

# DISEÑO DE UN MODELO DE DEMANDA DE USOS DE SUELO

Gabriela CORRALES BARRAZA<sup>a</sup>, Wenseslao PLATA ROCHA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa,

[gabriela.corrales@info.uas.edu.mx](mailto:gabriela.corrales@info.uas.edu.mx)

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa,

[wenses@uas.edu.mx](mailto:wenses@uas.edu.mx)

## 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 dos municipios del Estado de Sinaloa, México.

**Palabras clave:** Dinámica de Sistemas, escenarios futuros.

## ABSTRACT

Nowadays, land use transformations are impacting in distinct ecosystems and its biodiversity. Therefore, becomes important the proposing of future territorial models to visualize the performance of different land uses and land covers, with goal of making decisions in territorial level, thus, they comes to be a mechanism to make concern and to stablish natural resources protection strategies for township, state, national and global level. The design and simulation of future explorative scenarios are useful tools for the spatial planning processes, particularly relevant in territorial and metropolitan area.

For future scenarios development, it is necessary to simulate and compute the demand surface that needs to have each land use in the different sceneries proposed. This paper shows a System Dynamic based model designed to estimate demands that diverse categories need to have in a posed scenary. The model was developed specifically for two townships of Sinaloa state, México.

**Keywords:** System Dynamic, future scenarios.

## 1 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, et al., 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, et al., 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, et al., 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, et al., 2006; Mahesh Kumar & Garg Deepak, 2008).

Una alternativa puede ser optar por la nueva generación de modelos espaciales, tales como: la modelación de diferentes escenarios y la simulación de imágenes alternativas de futuro. Dichos modelos ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores, no solo económicos, sino también ambientales, sociales y otros, abarcando así los aspectos más representativos de las dinámicas territoriales.

La generación de escenarios a futuro en cuestiones territoriales, se han convertido en una poderosa herramienta de análisis espacial, pues son una representación de un componente o procesos de la realidad, considerados por diversos autores como modelos dinámicos capaces de pronosticar posibles comportamientos futuros, representar la magnitud de los cambios ocurridos en el territorio, su localización a futuro y sus patrones espaciales (Henriquez, et al., 2006; Houet & Verbug, 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, et al., 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 el cálculo de la demanda de suelo para cada escenario algunos autores se basan en los planes de desarrollo territorial, modelos macroeconómicos, o proyecciones de población (Aguilera, 2008; Barredo & Gómez, 2008; Pettit & Pullar, 2004; Verbug, et al., 2004; de Nijs, et al., 2004; Molero Melgarejo, et al., 2007).

Mientras que otros han empleado modelos estadísticos para correlacionar variables

demográficas y socioeconómicas con los usos de suelo (Reginster & Rounsevell, 2006). Por su parte, los modelos 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, 2001; Han, et al., 133-141).

No obstante, dichos trabajo utilizan 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 suelo considerando solamente los mapas de usos de suelos de dos fechas diferentes (1993 y 2011) utilizado implícitamente en los escenarios sin necesidad de introducir otro tipo de variables. Para lo cual se construirá un modelo de simulación utilizando herramientas como la Dinámica de Sistemas (DS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

## **2 ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio del modelo de simulación de demandas de uso de suelo está configurado para dos municipios del Estado de Sinaloa, México, los cuales son Culiacán y Navolato (Figura 1), los cuales ostentan un 14.67% del territorio estatal, con una superficie de 8,760.74 km<sup>2</sup>, en los cuales se distribuye un total de 994,241 habitantes (INEGI, 2010).

Los cambios más representativos se presentan en estos municipios, donde se encuentra Culiacán capital del Estado y el municipio de Navolato, que siendo el más joven de los 18 municipios del Estado, 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).

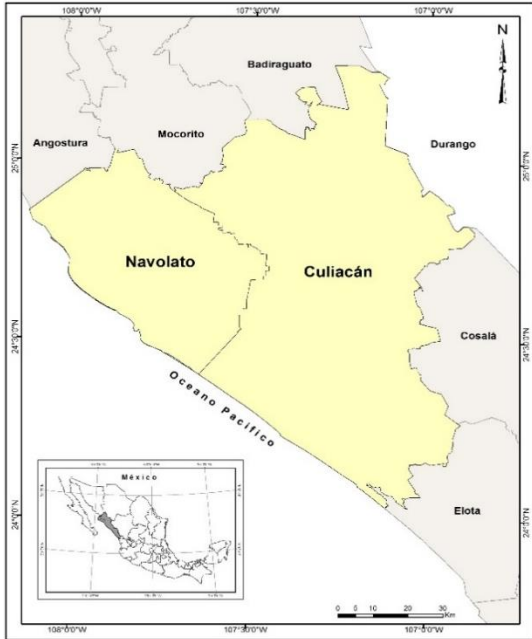


Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

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.

#### 3.1 DINÁMICA DE SISTEMAS: VENSIM PLE

Vensim es una herramienta visual de modelización que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Vensim provee una forma simple y flexible de construir modelos dinámicos de simulación mediante diagramas de influencias y diagramas de Forrester, el cual consta de tres etapas fundamentales:

**1. Formulación y elaboración del modelo estructural del sistema.** Se define el propósito, las fronteras y las variables a trabajar en el modelo, se

identifican las variables relevantes y las relaciones que se establecen entre ellas.

**2. Introducción del modelo matemático.** El programa cuenta con un editor de ecuaciones que permite introducir las expresiones descriptivas del comportamiento de cada variable.

**3. Ejecución de la simulación.** Una vez introducido el modelo matemático, el programa comprueba su coherencia y permite resolver las ecuaciones introducidas en el intervalo temporal que previamente hayamos definido.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

#### 3.2.1 DEFINICIÓN DEL ESCENARIO

Mediante el estudio de la evolución que han seguido los cambios de usos de suelo históricamente en los municipios de Culiacán y Navolato, se realiza un escenario de tendencia, con el objetivo de mostrar qué pasaría si se mantuviesen los cambios de uso del suelo hasta el año 2030.

Para ello, se ha estudiado la evolución pasada entre 1993 y 2011, utilizando una leyenda temática de 7 categorías (Tabla 1).

Tabla 1. Categoría utilizada.

| Categorías de Usos de suelo    | No. |
|--------------------------------|-----|
| Agricultura de riego y humedad | 1   |
| Agricultura temporal           | 2   |
| Asentamiento humano            | 3   |
| Bosque                         | 4   |
| Otros tipos                    | 5   |
| Pastizales                     | 6   |
| Selvas                         | 7   |

#### 3.2.2 DATOS DE PARTIDA

El conjunto de variables seleccionado para el estudio, son los mapas de usos de suelo con fechas de 1993 y 2011, a partir de estos se obtendrán las tasas y transiciones que se tomarán como base para el cálculo de demandas (Figura 2).

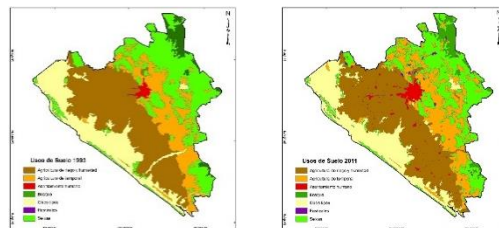


Figura 2. Usos de suelo del modelo.

### 3.2.2 OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES

Para obtener las variables que se utilizaron en el modelo, se realizó una matriz de tabulación cruzada de los mapas de usos de suelo, con la cual se obtuvieron, las transiciones entre todas las categorías (Tabla 2).

**Tabla 2.** Matriz de tabulación cruzada de los mapas de 1993 y 2011.

|            | 1       | 2       | 3     | 4      | 5       | 6   | 7       | Total 2011 |
|------------|---------|---------|-------|--------|---------|-----|---------|------------|
| 1          | 275,537 | 12,700  | 4     | 0      | 11,465  | 0   | 3,397   | 303,103    |
| 2          | 269     | 120,147 | 3     | 401    | 3,278   | 0   | 36,940  | 161,038    |
| 3          | 11,240  | 3,032   | 7,759 | 0      | 247     | 0   | 1,209   | 23,487     |
| 4          | 0       | 0       | 0     | 26,338 | 0       | 0   | 2,020   | 28,358     |
| 5          | 5,953   | 2,335   | 0     | 0      | 146,988 | 0   | 4,605   | 159,881    |
| 6          | 181     | 468     | 0     | 231    | 0       | 240 | 2,012   | 3,132      |
| 7          | 638     | 9,983   | 2     | 192    | 3,538   | 0   | 182,760 | 197,113    |
| Total 1993 | 293,818 | 148,665 | 7,768 | 27,162 | 165,516 | 240 | 232,943 | 876,112    |

A partir de las transiciones, se calcularon las tasas de cambio por año para el periodo de 1993 a 2011 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Tasas de cambio (1993 a 2011).

| 2011<br>1993 | 1         | 2        | 3      | 4        | 5        | 6     | 7         |
|--------------|-----------|----------|--------|----------|----------|-------|-----------|
| 1            | 15,307.61 | 705.55   | 0.22   | 0.00     | 636.94   | 0.00  | 188.72    |
| 2            | 14.94     | 6,674.83 | 0.167  | 22.27    | 182.11   | 0.00  | 2,052.22  |
| 3            | 624.44    | 168.44   | 431.05 | 0.00     | 13.72    | 0.00  | 67.16     |
| 4            | 0.00      | 0.00     | 0.00   | 1,463.22 | 0.000    | 0.00  | 112.22    |
| 5            | 330.72    | 129.72   | 0.00   | 0.00     | 8,166.00 | 0.00  | 255.83    |
| 6            | 10.05     | 26.00    | 0.00   | 12.83    | 0.000    | 13.33 | 111.77    |
| 7            | 35.44     | 554.61   | 0.11   | 10.66    | 196.55   | 0.00  | 10,153.33 |

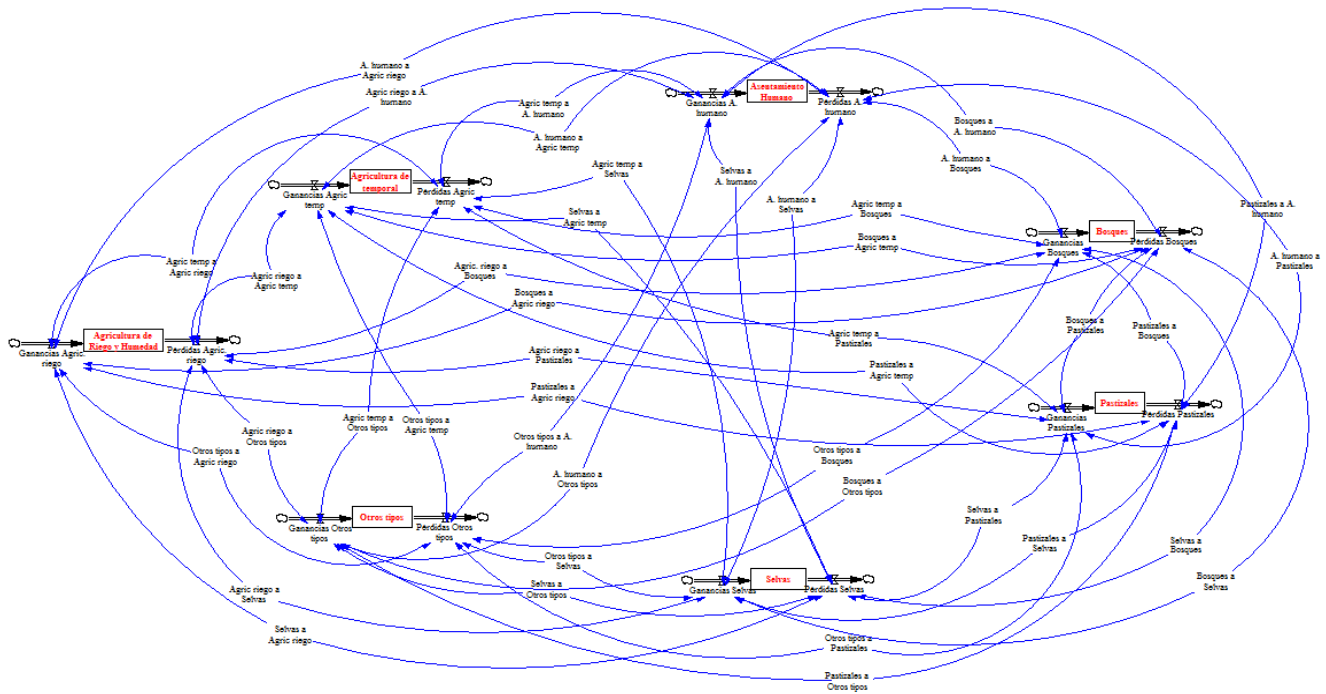
Conformándose así, todas las variables utilizadas en el modelo, las variables de nivel son todas la categorías, y su valor inicial corresponde a las superficies que cada uso de suelo tenía en la primera fecha (1993), las variables auxiliares, corresponden a todas las transiciones y su valores son las tasas por año de todas las transiciones.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

Desde el punto de vista del diseño conceptual del modelo, éste se compone de 7 variables de nivel, las cuales se relacionan entre sí mediante 42 variables auxiliares, éstas, alimentan los flujos que modifican las variables de nivel (Figura 3).

La evolución de las variables de nivel en el tiempo, se da mediante dos flujos, uno de entrada (Ganancias) que lo conforman todas las variables auxiliares que representen transiciones hacia la categoría en cuestión, y uno de salida (Pérdidas), que se compone de las variables auxiliares que representan transiciones de esa categorías hacia las demás.



**Figura 3.** Diseño del modelo de Dinámica de Sistemas

#### 4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez establecido el diseño del modelo, con los valores de las superficies iniciales para cada categoría y sus tasas, se realizó la simulación del año 1993 al año 2011 para verificar que el modelo ajustará bien a esas dos fechas de partida. Posteriormente, con el modelo ajustado, se ejecutó con 19 iteraciones para generar la demanda de cada categoría al año 2030 para un escenario de demanda de tendencia (Tabla 4).

**Tabla 4.** Demanda de superficie simulada

| Categorías de Usos de suelo    | SUP. 1993 | SUP. 2011 | SUP. 2030 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Agricultura de riego y humedad | 293,818   | 303,103   | 312,904   |
| Agricultura temporal           | 148,665   | 161,038   | 174,110   |
| Asentamiento humano            | 7,768     | 23,487    | 40,079    |
| Bosque                         | 27,162    | 28,358    | 29,620    |
| Pastizales                     | 240       | 3,132     | 6,184     |
| Otros tipos                    | 165,516   | 159,881   | 153,921   |
| Selvas                         | 232,943   | 197,113   | 159,293   |
| Σ                              | 876,112   | 876,112   | 876,112   |

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, cuales disminuyen considerablemente su superficie.

#### 5 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

Crisis (EC), un Escenario de Sostenibilidad e Innovación (ESI) u otros, con el hecho de modificar las tasas que podrían darse en un futuro según la línea evolutiva de cada escenario.

En la tabla 5 se plantean escenarios de demanda de manera hipotética de cómo se deberían comportar las tasas para cada categorías. Por ejemplo, la demanda de superficie para la agricultura de riego disminuye en ambos escenarios, en el EC debido a la baja actividad económica que impactaría en la productividad del campo y en el ESI se debería a la innovación en actividad agrícolas, lo que incrementaría la productividad en superficies menores de suelo. En el caso de la agricultura de temporal, para el EC aumentaría la superficie debido al abandono de la agricultura de riego y en el ESI disminuye debido al incremento de los pastizales y las selvas, pasando a ocupar esta superficie, principalmente en la zona serrana. En cuanto a los asentamiento humanos en el EC aumentaría de manera natural, aunque no con el auge que da la industria inmobiliaria debido a la crisis financiera y en el ESI se mantendría igual que en el periodo anterior 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 el ESI los bosques, pastizales y selvas aumentarían considerablemente intentado restaurar los ecosistemas forestales y ambientales perdidos en el modelo territorial pasado.

**Tabla 5.** Tasas hipotéticas para otros escenarios

| Categorías de Usos de suelo    | Tasas EC | Tasas ESI |
|--------------------------------|----------|-----------|
| Agricultura de riego y humedad | ↓        | ↓         |
| Agricultura temporal           | ↑        | ↓         |
| Asentamiento humano            | ↑        | =         |
| Bosque                         | =        | ↑↑↑       |
| Pastizales                     | ↑        | ↑↑        |
| Selvas                         | ↑        | ↑↑↑       |
| Otros tipos                    | =        | =         |

De esta manera se podría implementar el cálculo de la demanda de suelo para estos escenario u otros, claro está que este es solo un ejemplo. Para poder fundamentar la demanda se realizan 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 que 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.

### AGRADECIMIENTOS

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.

### REFERENCIAS

- Aguilera Benavente, F. et al., 2011. Escenarios y modelos de simulación como instrumento en la planificación territorial y metropolitana. *Serie Geográfica*, Volume 17, pp. 11-28.
- Aguilera, F., 2008. Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada.. In: *Tesis Doctoral. Universidad de Granada*. s.l.:s.n.
- Barredo, J. & Gómez, M., 2008. Toward a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region. In: *Modelling Environmental Dynamics*. s.l.:Springer-Verlag, Berlín.
- Carsjens, G., 2009. Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes. In: *Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen*. s.l.:s.n.
- de Nijs, T., de Niet, R. & Crommentuijn, L., 2004. Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management*, Volume 72, pp. 35-42.
- Dreborg, K., 2004. Scenarios and structural uncertainty: explorations in the field of sustainable transport.. In: *Tesis doctoral. Real Instituto Tecnológico de Estocolmo*.. s.l.:s.n.
- Forrester, J., 1969. *Urban Dynamics*. Portland: Productivity Pres..
- Gómez, M. & Barredo, J., 2005. *Sistemas De Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación Del Territorio*. Madrid: Ra-Ma.
- Guhathakurta, S., 2001. Urban Modelling as Story telling: Using Simulation Models as a Narrative. In: *Working Papers Series, Centre for Advanced Spatial Analysis (University College, London)*. s.l.:s.n., p. <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper37.pdf>.
- Han, J., Hayashi, Y., Cao X & Imura, H., 133-141. 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).
- Henriquez, C., Azócar, G. & Romero, H., 2006. Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities.. *Habitat International N° 30*., p. 945-964..
- Houet, T. & Verbug, P., 2009. “Monitoring and modelling landscape dynamics”.. *Springer*.
- Lambin, E. F., Helmut, J. G. & Lepers, E., 2003. “Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions”. *Annual Reviews Environment Resource*, p. 205-241..
- Lopez Klocker, C. & Bosque Sendra, J., 2005. SIG y Dinámica de sistemas”. In: *X Conferencia Iberoamericana de SIG*. San Juan de Puerto Rico.: s.n., p. 10.
- Mahesh Kumar, J. & Garg Deepak, K., 2008. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. N° 10*., pp. 26-43.
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L. & Asensio Rodríguez, J., 2007. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus*, Volume 7, pp. 120-147.
- Mustard, J. F. et al., 2004. “Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts”. *Springer*.
- Ott, T. & Swiaczny, F., 2001. Time-Integrative geographic information systems. Management and analysis of spatio-temporal data. In: *Springer-Verlag*. Berlin: s.n.
- 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*, Issue 213-233, p. 31.
- Reginster, I. & Rounsevell, M., 2006. Scenarios of future urban land use in Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(4), pp. 619-636.
- Roldán López,, H., 2006. *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Gobierno de Sinaloa: Fontamara.
- Verburg, P. H., Schot, P., Dijst, M. & Veldkamp, A., 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geojournal*, 61(04), pp. 309-324.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J., 1997. “Human domination of Earth’s ecosystems”. *Science*, 277:494-499.