}	T_{72}	T_{73}	T_{74}	T_{75}	T_{76}	---

Fuente: Elaboración propia

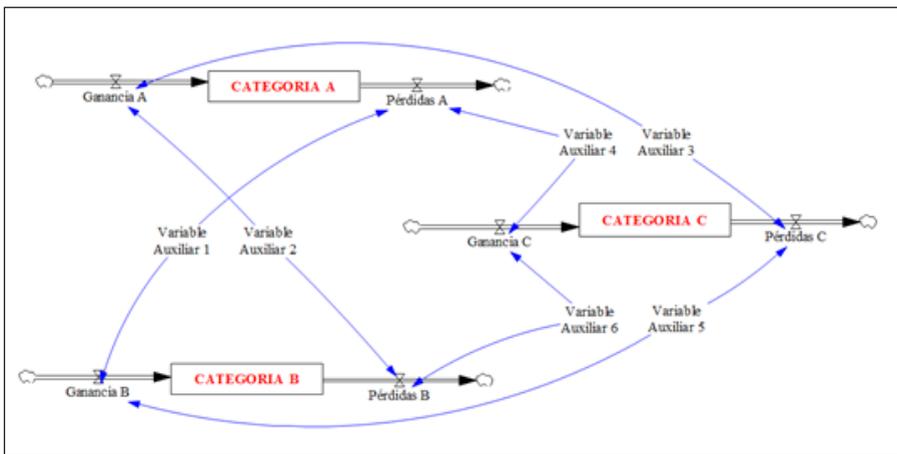
De esta manera se generan las variables cuantitativas utilizadas en el modelo. De este modo, se obtienen las 7 variables de nivel, una por categorías, y su valor inicial corresponde a las superficies que cada uso de suelo tenía en 1993 (último renglón tabla 1); las variables auxiliares corresponden a todas las transiciones, y

sus valores numéricos son las tasas por año de todas las transiciones (valores abajo y arriba de la diagonal principal de la matriz de tasas: ver Tabla 2).

Diseño del modelo de demanda en Vensim

El diseño conceptual del modelo se fundamenta en la evolución de las variables de nivel (Categorías) en el tiempo, la cual se da mediante dos flujos. El primer flujo es el de entrada (Ganancias), que lo conforman todas las variables auxiliares que representen transiciones hacia la categoría en cuestión; el segundo, es el flujo de salida (Pérdidas), que se compone de las variables auxiliares que representan transiciones de esas categorías hacia las demás (ver Figura 3).

Figura 2: Mapas de usos de suelo de 1993 y 2011



Fuente: Elaboración propia

Una vez establecido el diseño del modelo, considerando 7 variables de nivel y 42 variables auxiliares, se verificar el funcionamiento del modelo, comprobando que el valor generado después de 18 iteraciones arroje una superficie para cada variable de nivel igual a la superficie real correspondiente para cada uso de suelo en el año 2011.

RESULTADOS

En primer lugar, se obtuvo como resultado los cambios entre cada uso de suelo entre el año 1993 y 2011, mediante la utilización de una matriz de tabulación cruzada (ver Tabla 3).

De dicha matriz se puede observar que existen transiciones considerables de ambas agriculturas a la de asentamientos humanos y hacia otros tipos, también se presentan grandes transiciones de agricultura de temporal y otros tipos hacia la agricultura de riego y humedad. Sin embargo, la transición de mayor tamaño se presenta de selvas hacia agricultura de temporal.

Tabla 3: Transiciones obtenidas entre los mapas de usos de suelo de 1993 y 2011 (Superficie en hectáreas).

	<i>Agricultura de riego y humedad</i>	<i>Agricultura temporal</i>	<i>Asentamiento humano</i>	<i>Bosque</i>	<i>Otros tipos</i>	<i>Pastizales</i>	<i>Selvas</i>	<i>Total 2011</i>
<i>Agricultura de riego y humedad</i>	267,398	12,226	4	0	10,877	2	3,275	293,782
<i>Agricultura temporal</i>	250	116,343	3	380	3,250	0	35,925	156,151
<i>Asentamiento humano</i>	9,462	2,687	6,641	0	209	0	1,117	20,116
<i>Bosque</i>	0	0	0	26,166	0	0	2,019	28,185
<i>Otros tipos</i>	5,926	2,313	0	0	146,326	0	4,383	158,948
<i>Pastizales</i>	146	432	0	231	0	337	1,874	3,020
<i>Selvas</i>	630	9,910	2	192	3,490	1	180,868	195,093
<i>Total 1993</i>	283,812	143,911	6,650	26,969	164,152	340	229,461	855,295

Fuente: Elaboración propia

Teniendo como insumo la matriz de cambios se calcularon (Ec. 1) las tasas anuales para cada transición, observándose, como debe ser, las mayores tasas anuales para las categorías con las mayores transiciones; las selvas, la agricultura de temporal, asentamientos humanos y otros tipos (ver Tabla 4).

Tabla 4: Tasas anuales de cambio entre 1993 y 2011.

	Agricultura de riego y humedad	Agricultura temporal	Asentamiento humano	Bosque	Otros tipos	Pastizales	Selvas
Agricultura de riego y humedad	-	679.222	0.222	0.000	604.278	0.111	181.944
Agricultura temporal	13.889	-	0.167	21.111	180.556	0.000	1,995.833
Asentamiento humano	525.667	149.278	-	0.000	11.611	0.000	62.056
Bosque	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	112.167
Otros tipos	329.222	128.500	0.000	0.000	-	0.000	243.500
Pastizales	8.111	24.000	0.000	12.833	0.000	-	104.111
Selvas	35.000	550.556	0.111	10.667	193.889	0.056	-

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido la superficie de cada categoría y sus tasas anuales de cambio, se desarrolló el modelo de dinámica de sistemas, el cual está integrado por 7 variables de nivel (categorías de usos de suelo), las cuales se relacionan entre sí mediante 42 variables auxiliares (transiciones entre los usos de suelo), mismas que alimentan los flujos que modifican las variables de nivel (ver Figura 4).

A partir de la estructura del modelo se introducen los datos de partida de cada variable, correspondientes a las superficies iniciales para cada categoría y sus tasas, y se realiza la simulación del año 1993 al año 2011 para verificar que el modelo se ajustara a la información de las superficies de los mapas de 1993 y 2011 (ver Tabla 5).

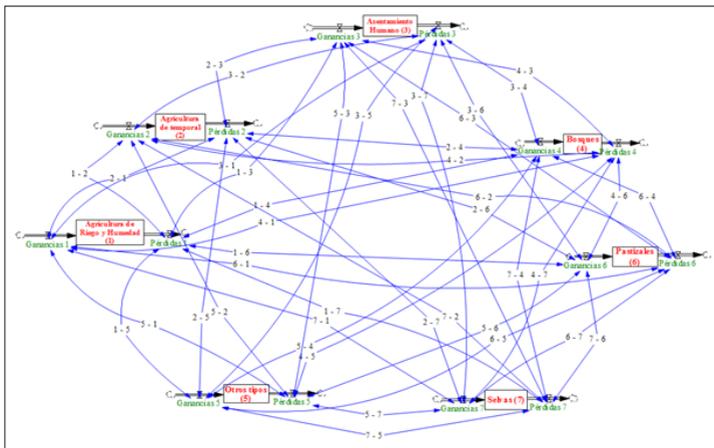
Tabla 5: Resultados del ajuste del modelo.

Categoría	Superficie Real 1993	Superficie Real 2011	Superficie Simulada 2011
Agricultura de riego y humedad	283,812	293,782	293,782
Agricultura temporal	143,911	156,151	156,151
Asentamiento humano	6,650	20,116	20,116
Bosque	26,969	28,185	28,185
Otros tipos	164,152	158,948	158,948
Pastizales	340	3,020	3,020
Selvas	229,461	195,093	195,093
Σ	855,295	855,295	855,295

Fuente: Elaboración propia

Si consideramos los valores obtenidos en la superficie simulada al año 2011, podemos comprobar que la estructura y diseño del modelo es correcto y adecuado, lo cual nos pone en posibilidades de utilizarlo para obtener la demanda de superficie en escenarios de futuros de usos de suelo.

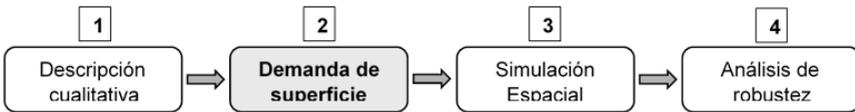
Figura 4: Modelo de Dinámica de Sistemas elaborado para estimar la demanda de superficie de usos de suelo



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, el modelo se diseñó con la finalidad de simular la demanda para dos escenarios de usos de suelo de futuro: tendencia y sostenibilidad. En este esquema de trabajo, la demanda de superficie corresponde solo a una parte del escenario (paso 2), misma que debe corresponderse con la descripción cualitativa (paso 1) y simulación espacial de los usos de suelo (paso 2) definidas en el marco teórico-metodológico del escenario (Figura 5).

Figura 5. Marco teórico-metodológico para el diseño de escenarios de usos de suelo



Fuente: Elaboración propia

En función de lo anterior la descripción cualitativa del **escenario de tendencia** se construyó siguiendo las lógicas ocurridas en el pasado, en donde, durante el periodo analizado se tuvo un aumento de los asentamientos humanos, de la agricultura temporal, de la agricultura de riego y en menor medida de los pastizales y bosques; mientras que las selvas tuvieron pérdida considerable de superficie. Es decir, mediante el estudio de la evolución que han seguido los cambios de usos de suelo en el pasado, se realiza un escenario de tendencia, con la finalidad de mostrar cual sería el estado de los usos de suelo si dicha tendencia se mantuviese hasta el año 2030.

Por su parte, el **escenario de sostenibilidad** se fundamenta en los tres pilares básicos de la sostenibilidad: minimizar el impacto ambiental y maximizar el beneficio social y económico. Para ello en la región se desarrollarán políticas de reforestación y protección del medio ambiente y natural más activas y dinámica; teniendo en cuenta un crecimiento de las zonas urbanas bajo un modelo compacto y aprovechando los huecos urbanos que existen al interior de las principales ciudades a partir de su construcción en lugares aptos para este fin. Asimismo, la tecnificación e innovación en el campo de la producción alimentaria, muy importante en la región, disminuirá el consumo de superficie de estas categorías.

Una vez generada la descripción de cada escenario, se procede a estimar la demanda de superficie de uso de suelo de futuro a simular. En este caso el

escenario de tendencia mantendrá las tasas anuales de cambio que tuvieron en el pasado los usos de suelo (1993 – 2001). Mientras que para el escenario de sostenibilidad es necesario adecuar las tasas anuales de cambio en función de su descripción cualitativa, es decir, disminuir la tasa de pérdida de selvas y zonas urbanas, así como las tasas de crecimiento de agricultura, con la finalidad que se obtenga una superficie para cada categoría que se corresponda con dicho escenario (ver Tabla 6).

Tabla 6: Tasas de cambios en cada uno de los escenarios

<i>Categoría</i>	<i>Escenario Tendencial</i>	<i>Escenario Sostenibilidad</i>
<i>Agricultura de riego y humedad</i>	=	↓
<i>Agricultura temporal</i>	=	↓
<i>Asentamiento humano</i>	=	=
<i>Bosque</i>	=	=
<i>Pastizales</i>	=	↓
<i>Selvas</i>	=	↑
<i>Otros tipos</i>	=	=

Fuente: Elaboración propia

En función de lo anterior se estimó la matriz de tasas para el escenario sostenible (ver Tabla 7).

Tabla 7: Tasas de transición anuales para el escenario sostenible

	<i>Agricultura de riego y humedad</i>	<i>Agricultura temporal</i>	<i>Asentamiento humano</i>	<i>Bosque</i>	<i>Otros tipos</i>	<i>Pastizales</i>	<i>Selvas</i>
<i>Agricultura de riego y humedad</i>	----	459.26	0.00	0.00	377.74	0.11	0.00
<i>Agricultura temporal</i>	197.37	----	0.00	20.00	65.79	0.00	680.26
<i>Asentamiento humano</i>	27.74	7.84	----	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Bosque</i>	0.00	0.00	0.00	----	0.00	0.00	106.26
<i>Otros tipos</i>	506.63	227.00	0.00	0.00	----	0.00	72.79
<i>Pastizales</i>	7.68	22.74	0.00	12.16	0.00	----	46.00
<i>Selvas</i>	205.53	1,732.11	0.00	10.11	341.58	0.05	----

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, con el modelo ajustado, se ejecutó con 19 iteraciones (años) para generar la demanda de cada categoría del año 2011 al año 2030 para los escenarios de tendencia y de sostenibilidad de usos de suelo futuros.

En el caso del escenario de tendencia, solamente se ejecutó hacia adelante con 19 iteraciones y manteniendo las tasas obtenidas en el pasado, lo cual permitió obtener la demanda de cada uso de suelo, considerando un comportamiento igual al pasado (ver Tabla 4). Lo anterior nos permitió observar que, efectivamente como ocurrió del año 1993 al 2011, todas las categorías continúan con la tendencia de aumentar de superficie, a excepción de las selvas, las cuales disminuyen considerablemente su superficie. Con respecto al escenario de sostenibilidad se ejecutó el modelo con 19 iteraciones pero considerando las tasas calculadas en base a referentes de sostenibilidad el territorio (ver Tabla 7), lo cual nos arroja la superficie final de para cada uso de suelo. En la tabla 8 se muestra la superficie obtenida para cada escenario y un indicador de su dinámica de cambio neto.

Tabla 8: Demanda de uso de suelo para cada escenario. Indicadores de cambio

Categoría	Superficie Real 2011	Escenario de Tendencia (ET) 2030	Escenario Sostenible (ES) 2030	Cambios netos 2030 - 2011	
				ET	ES
Agricultura de riego y humedad	293,782	304,306.00	289,733.00	10,524.00	-4,049.00
Agricultura temporal	156,151	169,069.00	125,176.00	12,918.00	-30,975.00
	20,116	34,330.00	20,792.00	14,214.00	676.00
Bosque	28,185	29,470.13	29,401.00	1,285.13	1,216.00
Otros tipos	158,948	153,455.00	159,353.00	-5,493.00	405.00
Pastizales	3,020	5,848.87	9,450.00	2,828.87	6,430.00
Selvas	195,093	158,816.00	221,390.00	-36,277.00	26,297.00
Σ	855,295	855,295	855,295.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Analizando el cambio neto entre la fecha de partida y cada uno de los escenarios simulados, vemos como en el escenario de tendencia todas las categorías aumentan de superficie a excepción de las selvas y la de otros tipos, en cambio en el escenario de sostenibilidad, las categorías que disminuyen de superficie son al agricultura de temporal y en menor medida la agricultura de riego y humedad, todas las demás categorías, aumentan de superficie, cumpliendo así, el objetivo de este escenario, pues tenemos una re-generación de las coberturas forestales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño de un modelo sencillo, pero robusto, que permita la estimación de la demanda de usos de suelo, considerando solamente las transiciones entre estos usos, constituye el principal objetivo inmediato de este trabajo. Para ello se emplearon solamente dos mapas de usos de suelo de distintas fechas, a partir de los cuales, fue posible calcular la demanda que esos usos tendrían en una fecha futura. Es decir, a diferencia de otros modelos presentados en otros trabajos, no se han utilizado variables externas de tipo socioeconómico o demográfico, lo cual constituye un avance en la obtención de la demanda de suelo en escenarios de simulación de usos de suelo.

Así mismo, este modelo permitirá obtener la demanda de usos de suelo para un Escenario de Tendencia (ET) y un Escenario de Sostenibilidad (ES). Asimismo se podrá utilizar para estimar la demanda de otros escenarios que se planteen, solo con modificar las tasas que podrían darse en un futuro según la línea evolutiva de cada escenario.

En el caso de la demanda del escenario de tendencia se incrementa y disminuye la superficie de cada usos de suelo tal cual ocurrió en el pasado, mientras que, en el Escenario de Sostenibilidad, la tasa de crecimiento de las superficies agrícolas disminuye, debido a la innovación y tecnificación en la actividad agrícolas, lo que incrementaría la productividad en superficies menores de suelo. En el caso del Escenario de Sostenibilidad, la agricultura de temporal disminuye debido al incremento de los pastizales y las selvas, pasando a ocupar esta superficie, principalmente en la zona serrana, mientras que las superficies urbanas se mantendría con una tasa de crecimiento muy baja, ya que se optarían por nuevas formas de edificación en altura y ocupando los huecos urbanos que hay al interior de las ciudades y también se ocuparía la vivienda construida en años anteriores y que no están ocupándose. En cuanto a los bosques, pastizales y selvas aumentarían considerablemente intentado restaurar los ecosistemas forestales y ambientales perdidos en el modelo territorial pasado.

De esta manera se implementó el cálculo de la demanda de suelo para estos escenarios, fundamentado en reuniones con expertos del grupo de Investigación de Geomática de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. No obstante, para poder fundamentar la demanda de más escenarios de futuro territorial se deben realizar encuestas a los representantes de instituciones que de alguna manera toman decisiones sobre la planificación del territorio, tales como: Direcciones

de desarrollo territorial y urbano de los Gobiernos Estatales y Municipales, CONAFOR, CONAGUA, SEMARNAT, PROFEPA, Académicos e Investigadores de Universidades y Centros de Investigación, etc.

Finalmente, comentar que el modelo se ha ajustado para un área de estudio específica pero puede implementarse para cualquier zona con solo obtener la matriz de cambios y sustituir los valores en el modelo, lo que lo hace un trabajo que se puede replicar de manera fácil y precisa.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L., Soria Lara, J., Gómez Delgado, M. & Plata Rocha, W. (2011). Escenarios y modelos de simulación como instrumento en la planificación territorial y metropolitana. *Serie Geográfica*, 17, 11-28. Recuperado de <http://dspace.uah.es/dspace/handle/10017/14342>
- Aguilera, F. (2008). *Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada*. (Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España). Recuperada de <https://hera.ugr.es/tesisugr/17652236.pdf>
- Barredo, J. & Gómez, M. (2008). Toward a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region. En M. Paegelow & M. Camacho-Olmedo (Eds.), *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions*. (p. 363–85). Recuperado de http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68498-5_14
- Carsjens, G. (2009). *Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes*. (Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen, Wageningen, Holanda).
- de Nijs, T., de Niet, R. & Crommentuijn, L. (2004). Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management*, 72, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.03.015>
- Dreborg, K. (2004). *Scenarios and structural uncertainty: explorations in the field of sustainable transport*. (Tesis doctoral, Real Instituto Tecnológico de Estocolmo, Estocolmo, Suecia)
- Forrester, J. (1969). *Urban Dynamics*. Portland, OR: Productivity Press.
- Guhathakurta, S. (2002). Urban Modelling as Storytelling: Using Simulation Models as a Narrative. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29, 895-911. <https://doi.org/10.1068/b12857>
- Han, J., Hayashi, Y., Cao, X. & Imura, H. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 91(3), 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.12.002>

- Henriquez, C., Azócar, G. & Romero, H. (2006). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945-964. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.05.002>
- Houet, T., Verbug, P. & Loveland, T. (2009). Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 25(2), 163-167. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9417-x>
- Jat, M. K., Garg, P. K. & Deepak, K. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26-43. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.04.002>
- Lambin, E., Helmut, J. & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Reviews Environment Resource*, 28, 205-241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. & Asensio Rodríguez, J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus*, 7, 120-147. Recuperado de <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/114/276>
- Mustard, J. F., Defries, R. S., Fisher, T. & Moran, E. (2004). Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts. En G. Gutman, A. Janetos, C. Justice, E. Moran, J. Mustard, R. Rindfuss, ...M. Cochrane, (Eds.). *Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface Springer* (pp. 411-429). Dordrecht: Springer Netherlands. Recuperado de http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-2562-4_24
- Pettit, C. & Pullar, D. (2004). A way forward for land use planning to achieve policy goals by using spatial modeling scenarios. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), 213-233. <https://doi.org/10.1068/b3024>
- Reginster, I. & Rounsevell, M. (2006). Scenarios of future urban land use in Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(4), 619-636. <https://doi.org/10.1068/b31079>
- Roldán López, H. (2006). *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Fontamara.
- Verburg, P. H., Schot, P., Dijst, M. & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geojournal*, 61(04), 309-324. Doi: 10.1007/s10708-004-4946-y
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499. Doi: 10.1126/science.277.5325.494