

Análisis y simulación espacio temporal de la dinámica de las zonas agrícolas mediante Sistemas de Información Geográfica

Plata Rocha Wenseslao¹, Corrales Barraza Gabriela²

¹ Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México
wenses@uas.edu.mx

² Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México
ga5bi.corrales@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis y simulación espacio-temporal de la agricultura en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del país, de hecho, la Ciudad capital, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato. Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal. Para llevar a cabo el estudio se utilizan los mapas de usos de suelo y vegetación de 1993 y 2011, y con base en estos se proponen 2 escenarios de simulación (tendencia y sostenibilidad) al 2030. El resultado obtenido muestra que la mayor dinámica se da en la agricultura de temporal y en la agricultura de riego. De esta manera se generó el escenario de tendencia, donde las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. Mientras que en el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Dichos escenarios son de gran utilidad en la gestión, planeación y prospección del territorio, integrando una visión participativa y adaptativa a las ordenanzas gubernamentales sobre las proyecciones de futuro de la región.

Palabras clave: **SIG, escenarios futuros, evaluación multicriterio.**

ABSTRACT

This paper presents a spatial-temporal analysis and simulation of agriculture in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico, using Geographic Information Systems (GIS). The state of Sinaloa has the first place in food production in the country, in fact, the capital city, Culiacán, is based in one of the most prolific agricultural valleys of the national territory, mainly covering the municipalities of Culiacan and Navolato. The agricultural areas in these municipalities constitute 52.6% of the area, almost 450,000 hectares of cultivation, of which 34.3% is irrigated agriculture and the remaining 18.3% is temporal agriculture.

In order to carry out the study, the maps of land use and vegetation of 1993 and 2011 are used, and based on these, are proposed two scenarios of simulation (trend and sustainability) by 2030. The results obtained shows that the greatest dynamics occurs in temporal agriculture and in irrigation agriculture. In this way, the trend scenario was generated, where the most significant transitions occur from rainforests to temporal agriculture and to irrigated agriculture and humidity; and from both agricultures to human settlements. While in the sustainability scenario, the main transition occurs from temporal agriculture to the rainforests, followed in less quantity, by the one of agriculture of temporary to grasslands. These scenarios are very useful in the management, planning and prospecting of the territory, integrating a participatory and adaptive vision to the governmental ordinances on the future projections of the region.

Keywords: GIS, future scenarios, multicriteria evaluation.

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones principalmente debido a 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, 2004). En este sentido, al análisis de los cambios, ayudan a explicar el alcance, la importancia y el efecto negativo que tiene dicha dinámica en el medio ambiente y su relación con las diversas actividades humanas, sobre todo las relacionadas con la antropización del territorio, la cual provoca la fragmentación y contaminación del paisaje, provocando daños irreversibles al medio ambiente y a la población.

De la misma forma, se señala en la literatura que no basta el monitoreo y análisis retrospectivo de los cambios de uso y cobertura de suelo, sino que es también necesario el análisis prospectivo a mediano y largo plazo (Henriquez, Azócar, & Romero, 2006; Mahesh Kumar & Garg Deepak, 2008). Una alternativa puede ser optar por la generación de diferentes escenarios de futuro, los cuales contribuyen, además, a tener un mejor entendimiento de los principales procesos de cambios de usos del suelo y ser utilizados como un sistema de alerta temprana que pone de manifiesto y subraya los efectos e impacto de los cambios futuros de usos del suelo que son prioritarios para un análisis en profundidad o de interés en la intervención política, económica, ambiental, social y cultural (Verburg, Kok, Pontius, & Veldkamp, 2006).

Al respecto, se puede decir que los modelos de simulación se presentan como un instrumento innovador, en los cuales es posible considerar las dinámicas actuales de la región y, a la vez, incluir la opinión consensuada de instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, investigadores, economistas, entre otros, permitiendo de este modo llevar a cabo un proceso de planificación del territorio más informado.

Dichos modelos ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores económicos, ambientales, sociales, entre otros, abarcando así los aspectos más representativos de las dinámicas territoriales.

Las posibilidades que se desprenden de lo anterior motivan que la aplicación de escenarios en planificación sea una línea o enfoque de actualidad científica, en el que se encuadran diversos proyectos de investigación en la materia, tanto de carácter nacional como internacional.

La aplicación de los escenarios para cuestiones medioambientales aparece a comienzos de la década de 1970 (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972). Desde entonces los estudios de escenarios se han utilizado para analizar todo tipo de situaciones a distintas escalas, desde la sostenibilidad global hasta cuestiones ambientales muy específicas a escala regional. Los ejemplos más conocidos de estudios de

escenarios incluyen el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2000), el Global Environment Outlook (PNUMA, 2002) y la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (WRI, 2005). Estos estudios se han tomado como referencia por numerosas naciones y organizaciones mundiales, adaptando los escenarios a su escala de gestión.

Los objetivos de los estudios globales tienden a centrarse únicamente en producir escenarios, mientras que los estudios regionales, normalmente, se concentran en desarrollar herramientas que sirvan como apoyo en la toma de decisiones. Además, los escenarios globales tienden a responder cuánto uso del suelo cambiará, mientras que los escenarios regionales y locales tienden a responder también dónde tendrá lugar el cambio. Asimismo las simulaciones globales o continentales se llevan a cabo a largo plazo (normalmente tienen como horizonte futuro el año 2050 en adelante), mientras que los escenarios regionales y locales se realizan a corto plazo (la mayoría al 2020, 2030 o 2050).

Por su impacto en el ambiente, los escenarios asociados al cambio de uso de suelo y la evaluación de las políticas públicas han tomado relevancia en México desde la década de los 90. En las dos últimas décadas, se han realizado trabajos enfocados a establecer áreas de adecuación óptima para plantaciones agrícolas (Aguilar Rivera, Galindo Mendoza, Fortanelli Martínez, & Contreras Servin, 2010), para estudios de deforestación (Pineda Jaimes, 2010; Franco Prieto, 2010) y análisis de la desertificación (López Beltrán, Aguilar Villegas, & Plata Rocha, 2014; Pérez Verdín, Hernández Díaz, Márquez Linares, & Tecle, 2009).

En este sentido, en el presente trabajo se realiza un estudio de la dinámica histórica de las zonas agrícolas y la simulación de 2 escenarios de futuro, lo cual dará la pauta para analizar una línea evolutiva de tendencia y una situación de sostenibilidad en la agricultura en los Municipios de Culiacán y Navolato.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El Estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del País, de hecho, la Ciudad capital del Estado, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato, los cuales se encuentran ubicados entre los paralelos 24° 02' y 25° 59' de latitud Norte y los meridianos 106° 52' y 108° 04' de longitud Oeste; con una altitud entre 0 y 800 m., colindando al Norte con los municipios de Angostura, Mocorito, Badiraguato y el Estado de Durango; al Este con el Estado de Durango y los municipios de Cosalá y Elota; al Sur con el Municipio de Elota y el Océano Pacífico (Figura 1).

El Municipio de Culiacán ocupa el 10.96% de la superficie del estado y cuenta con un total de 1,483 localidades (INEGI,

2010), mientras que al municipio de Navolato le corresponde un total de 3.71%, con 498 localidades. Ambos municipios 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). El mayor porcentaje de habitantes radica en las ciudades capitales, Culiacán y Navolato, con 858, 638 y 135, 603 habitantes, respectivamente (INEGI, 2010).

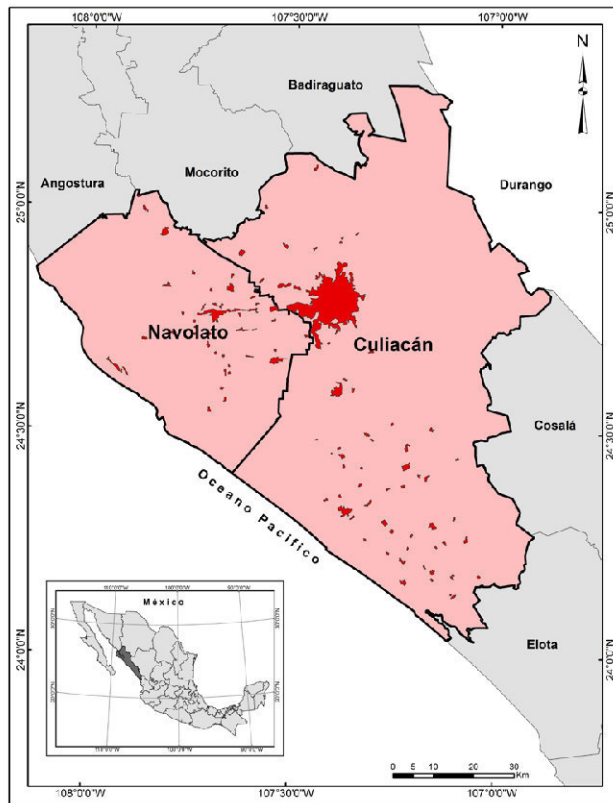


Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato

Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal (Tabla 1).

Tabla 1 SUPERFICIE DE USOS DE SUELO EN AMBOS MUNICIPIOS

| CATEGORÍA | SUPERFICIE (HAS) 1993 | SUPERFICIE (HAS) 2011 | % 2011 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| Agricultura de riego y humedad | 283,812 | 293,782 | 34.3 |
| Agricultura temporal | 143,911 | 156,151 | 18.3 |
| Asentamiento humano | 6,650 | 20,116 | 2.4 |
| Bosque | 26,969 | 28,185 | 3.3 |
| Otros tipos | 164,152 | 158,948 | 18.6 |
| Pastizales | 340 | 3,020 | 0.4 |
| Selvas | 229,461 | 195,093 | 22.8 |
| Σ | 855,295 | 855,295 | 100.0 |

Otro aspecto fundamental a considerar es el hecho que ambas cabeceras municipales trazan un eje donde interactúan entes rurales, urbanos, industriales y comerciales, lo cual induce a la conformación de una zona metropolitana (Figura 3), lo que implica en corto plazo el desarrollo de planes territoriales en el corredor Culiacán - Navolato (Roldán López, 2006).

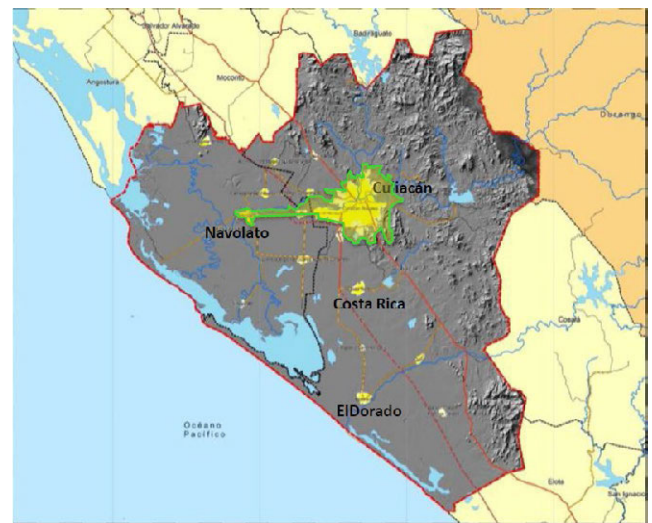


Figura 3. Zona metropolitana Culiacán - Navolato
Fuente: <http://codesin.mx/wp-content/uploads/2015/01/Zona-Metropolitana-Culiacan-Navolato.pdf>

III. MÉTODO

Para el estudio de la dinámica del territorio se utiliza como información de partida los mapas de usos del suelo del año 1993 y 2011, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para lo cual se definió una leyenda conformada por 7 categorías, las cuales representan adecuadamente la dinámica entre los diferentes usos de suelo, obteniéndose así los mapas homogeneizados entre ambas fechas que permitieron realizar el estudio retrospectivo y la simulación de los escenarios de futuro (Figura 2).

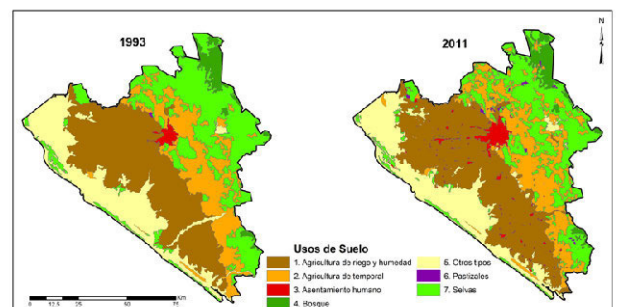


Figura 2. Mapas de usos de suelo del modelo

Una vez preparada la información cartográfica espacio-temporal se procedió a realizar el análisis detallado de los cambios de uso del suelo mediante la metodología desarrollada por Pontius (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004), la cual permite obtener para cada categoría de uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales.

Luego de identificar los principales usos de suelo que intervienen en la dinámica territorial de los municipios de Culiacán y Navolato, se realiza la construcción de los escenarios para identificar las diferentes opciones que tuviese el área de estudio, si continuase la tendencia actual (escenario tendencial) o si se tuvieran intervenciones planificadas y concertadas en el corto, mediano y largo plazo (escenarios de sostenibilidad). Dicha metodología se realiza en 3 etapas (Figura 4).

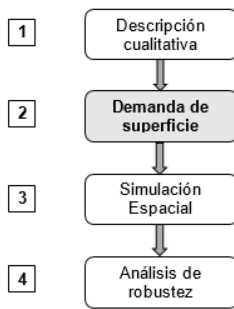


Figura 4. Etapas para la simulación de escenarios

Para llevar a cabo la primera etapa se realizaron reuniones con expertos del grupo de geomatica de la Universidad Autónoma de Sinaloa (geomatica.uas.edu.mx), en las cuales se consensó realizar un escenario de tendencia con la finalidad de mostrar cual sería el estado de los usos agrícolas hasta el año 2030 si se mantuvieran las lógicas ocurridas en el pasado, así como un escenario de sostenibilidad, en el cual se tomarían en cuenta los nuevos modelos de producción agrícola tecnificada y la reforestación de algunas zonas consumidas por la agricultura de temporal.

Para realizar la segunda etapa se optó por el diseño y ajuste de un modelo de Dinámica de Sistemas (DS) de Demanda, utilizando para ello el Software Vensim y los mapas de usos de suelo de 1993 y 2011 (Corrales, 2016).

Posteriormente, para la simulación geoespacial de los escenarios de zonas agrícolas se recopiló datos referentes al tipo de suelo, hidrografía, carreteras, altitud y pendiente (Tabla II), para diseñar los factores a utilizar en cada escenario.

TABLA II
VARIABLES UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

| VARIABLES | FUENTE/ESCALA |
|---|--|
| • Agricultura de riego y humedad • Agricultura de temporal • Asentamiento humano • Bosques • Pastizales • Selvas • Otros tipos. | Uso del Suelo y Vegetación INEGI Año 2011 1:250,000 |
| • Altitud • Pendiente | MDT. INEGI Escala: 90m Año: 2013 |
| • Tipos de suelo | INEGI 1:250,000 |
| • Ríos • Canales | INEGI 1:250,00 1:1,000,00 |
| • Carreteras | INEGI 1:50,000 |

Para obtener los mapas de aptitud o adecuación se utilizó la sumatoria lineal ponderada, la cual es uno de los métodos más utilizados en la Evaluación Multicriterio por su relativa sencillez, robustez y poca complejidad en su implementación (Gómez Delgado & Barredo, 2005). El nivel de adecuación de cada alternativa se obtiene sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso [1]:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_i \cdot v_{ij} \quad (1)$$

Donde: w_i son los pesos; v_{ij} son los factores y r_i es la aptitud de cada píxel.

Finalmente, con los mapas de aptitud/adecuación obtenidos, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA, MultiObjective Land Allocation) en el software Idrisi entre los mapas de aptitud para agricultura de riego y aptitud para la agricultura de temporal.

El esquema metodológico seguido para realizar la investigación se muestra en la figura 4.

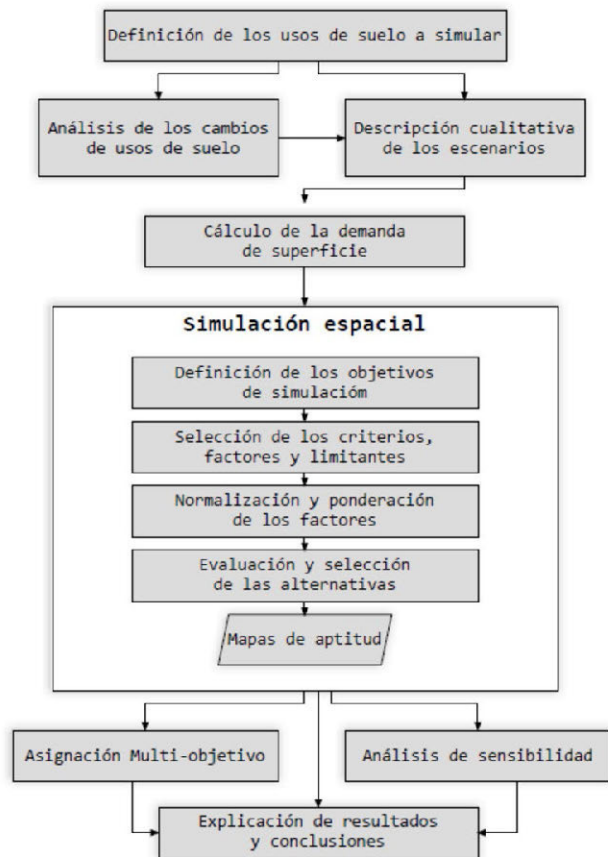


Figura 4. Esquema metodológico

IV. RESULTADOS

ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO

Analizando la dinámica de los usos de suelo del año 1993 al 2011 se tuvo que la tendencia de los cambios fue de un aumento de los asentamientos humanos, de la agricultura de temporal, de la agricultura de riego y en menor medida de los pastizales y bosques. A su vez, las selvas tuvieron una gran pérdida de superficie y en menor cantidad la categoría de otros tipos.

Analizando ésta matriz de cambios, vemos como la transición de mayor tamaño se da de selvas a la agricultura de temporal, seguidas por las de la agricultura de temporal hacia agricultura de riego y otros tipos (Tabla 3).

TABLA III
MATRIZ DE CAMBIOS: 1993 A 2011

| | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|-------|--------|---------|-----|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Agric. de riego y humedad | 267,398 | 12,226 | 4 | 0 | 10,877 | 2 | 3,275 |
| Agric. temporal | 250 | 116,343 | 3 | 380 | 3,250 | 0 | 35,925 |
| Asent. humano | 9,462 | 2,687 | 6,641 | 0 | 209 | 0 | 1,117 |
| Bosque | 0 | 0 | 0 | 26,166 | 0 | 0 | 2,019 |
| Otros tipos | 5,926 | 2,313 | 0 | 0 | 146,326 | 0 | 4,383 |
| Pastizal | 146 | 432 | 0 | 231 | 0 | 337 | 1,874 |
| Selva | 630 | 9,910 | 2 | 192 | 3,490 | 1 | 180,868 |

Ahora bien, si analizamos la dinámica de los usos de suelo en función de sus ganancias, pérdidas, persistencias y cambios, tenemos que, la categoría que experimentó la mayor ganancia fue la agricultura de temporal, seguida por la agricultura de riego y humedad, y en cantidades menores los asentamientos humanos y otros tipos. En cuanto a las pérdidas, fueron las selvas la categoría que experimentó la mayor pérdida, de igual forma, son las selvas las que presentan los mayores cambios, seguidas por los asentamientos humanos y las agriculturas. Es importante recalcar que, el aumento de superficies de categorías como, las agriculturas y los asentamientos humanos, se da básicamente a costa de las selvas (Tabla 4). De igual forma, debemos considerar que las transiciones experimentadas por la categoría de otros tipos, no representa un cambio negativo, pues dichos cambios se dan en las subcategorías de "área sin vegetación aparente" y "vegetación halófila y gipsófila", mientras que la vegetación hidrófila y los cuerpos de agua permanecen constantes.

TABLA 4
CAMBIOS OCURRIDOS DE 1993 AL 2011

| CLASE | GANANCIA | PÉRDIDA | PERSISTENCIA | CAMBIO NETO | CAMBIO TOTAL |
|-------|----------|---------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | 26,384 | 16,414 | 267,398 | 9,970 | 42,798 |
| 2 | 39,808 | 27,568 | 116,343 | 12,240 | 67,376 |
| 3 | 13,475 | 9 | 6,641 | 13,466 | 13,484 |
| 4 | 2,019 | 803 | 26,166 | 1,216 | 2,822 |
| 5 | 12,622 | 17,826 | 146,326 | 5,204 | 30,448 |
| 6 | 2,683 | 3 | 337 | 2,680 | 2,686 |
| 7 | 14,225 | 48,593 | 180,868 | 34,368 | 62,818 |
| Σ | 111,216 | 111,216 | 744,079 | 79,144 | 222,432 |

En función de los resultados obtenidos del análisis de los cambios de usos de suelo observamos que la agricultura de riego y de temporal son las que mantienen las mayores ganancias y están dentro de las que tienen más pérdidas, mismas que se presentan espacialmente de diferentes partes del territorio, mientras que la agricultura de riego refleja su dinámica en el valle, la agricultura de temporal lo representa en la zona serrana (Figura 5).

Dicha dinámica no garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, es por ello, que se propuso evaluar dos escenarios territoriales futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia, es decir, un escenario de tendencia, que permita evaluar nuestro territorio futuro si se dieran las mismas lógicas seguidas en el pasado. Dicho escenario sería la base para medir un escenario alternativo de sostenibilidad a mediano y largo plazo de las dinámicas de los usos de suelo en nuestro territorio.

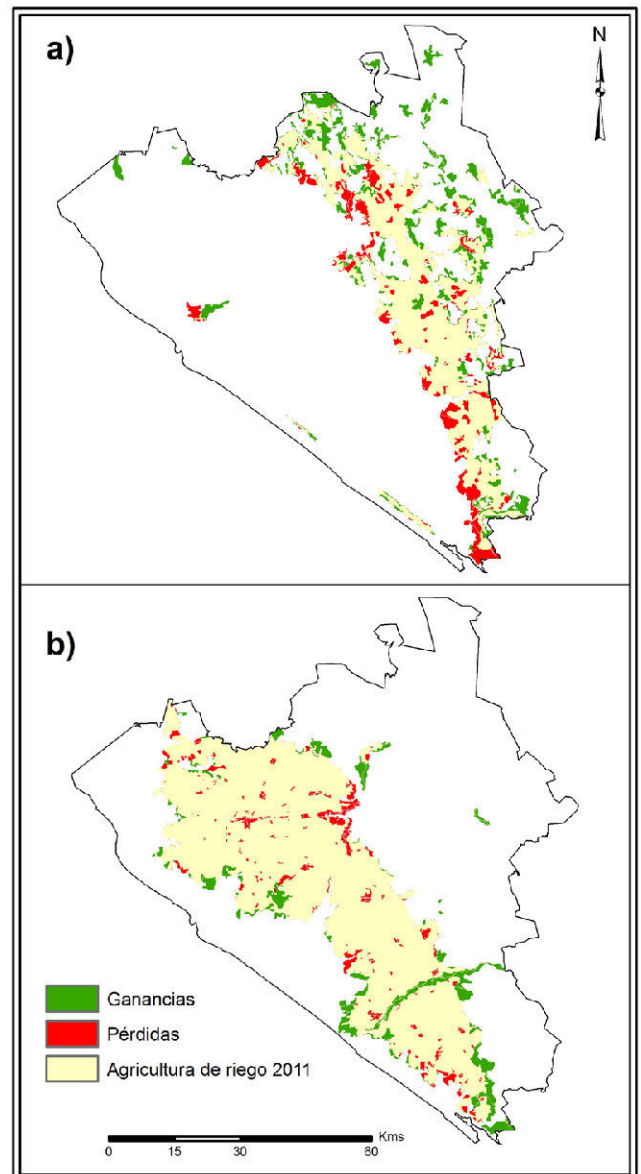


Figura 5. a) Agricultura de temporal, b) Agricultura de riego

ESCENARIOS DE FUTURO

Descripción cualitativa

De este modo se realizó la descripción cualitativa de los escenarios considerando el consenso de los integrantes del grupo de investigación en Geomática de la Universidad Autónoma de Sinaloa como se enuncian a continuación.

El seguimiento de las directrices de cambio ocurridas en el pasado, constituye la base del escenario de tendencia. Este escenario supone la confirmación y consolidación de las tasas de cambio ocurridas en el pasado, en donde, se establece un comportamiento de intercambio espacial de las zonas agrícolas, ya que mantendrán altas tasas de incremento y considerables pérdidas.

Por otro lado, la búsqueda de nuevos modelos y fórmulas que minimizan el impacto ambiental y maximizan el beneficio social y económico constituye la fortaleza del escenario de sostenibilidad. Las tasas de crecimiento de las superficies agrícola-

las disminuyen, debido a la innovación y tecnificación en las actividades agrícolas, lo que incrementaría la productividad en superficies menores de suelo. En particular, la agricultura de temporal disminuye debido al incremento de las selvas y pastizales. Lo que resulta en una disminución de las tasas de deforestación, así como recuperación de parte de la superficie de selvas deforestadas.

Demanda de suelo agrícola

Con el Modelo de Demanda ajustado, se obtuvo la superficie de futuro, ejecutándose con 19 iteraciones (años) para obtener la demanda de cada categoría del año 2011 al año 2030 para ambos escenarios futuros (Corrales Barraza, 2016).

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.

A partir de los resultados de la superficie simulada, observamos 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.

Para el escenario de sostenibilidad se ajustaron las tasas de transiciones de manera que se cumpla lo planteado en este escenario, es decir, que las tasas de superficie de cada categoría disminuyan o aumenten, conforme una dinámica sostenible de los usos de suelo. Al respecto, vemos una disminución de la superficie de agricultura de temporal debido al incremento de las selvas y pastizales, las superficies urbanas se mantienen constantes, con una tasa de crecimiento muy baja.

En la Tabla 5 se muestra la superficie obtenida para cada escenario y un indicador de su dinámica de cambio neto.

TABLA 5
SUPERFICIES SIMULADAS

| CATEGORÍA | SUPERFICIE REAL 2011 | ESCENARIO DE TENDENCIA (ET) 2030 | ESCENARIO SOSTENIBLE (ES) 2030 |
|-----------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 293,782 | 304,306.00 | 289,733.00 |
| 2 | 156,151 | 169,069.00 | 125,176.00 |
| 3 | 20,116 | 34,330.00 | 20,792.00 |
| 4 | 28,185 | 29,470.13 | 29,401.00 |
| 5 | 158,948 | 153,455.00 | 159,353.00 |
| 6 | 3,020 | 5,848.87 | 9,450.00 |
| 7 | 195,093 | 158,816.00 | 221,390.00 |
| Σ | 855,295 | 855,295 | 855,295.00 |

Selección de los criterios, factores y restricciones para la simulación geoespacial

Para la simulación geoespacial primero que nada se determinaron las zonas de restricción, es decir, se tomaron en cuenta las áreas donde cada objetivo a simular no se debía asignar, tales como: zonas urbanas, vías de comunicación, cuerpos de agua, red hidrográfica y algunos usos de suelo en particular (Figura 6).

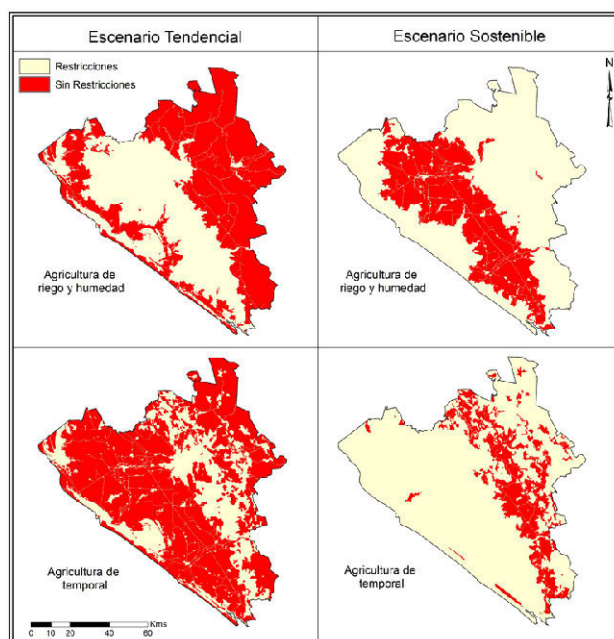


Figura 6. Mapa de restricciones, 1

Normalización

Como resultado de este apartado, tenemos los criterios normalizados, es decir, con una escala compatible, de todos los factores para cada uno de los escenarios.

La obtención de cada factor se obtuvo considerando diferentes procedimientos de normalización de cada uno de los factores para las categorías a simular en los dos escenarios planteados.

Agricultura de Riego y humedad

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utilizó solo para el escenario de sostenibilidad, en el cual se presentará una disminución de esta categoría. Considera los usos de suelo que producirán las pérdidas o disminución de superficie de la agricultura de riego. Es decir, las transiciones de agricultura de riego hacia otras categorías. Dichas transiciones, se obtuvieron en primer lugar, del análisis de los cambios sucedidos en el pasado, sin embargo, se analizó desde el punto de vista de la sostenibilidad que categorías deberían de crecer en función de la agricultura de riego y humedad y a que distancias se podrían producir esas transiciones. Se obtuvieron mapas de distancias de las categorías elegidas, y se normalizaron con funciones borrosas de tipo lineal decreciente, donde el valor máximo es el resultado del análisis mencionado, posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 6).

TABLA VI
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

| USYV | PESOS | DIST. DE NORMALIZACIÓN |
|----------------------|-------|------------------------|
| Agricultura temporal | 0.211 | 0 a 25,000 |
| Asentamiento humano | 0.031 | 0 a 4,000 |
| Otros tipos | 0.538 | 0 a 10,000 |
| Selvas | 0.220 | 0 a 10,000 |

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio se utiliza para el escenario de tendencia y representa los usos de suelo sobre los que se debe de dar el

crecimiento de la agricultura de riego, sin embargo, aparte de representar los usos de suelo, también representa las distancias sobre cada uno de ellos. Estas, se consideran inversas pues van desde los límites de cada categoría hacia el interior, ya que la idea es representar las distancias hacia cada uso de suelo. Para la obtención de éste factor, se analizaron los usos sobre los que se dio el crecimiento de la agricultura de riego en el pasado, así como a que distancias. Posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 7).

TABLA VII
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

| USYV | PESOS | DIST. DE NORMALIZACIÓN |
|-------------------------|-------|------------------------|
| Agricultura de temporal | 0.46 | 0 a 5,000 |
| Otros tipos | 0.41 | 0 a 2,000 |
| Selvas | 0.13 | 0 a 2,500 |

- Proximidad a Agricultura de riego

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de riego. Se utilizó para la simulación de crecimiento de agricultura de riego y humedad en el escenario de tendencia. Se normalizó utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde el valor mínimo que representa la máxima aptitud es 0, y máximo es 8,000.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de riego se producirá la disminución de superficie, asumiendo que se darán en los límites, donde esta colinda con otras categorías. Para generar este factor, primero se obtiene un mapa de distancias hacia el interior de la agricultura de riego y posteriormente se normaliza utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde los valores van del 0 a 1,000.

- Proximidad a Canales

La accesibilidad a los canales se considera esencial para el desarrollo de la Agricultura de Riego. Así, los lugares más próximos a los canales se valoraron como los más óptimos para que se presente el aumento de la Agricultura de riego. Factor utilizado en el escenario de tendencia y normalizado con una función lineal decreciente.

- Lejanía a Canales

Este criterio utilizado en el escenario de sostenibilidad, considera los lugares más lejanos a los canales como los menos óptimos para la agricultura de riego, es decir, son los más óptimos para la pérdida de esta cobertura. Se normaliza usando una función Lineal creciente de 0 a 5,000.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia. Se normaliza utilizando una función lineal decreciente.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se valoraran como los más óptimos para la disminución de superficie de la agricultura de riego. Por lo que, éste factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

Para su normalización se utiliza una función borrosa lineal creciente.

- Pendiente

Este factor se normaliza de manera que se representen las mejores pendientes para el desarrollo de cada actividad, en este caso, para la agricultura de riego. La normalización se realizó, mediante una función sigmoïdal decreciente, donde el valor más óptimo es el 0 (punto de control c) y el valor de menor aptitud es el 16 (punto de control d).

- Altitud

En este factor se representa la altura más adecuada para el crecimiento de la Agricultura de Riego. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia y para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoïdal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para el desarrollo de la Agricultura de riego, dependiendo del escenario a simular. En el escenario de tendencia, que tiene como objetivo simular el aumento de superficie, se normaliza dando mayor aptitud a los tipos de suelos donde se debe desarrollar dicho aumento; para determinar los tipos de suelo, se realizó un análisis histórico que consistió en una superposición de los mapas de cambios de la agricultura de riego y el mapa de tipos de suelo, obteniendo así, los tipos de suelos en los que se ha dado el crecimiento, posteriormente, se establecieron pesos para cada uno, basándonos en la superficie ocupada por cada uno.

Una vez establecidos los pesos para cada tipo de suelo, se reclasificó cada uno con el valor del peso correspondiente y se normalizó utilizando una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el valor máximo corresponde al valor del peso más alto (Tabla 8).

Para el escenario de sostenibilidad, que tiene el objetivo de simular la disminución de agricultura de riego, en primer lugar, se analizó sobre qué tipos de suelos se presentaba la agricultura de riego existente, la ponderación de cada suelo se realizó considerando la superficie de cada uno, en conjunto con los suelos que son menos óptimos para el desarrollo de la agricultura de riego. De la misma manera que en el escenario de tendencia, se normalizó utilizando una función lineal creciente de 0 al valor del peso más alto (Tabla 8).

TABLA VIII
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

| TIPOS DE SUELO | PESOS E. TENDENCIAL | PESOS E. SOSTENIBLE |
|----------------|---------------------|---------------------|
| Cambisol | 0.16 | 0.25 |
| Feozem | 0.08 | 0.05 |
| Fluvisol | 0.14 | 0.03 |
| Solonchak | 0.20 | 0.10 |
| Vertisol | 0.42 | 0.57 |

En resumen en la Tabla 9 se muestran los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

TABLA IX
VALORES UTILIZADOS PARA NORMALIZAR LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD

| FACTORES | FUNCIÓN | VALORES DE ADECUACIÓN | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|--------|---------------|--------|
| | | E. TENDENCIA | | E. SOSTENIBLE | |
| | | MIN | MAX | MIN | MAX |
| Proximidad a usos de suelo | Especial | - | - | SLP | SLP |
| Proximidad inversa a usos de suelo | Especial | SLP | SLP | - | - |
| Proximidad a Agricultura de riego | Lineal decreciente | 0 | 8,000 | - | - |
| Proximidad inversa a Agricultura de riego | Lineal decreciente | - | - | 0 | 1,000 |
| Proximidad a Canales | Lineal Decreciente | 0 | 27,000 | - | - |
| Lejanía a Canales | Lineal creciente | - | - | 0 | 5,000 |
| Pendiente | Sigmoidal decreciente | 0 | 16 | - | - |
| Altitud | Sigmoidal decreciente | 0 | 130 | - | - |
| Proximidad a Ríos | Lineal decreciente | 0 | 30,000 | - | - |
| Lejanía a Ríos | Lineal creciente | - | - | 0 | 30,000 |
| Tipos de Suelos | Lineal creciente | 0 | 0.57 | - | - |
| | Lineal decreciente | - | - | 0 | 0.42 |

Finalmente, en la Figura 7 y 8 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de riego en ambos escenarios.

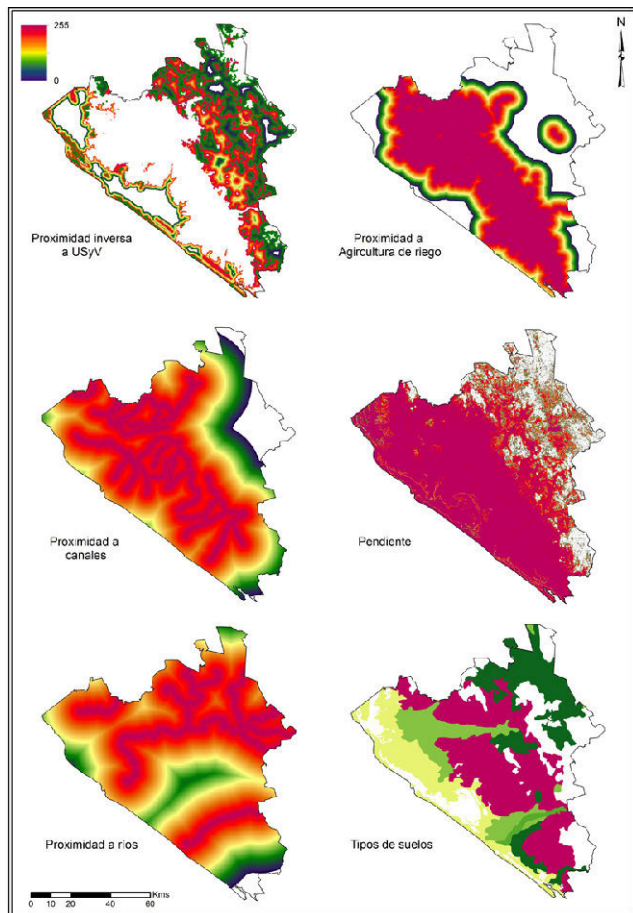


Figura 7. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de tendencia

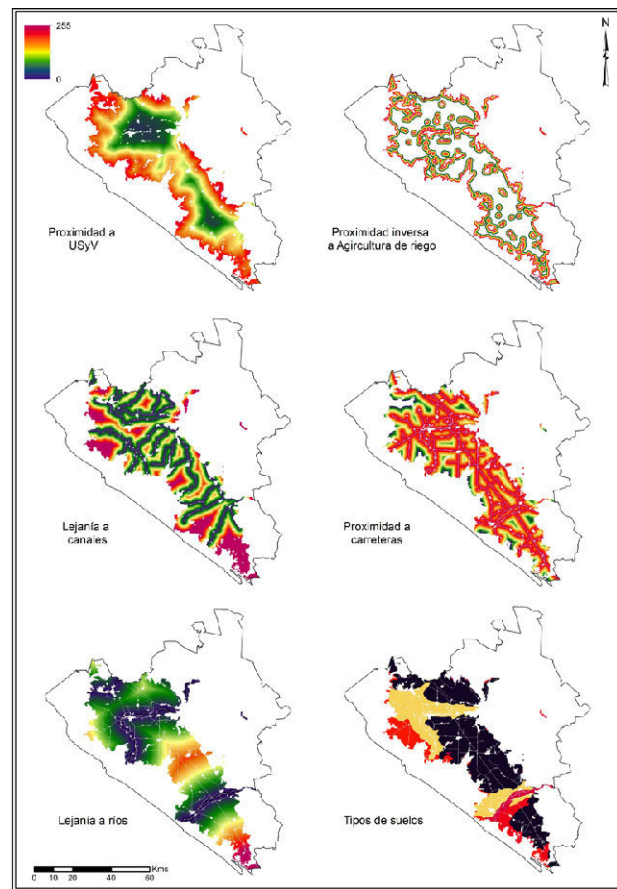


Figura 8. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de sostenibilidad

Agricultura de temporal

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se realizó para el escenario sostenible, tomando en cuenta los usos de suelo que tienen que ver con las pérdidas de la agricultura de temporal. El procedimiento para obtenerlo, fue similar a este mismo factor para la agricultura de riego y humedad. A continuación, se presenta un resumen con las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 10).

TABLA X
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

| FACTORES | PESOS | DIST. DE NORMALIZACIÓN |
|--------------------------------|-------|------------------------|
| Agricultura de riego y humedad | 0.188 | 0 a 15,000 |
| Asentamiento humano | 0.003 | 0 a 5,000 |
| Otros tipos | 0.093 | 0 a 13,000 |
| Pastizales | 0.009 | 0 a 15,000 |
| Selvas | 0.707 | 0 a 10,000 |

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio es utilizado para el escenario de tendencia, representa los usos de suelo sobre los que se dará el crecimiento de la agricultura de temporal. Al igual que el anterior, se utiliza el mismo procedimiento que en el factor de la agricultura de riego, pero pensado ahora, para esta categorías. Resumiéndose a continuación las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 11).

TABLA XI
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU APTITUD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

| FACTORES | PESOS | DIST. DE NORMALIZACIÓN |
|--------------------------------|-------|------------------------|
| Agricultura de riego y humedad | 0.01 | 0 a 1,100 |
| Bosques | 0.01 | 0 a 1,500 |
| Otros tipos | 0.08 | 0 a 6,000 |
| Selvas | 0.9 | 0 a 7,000 |

- Proximidad a Agricultura de temporal

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de temporal, es utilizado para la simulación de crecimiento de dicha categoría en el escenario de tendencia.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de temporal hacia el interior de ésta ocurrirán las pérdidas.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se consideran como los de menor aptitud para que se dé la agricultura temporal, por lo que, en estos lugares, es más probable que se presenten las pérdidas. Este factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

- Pendiente

Este factor representa las mejores pendientes para cada actividad, en este caso, para la Agricultura de temporal, se utilizó en ambos escenarios, normalizándose de diferente manera para cada uno. Para el escenario de tendencia, se utilizaron los valores resultantes en cuanto a lo ocurrido en el pasado, mientras que para el sostenible, se utilizaron los valores más adecuados para que se realice esta actividad.

- Altitud

En este factor se representa la altura en la que se debe de dar la Agricultura de temporal. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia, para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoidal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para la simulación de la agricultura de temporal en ambos escenarios. Su normalización se llevó a cabo de la misma manera que éste factor en la agricultura de riego, pero considerando ahora a la agricultura de temporal. Para los dos escenarios se utilizó una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el máximo es igual al valor del peso más alto (Tabla 12).

TABLA XII
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

| TIPOS DE SUELO | PESOS E. TENDENCIAL | PESOS E. SOSTENIBLE |
|----------------|---------------------|---------------------|
| Feozem | 0.25 | 0.48 |
| Litosol | 0.03 | 0.05 |
| Regosol | 0.14 | 0.26 |
| Solonchak | 0.04 | 0.07 |
| Vertisol | 0.54 | 0.14 |

En la Tabla 13 se muestran todos los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

TABLA XIII
VALORES UTILIZADOS PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

| FACTORES | FUNCIÓN | VALORES DE ADECUACIÓN | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|--------|---------------|--------|
| | | E. TENDENCIA | | E. SOSTENIBLE | |
| | | MIN | MAX | MIN | MAX |
| Proximidad a usos de suelo | Especial | - | - | SLP | SLP |
| Proximidad inversa a usos de suelo | Especial | SLP | SLP | - | - |
| Proximidad a Agricultura de temporal | Lineal decreciente | 0 | 20,000 | - | - |
| Proximidad inversa a Agricultura de temporal | Lineal decreciente | - | - | 0 | 2,000 |
| Proximidad a Ríos | Lineal Decreciente | 0 | 30,000 | - | - |
| Lejanía a Ríos | Lineal creciente | - | - | 0 | 35,000 |
| Pendiente | Sigmoidal decreciente | 0 | 60 | 0 | 15 |
| Altitud | Sigmoidal decreciente | 0 | 650 | - | - |
| Tipos de Suelos | Lineal creciente | 0 | 0.48 | - | - |
| | Lineal decreciente | - | - | 0 | 0.54 |

Finalmente en la Figura 9 y 10 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de temporal en el escenario de tendencia y en el de sostenibilidad.

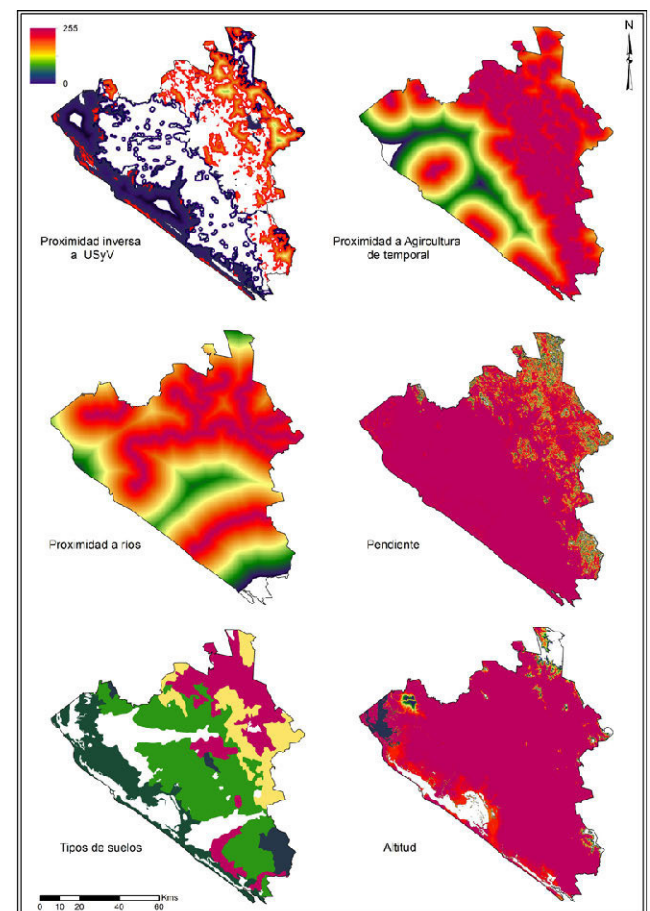


Figura 9. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de tendencia

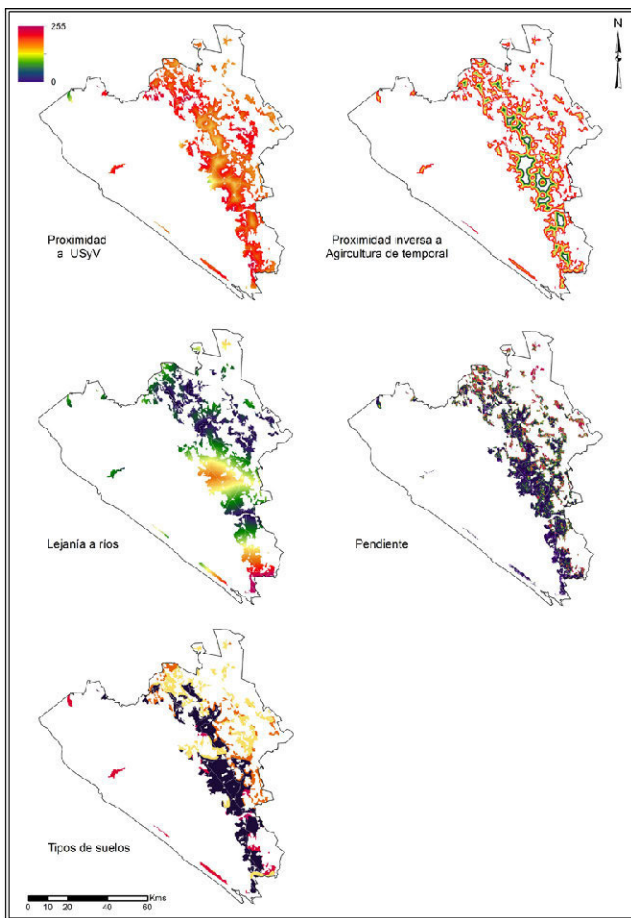


Figura 10. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de sostenibilidad

Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de riego y humedad

En la ponderación de los factores, se establecieron primero el orden jerárquico de cada uno de ellos. Finalmente siguiendo el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso de cada factor. El resultado del peso para los factores muestra que se asignó el mayor peso a los usos de suelo, así como al uso de suelo que se estuviera simulando. En el caso de la simulación de la Agricultura de riego y humedad, vemos como los factores de mayor peso con la proximidad a USyV, y la proximidad a Agricultura de riego, ya sea normal o inversa, dependiente del escenario a simular (Tabla 14 y 15).

TABLA XIV
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

| FACTORES | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | PESO |
|------------------------------|---|-----|-------|------|-----|-----|------|
| 6) Tipos de suelo | 1 | --- | --- | --- | --- | --- | 0.05 |
| 5) Proximidad a Ríos | 2 | 1 | --- | --- | --- | --- | 0.10 |
| 4) Pendiente | 3 | 1.5 | 1 | --- | --- | --- | 0.15 |
| 3) Proximidad a Canales | 4 | 2 | 1.333 | 1 | --- | --- | 0.19 |
| 2) Proximidad a A. Riego | 5 | 2.5 | 1.667 | 1.25 | 1 | -- | 0.23 |
| 1) Proximidad inversa a USyV | 6 | 3 | 2 | 1.5 | 1.2 | 1 | 0.28 |

TABLA XV
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

| FACTORES | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | PESO |
|----------------------------------|---|-----|------|------|-----|-----|------|
| 6) Tipos de suelo | 1 | --- | --- | --- | --- | --- | 0.05 |
| 5) Lejanía a Ríos | 2 | 1 | --- | --- | --- | --- | 0.07 |
| 4) Proximidad a Carreteras | 3 | 1.5 | 1 | --- | --- | --- | 0.15 |
| 3) Proximidad a Canales | 4 | 2 | 1.33 | 1 | --- | --- | 0.10 |
| 2) Proximidad inversa a A. Riego | 6 | 3 | 2 | 1.5 | 1 | -- | 0.25 |
| 1) Proximidad a USyV | 9 | 4.5 | 3 | 2.25 | 1.5 | 1 | 0.38 |

Diseñados los factores para cada escenario y definidos sus pesos, se obtuvieron, aplicando una sumatoria lineal ponderada, los mapas de aptitud para ambos escenarios. En la Figura 11, vemos el mapa de aptitud para la Agricultura de riego y humedad para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad, donde podemos apreciar como cada mapa representa el objetivo de simulación planteado, dependiendo esto, de la finalidad de cada escenario.

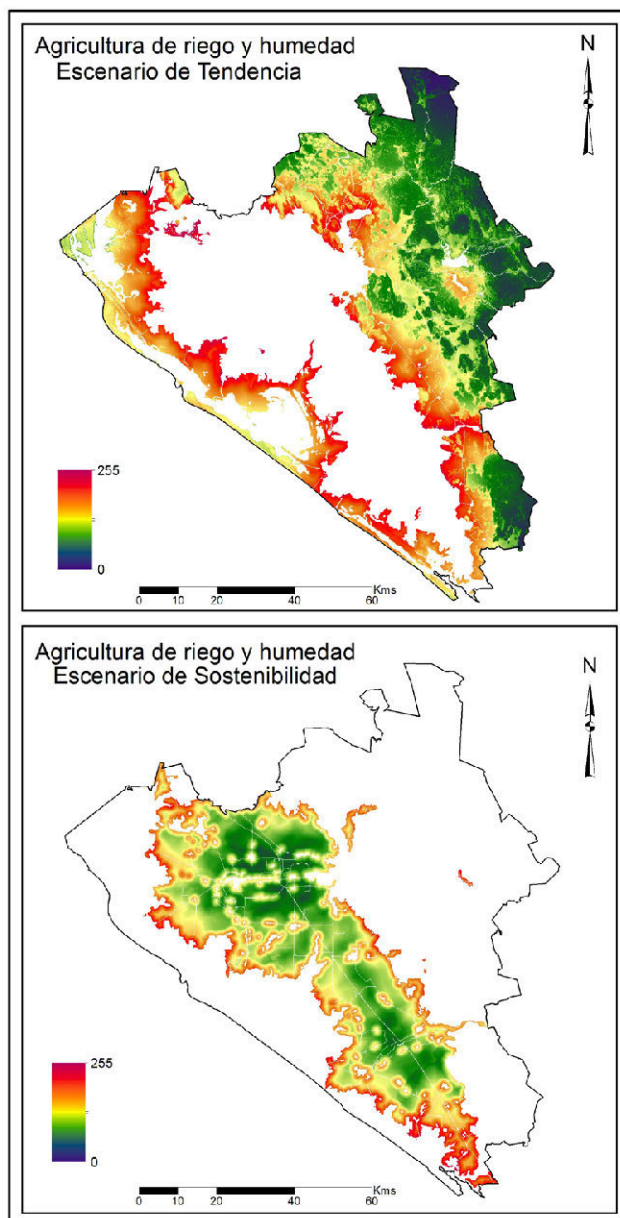


Figura 11. Mapas de aptitud para la agricultura de riego y humedad

Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de temporal

La ponderación de los factores para la simulación de agricultura de temporal en ambos escenarios se muestra en la Tabla 16 y 17, donde podemos ver el orden jerárquico de cada uno de ellos, así como el peso resultante.

TABLA XVI
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

| FACTORES | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | PESO |
|-----------------------------|---|------|-------|-----|-------|-----|------|
| 6) Tipos de suelo | 1 | --- | --- | --- | --- | --- | 0.05 |
| 5) Altitud | 2 | 1 | --- | --- | --- | --- | 0.07 |
| 4) Pendiente | 3 | 31.5 | 1 | --- | --- | --- | 0.12 |
| 3) Proximidad a Ríos | 4 | 2 | 1.333 | 1 | --- | --- | 0.16 |
| 2) Proximidad a A. Temporal | 6 | 3 | 2 | 1.5 | 1 | --- | 0.25 |
| 1) Proximidad inversa USyV | 8 | 4 | 2.667 | 2 | 1.333 | 1 | 0.35 |

TABLA XVII
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

| FACTORES | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | PESO |
|-------------------------------------|---|-----|------|-----|-----|------|
| 5) Tipos de suelo | 1 | --- | --- | --- | --- | 0.07 |
| 4) Pendiente | 2 | 1 | --- | --- | --- | 0.08 |
| 3) Lejanía a Ríos | 4 | 2 | 1 | --- | --- | 0.15 |
| 2) Proximidad inversa a A. Temporal | 5 | 2.5 | 1.25 | 1 | -- | 0.25 |
| 1) Proximidad a USyV | 9 | 4.5 | 2.25 | 1.8 | 1 | 0.45 |

Con los pesos determinados y los factores en cada uno de los escenarios, se obtuvieron los mapas de aptitud para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad (Figura 12).

A partir de dichos mapas de obtuvieron los pixeles con la mayor aptitud para la asignación de la agricultura de riego y de temporal para ambos escenarios. Para ello, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA), con la finalidad de resolver posibles conflictos entre los pixeles de mejor aptitud para agricultura de riego y de temporal, obteniendo un mapa con todos ambos objetivos para el escenario de tendencia y de sostenibilidad (Figura 13).

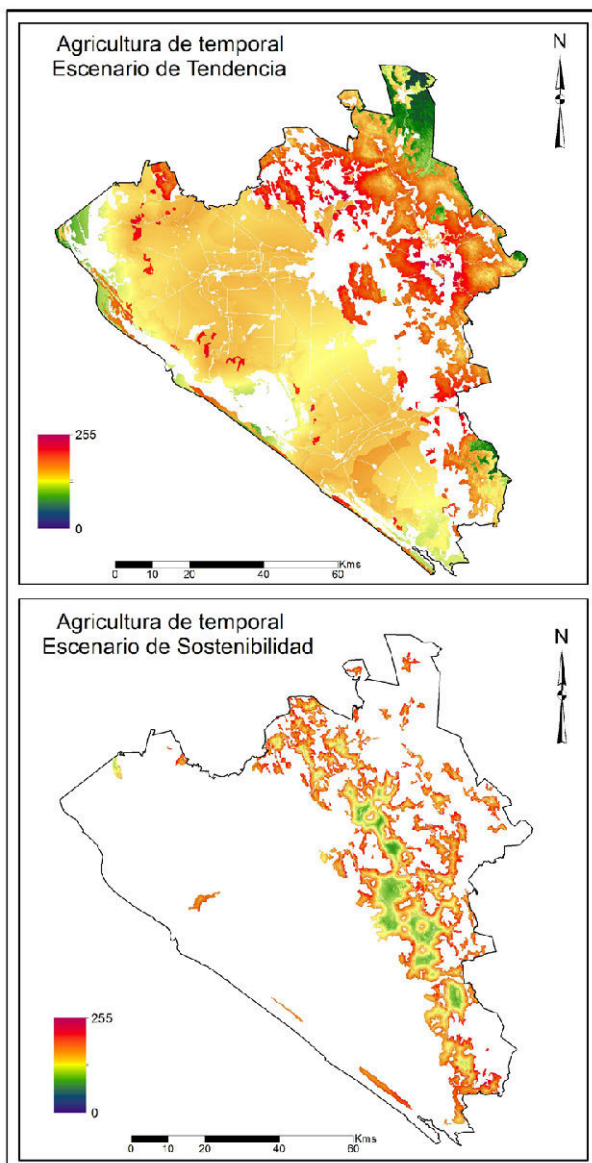


Figura 12. Mapas de aptitud para la agricultura de temporal

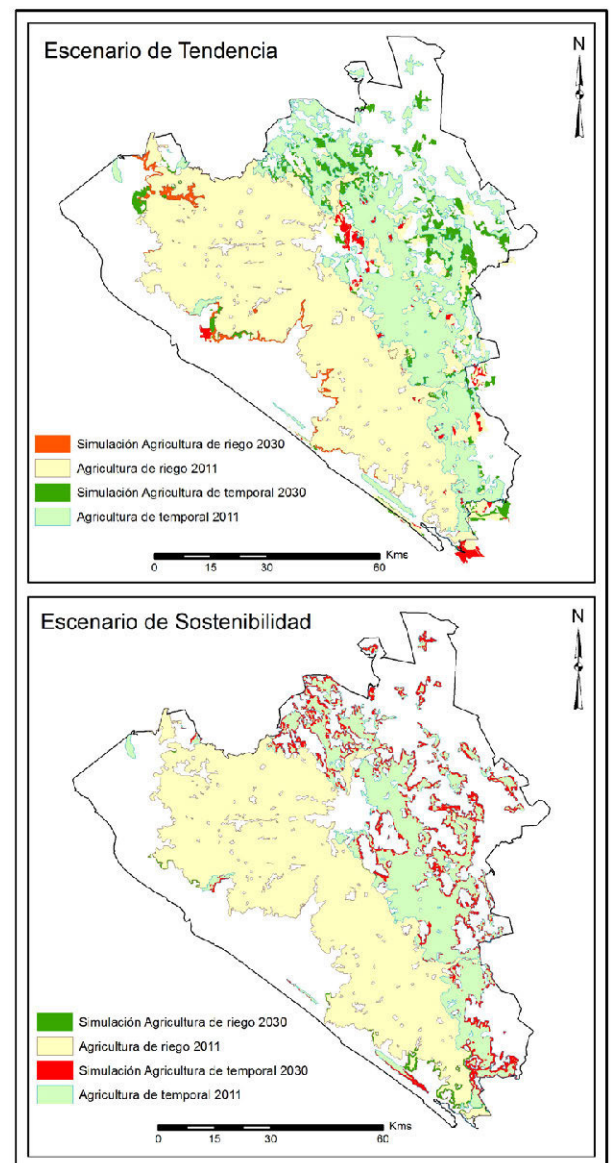


Figura 13. Escenario de Tendencia y Sostenibilidad para la agricultura de riego y humedad y la agricultura de temporal.

Descripción de la evolución de los cambios en ambos escenarios

La simulación espacial de cada escenario representa su descripción cualitativa, para el escenario de tendencia se observó una dinámica futura de los usos de suelo igual a la ocurrida en el pasado, mientras que, el escenario de sostenibilidad muestra un crecimiento con base en la protección de suelos forestales y una evolución de las zonas agrícolas sostenible en cuanto al consumo de suelo.

Analizando los indicadores de cambio del año 2011 a cada uno de los escenarios simulados, podemos ver que, en el escenario de tendencia, ambas agriculturas presentan unas ganancias altas, mientras las selvas sufren una enorme pérdida. Al contrario, en el escenario de sostenibilidad, la agricultura de temporal disminuye considerable en superficie a costa del aumento de las selvas (Tabla 18).

TABLA XVIII
INDICADORES DE CAMBIOS DEL 2011 AL 2030 EN AMBOS ESCENARIOS

| CATEGORÍA | AUMENTO | | DISMINUCIÓN | |
|--------------------------------|---------|----|-------------|--------|
| | ET | ES | ET | ES |
| Agricultura de riego y humedad | 21,649 | 0 | 11,125 | 4,049 |
| Agricultura temporal | 16,285 | 0 | 3,746 | 30,975 |

En la Figura 45 y la Figura 46, podemos analizar espacialmente donde se efectuaron cada una de las transiciones. De esta manera, podemos ver como en el escenario de tendencia, las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. En el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Un análisis visual de ambos escenarios, muestra como en el escenario de tendencia, los cambios se presentan de manera compacta en torno a la categoría correspondiente, como es el caso de las transiciones hacia asentamientos humanos. Por otro lado, el aumento de las selvas en el escenario de sostenibilidad, muestra patrones espaciales un poco más diseminados, que corresponden a los límites entre ésta y la agricultura de temporal (Figura 14 y 15).

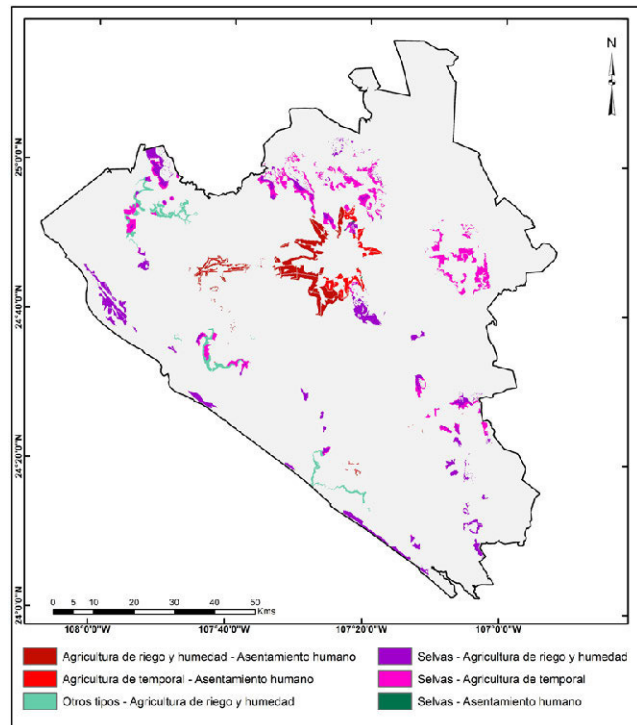


Figura 14. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de tendencia

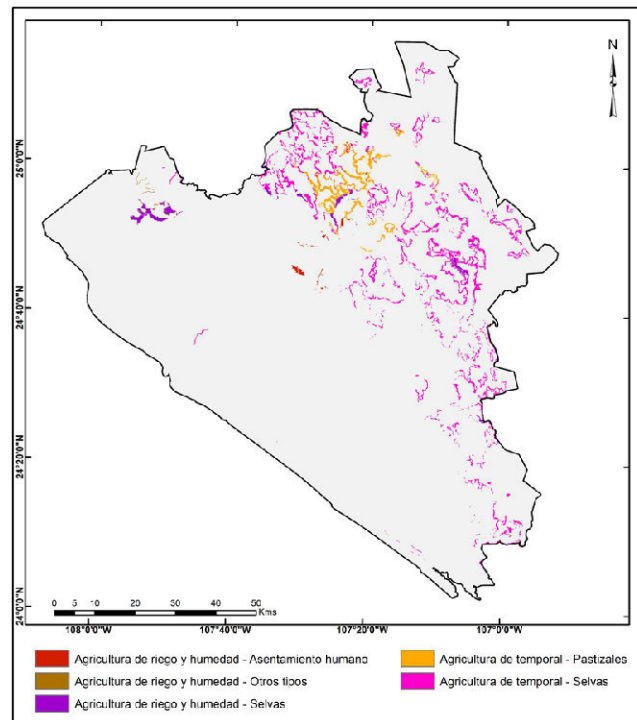


Figura 15. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de Sostenibilidad

V. CONCLUSIONES

Podemos concluir que en el presente estudio se han desarrollado y aplicado con éxito los modelos de simulación que nos permitieron obtener los dos escenarios planteados, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos y proponiendo un marco metodológico integral.

En primera instancia, de acuerdo con los resultados obtenidos respecto a los cambios de uso de suelo, se ha comprobado que en los municipios de Culiacán y Navolato se han presentado importantes cambios en el uso y ocupación del suelo en el periodo analizado. Observamos que el territorio tiene una tendencia a la pérdida de coberturas forestales, en particular de las selvas presentes en la región, y al incremento de las superficies artificiales; como los asentamientos humanos, la agricultura de temporal y la agricultura de riego.

Dicha dinámica no nos garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, por ello, la necesidad de evaluar dos escenarios futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia en dichas dinámicas de usos de suelo y uno alternativo, planteada en un desarrollo sostenible.

A pesar de la aparente sencillez de los módulos y programas informáticos utilizados, la simulación de los modelos requirió de un esfuerzo importante, sobre todo para definir los criterios y factores que deberían utilizarse para estructurar la base de datos geográfica, así como para normalizar cada uno de los factores, pues este es un paso determinante para obtener buenos resultados. La aplicación de una metodología combinada de técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica resultó ser muy práctica para sistematizar y agilizar procesos complejos que se dan en este tipo de modelos.

Se aplicaron algunos aspectos metodológicos novedosos en este campo, principalmente, en la modelización de los factores, como es el caso del factor de proximidad inversa a USyV. Otro aspecto relevante fue el uso de modelos normativos para implementar diferentes escenarios de futuro (tendencia y sostenibilidad). Dichos escenarios proporcionan información importante sobre los potenciales impactos ambientales, terri-

toriales y económicos que podrían ocasionar la continuación de las actuales políticas de planificación (escenario de tendencia) y/o alternativas de desarrollo más sostenibles (escenario de sostenibilidad).

También es relevante mencionar, el diseño y desarrollo de un modelo sencillo, pero robusto, que permitió la estimación de la demanda de usos de suelo, considerando solamente las transiciones entre estos usos, lo cual constituye una valiosa aportación. Pues 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 (Corrales Barraza, 2016).

De esta manera, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas que podrían ser propuestas por los entes involucrados en la planificación del territorio. Además, la metodología planteada podría ser extrapolada a otros lugares y escenarios, pudiendo involucrar nuevas variables que permitirán enriquecer cada vez más los resultados obtenidos.

Finalmente, decir que los modelos y escenarios de futuro podrían servir para discutir exhaustivamente sobre los desequilibrios o beneficios que pueden ocasionar en el territorio si sigue una línea evolutiva u otra de las presentadas en los escenarios. Asimismo, estos escenarios de usos de suelo a futuro pueden convertirse en una herramienta útil para el diseño de la planificación territorial y en un instrumento para reparar posibles desequilibrios de los usos del suelo a nivel local y regional. Además, se presentan como algo novedoso, ya que no existe en la región otro tipo de análisis de esta índole, si bien en el Plan Director de Desarrollo Urbano de Culiacán se realiza la construcción de diferentes escenarios (Tendencial, Probable y Deseable), éstos se apegan solo a descripciones cualitativas de cada uno de ellos y están referidos solo al área urbana de la ciudad de Culiacán.

REFERENCIAS

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J., & Contreras Servin, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 144-154.
- Corrales Barraza, G. (2016). Simulación de Escenarios de Uso y Cobertura de suelo, mediante Técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio: Culiacán y Navolato. (Tesis de maestría): Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México.
- Cuevas García, G., & Mas Causel, J. (2008). Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios de uso/ cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán. México, D.F. México, D.F.
- Franco Prieto, C. (2010). Desarrollo de un modelo basado en Análisis Espacial Multicriterio para la determinación de unidades de Ordenación Forestal. Caso Departamento del Casanare. Bogotá D.C., Colombia.
- Gómez Delgado, M., & Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio. Madrid: Ra-Ma.
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International* N° 30., 945-964.
- Ibarra Montoya, J., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V., & Bautista, M. (2012). "Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático".
- INEGI. (2010). Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
- IPCC. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.: Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds) .

- López Beltrán, M., Aguilar Villegas, J., & Plata Rocha, W. (2014). Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geoespaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México. Culiacán, Sinaloa, México.
- 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., 26-43.
- Mas, J.-F., & Sandoval, A. F. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books Publishers.
- Mustard, J., Defries, R., Fisher, T., Moran, E., & 2004. (2004). "Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts". Springer.
- Pérez Verdín, G., Hernández Díaz, J., Márquez Linares, M., & Teclé, A. (2009). Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México. *Madera y Bosques*.
- Pineda Jaimes, N. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante Tecnologías de la Información Geográfica. Alcalá de Henares, Madrid: (Tesis de Doctorado).
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268.
- Roldán López, H. (2006). *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Gobierno de Sinaloa: Fontamara.
- Verborg, P., Kok, K., Pontius, R., & Veldkamp, A. (2006). Modeling land-use and land-cover change. En E. L. Geist (Ed.), *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*. (págs. 117-135). Berlin: Springer.
- Von Thaden Ugalde, Clark Tapia Ricardo, & Venegas Barrera, C. (2012). Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el Municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México. Oaxaca, México.
- WRI, W. (2005). Millennium Ecosystem Assessment. En *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis* (pág. 68). Washington, DC.