

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



**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
**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:
GABRIELA CORRALES BARRAZA

DIRECTORES DE TESIS:
DR. WENSESLAO PLATA ROCHA
DR. RENÉ RODRÍGUEZ ZAMORA

Culiacán, Sinaloa, Diciembre 2016

“El desarrollo sostenible no es una opción. Es el único camino que permite a toda la humanidad disfrutar de una vida digna en este planeta.”

Zukang, 2011

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, madre, hermanos, a mi familia en general, gracias por el apoyo recibido en toda mi vida y muy especial durante esta importante etapa de mi formación académica.

Es necesario dar un agradecimiento especial a mis directores de tesis, el Dr. Wenseslao Plata Rocha y Dr. René Zamora, por su apoyo incondicional y excelente guía en el periodo que duró mi estudio de maestría en la Universidad Autónoma de Sinaloa, ya que sin ayuda y tiempo invertido no hubiera podido culminar la presente tesis. Agradecer a otras personas que con palabras de apoyo hicieron que las desveladas de trabajo no fueran tan largas.

A mis amigos y compañeros de posgrado, Carlos, Ros, Sergio, Jesús, Arturo, gracias a todos. A todos los que de una u otra fueron colaboraron con éste trabajo, Jesús Uriarte, gracias nuevamente, tu ayuda fue muy valiosa.

Es importante agradecer al posgrado de Ciencias de la Información por darme la oportunidad de poder realizar mis estudios de maestría, igualmente a los maestros del núcleo básico por compartir parte de su conocimiento durante los dos años de formación.

Finalmente, doy gracias a CONACYT (CVU: 558335), ya que sin su apoyo financiero no hubiese podido estudiar un posgrado de excelencia académica.

A todos, ¡Gracias!

RESUMEN

En los últimos años se han puesto en evidencia los notables cambios de uso y ocupación del suelo que ha sufrido, en general, todo el planeta. Estos cambios juegan un papel fundamental en el desarrollo económico, así como en la sostenibilidad regional y local. Los usos del suelo pueden funcionar como reguladores del clima y son soporte de diferentes funciones del ecosistema. Una mala gestión de éstos puede ocasionar múltiples impactos negativos, como pueden ser el aumento de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad, destrucción de hábitats, degradación y fragmentación de paisajes, etc.

Por lo tanto, 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. La generación y simulación de escenarios exploratorios futuros es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones, ofreciéndonos un marco para combinar diferentes datos, modelos y puntos de vista.

El Estado de Sinaloa, ha sido afectado de manera importante por los cambios de usos de suelo, así como por la antropización del territorio, siendo el principal agente transformador de la cubierta vegetal, el aumento desmesurado de la superficie urbana. Presentándose un fenómeno de aglomeración espacial en diferentes áreas del estado, con mayor relevancia en la zona central, donde las ciudades de Culiacán y Navolato se relacionan con las localidades que se ubican en su territorio de influencia.

Así pues, los municipios de Culiacán y Navolato, son una zona de alta importancia en el estado, que ha experimentado una intensa dinámica de uso de suelo, volviéndose necesario planificar y establecer modelos que permitan proponer planes para un desarrollo sustentable.

El presente trabajo plantea el diseño y la simulación de dos escenarios de usos de suelo, uno de tendencia y uno de sostenibilidad, con lo cual tendremos la posibilidad de analizar las diferentes líneas evolutivas que la dinámica entre los usos de suelo puede tener en el territorio ocupado por los municipios de Culiacán y Navolato, Sinaloa.

ABSTRACT

In recent years, the remarkable changes in land use and occupation that have suffered, in general, the entire planet have become evident. These changes play an important role in the economic development, as well as the regional and local sustainability. Land use can function as a climate regulator and are supporting different ecosystem functions. A bad mismanagement of these can led to multiples negatives impacts, such as the increased of greenhouse gases, biodiversity loss, habitat destruction, landscape degradation and fragmentation, etc.

Therefore, it is important to propose territorial models for the future to visualize the performance of the different land use and land covers, in order to make decisions at a territorial level and these decisions can be valuable tools to raise awareness and stablish strategies to protect the natural resources. The generation and simulation of future exploratory scenarios is a useful tool in the processes of planning and decisions makers, offering us a framework to combine different data, models and points of view.

The State of Sinaloa, has been significantly affected by the changes in the land use, as well as for the anthropization of the territory, being the main transforming agent of the vegetal cover; the excessive increase in the urban surface. Presenting a phenomenon of spatial agglomeration in different areas of the state, with greater relevance in the central zone, where the cities of Culiacan and Navolato are related with the localities that are situated in the influence territory.

Thus, the municipalities of Culiacan and Navolato, are an area of high importance in the state, which has experimented an intense dynamics of land use, turning necessary to plan and stablish models to propose ideas for a sustainable development.

The present work proposes the design and simulation of two scenarios of land use, one of trend and the second one of sustainability, with which we will have the possibility to analyze the different evolutionary lines that the dynamic between the land uses can have in the territory occupied by the municipalities of Culiacan and Navolato, Sinaloa.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	17
II. ANTECEDENTES	20
2.1 Modelos de Simulación de escenarios	20
2.2 Metodologías empleadas.....	24
III. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	28
IV. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	31
4.1 Objetivos	31
4.1.1 Objetivo general.....	31
4.1.2 Objetivos particulares	31
4.2 Preguntas de Investigación.....	31
V. ÁREA DE ESTUDIO	33
VI. MARCO TEÓRICO	35
6.1 Generación de escenarios.....	35
6.2 Simulación de la demanda de superficie de usos de suelo.....	36
6.2.1 Dinámica de sistemas: Vensim PLE.....	37
6.3 Evaluación Multicriterio	40
6.3.1 Objetivos y alternativas	40
6.3.2 Criterios: Factores y restricciones	41
6.3.3 Evaluación de las alternativas.....	45
6.3.4 La decisión Multiobjetivo	46
6.4 Análisis de sensibilidad.....	47
6.5 Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio.....	49
VII. METODOLOGÍA.....	51
7.1 Definición de los Usos de Suelo a simular	53

7.2	Análisis histórico de los cambios de uso y cobertura de suelo	54
7.3	Descripción cualitativa de los escenarios.....	57
7.4	Modelo de demanda de superficie de uso de suelo	58
7.4.1	Obtención de las variables	59
7.4.2	Descripción y funcionamiento del modelo de demanda.....	60
7.5	Simulación espacial de los escenarios	61
7.5.1	Definición de los objetivos de simulación.....	61
7.5.2	Selección de los criterios, factores y restricciones	62
7.5.3	Normalización de los factores	69
7.5.4	Ponderación de los factores	70
7.5.5	Sumatoria Lineal Ponderada.....	71
7.5.6	Asignación Multiobjetivo	72
7.6	Análisis de Sensibilidad.....	74
VIII.	RESULTADOS.....	78
8.1	Análisis histórico de los cambios de uso y cobertura de suelo	78
8.2	Descripción cualitativa de los escenarios.....	82
8.3	Cálculo de la demanda de uso de suelo / Modelo de demanda de superficie de uso de suelo	83
8.3.1	Obtención de las variables	83
8.3.2	Descripción y funcionamiento del modelo de demanda.....	83
8.3.3	Superficies simuladas	86
8.4	Selección de los criterios, factores y restricciones.....	87
8.4.1	Reestricciones	87
8.4.2	Normalización.....	91
8.4.3	Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para cada objetivo.....	124

8.4.4	Asignación Multiobjetivo	132
8.5	Descripción de la evolución de los cambios en ambos escenario	140
8.6	Análisis de Sensibilidad	147
IX.	CONCLUSIONES GENERALES	155
9.1	Conclusiones	155
9.2	Futuras líneas de investigación	157
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	159
	ANEXOS	173
	ANEXO 1	174
	Categorías/leyenda de los mapas de usos de suelo.	174
	Anexo 2.....	176
	Descripción de cada categoría	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato	33
Figura 2. Marco metodológico.....	52
Figura 3. Mapas de usos de suelo del modelo	54
Figura 4. Categorías con superficie inicial y final igual	57
Figura 5. Variable de nivel.....	60
Figura 6. Ejemplo de las variables de nivel y variables auxiliares.....	60
Figura 7. Variables utilizadas: a) Altitud, b) Pendientes, c) Tipos de suelo y d) Ríos	65
Figura 8. Variables utilizadas (continuación): a) Canales y d) Carreteras.....	66
Figura 9. Procedimiento para la obtención de los mapas de aptitud y el mapa final de USyV 2030.	72
Figura 10. Proceso para obtener la variación espacial en los factores (izqda.) y pesos (dcha.)	74
Figura 11. Mapa de cambios de 1993 a 2011	79
Figura 12. Cambios más importantes. a) Agricultura de temporal, b) Selvas, c) Agricultura de riego, d) Otros tipos y e) Asentamientos humanos	81
Figura 13. Interfaz gráfica del modelo diseñado en el software VenSim PLE.....	84
Figura 14. Superficie 2011 y superficies simuladas (2030)	87
Figura 15. Mapa de restricciones, 1.....	88
Figura 16. Mapa de restricciones, 2.....	89
Figura 17. Mapa de restricciones, 3.....	90
Figura 18. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de tendencia.....	96
Figura 19. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de sostenibilidad	97
Figura 20. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de tendencia.....	101
Figura 21. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de sostenibilidad.....	102
Figura 22. Factores para Asentamientos humanos. Escenario de tendencia	107
Figura 23. Factores para Asentamientos humanos. Escenario de sostenibilidad	108
Figura 24. Factores para Bosques. Escenario de tendencia y escenario sostenible	111
Figura 25. Factores para Otros tipos. Escenario de tendencia.....	114
Figura 26. Factores para Otros tipos. Escenario de sostenibilidad.....	115
Figura 27. Factores para Pastizales. Escenario de tendencia y de sostenibilidad	118
Figura 28. Factores para Selvas. Escenario de tendencia.....	122
Figura 29. Factores para Selvas. Escenario de sostenibilidad	123
Figura 30. Mapas de aptitud para la agricultura de riego y humedad.....	125
Figura 31. Mapas de aptitud para la agricultura de temporal	126

Figura 32. Mapas de aptitud para la asentamiento humano	127
Figura 33. Mapas de aptitud para los bosques	128
Figura 34. Mapas de aptitud para otros tipos	129
Figura 35. Mapas de aptitud para los pastizales.....	130
Figura 36. Mapas de aptitud para las selvas.....	132
Figura 37. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de tendencia.....	133
Figura 38. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de tendencia (continuación).....	134
Figura 39. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de sostenibilidad	135
Figura 40. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de sostenibilidad (continuación).....	136
Figura 41. Uso de Suelo y Vegetación 2030. Escenario de Tendencia	138
Figura 42. Uso de Suelo y Vegetación 2030. Escenario de Sostenibilidad.....	139
Figura 43. Cambios netos entre 2011 y 2030 escenario de tendencia	142
Figura 44. Cambios netos entre 2011 y 2030 escenario de Sostenibilidad	142
Figura 45. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de tendencia	144
Figura 46. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de Sostenibilidad	145
Figura 47. Crecimiento de los asentamientos humanos en los dos escenarios	146
Figura 48. Interfaz gráfica del módulo desarrollado	147
Figura 49. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para la Agricultura de riego y humedad.....	150
Figura 50. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para la Agricultura de temporal	151
Figura 51. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Asentamientos humanos	151
Figura 52. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Bosques.....	152
Figura 53. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Otros tipos	152
Figura 54. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Pastizales.....	153
Figura 55. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para las Selvas.....	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de comparación de pares de Saaty.....	44
Tabla 2. Técnicas de EMC con objetivos y criterios múltiples	46
Tabla 3. Clasificación de los usos de suelo	53
Tabla 4. Matriz de cambios entre dos mapas de diferente fecha	55
Tabla 5. Tasas de cambios en cada uno de los escenarios	58
Tabla 6. Leyenda de los mapas.....	59
Tabla 7. Matriz de tasas anuales para cada transición entre usos de suelo	59
Tabla 8. Objetivos de simulación para cada escenario	62
Tabla 9. Variables utilizadas	64
Tabla 10. Restricciones para cada escenario y usos de suelo simulado.....	67
Tabla 11. Escala de valoración del índice Kappa	76
Tabla 12. Matriz de cambios: 1993 a 2011	78
Tabla 13. Cambios ocurridos de 1993 al 2011	80
Tabla 14. Tasas anuales de transiciones entre 1993 y 2011	83
Tabla 15. Resultado del ajuste del modelo.....	85
Tabla 16. Tasas de transiciones para el Escenario Sostenible	86
Tabla 17. Superficies simuladas.....	86
Tabla 18. Proximidad a USyV reclasificados según su idoneidad para la agricultura de riego	91
Tabla 19. Proximidad inversa a USyV reclasificados según su idoneidad para la agricultura de riego.....	92
Tabla 20. Pesos de los tipos de suelo para la agricultura de riego	94
Tabla 21. Valores utilizados para normalizar los factores de la Agricultura de riego.....	95
Tabla 22. Proximidad a USyV reclasificados según su idoneidad para la agricultura de temporal...98	
Tabla 23. Proximidad inversa a USyV reclasificados según su aptitud para la agricultura de temporal.....	98
Tabla 24. Pesos de los tipos de suelo para la agricultura de temporal.....	100
Tabla 25. Valores utilizados para la normalización de los factores de la Agricultura de temporal .	100
Tabla 26. Distancias y pesos para la obtención del factor Proximidad a asentamientos humanos ..	103
Tabla 27. Distancias y pesos para la obtención del factor Proximidad inversa a Usos de suelo	104
Tabla 28. Valores utilizados para la normalización de los factores de Asentamientos humanos	106
Tabla 29. Pesos de los tipos de suelo para los bosques	110
Tabla 30. Valores utilizados para la normalización de los factores de los Bosques	110

Tabla 31. Proximidad a USyV según su idoneidad para Otros tipos	112
Tabla 32. Proximidad inversa a USyV según su idoneidad para Otros tipos	112
Tabla 33. Valores utilizados para la normalización de Otros tipos	114
Tabla 34. Proximidad inversa a USyV según su idoneidad para los Pastizales, escenario de tendencia	116
Tabla 35. Proximidad inversa a USyV para los Pastizales, escenario sostenible	116
Tabla 36. Pesos de los tipos de suelo para los pastizales	117
Tabla 37. Valores utilizados para la normalización de los factores de Pastizales	117
Tabla 38. Proximidad a USyV según su idoneidad para las selvas.....	119
Tabla 39. Proximidad inversa a USyV según su idoneidad para las selvas	119
Tabla 40. Pesos de los tipos de suelo para las selvas	121
Tabla 41. Valores utilizados para la normalización de los factores de las Selvas	121
Tabla 42. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Agricultura de riego y humedad en el Escenario de tendencia.....	124
Tabla 43. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Agricultura de riego y humedad en el Escenario de Sostenibilidad	124
Tabla 44. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Agricultura de temporal en el Escenario de tendencia	125
Tabla 45. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Agricultura de temporal en el Escenario de Sostenibilidad	126
Tabla 46. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Asentamientos humanos en el Escenario de tendencia	127
Tabla 47. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Asentamientos humanos en el Escenario de Sostenibilidad	127
Tabla 48. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Bosques en el Escenario de tendencia y en el de Sostenibilidad.....	128
Tabla 49. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Otros tipos en el Escenario de tendencia	129
Tabla 50. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Otros tipos en el Escenario de Sostenibilidad	129
Tabla 51. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Pastizales en el Escenario de tendencia y en el de Sostenibilidad	130
Tabla 52. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para las Selvas en el Escenario de tendencia	131

Tabla 53. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para las Selvas en el Escenario de Sostenibilidad	131
Tabla 54. Pesos para los objetivos de simulación. MOLA	137
Tabla 55. Matriz de cambios: 2011 a 2030. Escenario de tendencia.....	140
Tabla 56. Matriz de cambios: 2011 a 2030. Escenario de Sostenibilidad.....	141
Tabla 57. Indicadores de cambios del 2011 al 2030 en ambos escenarios	142
Tabla 58. Coincidencias de píxeles de los mapas simulados con variaciones respecto al mapa original. Kappas.....	148
Tabla 59. Porcentaje de coincidencias entre el modelo original y los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados.....	149
Tabla 60. Estadísticos básicos extraídos de los mapas de la diferencia media cuadrática para cada uso	154

I. 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).

Dentro de dichos cambios ocurridos, indiscutiblemente, uno de los más significativos ha sido el aumento desmesurado de las superficies artificiales, colocando a los estudios sobre cambios de usos y coberturas de suelo como una información necesaria para la planificación del territorio, debido a su capacidad de reflejar patrones espaciales y temporales como emplazamiento, distribución, estructura y dirección (Bocco, et al., 2001).

Por lo que, se ha reconocido a nivel mundial la importancia de estudiar y comprender las dinámicas del cambio de cobertura y uso del suelo así como su efecto e impacto sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Lambin, et al., 2003). El análisis de los cambios históricos en la cobertura y uso del suelo, 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, 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.

Los escenarios no son una predicción ni un pronóstico, sino que deben ser entendidos como descripciones e imágenes coherentes, consistentes y plausibles de un posible estado futuro

(Patel, et al., 2007) con la finalidad de examinar varias alternativas de futuro y comparar las consecuencias potenciales de cada una de ellas (Verburg, et al., 2006). Así, un modelo de simulación permite reproducir un fenómeno existente en un área de estudio determinada y/o generar posibles futuros si se dan unas determinadas características en el pasado.

Los modelos permiten probar la estabilidad integrada de los sistemas social y ecológico, a través de la construcción de escenarios. Por definición, cualquier modelo se queda corto en la incorporación de todos los aspectos de la realidad, sin embargo nos proveen información valiosa sobre el comportamiento del sistema bajo un rango de condiciones (Veldkamp & Lambin, 2001).

Se trata, pues, de poner de manifiesto qué es lo que podría ocurrir bajo diferentes supuestos, por lo que los modelos de simulación pueden funcionar como una herramienta para la elaboración de imágenes tendenciales y deseadas en el ejercicio de la planificación (Gallardo & Martínez-Vega, 2012). Es por ello que existe una necesidad de desarrollar escenarios y evaluación a escala regional o local para identificar los patrones de usos del suelo con características óptimas que satisfagan simultáneamente objetivos económicos, sociales y medioambientales (Parker, et al., 2002).

La generación de escenarios futuros contribuye, además, a un mejor entendimiento de los principales procesos de cambios de usos del suelo. Pueden ser utilizados como un sistema de alerta temprana que pone de manifiesto y subraya los efectos de los cambios futuros de usos del suelo y los puntos calientes que son prioritarios para un análisis en profundidad o con interés en la intervención política (Verburg, et al., 2006).

El presente trabajo plantea la simulación de dos escenarios de usos de suelo, con lo cual tendremos la posibilidad de analizar las diferentes líneas evolutivas que la dinámica entre los usos de suelo puede tener en el territorio; perpetuando la evolución que se ha mantenido durante los años pasados y que pasaría si dichas pautas son modificadas. Teniendo como objetivo principal, desarrollar un escenario de tendencia y uno de sostenibilidad.

La estructura del trabajo se presenta en diez capítulos, los cuales presentan de manera ordenada el objetivo general de la investigación. En el capítulo 1 se hace una introducción de la tesis. En el capítulo 2 se muestran los antecedentes existentes en el tema; ofreciendo una exhaustiva recopilación bibliográfica referida a los modelos de simulación y escenarios

de usos de suelo realizados, así como las metodologías utilizadas.

En el capítulo 3, se presenta el planteamiento general y la justificación del problema. El capítulo 4 muestra el objetivo general, los objetivos particulares y las preguntas de investigación. En el capítulo 5 se presenta el área de estudio, además de una breve introducción sobre las características del medio físico y los rasgos más importantes de la región donde se aplicarán los escenarios. El capítulo 6 describe todos los conceptos generales y necesarios para la generación de escenarios, desde la definición cualitativa de estos, la simulación de demanda de superficie, la simulación espacial, asignación multiobjetivo, concluyendo con la estimación de la confiabilidad de los escenarios.

En el capítulo 7 aparece toda la metodología seguida, de manera ordenada contiene, en detalle la descripción de los diferentes procesos llevados a cabo. El capítulo 8 presenta los resultados obtenidos, siguiendo el orden planteado en la metodología; culminando con los escenarios simulados, así como una breve descripción de cada uno. El capítulo 9, contiene las conclusiones generales derivadas de todo el trabajo realizado, así como las posibles líneas futuras de trabajo. Por último, en el capítulo 10 se muestra toda la bibliografía utilizada.

II. ANTECEDENTES

2.1 Modelos de Simulación de escenarios

Los escenarios pueden ser entendidos como descripciones e imágenes hipotéticas del futuro, lógicas y plausibles, formuladas para mostrar posibles situaciones consecuencia de procesos causales o de toma de decisiones (Paterson, 2003; Borjeson, et al., 2006; Carsjens, 2009). Estos, permiten a los planificadores trabajar con planes e instrumentos de planificación lo más adaptables y adecuados para una realidad altamente cambiante, dirigida por factores que en muchos casos escapan de su rango de actuación. Así mismo, se requiere que los escenarios diseñados y considerados vengán acompañados de representaciones espaciales de los mismos (Stillwell, et al., 1999), que plasmen en el territorio sus características. Para esto, se emplean herramientas como los modelos de simulación.

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 expertos, instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, 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, no solo económicos, sino también ambientales, sociales y otros, abarcando así los aspectos más representativos de las dinámicas territoriales. Los modelos de cambio en el uso y la cobertura del suelo son poderosas herramientas que pueden utilizarse para comprender y analizar la importante relación entre los procesos socioeconómicos asociados al aprovechamiento del territorio, las actividades agrícolas y las estrategias en el manejo de los recursos naturales, con las formas en que esos cambios afectan la estructura y la función de los ecosistemas.

Considerándose así, el diseño de escenarios futuros y la aplicación de modelos de simulación que permitan la representación espacial de los futuros plasmados en los escenarios, como herramientas perfectamente complementarias. La generación de escenarios a futuro en cuestiones territoriales, se han convertido un valioso instrumento de análisis espacial, pues son una representación de un componente o procesos de la realidad, son considerados por

diversos autores (Henriquez, et al., 2006; Houet & Verbug, 2009) como modelos dinámicos capaces de pronosticar posibles comportamientos futuros. Henríquez et al., (2006) señalan la potencialidad de representar la magnitud de los cambios ocurridos en el territorio, su localización a futuro y sus patrones espaciales.

La generación de escenarios futuros contribuye, además, a un mejor entendimiento de los principales procesos de cambios de usos del suelo. Pueden ser utilizados como un sistema de alerta temprana que pone de manifiesto y subraya los efectos de los cambios futuros de usos del suelo y los puntos calientes que son prioritarios para un análisis en profundidad o con interés en la intervención política (Verburg, et al., 2006).

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.

El uso formal de los escenarios con fines de planificación y análisis se remonta a finales de los años 50 y principios de los 60, cuando una serie de centros de investigación pioneros (Stanford Research Institute, Instituto Hudson, y la Corporación RAND), emprendieron un conjunto de estudios diseñados para fomentar los sistemas de pensamiento holístico sobre el futuro (Thomas, 1994; Chermack et al., 2001). La aplicación de los escenarios para cuestiones medioambientales aparece a comienzos de la década de 1970 (Meadows et al., 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 (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.

La elaboración de escenarios a escala global no ha sido muy implementada hasta la fecha y hoy en día no son muy numerosas las proyecciones a futuro de usos del suelo que se han llevado a cabo. Esto es debido a que el estudio de la evolución de los cambios de usos de la

tierra a nivel global es limitado, ya que la mayoría de los procesos que influyen en el cambio global son el resultado de las decisiones y cambios que se dan a escala local o regional y que, por tanto, están representados de manera pobre en las evaluaciones a escala global (Verburg, et al., 2006).

Los escenarios a escala regional y local son más variados y más numerosos que los globales; esta diferencia, según Alcamo et al. (2006) está causada principalmente por la gama, mucho más amplia, de cuestiones regionales y locales específicas que están siendo abordadas, así como de factores locales y regionales específicos que determinan los usos y cubiertas del suelo.

Los objetivos de unos y otros son similares, sin embargo, 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, la cuestión básica que desean abordar también es diferente: 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. Otra diferencia que puede observarse se da en la escala temporal; mientras que las simulaciones globales o continentales se llevan a cabo a largo plazo (normalmente a partir del año 2050 e incluso a partir del 2100 en adelante), los escenarios regionales y locales se realizan a corto plazo (la mayoría entre los años 2020 y 2050).

Como se ha visto previamente, los estudios de escenarios comprenden desde escalas globales a escalas locales, si bien, los primeros son los más escasos en cuanto a número. A nivel de continente o región, entendida ésta como una escala que comprende varios países, destacan los desarrollados en Europa o a escala de la *Unión Europea (UE)* (Busch, 2006; Ewert et al., 2005; Rounsevell et al., 2006; Westhoek et al., 2006); muchos de estos escenarios a escala de la UE están basados en el IPCC y las storylines que utilizan son las desarrolladas en el Special Report in Emission Scenarios (SRES).

Al ámbito sudamericano se le ha mostrado también mucha atención, especialmente en temas relacionados con la deforestación o la intensificación de la agricultura (Kok et al., 2001; Wassenaar et al., 2007; Sangermano et al., 2012).

La elaboración de escenarios a nivel local se ha sucedido por toda la superficie de la Tierra: desde América del Norte (Hazen y Berry, 1997; Brown et al., 2002; Pontius et al., 2004a; Gómez-Mendoza et al., 2006; McDonald y Urban, 2006; García-Frapolli et al., 2007; Conway, 2009), a América del Sur (Henríquez et al., 2006; Lima et al., 2011), Europa (Hilferink y Rietveld, 1999; Rounsevell et al., 2003; Tress y Tress, 2003; Münier et al., 2004; Verbunt et al., 2005; Loibl et al., 2007; Vafeidis et al., 2007; Valbuena et al., 2008; Aitkenhead y Aalders, 2009; Koomen et al., 2011) o Asia (Li y Yeh, 2002; Chen et al., 2003).

Los modelos de simulación, han experimentado un gran avance en los últimos años (Batty, 1997; Briassoulis, 2000; Benenson y Torrens, 2004, Paegelow y Camacho, 2008), siendo especialmente relevantes aquellos que se han ocupado de modelar procesos dinámicos complejos, como son los sistemas urbanos (Verburg, et al., 2004).

Para este fin, se han desarrollado numerosos modelos aplicados en simular el crecimiento urbano; en Valparaíso, Chile (Sandoval Verdugo & Romero Aravena, 2009), en Madrid, España (Plata Rocha, et al., 2010), en Granada, España (Aguilera Benavente, et al., 2010; Pascual Rosa, et al., 2012); en un lugar de Argentina (Gutiérrez Angonese, et al., 2010), por mencionar algunos.

Se han realizado, también una cantidad considerable de trabajos enfocados a cuestiones forestales (Pineda Jaimes, 2010; Franco Prieto, 2011; Osorio, et al., 2014; Rodríguez Eraso & Retana A., 2011). A la determinaciones de zonas óptimas o de adecuación (Galacho Jiménez & Arrebola Castaño, 2013; Molero Melgarejo, et al., 2007; Henríquez Ruiz & Quiñese Abarzúa, 2009; Carrero, et al., 2010).

Enfocados a simular la dinámica de cambio de uso de suelo (Nogueira Terra, et al., 2013; Rosete Vergés & Bocco Verdinelli, 2008; Li & Li, 2015). Así como a modelar los recursos hídricos (Henríquez, et al., 2006; Méndez Morales, 2012; Henríquez Dole & Pulido Velázquez, 2012).

Por su impacto en el ambiente, los modelos predictivos 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. Y en las dos últimas décadas, se han realizado trabajos enfocadas a establecer áreas

de adecuación óptima para plantaciones agrícolas (Aguilar Rivera, et al., 2010). Para analizar el cambio de la cobertura vegetal y uso de (Von Thaden Ugalde, et al., 2012; Cuevas García & Mas Causse, 2008; Mas & Sandoval, 2011; Ibarra Montoya, et al., 2012). Así como para cuestiones de deforestación (Pineda Jaimes, 2010; Franco Prieto, 2010) y desertificación (López Beltrán, et al., 2014; Pérez Verdín, et al., 2009).

2.2 Metodologías empleadas

Son variadas las metodologías que se han venido utilizando para realizar escenarios y modelos de simulación. Por un lado, en los últimos años, numerosos estudios se han basado en transiciones espaciales, dentro de los cuales destaca la utilización de métodos estocásticos como Cadenas de Markov y Autómatas Celulares. Estas técnicas se aplican para estudiar la dinámica temporal de muy diversas cuestiones, en primer lugar, el crecimiento urbano (Quiroz Ortuño & Mas, 2009; Sandoval Verdugo & Romero Aravena, 2009; Aguilera Benavente, et al., 2010).

Diversos autores, señalan que éstos son capaces de modelar dinámicas espaciales, reproduciendo patrones complejos, tales como los que se manifiestan en las ciudades (Sudhira et al, 2004; Fuentes y González, 2005; Aguilera et al, 2006; Henríquez et al, 2006). Los Autómatas Celulares reproducen estas dinámicas espaciales en base a reglas simples, como son la representación de los usos en celdas, la influencia de celdas vecinas, como también reglas de transición, que están en relación con accesibilidad, transición potencial de cada celda, entre otras (Barredo et al, 2003; Henríquez et al 2006).

Asimismo existen trabajos enfocados en simular procesos forestales que han utilizado Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (Rodríguez Eraso & Retana A., 2011). Así como modelos para simular algún cambio de uso de suelo (Von Thaden Ugalde, et al., 2012; Nogueira Terra, et al., 2013; Cuevas García & Mas Causse, 2008; Henríquez Dole & Pulido Velázquez, 2012; Mas & Sandoval, 2011).

En el algoritmo de Autómatas Celulares, se asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central (Paegelow, et al., 2003). Siendo un sistema dinámico discreto compuesto por estados, vecindades y una regla de

transición o evolución local, la cual se aplica a cada celda que forma parte de un latís de manera sincrónica durante la evolución. En el momento que una celda del AC se está evaluando se convierte en celda central, los vecinos que conforman su vecindad determinarán su estado siguiente a partir de la regla de transición en función de los estados de todos los vecinos y del estado de la celda que se está evaluando.

En este tipo de modelos, las Cadenas de Markov son utilizadas para estimar las probabilidades de que un uso de suelo determinado cambie en un periodo de tiempo a otro uso de suelo (Paegelow et al, 2003). Sin embargo, dicho método no toma en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema. Por lo tanto, la probabilidad de que ocurra un suceso o cambio dependerá de lo que ocurra en los estados anteriores. Es decir, simulan la predicción del estado del sistema en un tiempo determinado a partir de estados precedentes. Además, en los modelos de Autómatas Celulares, usualmente, no se integran los factores suficientes para poder asignar un determinado uso del suelo en el lugar más adecuado desde el punto de vista de la capacidad de acogida del territorio.

Por lo que, también para fines de simular el crecimiento urbano se utilizan técnicas de Evaluación Multicriterio, aplicando Métodos de Análisis Jerárquico y Sumatoria Lineal Ponderada (Gutiérrez Angonese, et al., 2010; Plata Rocha, et al., 2010; Pascual Rosa, et al., 2012; Molero Melgarejo, et al., 2007; Galacho Jiménez & Arrebola Castaño, 2013). Asimismo la Evaluación Multicriterio se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas para la determinación de zonas de adecuación o de aptitud (Henríquez Ruiz & Quiñe Abarzúa, 2009; Aguilar Rivera, et al., 2010; Galacho Jiménez & Arrebola Castaño, 2013; Aguilar Rivera, et al., 2010; Mena Frau, et al., 2006; Méndez Morales, 2012).

Al respecto, podemos decir que las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) han demostrado sobradamente su eficiencia a la hora de diseñar modelos “óptimos” territoriales, ya que consideran la adecuación y aptitud que presenta el territorio para que sobre él se desarrolle una determinada actividad. Pese a esto, no han sido utilizadas como tales en la simulación de diferentes escenarios de futuros de múltiples usos de suelo, por lo que su aplicación en este campo merece ser estudiado.

El análisis o evaluación multicriterio (EMC) se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión (Gómez Delgado & Barredo, 2005). Se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser inventariados y clasificados previamente.

Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) más ampliamente utilizadas en distintas investigaciones son la *sumatoria lineal ponderada* y *el método de las jerarquías analíticas*, método ampliamente probado en modelos que tienen una estructura jerárquica, y en los cuales se pondera la importancia relativa de los elementos en cada nivel de la jerarquía, descendiendo del más general al más concreto. Para ponderar las distintas alternativas y factores en los modelos se pueden utilizar diferentes métodos como la escala de 7 puntos, tasación simple, ordenación simple, etc. No obstante uno de los más aceptados y utilizados es el método de comparación por pares de Saaty.

En los últimos años, algunos autores han planteado la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con modelos basados en análisis multicriterio (Barredo y Bosque Sendra, 1999; Malczewski, 1996; Bosque Sendra *et al.*, 1999).

Algunas de las ventajas de utilizar los Sistemas de Información Geográfica en conjunto con la Evaluación Multicriterio, es que permite diseñar modelos de adecuación óptima de diferentes usos y ocupaciones del suelo, así como combinar diferentes objetivos y criterios.

Actualmente, existen diversos campos y disciplinas que utilizan la EMC y los SIG para obtener mapas de adecuación y aptitud del territorio. Son numerosos los ejemplos que se pueden encontrar en la bibliografía especializada, destacando los trabajos relacionados con la evaluación de recursos naturales (Rivera, 2001; Tardivo *et al.*, 2000; Valpreda, 2007); los que estudian el crecimiento urbano (Sandoval Verdugo, 2009; Plata Rocha, 2010; Aguilere Benavente, *et al.*, 2009; Gutiérrez Angonese, *et al.*, 2010). Los que buscan localizar las mejores zonas para determinados usos del suelo, ya sea de forma separada o de manera conjunta (Tardivo, 1999; Paegelow *et al.*, 2003; Molero, *et al.*, 2007; Galacho y Arrebola, 2008); los relacionados con impactos ambientales y localización-asignación de instalaciones deseables y no deseables (Galacho Jiménez & Arrebola Castaño, 2013); e inclusive hay

quienes aplican técnicas de EMC para modelar procesos de desertificación y deforestación de acuerdo a escenarios de cambio climático o incorporar procesos de participación ciudadana para la toma de decisiones en la planificación forestal (Pineda Jaimes, 2010; López Beltrán, et al., 2014).

Para el caso de México, aún son escasos los trabajos de evaluación de adecuación del suelo para una determinada actividad que usan técnicas de EMC y SIG, y los que están disponibles se enfocan sobre todo a establecer áreas de adecuación óptima para plantaciones agrícolas. Por ejemplo, Olivas et al., (2007) utilizaron el método de jerarquías analíticas en un entorno SIG para definir áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo en el norte de México. Los resultados del trabajo muestran la importancia de aplicar esta técnica en la toma de decisiones, pero no va más allá de localizar y cuantificar las superficies con diferente grado de aptitud. Ceballos y López (2003), aplican también el método de las jerarquías analíticas en un entorno SIG, para determinar áreas de adecuación óptima para sembrar maíz y patata en una región del centro de México. Un trabajo para determinar la aptitud y el potencial productivo del cultivo de caña de azúcar en la región Huasteca (México), utilizando EMC (Aguilar Rivera, et al., 2010).

En cuanto a los trabajos para plantaciones forestales se encuentra el realizado por Bustillos et al., (2007), quienes aplican también un proceso de jerarquías analíticas para determinar zonas de aptitud del terreno en el Estado de Sinaloa para plantaciones de eucalipto. Un estudio realizado por Pineda Jaimes, (2010) cuyo objetivo principal es desarrollar modelos de simulación que permitan mediante técnicas combinadas de EMC y SIG localizar áreas adecuadas para plantaciones forestales. Uno por Franco Prieto, (2010), que consiste en el desarrollo de un modelo basado en análisis espacial multicriterio para la determinación de unidades de ordenación espacial. Un trabajo para la simulación de modelos geoespaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, utilizando Sumatoria Lineal Ponderada (López Beltrán, et al., 2014). Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango (Pérez Verdín, et al., 2009).

Finalmente, algunos de esos procedimientos y técnicas están disponibles desde hace tiempo en algunos paquetes SIG como IDRISI, del cual se han utilizado para este trabajo los módulos de evaluación multicriterio y el de asignación multiobjetivo del territorio.

III. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La situación geográfica y topográfica de México, así como los diferentes usos de suelos y la variedad de climas hacen que existan las condiciones necesarias para la presencia de diversos ecosistemas forestales y ser uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo. Sin embargo, estos ecosistemas se han visto alterados y modificados sustancialmente en las últimas décadas y son relativamente pocas las superficies boscosas, templadas o tropicales, que se encuentran inalteradas. La deforestación y sus consecuencias sobre otros recursos naturales, son cada día más comunes en diversas regiones del país.

Al igual que en el resto del mundo, las transformaciones de la cubierta vegetal y uso de suelo en México, han sido impulsados, en parte, por el crecimiento de la población y algunas de sus consecuencias, tales como: la demanda de alimentos y la ampliación de la infraestructura.

El estado de Sinaloa, así como otras entidades del país, ha sufrido un gran impacto en su medioambiente, paisaje, áreas naturales, principalmente, como consecuencia de una dinámica económica y demográfica que impacta en nuestros ecosistemas, bajo una carencia e inadecuada planeación territorial.

El estado en los últimos años ha sido afectado de manera importante por los cambios de uso de suelo y vegetación, así como por la antropización del territorio, lo que ha provocado un paisaje degradado, fragmentado y desvalorizado desde el punto de vista ambiental, todo esto, auspiciado por la falta de políticas de planificación en la cobertura y uso del suelo, el territorio y las superficies artificiales. Pues el principal agente transformador de la cubierta vegetal, es el aumento desmesurado de la superficie urbana (Corrales Barraza, 2013).

En el estudio de los cambios históricos de usos de suelo realizado por Corrales Barraza, 2013, se puede observar, que del estado de Sinaloa, el municipio de Culiacán, experimenta la mayor dinámica en el uso de suelo. Presentando el crecimiento urbano más significativo y de mayor tamaño en el Estado.

Asimismo, la principal área “*hot spot*” de deforestación se encuentra en este municipio, pues es en el que se da la mayor transición de selvas hacia agricultura (Monjardin Armenta, et al., 2016).

El proceso de urbanización ha afectado en diferentes medidas a todos los municipios del Estado, produciéndose el fenómeno denominado “*urban sprawl*”, es decir, crecimiento urbano disperso, producido en zonas cada vez más alejadas del área urbana central de las principales ciudades. De esta manera, se presenta un fenómeno de aglomeración espacial en diferentes puntos del estado, con mayor relevancia en la zona central del estado, donde la ciudad de Culiacán y Navolato se relacionan con las localidades que se ubican en su territorio de influencia económica y forma un corredor urbano-industrial-comercial (Roldán López, 2006; IMPLAN, 2015). Siendo así, los municipios de Culiacán y Navolato un punto de sumamente importante, donde se concentran intensas actividades demográficas, económicas, sociales y territoriales que entre ellas se desarrollan conjuntamente de manera natural. Además, se ha propuesto recientemente la consolidación de la zona metropolitana de Culiacán-Navolato, con el apoyo del Fondo Metropolitano Nacional ante la instalación del Consejo Metropolitano para Desarrollo de Sinaloa (Plan Estatal de Desarrollo). Dicha propuesta tiene como objetivo; potenciar el crecimiento económico, productividad y calidad de vida de los habitantes, así como promover el desarrollo urbano estratégico y sustentable de la zona metropolitana en un marco de orden y crecimiento armónico.

Por lo que, los municipios de Culiacán y Navolato, son una zona de alta importancia en el estado, la cual ha experimentado una intensa dinámica de uso de suelo (Hinojoza C. & Plata R., 2015), volviéndose necesario planificar y establecer modelos que permitan desarrollar planes para un desarrollo sostenible.

Así, los modelos de simulación son una herramienta para la elaboración de imágenes tendenciales y/o deseadas en el ejercicio de planificación. El desarrollo de escenarios ha ganado importancia como un enfoque para analizar el futuro de una manera estructurada e integrada; ofreciendo un marco para combinar diferentes datos, modelos y puntos de vista.

El entender los patrones que gobiernan los rápidos cambios de usos del suelo y sus efectos asociados y la retroalimentación que se produce, puede ayudar a los responsables políticos y los gestores ambientales a desarrollar estrategias más efectivas y a identificar oportunidades específicas de intervención.

En este sentido, la simulación de escenarios 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 expertos, instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, entre otros, permitiendo de este modo llevar a cabo un proceso de planificación del territorio más informado.

Para Brown et al. (2002) este tipo de estudios tienen que representar: a) la cantidad de cambio de uso del suelo que se ha producido, b) la localización de los futuros cambios, y c) los patrones espaciales de esos cambios. En su opinión, son pocos los modelos que tienen como objetivo reproducir los patrones de cambios de usos del suelo y su estudio tiene gran importancia, ya que es la única manera de evaluar las consecuencias de las trayectorias de usos del suelo que se están dando. Tal y como comenta ESPON (2007), la comparación de los resultados de diferentes escenarios es un ejercicio pedagógico cuyo objetivo es la identificación de trayectorias positivas y negativas y de los factores explicativos que las ocasionan para poder configurar un futuro más deseable y prevenir futuros no deseables mediante políticas apropiadas.

Por lo que, los resultados de esta investigación servirán para evaluar el impacto futuro que la dinámica entre los usos de suelo puede tener en los municipios de Culiacán y Navolato. Los escenarios planteados en esta investigación, tienen un horizonte futuro al año 2030, alineándose a las proyecciones del Plan Estatal de Desarrollo Urbano, del Plan de Desarrollo Urbano de Culiacán y del Programa Estatal de Ordenamiento del Territorio; los cuales proponen diseñar modelos de ordenamiento territorial con una visión estratégica al 2030.

Lo anterior, nos permitirá tener una visión a futuro de cómo se podrían comportar los diferentes usos y coberturas de suelo en una fecha futura; 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. Que puedan ser un instrumento valioso para la toma de decisiones y la sensibilización sobre la necesidad de establecer estrategias de protección de los recursos naturales municipales y estatales, convirtiéndose en una herramienta útil para el diseño de la planificación territorial y en un instrumento para reparar posibles desequilibrios de los usos del suelo.

IV. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

4.1 Objetivos

4.1.1 Objetivo general

Simular un escenario de tendencia y uno de sostenibilidad de usos de suelo, mediante técnicas combinadas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, para los municipios de Culiacán y Navolato, Sinaloa.

4.1.2 Objetivos particulares

- Determinar de forma cuantitativa y espacial los patrones de cambios en los usos de suelo experimentados en la región de estudio.
- Integrar una base de datos geoespacial con todos los criterios que se van a utilizar para realizar el modelo.
- Definir y describir los diferentes escenarios a evaluar.
- Simular la demanda de uso de suelo para cada escenario.
- Generar los factores espaciales para cada escenario.
- Llevar a cabo las simulaciones de los diferentes escenarios de uso de suelo para los municipios de Culiacán y Navolato, explorando y profundizando en la aplicación de técnicas de Evaluación Multicriterio.
- Realizar un Análisis de Sensibilidad para evaluar, en la medida de lo posible, la confiabilidad de las simulaciones.
- Analizar y describir el impacto futuro de cada escenario.

4.2 Preguntas de Investigación.

Para cumplir a cabalidad con los objetivos planteados y guiar el proceso de investigación se formularon las siguientes preguntas conductoras:

- ¿El diseño, la simulación e integración de técnicas de EMC y SIG, permitirán plantear diferentes escenarios de Uso de suelo, que nos ayuden a determinar el impacto futuro que la dinámica de estos, generarán en los municipios de Culiacán y Navolato?

- ¿Generar un modelo de demanda de superficie para los escenarios utilizando solamente dos mapas de usos de suelo hará más factible y riguroso el uso de escenarios geoespaciales en el campo de las Geociencias?
- ¿Los resultados de la simulación de un escenario de sostenibilidad versus un escenario de tendencia permitirá evaluar el impacto futuro que la dinámica entre los usos de suelo tendrá en nuestro territorio futuro?

V. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se llevó a cabo en el área que comprenden los municipios de Culiacán y Navolato, en el Estado de Sinaloa, México (Figura 1).

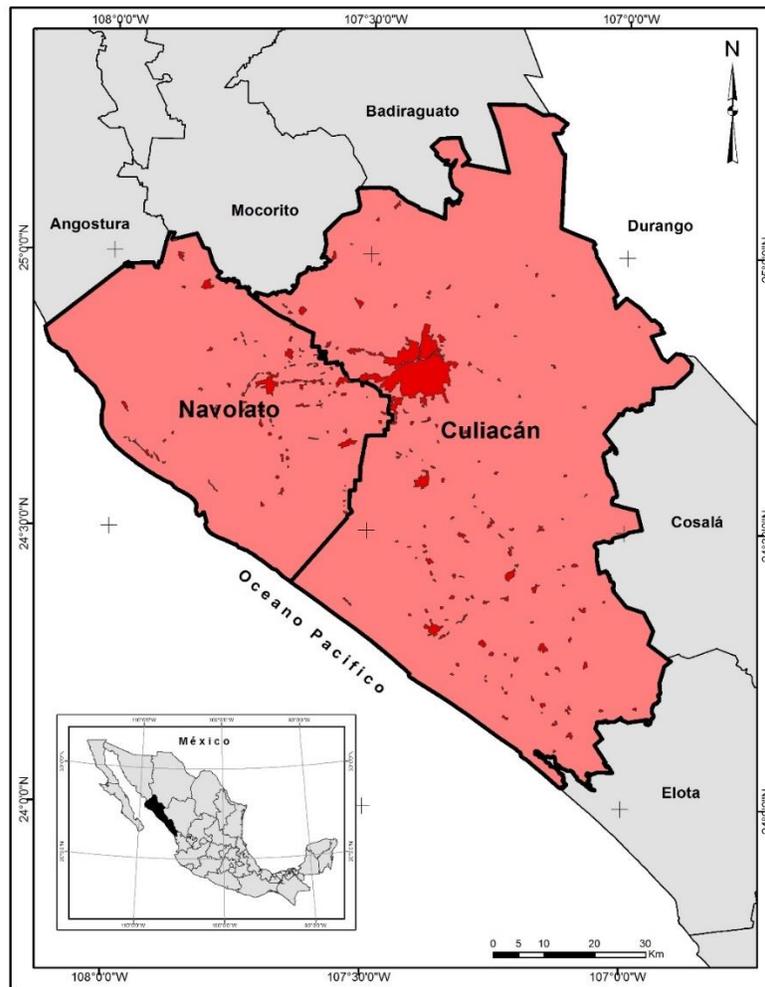


Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato

El estado de Sinaloa está integrado por 18 municipios entre los cuales destaca Culiacán como la Capital del Estado y Navolato el municipio más joven (separado de Culiacán en 1982). Los municipios de Culiacán y Navolato 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. El Municipio de Culiacán ocupa el 10.96% de la superficie del estado y cuenta con un total de 1,483

localidades (INEGI, 2009), 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 (Anon., 2010).

En el área de estudio se tiene una diversidad de usos de suelo, algunos naturales y otros artificiales, ocasionados por los procesos de antropización que se ha producido en el territorio, producto de las diferentes actividades socioeconómicas propias de la región. Actualmente el área de estudio cuenta con coberturas agrícolas, vegetación natural, áreas urbanas y cuerpos de aguas.

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 a la inversión en proyectos turísticos relacionados con el Mar de Cortes.

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

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Generación de escenarios

Un escenario es una “descripción coherente, plausible y coherente en su interior, de un posible estado futuro del mundo” (Carter, et al., 1994). El objetivo del desarrollo de escenarios es explorar alternativas futuras, tanto cualitativa como cuantitativamente, de forma que puedan evaluar las implicaciones de las decisiones actuales y la política a largo plazo en la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático.

Los escenarios pueden ser entendidos también como “imágenes hipotéticas del futuro, lógicas y plausibles, formuladas para mostrar posibles situaciones consecuencia de procesos causales o de toma de decisiones” (Paterson, 2003). Así, los escenarios suelen corresponderse generalmente con imágenes de futuros probables, posibles y/o deseables (Borjeson, et al., 2006; Carsjens, 2009), que permitan a los planificadores trabajar con planes e instrumentos de planificación lo más adaptables y adecuados para una realidad altamente cambiante, dirigida por factores que en muchos casos escapan de su rango de actuación.

Dependiendo del fin que se desea alcanzar mediante la creación de escenarios futuros, dependerá la escala espacial y temporal a utilizar, la tipología de usos del suelo a escoger, la metodología y las variables explicativas, etc. La disponibilidad de datos de partida es, en ocasiones, quien determina también que un estudio pueda llevarse a cabo o no.

Se pueden definir diferentes escenarios de futuro, dependiendo de las trayectorias de futuro que podrían darse o dependiendo de las estrategias de planificación que se desean implementar. La escala espacial de trabajo así como los factores explicativos juegan un papel fundamental en el desarrollo y resultado de aquéllos.

Los escenarios pueden ser cualitativos y/o cuantitativos. Los primeros describen posibles futuros en forma de palabras en lugar de números; pueden tomar la forma de imágenes, diagramas, frases o esquemas, pero lo más frecuente es que se compongan de textos narrativos, comúnmente llamados “*storylines*”; estos *storylines* pueden representar opiniones y visiones de las partes interesadas y de los expertos al mismo tiempo, desarrollándose a través de un enfoque participativo, donde ambos trabajan juntos en el desarrollo de los

escenarios. La importancia de los escenarios cuantitativos, sin embargo, suelen ser llevados a cabo mediante modelos informáticos y proporcionan información numérica en forma de tablas, gráficos y mapas (Alcamo, et al., 2006). El enfoque actual es utilizar una combinación de ambos.

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.

El Diseño de Escenarios sigue una metodología genérica adaptada en función de las técnicas utilizadas para la simulación de los usos del suelo:

- Descripción cualitativa de los escenarios.
- Cálculo o simulación de la demanda de superficie para cada escenario.
- Simulación espacial de los usos de suelo.
- Análisis de Sensibilidad.

6.2 Simulación de la demanda de superficie de usos de suelo

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; Verburg, et al., 2004; de Nijs, et al., 2004; Molero Melgarejo, et al., 2007). Otros investigadores han empleado modelos estadísticos para correlacionar variables demográficas y socioeconómicas con los usos de suelo (Reginster & Rounsevell, 2006).

En este sentido, pueden utilizarse diferentes herramientas para el cálculo de la demanda de superficie, entre ellas la Dinámica de Sistemas (DS).

La dinámica de sistemas, sin una preocupación expresa por el tratamiento de las cuestiones

espaciales, se presenta como un instrumento útil para el estudio del comportamiento de sistemas complejos a partir de la identificación de las relaciones entre la estructura del sistema, su comportamiento y la determinación de los valores que las variables adoptan, a lo largo del tiempo (Aracil, 1995). Así pues, de acuerdo con el enfoque temporal de la DS, es posible abordar, procesos de generación y simulación temporal y espacial de escenarios aplicados a la planificación territorial.

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, 2001; Han, et al., 2008). 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.

6.2.1 Dinámica de sistemas: Vensim PLE

La dinámica de sistemas es una metodología que busca entender el comportamiento de sistemas complejos y la evolución de éste a través del tiempo. Posee un conjunto de reglas precisas que reducen la ambigüedad en aspectos complejos. Emplea diagramas causales con flujos positivos y flujos negativos, los primeros son para indicar la influencia en crecimiento de una variable y la de flujo negativo para explicar el control de la variable mediante su influencia inversa.

Entre los elementos que constituyen un sistema dinámico se establece un bosquejo esquemático en el cual se representan las relaciones entre aquellos relacionados entre sí, uniéndolos a través de flechas. Este es el diagrama causal, y permite conocer la estructura del sistema dinámico. Esta estructura viene dada por la especificación de las variables que aparecen en el mismo, y por el establecimiento de la existencia o no, de una relación entre cada par de elementos.

Existen programas informáticos capaces de elaborar modelos estructurales de sistemas a los que, además, se les puede agregar el modelo matemático que describe la dinámica de ese sistema. De esta forma se consigue obtener un modelo dinámico de ese sistema. Existen diferentes programas de este tipo, pero uno de los más extendidos es Vensim, que cuenta con una versión de libre distribución para el aprendizaje (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 de simulación mediante diagramas de influencias y diagramas de Forrester.

El uso de Vensim para construir un modelo dinámico de un sistema 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. Es decir, deben incluirse en el modelo todos los elementos representativos del sistema.

Los elementos se suelen representar mediante conjuntos de símbolos más o menos estandarizados. Vensim utiliza los símbolos propuestos por Forrester, un ingeniero de sistemas de Massachusetts Institute of Technology (MIT). El sistema de símbolos de Forrester incluye los siguientes tipos de elementos:

Variables, que pueden ser de tres tipos:

- *Variables ocultas*: se trata de características del sistema que actúan siempre como variables independientes y que pueden influir en otros elementos, por ejemplo el tiempo.
- *Variables auxiliares o constantes*: son elementos del sistema que se relacionan con otros sin que se produzca en esa relación una transferencia de materia o energía. Pueden tomar valores fijos (constantes) o modificables. Cuando se ejecuta el modelo, podemos cambiar el valor de referencia y observar el efecto que esta modificación produce en el resto de los elementos del sistema.
- *Variables de estado (o de nivel)*: son los elementos fundamentales de los modelos dinámicos, y generalmente se pretende estudiar su evolución en el tiempo. Suelen representar “depósitos” de materia o energía que pueden recibir entradas o generar salidas en la dirección de otros elementos del sistema. Matemáticamente, su evolución se describe mediante una integral respecto al tiempo, y en el programa se las considera así, de modo que, al introducir el modelo matemático, basta con escribir la ecuación diferencial correspondiente y su valor inicial.

Relaciones entre los elementos, que pueden ser de dos tipos:

- *Influencia simple*: permite relacionar cualquier tipo de elementos del sistema sin que representen un flujo de materia o energía entre ellos. Siempre que se desee incluir una variable en la expresión matemática que describe a otra, ambas deben estar conectadas entre sí al menos por una de estas relaciones.
- *Flujos*: representan transferencias de materia o energía entre dos elementos del sistema. Los flujos pueden partir de una variable de estado o de una auxiliar”. Siempre deben tener unidades de “velocidad”, es decir, la magnitud que se transfiere dividida por el tiempo

2. Introducción del modelo matemático. El programa cuenta con un editor de ecuaciones que permite introducir las expresiones descriptivas del comportamiento de cada variable. También permite definir las unidades de cada variable, sus valores iniciales y sus rangos de variación. Una de las funciones matemáticas que incluye el programa es la integración numérica, de modo que se puede introducir una ecuación diferencial que el propio programa

se encargará de resolver.

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. El resultado de “ejecutar” el modelo se representa gráficamente, aunque también es posible obtener resultados numéricos.

6.3 Evaluación Multicriterio

La evaluación multicriterio es un conjunto de técnicas utilizadas en la toma de decisiones multidimensional para evaluar una serie de alternativas, que satisfacen uno o varios objetivos, a la luz de múltiples criterios. El fin básico de las técnicas de EMC es “investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos” (Voogd, 1983).

Según Colson y De Bruin (1989), citados por Gómez y Barredo (2005), la toma de decisiones multicriterio se puede entender como un mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, sobre la base de una evaluación de acuerdo a varios criterios, que pueden representar objetivos, metas, valores de referencia, niveles de aspiración o utilidad.

La teoría de la decisión y los métodos de EMC que ella concierne no están completamente desarrollados en el campo de los SIG, lo cual lógicamente produce ciertas diferencias en cuanto a la terminología empleada para definir los elementos pertenecientes a dichos métodos. Sin embargo, existen algunos antecedentes como Eastman et al (1993), Barredo (1996) y Malczewski (1999), que asientan las bases conceptuales de esta herramienta en el ámbito de los SIG. Para comprender los detalles de esta metodología, es necesario explicar algunos de sus conceptos y componentes.

6.3.1 Objetivos y alternativas

Un objetivo en ambiente de la EMC se entiende como una meta, finalidad o propósito que se quiere conseguir con algún tipo de actividad. El contenido del objetivo puede variar de acuerdo a un campo temático en particular. Aunque la EMC se puede aplicar con un solo

objetivo, es también posible plantear varios objetivos. En este último caso se trata de una evaluación multiobjetivo.

Los objetivos se han de plantear sobre un elemento determinado, es decir, sobre una serie de alternativas. El concepto de alternativas se refiere al conjunto de soluciones que debe de satisfacer el objetivo planteado. Si lo vemos desde el punto de vista de la planificación del territorio, las alternativas son unidades geográficas susceptibles a ser evaluadas y donde se decide ubicar o localizar determinadas actividades de acuerdo a una regla de decisión. En el ambiente SIG existen dos modelos de visualizar el espacio geográfico: el modelo vectorial que lo organiza de forma bidimensional mediante puntos, líneas y polígonos, mientras que el modelo raster lo hace utilizando celdas regulares, lo cual convierte en cada una de ellas en una alternativa.

6.3.2 Criterios: Factores y restricciones

Los elementos primarios para realizar el estudio se denominan criterios y su combinación permite valorar analíticamente las diversas alternativas para cada uno de los objetivos. El criterio se plantea como un punto de referencia para tomar una decisión y la forma en que se mide o evalúa es de gran importancia en el proceso de EMC (Gómez Delgado & Barredo, 2005).

Generalmente en los estudios de EMC de tipo espacial, las alternativas deben ser estimadas y comparadas entre sí. Por ello se emplean diversas variables con información geográfica, las cuales sirven de base para construir los criterios, que a su vez se clasifican en *factores* y *restricciones*. Un factor es un criterio que permite definirse a favor de una alternativa y en contra de otra, al comparar los resultados de medir, cualitativa o cuantitativamente el valor alcanzado en cada una de ellas (Santos & Borderías, 2002). Una característica propia de los factores es que deben estar medidos en escala de razón para que pueda aplicarse la metodología de EMC. Las restricciones o limitantes por su parte, restringen la posibilidad de considerar alguna alternativa, excluyéndola de forma definitiva. Comúnmente se genera una capa binaria para este tipo de criterio, en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro la no disponibilidad para las actividades (Gómez Delgado & Barredo, 2005).

A partir de un criterio específico y de una capa que represente la variable relacionada con dicho criterio, se puede generar a través de su evaluación, la capa que represente la capacidad en cuanto a ese criterio para cada uno de los datos espaciales de la capa original. Esto es, la capa de datos espaciales que representa los elementos de una variable específicas debe expresarse como un factor para ser un insumo de la regla de decisión. Una vez que las capas temáticas correspondientes a los criterios han sido generadas, pueden ser combinadas a través de la regla de decisión para lograr la evaluación.

Debe señalarse que, en cualquier estudio en el que se deban integrar distintos factores, variables o criterios, independientemente del método de evaluación a utilizar, se requiere que se realice sobre escalas comparables en tipo, rango de extensión, unidad de medida, eventual posición del cero, etc. Santos y Borderías, (2002), establecen que la integración de los criterios valorativos de un objetivo determinado exige, previamente, la transformación de los valores de las variables que los representan a una escala de referencia común. De esta manera, el rango de variación de los criterios se mueve entre valores semejantes. Es decir, se debe buscar **estandarizar o normalizar** los criterios en una escala de medida común.

Existen diferentes métodos para normalizar los datos, entre los más conocidos está la estandarización por el valor máximo, la estandarización mediante la amplitud total o recorrido. No obstante, también es posible utilizar como métodos de normalización aquellos que se basan en funciones de pertenencia borrosa, sobre todo si se reconoce que los factores continuos son en realidad grupos difusos.

La lógica borrosa o difusa es una técnica que ayuda a la representación más exacta de la información imprecisa, incompleta o incierta, implícita en la opinión de los expertos en la toma de decisiones (Prakash, 2003). La teoría matemática de la lógica difusa fue propuesta por Zadeh en 1965, y se basa en la existencia de diferentes grados de pertenencia entre lo falso y lo verdadero (deseado y no deseado; apto y no apto). Es decir, utiliza valores como “moderado”, “bajo”, “alto”, entre otros, en lugar de expresarse como “sí” o “no” similar al concepto del álgebra booleana. Mediante la lógica difusa, un problema se puede representar en términos de conjuntos difusos, los cuales pueden derivarse de procedimientos cuantitativos o cualitativos (Prakash, 2003).

Las funciones borrosas se caracterizan por un grado de pertenencia difusa (también llamado posibilidad) que oscila entre 0.1 a 1.0, indicando un aumento continuo de la no pertenencia a la pertenencia completa.

En IDRISI, el módulo llamado FUZZY (borroso) se utiliza para normalizar factores usando un rango completo de funciones de pertenencia de grupos borrosos. El módulo cuenta con la opción de normalización en una escala de números reales de 0.0- 1.0 o en una escala byte de 0.0-255. Es recomendable usar la segunda opción porque el módulo de evaluación multicriterio ha sido optimizado para utilizar una estandarización de nivel 0.0-255. El valor más alto de la escala estandarizada debe representar el caso de mayor probabilidad de pertenencia al grupo de decisiones.

Un tema crítico en la normalización de los factores es la elección de los puntos finales en los cuales la pertenencia del grupo alcanza 0.0 ó 1.0 (ó 0.0 y 255). No se aconseja usar una escala lineal a ciegas entre los valores mínimos y máximos de la imagen. Al desarrollar factores estandarizados usando FUZZY, se debe considerar cuidadosamente el significado inherente de los puntos finales elegidos (Eastman, 2003).

De igual forma, uno de los mayores problemas en la EMC es asignar los pesos para cada uno de los criterios del análisis. Las opiniones al respecto varían entre quienes consideran, que dada la dificultad es conveniente suponer la igualdad de la ponderación, hasta quienes mantienen que la diferencia de significado y contenido de los mismos exige una valoración relativa (Santos & Borderías, 2002). Podemos definir el objeto de la ponderación como: “llegar a expresar, en términos cuantitativos, la importancia de los distintos elementos para acoger o ser afectados por una determinada actuación” (CEOTMA, 1991).

Existen diferentes técnicas de ponderación de criterios, como la escala de siete puntos, la tasación simple, la ordenación simple, el método de las puntuaciones, el método de la colocación en una escala ordinal, el método de comparación por pares de criterios y el método Delphi.

La técnica aquí aplicada, es la matriz de comparación por pares desarrollada por Saaty (1980). En este procedimiento es necesario que los pesos sumen uno y se deben realizar

comparaciones por pares de los criterios que parten de una matriz cuadrada en donde el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar. De esta forma, se establece una matriz entre pares de criterios, comparando la importancia de cada uno de ellos con los demás, lo que permite obtener el eigenvector principal que establece los pesos (w_j) y proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores.

La escala de medida que se emplea en este método es de tipo continuo que va desde el valor mínimo de 1/9 hasta 9, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala de comparación de pares de Saaty

Valor	Definición	Comentario
1/9	Importancia extrema	A es extremadamente menos importante que B
1/7	Importancia muy fuerte	A es mucho menos importante que B
1/5	Importancia fuerte	A es menos importante que B
1/3	Importancia moderada	A es ligeramente menos importante que B
1	Igual de importante	A y B tienen la misma importancia
3	Importancia moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia fuerte	A es más importante que B
7	Importancia muy fuerte	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente más importante que B

Tomando como base esta escala, se puede asignar a cada par de factores un juicio de valor de importancia relativa frente una actividad propuesta. Después de la asignación de los pesos se otorga una medida operativa de la consistencia de la matriz, que permite valorar la relación de los criterios entre sí determinando su coherencia y pertinencia. Esto es muy importante porque en la asignación de los juicios de valor, aunque se basen en criterios sólidos, siempre existe una cuota más o menos importante de incertidumbre o subjetividad (Gómez Delgado & Barredo, 2005).

6.3.3 Evaluación de las alternativas

La toma de decisiones por su parte requiere una regla de decisión que oriente la evaluación del proceso. Según Santos y Borderías, (2002), ésta regla no es sino un procedimiento lógico y/o matemático que permite comparar las alternativas entre sí, con objeto de su ordenación, de acuerdo a la capacidad mostrada para cumplir cada objetivo. Por su parte Gómez y Barredo (2005) establecen que es un procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular, pudiendo también comparar a través de ella distintas evaluaciones con el fin de variar alguno de sus aspectos en caso de ser necesario.

Para establecer una regla de decisión existen dos procedimientos: la función de selección y la selección heurística. La primera se especifica mediante un modelo matemático donde intervienen los diferentes criterios, con el fin de comparar los resultados alcanzados por las diferentes alternativas. Es decir, es una transformación de los valores correspondientes a cada criterio en valores homogéneos, utilizando un método de ponderación, donde lo que se intenta es clasificar las alternativas en función de una característica medible. Por su parte, la selección heurística selecciona exclusivamente algunas alternativas y rechaza otras. No obliga a cuantificar cada criterio en cada alternativa, sino que basta con un conocimiento ordinal.

El proceso de aplicar la regla de decisión sobre las capas criterio, se denomina **evaluación**, la cual ofrecerá finalmente el modelo de decisión. Existen diversos métodos para realizar la EMC y se distinguen básicamente en los procedimientos aritmético–estadísticos que utilizan. Las técnicas no compensatorias no pueden “compensar” o equilibrar un valor bajo en un criterio por un valor alto en otro criterio, mientras que las técnicas compensatorias si pueden “compensar” un valor alto de una alternativa en un criterio por un valor bajo de la misma alternativa en otro criterio. Algunos ejemplos del primero grupo son: el método de dominancia, el conjuntivo, el disjuntivo y el lexicográfico. En el caso de las técnicas compensatorias se pueden subdividir en técnicas aditivas, entre las que se encuentran la sumatoria lineal ponderada, el análisis de concordancias y las jerarquías analíticas y técnicas basadas en la aproximación al punto ideal.

6.3.4 La decisión Multiobjetivo

Existen tres enfoques diferentes para la resolución de problemas de decisión con múltiples objetivos y múltiples criterios, además de considerar, la posibilidad o no, de establecer jerarquías o niveles de importancia y, por consiguiente, pesos a los objetivos. Los procedimientos son: **extensión jerárquica**, **solución priorizada** y **solución compromiso**, los cuales actúan con una estructura definida que desarrollaremos seguidamente, siendo independientes de las reglas de decisión empleadas (Tabla 2). Estos tres enfoques aumentan en el orden citado su potencia operativa así como su complejidad de implementación.

Tabla 2. Técnicas de EMC con objetivos y criterios múltiples

Objetivos / Jerarquías		Tipos de Jerarquías	
		Conocidas	Desconocidas
Tipos de objetivos	Complementarios	Extensión jerárquica (D1)	Extensión jerárquica (D2)
	Conflictivos	Solución priorizada (D3)	Solución compromiso (D4)

Cuando se plantea un problema de decisión con objetivos complementarios las alternativas pueden satisfacer más de un objetivo, o bien, satisfacer a todos los objetivos propuestos. Por otro lado es factible que se presenten evaluaciones que requieren considerar simultáneamente objetivos conflictivos (opuestos). En este caso las alternativas solo pueden satisfacer a uno y sólo uno de los objetivos, ya que éstos son opuestos y “competidores” entre sí por los espacios o alternativas (Eastman, et al., 1993). La asignación de alternativas a uno u otro depende de la naturaleza de la regla de decisión, la cual está estructurada en función de los objetivos.

En los casos de objetivos complementarios, las decisiones multiobjetivo pueden ser solucionadas a través de una extensión jerárquica. Se puede asignar un peso a cada uno de los objetivos y usarlos junto con los mapas de adecuación elaborados para cada uno, para combinarlos en un solo mapa de adecuación.

Sin embargo, con los objetivos conflictivos el procedimiento es más complejo. Se debe de asignar un orden de importancia a los objetivos para alcanzar una solución priorizada (Rosenthal, 1985). En estos casos, las necesidades de objetivos de rangos más elevados se

cubren antes de que se traten las necesidades de aquellos objetivos de rangos menores. No obstante, a menudo esto no es posible, y la solución más común es el desarrollo de una solución compromiso. Entre las técnicas frecuentemente usadas para resolver objetivos conflictivos son aquellas que incluyen la optimización de una función de selección como la programación lineal, matemática o la programación por metas (Gómez y Barredo, 2005).

6.4 Análisis de sensibilidad

El resultado de las simulaciones de futuro debe ser tratado con mucha cautela, ya que no es posible determinar el grado de confiabilidad de los resultados (Barredo Cano & Gómez Delgado, 2008). Lo anterior se debe a que la simulación de este tipo de modelos se realiza partiendo de una fecha reciente y bajo una serie de criterios ponderados según su nivel de importancia, de tal forma que el resultado de la simulación a futuro se intuye conceptualmente pero se desconoce espacialmente. Sin embargo, un aspecto necesario en la elaboración de modelos de simulación es la demostración de que estos generan representaciones fiables, es decir, de tratar de validar los resultados.

Los procesos de validación han de ser necesariamente distintos dependiendo del tipo de modelo tratado. En cualquier caso, no existe un acuerdo general en la comunidad científica sobre en qué debe consistir ese proceso de validación. Si nos apegamos a la definición de validar, que es dar fuerza o firmeza a algo, hacerlo válido. Por lo tanto, en el proceso de validación se podría incluir cualquier procedimiento que nos permita reforzar la credibilidad de los resultados obtenidos (Motserrat Gómez, 2015).

Ante esto, una alternativa para valorar el grado de confiabilidad en modelos de simulación espaciales de futuro es el Análisis de Sensibilidad (AS), con éste se puede determinar, en cierta medida, el grado en que los resultados son afectados por pequeños cambios en los parámetros del modelo. Es decir, éste se basa en investigar si pequeñas variaciones en los parámetros de los modelos influyen significativamente en el resultado del mismo. Además, puede ayudar a simplificar la dimensión de los modelos, reducir la demanda computacional y optimizar los recursos (Saltelle, et al., 2000; Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005; Saltelli, et al., 2008). El análisis de sensibilidad (AS), es por lo tanto, fundamental para dar robustez y credibilidad a cualquier modelo.

Dicha técnica se ha venido aplicando en modelos espaciales a través de dos vías. Una, utilizando métodos numéricos o estadísticos de AS (regresiones, ANOVA, varianza, etc.), y otra, implícitamente en Sistemas de Información Geográfica.

El AS se ha venido aplicando, hasta cierto punto, sobre los resultados de estudios basados en la aplicación conjunta de técnicas de EMC y SIG. Hay que destacar que el uso del AS en modelos de EMC es imprescindible, puesto que dichas técnicas han sido duramente criticadas por tener un alto grado de subjetividad. De tal manera que, cuando se desarrollen modelos de simulación aplicando técnicas de EMC, se hace un gran esfuerzo por introducir tanta objetividad como sea posible en un proceso que es altamente subjetivo (Lamelas Gracia, 2009).

Por ello, la aplicación de AS en modelos desarrollados a partir de técnicas de EMC surge como una alternativa para dar un grado de confiabilidad a los resultados espaciales obtenidos de la integración de dicha información. No obstante, su aplicación hasta hoy en día, al menos en modelos de simulación de usos de suelo, ha sido muy escasa y limitada, tal y como lo ponen de manifiesto las revisiones bibliográficas llevadas a cabo por (Qureshi, et al., 1999; Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2004a).

Los pocos casos en los que se ha utilizado, ha sido bajo un proceso de simulación, donde se examinan los efectos que una pequeña variación en los parámetros del modelo tiene en los resultados del mismo (Gómez Delgado & Tarantola, 2006; Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2004a). En estos casos, los investigadores realizan cambios en el orden de preferencias asignado a cada criterio u objetivo para verificar si estas variaciones influyen en los resultados de los modelos (Qureshi, et al., 1999; Pettit, 2002; Chang, et al., 2008); otros introducen variaciones en los valores dados a los parámetros de los modelos (pesos, métrica de distancia, etc.) (Jankowski, 1995; Baja, et al., 2007); y/o aplican diferentes métodos de agregación para convertir los mapas de aptitud (píxel) en mapas de zonificación ambiental (grupo de píxeles) (Geneletti & van Duren, 2008).

Sin embargo, se encuentran ciertas limitaciones en los AS aplicados a modelos espaciales. Por un lado, es muy común cuando se aplican métodos numéricos de AS que solo se introduzcan variaciones a las funciones de densidad de probabilidad de los pesos, dejando

los factores al margen del análisis. Por otro lado, cuando el AS se realiza sobre modelos basados en EMC, lo habitual es que sólo se varíe el orden de los criterios u objetivos, los valores de sus pesos o se obtenga el modelo final por diferentes métodos.

En este contexto, algunos autores realizan una revisión de técnicas AS numéricas aplicadas a modelos espaciales, encontrando una serie de deficiencias en dichas aplicaciones y destacando dentro de éstas la importancia de no fundamentar el AS sólo en la variación de la distribución de los pesos, sino también introducir variaciones a la distribución de las variables (factores) de entrada (Lilburne & Tarantola, 2009).

En este contexto, (Plata Rocha, et al., 2013) proponen una metodología de AS explícitamente espacial, fácil e intuitiva de aplicar utilizando las herramientas disponibles en un entorno SIG raster. Esta metodología pretende reproducir, en la medida de lo posible, el procedimiento de *One-at-a-Time-Factor* (OAT). Para obtener el impacto local de los factores en el modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada y sus pesos, mientras los demás permanecen invariables.

6.5 Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio

La integración de métodos de EMC y SIG genera una potente herramienta para asistir en procesos de análisis espacial a través del modelado, en especial para la asignación/localización de actividades, gestión de recursos naturales, control del riesgo y en general, para la ordenación del territorio.

Los SIG ofrecen herramientas que nos permiten obtener, a través de análisis determinísticos, las áreas disponibles para una posterior evaluación. En la primera fase, el SIG puede ser utilizado para la entrada, transformación, almacenamiento y manipulación de los datos digitales espaciales relevantes para el problema planteado. Con dichas funciones podemos obtener un conjunto reducido de alternativas disponibles para cierta actividad así como su localización, sin embargo, dichos datos espaciales deben ser evaluados a la luz de procedimientos de EMC para poder establecer órdenes de preferencias, conjuntos compromisos, jerarquías de capacidad, etc. Como estos métodos no están integrados en los SIG de manera extensa, puede establecerse a través de la adaptación e inclusión en sistemas

informáticos de los métodos a implementar, con lo cual dispondríamos de una herramienta (SIG +EMC) sumamente poderosa para estudios de localización-asignación de recursos o actividades, o bien de capacidad de acogida del territorio, de los que podemos encontrar algún ejemplo en la literatura.

VII. METODOLOGÍA

La presente metodología integra métodos de EMC y SIG como una herramienta de apoyo para realizar procesos de modelado y toma de decisiones a nivel espacial para uso de suelo. El principal objetivo de éste trabajo es la simulación de escenarios de usos de suelo a mediano plazo, teniendo como año base el 2010 y horizonte futuro el 2030, alineándose a las proyecciones del Plan Estatal de Desarrollo Urbano y del Programa Estatal de Ordenamiento del Territorio.

La metodología seguida engloba desde las pautas para el diseño e implementación de un escenario, como son; la descripción cualitativa y el cálculo de la demanda de superficie para cada escenario. De la misma forma, se siguen los pasos estructurales para la implementación de una técnica de evaluación multicriterio en un ambiente SIG, los cuales van desde la definición del objetivo, es decir, que es lo que se quiere simular; hasta la búsqueda y selección de los criterios y alternativas, concluyendo este proceso con una asignación multiobjetivo que permite conformar un mapa simulado de uso de suelo para cada escenario. Finalmente, se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de cada escenario y un análisis de sensibilidad en base a la modificación de los parámetros del modelo planteado, el cual permite determinar el grado de robustez de los resultados obtenidos.

Proponiéndose así, el siguiente marco metodológico integral (Figura 2).

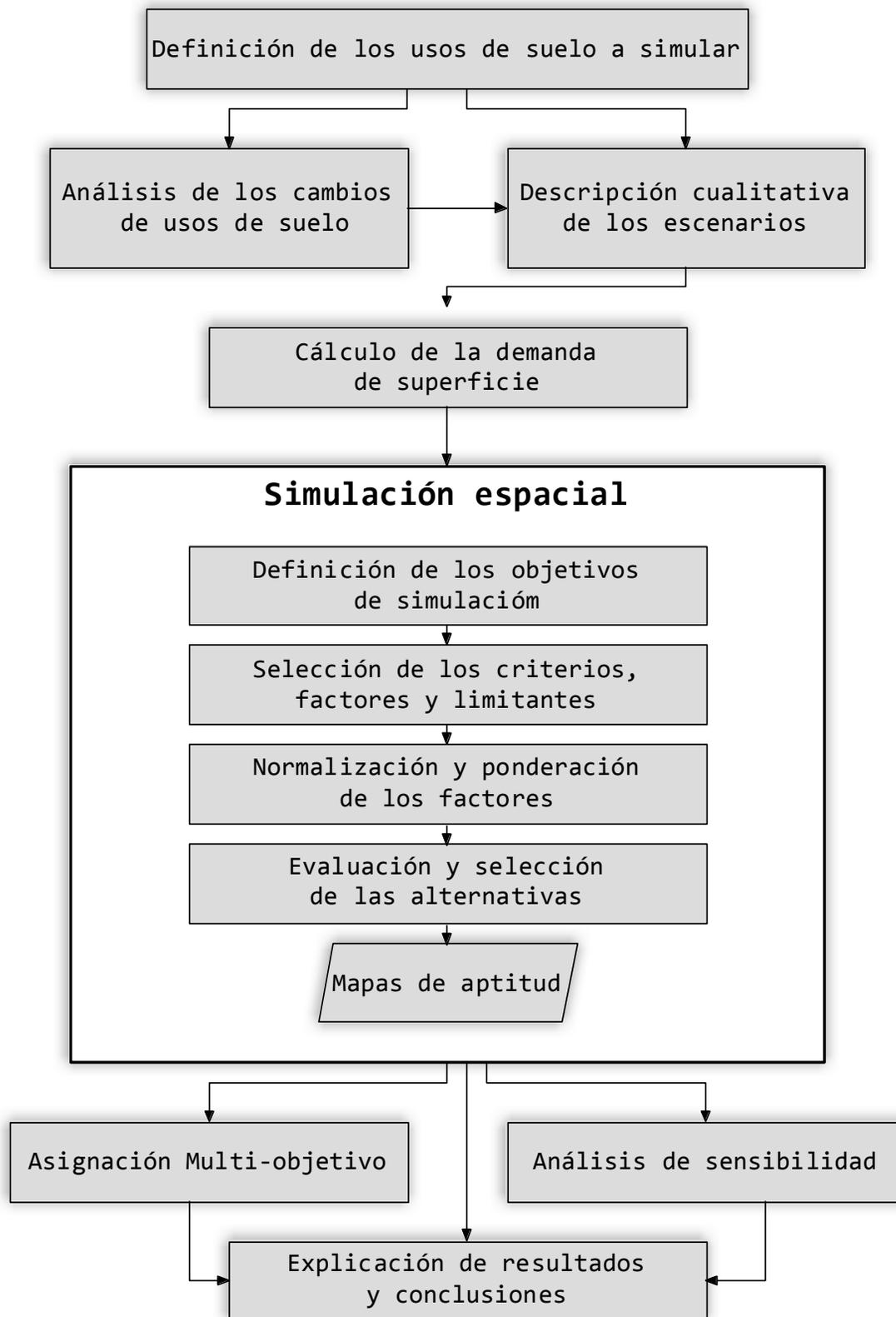


Figura 2. Marco metodológico

7.1 Definición de los Usos de Suelo a simular

La información de partida necesaria a la hora de realizar este tipo de estudios es el condicionante principal, de cuya calidad dependerá, en gran medida, el éxito o la adecuación del modelo. En el caso de los modelos espaciales de simulación de usos de suelo, esta información de partida consistirá de una o más fechas diferentes en el tiempo de mapas de usos de suelo y vegetación.

La información de partida, son los mapas de usos del suelo del año 1993 y 2011, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Dichos mapas, presentan diferentes clasificaciones en cuanto a las categorías de usos de suelo (Anexo 1).

Para la realización de los escenarios se debe trabajar con una clasificación de usos de suelo específica, debido a la dificultad de representar las dinámicas de una gran variedad categórica de usos de suelo, es por ello que se tomó la determinación de homogeneizar la leyenda de los mapas de 1993 y 2011, las cuales tienen una leyenda jerárquica de 30 y 18 categorías (ver Anexo 2).

Ante esto, se estableció una leyenda conformada por 7 categorías, las cuales representan adecuadamente la dinámica entre los diferentes usos de suelo (Tabla 3) (ver Anexo 2). Se reclasificaron y homogeneizaron los mapas originales a este nivel de agregación de información temática, con la finalidad de tener una correcta equivalencia en la leyenda (Figura 3).

Tabla 3. Clasificación de los usos de suelo

- I.- Agricultura de riego y humedad
- II.- Agricultura de temporal
- III.- Asentamiento humano
- IV.- Bosque
- V.- Otros tipos
- VI.- Pastizales
- VII.- Selvas

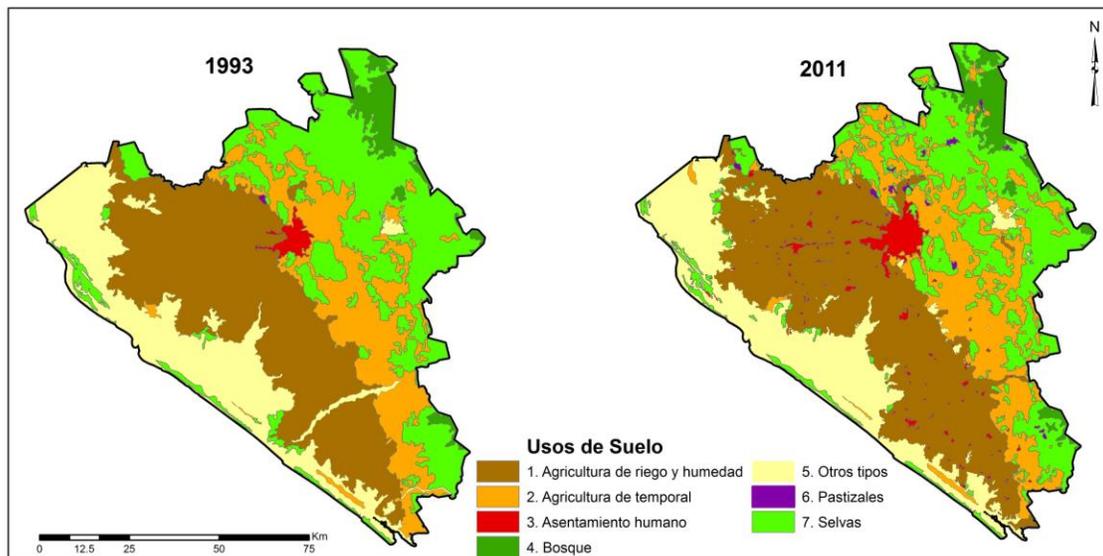


Figura 3. Mapas de usos de suelo del modelo

7.2 Análisis histórico de los cambios de uso y cobertura de suelo

Para conocer cómo ha sido la dinámica entre los distintos usos de suelo, se realizó un análisis de cambios entre los años 1993 y 2011. Con la finalidad de tener un análisis menos redundante, así como evitar la sobreestimación de algún cambio, se restaron de ambos mapas las superficies ocupadas por los ríos y las carreteras, pues éstas permanecen constantes a lo largo del periodo de tiempo.

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 y *et al.*, (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. Asimismo, permite valorar el cambio total tomando como referencia las persistencias y así poder evaluar cuáles fueron las transiciones más significativas entre categorías.

Dicha metodología, parte del resultado obtenido en una matriz de tabulación cruzada (que en el estudio de usos de suelo comúnmente se denomina matriz de cambios), resultado de cruzar dos mapas de usos de suelo de diferentes fechas, de 1993 y 2011, en éste caso.

En dicha matriz (Tabla 4) las columnas representan las categorías del mapa en el tiempo 1 (T_1) y las filas las categorías del mapa en el tiempo 2 (T_2). Asimismo, la diagonal principal muestra las persistencias entre el T_1 y T_2 , mientras que los elementos fuera de la diagonal principal dan cuenta de las transiciones ocurridas entre el T_1 y T_2 para cada categoría. En la fila 6 se recoge el total ocupado por cada categoría en el T_1 (P_{+j}), mientras que en la columna 6 se recoge el total de cada categoría en el tiempo T_2 (P_{i+}). Hasta aquí no hay ninguna diferencia con un análisis basado en un proceso de tabulación cruzada. Sin embargo, ante la necesidad de realizar un estudio detallado de los cambios, se agregaron una fila y una columna adicional. Así, la fila 7 mostraría las pérdidas que tuvieron las categorías entre el T_1 y T_2 y la columna 7 las ganancias que tuvo cada categoría entre el T_1 y T_2 .

Tabla 4. Matriz de cambios entre dos mapas de diferente fecha

		Tiempo 1						
		1	2	3	4	5	6	7
Tiempo 2	1		Clase 1	Clase 2	.....	Clase n	Suma T_2	Ganancias
	2	Clase 1	P_{11}	P_{12}	.....	P_{1n}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{jj}$
	3	Clase 2	P_{21}	P_{22}	.....	P_{2n}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{jj}$
	4	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	5	Clase n	P_{n1}	P_{n2}	.....	P_{nn}	P_{n+}	$P_{n+} - P_{jj}$
	6	Suma T_1	P_{+1}	P_{+2}	.....	P_{+n}	P	
	7	Pérdidas	$P_{+1} - P_{jj}$	$P_{+2} - P_{jj}$	.....	$P_{+n} - P_{jj}$		

Fuente. Pontius *et al.*, 2004.

Una vez obtenida la matriz de tabulación cruzada, es posible calcular una serie de parámetros de gran importancia en el análisis de los cambios de usos del suelo:

Las ganancias, expresadas como la diferencia de la suma total de la columna 6 y los valores de la diagonal principal, es decir:

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}; \quad (1)$$

Las pérdidas, expresadas como la diferencia de la suma total de la fila 6 y los valores de la diagonal principal, es decir:

$$L_{ij} = P_{j+} - P_{ij} \quad (2)$$

A partir de estos valores se calculó el cambio neto, cambio total y los intercambios, como se muestra a continuación.

El cambio neto, expresado como el valor absoluto de la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría

$$D_j = |L_{ij} - G_{ij}|; \quad (3)$$

El intercambio, expresado como el doble del valor mínimo de las ganancias o las pérdidas, es decir:

$$S_j = 2 \times \text{MIN}(P_{j+} - P_{ij}, P_{+j} - P_{ij}); \quad (4)$$

El cambio total, sería el resultado de la suma de las ganancias y las pérdidas, es decir:

$$DT_j = G_{ij} + L_{ij} \quad (5)$$

Posteriormente, los valores reales del cambio entre ambas fechas, se obtuvieron por medio de la ecuación del cambio total, que a diferencia de la del cambio neto, permitió estimar la totalidad de las transiciones que se dieron entre categorías. Al respecto, cabe señalar que si una categoría hubiera presentado ganancias y pérdidas de la misma magnitud, el cambio neto sería igual a cero. Sin embargo, mediante la ecuación del cambio total, dicho resultado sería igual al doble de la pérdida o la ganancia (Figura 4).

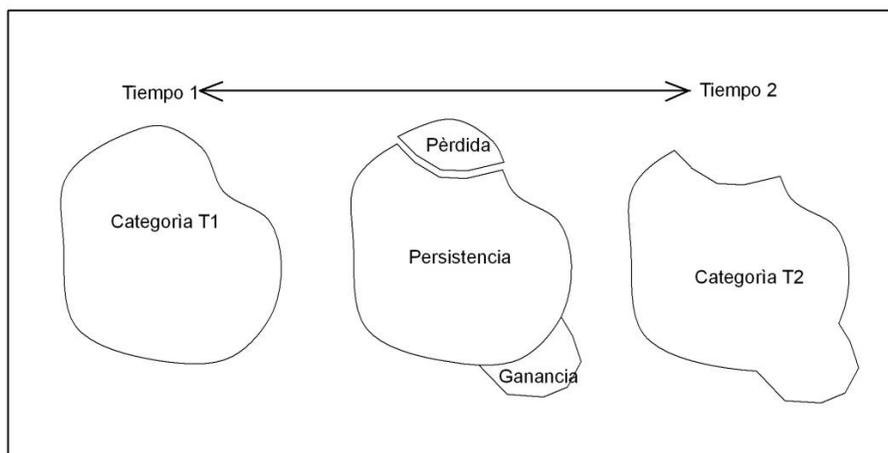


Figura 4. Categorías con superficie inicial y final igual
Fuente. Plata *et al.*, 2009

7.3 Descripción cualitativa de los escenarios

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 realizasen intervenciones planificadas y concertadas en el corto, mediano y largo plazo (escenarios de sostenibilidad).

En función de lo anterior, la descripción cualitativa del **escenario de tendencia** se construirá siguiendo las lógicas ocurridas en el pasado. 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 apegado a los tres pilares básicos de la sostenibilidad: minimizar el impacto ambiental y maximizar el beneficio social y económico. El objetivo de este escenario es ver qué pasaría si existen políticas de reforestación más activas y se le otorga más importancia al cuidado del medio ambiente y de los elementos naturales, pero teniendo en cuenta que la región urbana continuará creciendo, considerando la sostenibilidad del territorio para su evolución.

Descritos los escenarios, es necesario explicar sus diferencias a través de la modificación de

las tasas que controlan el funcionamiento del modelo. En el escenario tendencial todas las tasas de cambio que se han experimentado, se mantienen constantes, mientras que en el sostenible disminuirán las tasas de cambio de las agriculturas, las tasas de asentamientos humanos se mantendrán constantes, mientras que las tasas de cambio de las selvas aumentarán.

Finalmente se consideraran los valores de las tasas que se mantendrán constantes para los diferentes escenarios, así como aquellos que incrementarán o disminuirán (Tabla 5).

Tabla 5. Tasas de cambios en cada uno de los escenarios

Escenarios Categoría	Tendencial	Sostenibilidad
Agricultura de riego y humedad	=	↓
Agricultura temporal	=	↓
Asentamiento humano	=	=
Bosque	=	=
Otros tipos	=	=
Pastizales	=	↓
Selvas	=	↑

7.4 Modelo de demanda de superficie de uso de suelo

Una vez descritos cualitativamente los diferentes escenarios futuros, la etapa siguiente, consistió en simular o calcular la demanda de superficie que debería tener cada uso de suelo en los escenarios planteados. Para ello, se construyó un modelo que pudiera generar valores de demanda de uso de suelo basado en las transiciones entre todos los usos de suelo.

Así cumpliendo con el primer objetivo de la investigación, se diseñó un modelo que permitiera 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), mismos que son utilizados implícitamente en los escenarios, es decir, sin necesidad de introducir otro tipo de variables externas. Para lograr lo anterior, el modelo de simulación fue diseñado utilizando herramientas como la Dinámica de Sistemas (DS) y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

7.4.1 Obtención de las variables

De acuerdo con el enfoque del trabajo, que se aleja de la dimensión espacial en esta primera etapa, el conjunto de variables seleccionado resume los factores motrices de los cambios experimentado en cada uso de suelo. Para esto se utilizaron los datos de dos mapas históricos de Uso de Suelo con fechas de 1993 y 2011, utilizando una leyenda temática de 7 categorías (Tabla 6).

Tabla 6. Leyenda de los mapas

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

Para generar las variables para el modelo de DS, partimos de la matriz de cambios de 1993 al 2011. A partir de dicha matriz de transiciones, se calcularon las tasas anuales para cada transición entre el periodo analizado (Tabla 7), mediante la siguiente ecuación:

$$T_{ij} = \frac{A_{ij}}{n} \quad (6)$$

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 7. 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}	A_{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}	---

En este sentido, se obtienen las 7 variables de nivel, una por categoría, y su valor inicial corresponde a las superficies que cada uso de suelo tenía en 1993; 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: Tabla 7).

7.4.2 Descripción y funcionamiento del modelo de demanda

El diseño conceptual del modelo se fundamenta en la evolución de las variables de nivel (las 7 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 representan 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; teniendo en total 42 variables auxiliares que afectan a todo el modelo, pues éstas, alimentan los flujos que modifican las variables de nivel (Figura 5 y Figura 6).



Figura 5. Variable de nivel

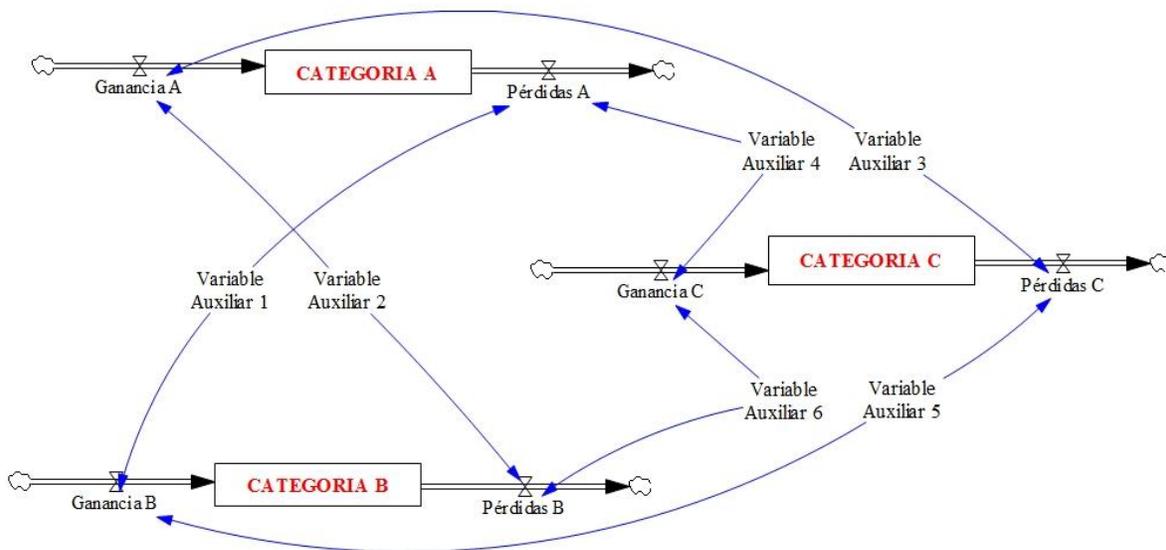


Figura 6. Ejemplo de las variables de nivel y variables auxiliares

Una vez establecido el diseño del modelo, se introducen los datos de partida de cada variable, correspondientes a las superficies iniciales para cada categoría y las tasas de transiciones. Se verificó el funcionamiento del modelo, partiendo con la superficie de cada uso de suelo en 1993 y comprobando que el valor generado después de 18 interacciones arroje una superficie para cada variable de nivel, igual a la superficie real correspondiente para cada uso de suelo en el año 2011. Es decir, se ajustó el modelo, realizando una simulación del año 1993 al año 2011.

Después de la comparación entre la superficie simulada y la superficie real del año 2011, se pudo concluir que el modelo se auto-ajusta, debido que al ser un modelo basado solo en las transiciones entre las categorías, representa la dinámica existente entre ellas.

Posteriormente, con el modelo ajustado, se ejecutó con 19 iteraciones para generar la demanda de cada categoría al año 2030 para cada uno de los escenarios, modificando las tasas según el escenario planteando.

Para ambos escenarios las variables de nivel tuvieron el mismo valor, la superficie de cada categoría en el año 2011. En cuanto a las variables auxiliares que corresponden a las tasas de transiciones, en el escenario tendencial se utilizaron las mismas que en el periodo anterior, pues este escenario plantea que los cambios ocurridos en el pasado, seguirán de igual manera en el futuro. En cuanto al escenario sostenible, se modificaron 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 al principio de sostenibilidad (Tabla 5).

7.5 Simulación espacial de los escenarios

7.5.1 Definición de los objetivos de simulación

Una vez simulada la demanda de superficie de cada escenario para el año 2030, se analizó si ésta era menor o mayor que la superficie del año de partida (2011). Para el escenario de tendencia tenemos que las categorías que presentan aumento de superficie son la agricultura de riego y humedad, la agricultura temporal, los asentamientos humanos, los bosques y los pastizales; mientras que las selvas y la categoría de otros tipos presentan una superficie menor a la de partida. En cuanto al escenario de sostenibilidad, las categorías que aumentan de

superficie son los asentamientos humanos, bosques, pastizales, otros tipos y selvas, mientras que las que disminuirán de superficie son la agricultura de riego y humedad y la agricultura de temporal.

De esta forma, partiendo del cambio de la superficie de partida y la simulada, se establecen los objetivos de simulación para cada categoría en ambos escenarios, es decir, si la finalidad será simular crecimiento o disminución de superficie. Los objetivos de simulación son diferentes para cada categoría y para cada escenario, mientras que en un escenario el objetivo de simulación para determinada categoría está enfocado al aumento, en otro, a la disminución de superficie (Tabla 8). Es a partir de cada objetivo de simulación que se seleccionan las variables y los factores utilizados.

Tabla 8. Objetivos de simulación para cada escenario

Categoría	Escenario de Tendencia	Escenario de Sostenibilidad
Agricultura de riego y humedad	Crecimiento	Disminución
Agricultura temporal	Crecimiento	Disminución
Asentamiento humano	Crecimiento	Crecimiento
Bosque	Crecimiento	Crecimiento
Otros tipos	Disminución	Crecimiento
Pastizales	Crecimiento	Crecimiento
Selvas	Disminución	Crecimiento

7.5.2 Selección de los criterios, factores y restricciones

7.5.2.1 Variables utilizadas

La selección de los factores que determinan los cambios de usos de suelo supone una tarea ardua, ya que son multitud de datos y variables las que pueden considerarse, aunque no todos los procesos que generan cambios de usos del suelo pueden ser modelados (Alcamo, et al., 2006), ya que éstos varían dependiendo de la escala espacial. Por ejemplo, a escala local, las variables que más influyen el uso del suelo son de tipo social y de accesibilidad; mientras que a escala de paisaje, el determinante principal es la topografía (Veldkamp & Lambin, 2001).

De esta manera, la selección de las variables se realizó tomando en consideración todos los objetivos de los escenarios propuestos, así como la información especializada en estos temas, resultado de una extensa revisión bibliográfica. De igual manera, la disponibilidad de información para el área de estudio fue determinante para conformar la base de datos.

Finalmente, se recopilaron datos referentes al uso del suelo, tipos de suelo, hidrografía, carreteras, altitud y pendiente. Dicha información se extrajo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), posteriormente, se le realizó un tratamiento para asegurar la confiabilidad y compatibilidad de la información. El procedimiento seguido para la obtención de cada una de las variables, fue el siguiente:

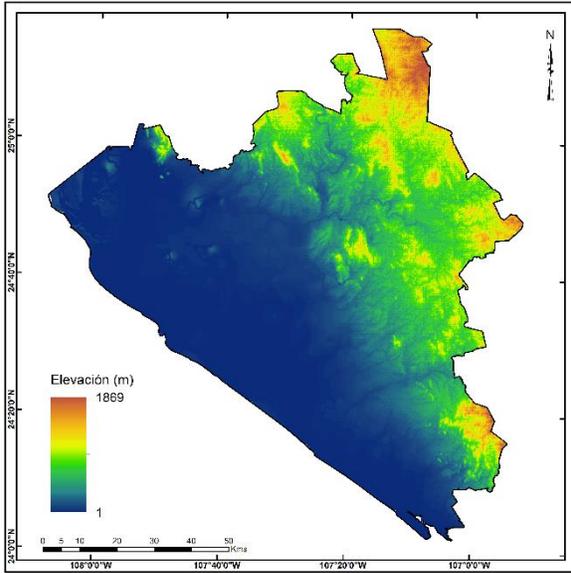
1. **Obtención** de los mapas de INEGI.
2. **Reproyección:** se definió la proyección UTM zona 13 ya que los mapas contaban con diferentes proyecciones.
3. **Delimitación** del área de estudio: algunos mapas fueron obtenidos para todo el País, y otros, para el Estado de Sinaloa, por lo que se utilizó, el mapa con la delimitación municipal de Navolato y Culiacán para recortar todos los mapas y conservar así solo la región de interés (Figura 6).
4. **Homogenización** de la leyenda: se generó la leyenda categórica de los mapas de usos de suelo a 7 categorías (Figura 6).
5. **Rasterización** de los mapas: pues las técnicas de EMC requieren la información en formato raster.

La base de datos compilada está compuesta por las variables que aparecen en la Tabla 9.

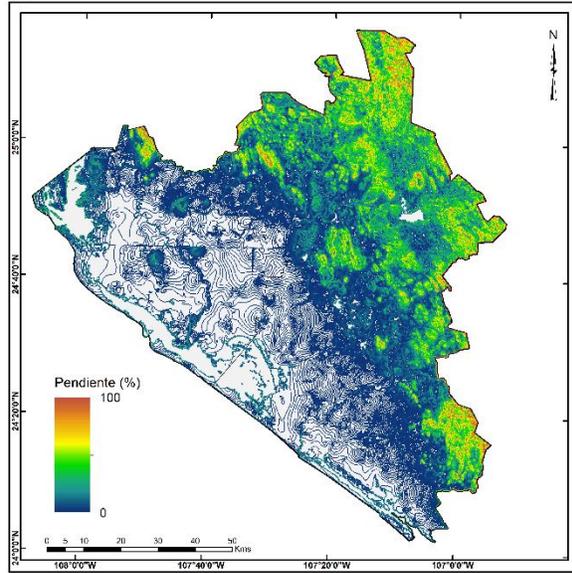
Tabla 9. Variables utilizadas

Variables	Descripción/Fecha	Fuente/Escala
Categorías Usos de Suelo:		
<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura de riego y humedad • Agricultura de temporal • Asentamiento humano • Bosques • Pastizales • Selvas • Otros tipos. 	<p>Reclasificación realizada para la simulación. Partiendo del mapa de Uso del Suelo y Vegetación (USyV) Serie V.</p> <p>Año 2011.</p>	<p>Elaboración propia a partir de datos de INEGI</p> <p>Escala: 1:250,000</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Altitud • Pendiente 	<p>Modelo Digital del Terreno (MDT). La pendiente se obtuvo a partir del MDT.</p> <p>Año: 2013</p>	<p>INEGI</p> <p>Escala: 90m</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de suelo 	<p>Representa los tipos de suelo existentes en el área de estudio</p> <p>Fechas: 2007</p>	<p>INEGI</p> <p>Escala: 1:250,000</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Ríos • Canales 	<p>Se obtendrán la distancia a los Ríos y Canales.</p> <p>Ríos: 2010</p> <p>Canales: 2005</p>	<p>INEGI</p> <p>1:250,00</p> <p>1:1,000,00</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras 	<p>Se obtendrán las distancia a las carreteras</p> <p>Fecha: 2014</p>	<p>INEGI</p> <p>1:50,000</p>

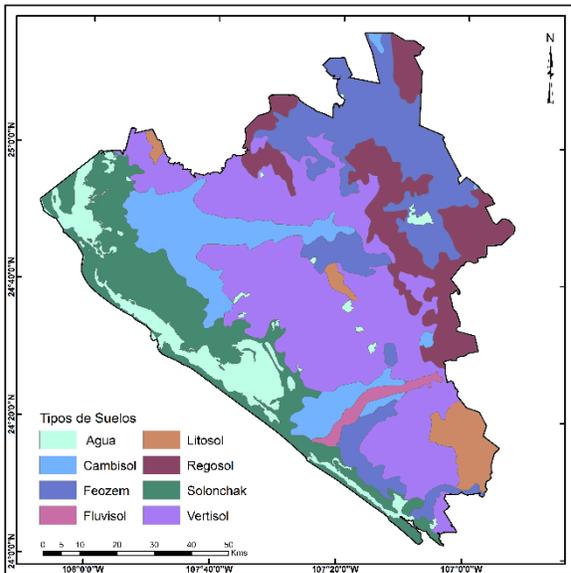
Asimismo en las Figura 7 y Figura 8 se muestran cada una de las variables utilizadas.



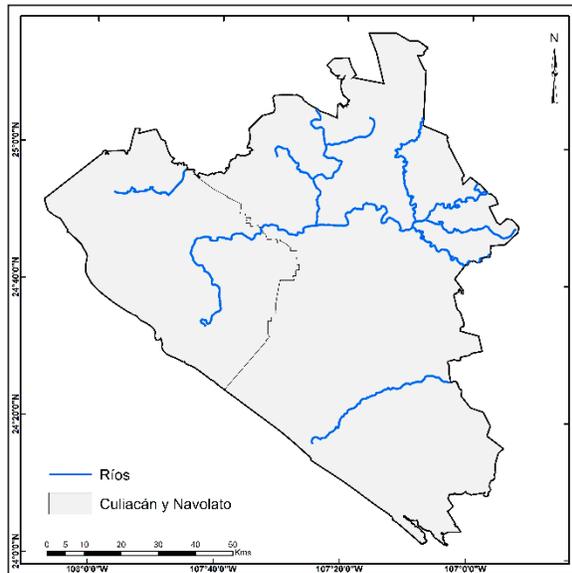
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Variables utilizadas: a) Altitud, b) Pendientes, c) Tipos de suelo y d) Ríos

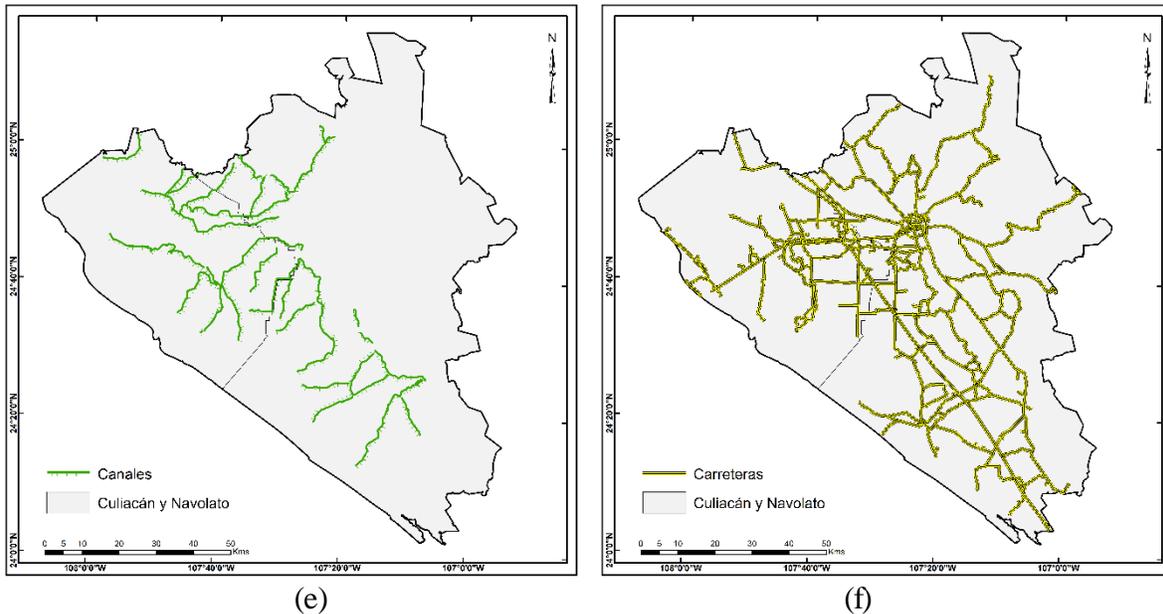


Figura 8. Variables utilizadas (continuación): a) Canales y d) Carreteras

Con la base de datos conformada, los mapas en formato raster, se procedió a la creación de los factores y restricciones.

7.5.2.2 Restricciones

Las restricciones son alternativas que sólo tienen dos códigos numéricos, el valor 0, que indica todas las zonas excluidas del análisis y el 1 que corresponde al lugar candidato para desarrollar la actividad a simular.

En este trabajo, para la creación de los mapas de restricciones se consideraron como limitantes base para el diseño de los escenarios a: los ríos, carreteras, cuerpos de agua y los asentamientos humanos existentes, con el objetivo de impedir que sobre estos se desarrolle alguna actividad. Ya para la simulación de cada una de las categorías se suman algunas restricciones particulares, según el escenario planteado (Tabla 10). Cuando se requiere simular aumento de superficie, los mapas de restricciones se elaboraron partiendo un mapa base conformado por toda el área de estudio, a éste se le restaron los mapas que no se tomarán en cuenta para el crecimiento de cada una de las categorías, tales como, las carreteras, ríos, cuerpos de agua y la categoría tratada. Para el caso de las simulaciones de disminución de superficies, se tomarán como base la superficie de esa categoría en el año 2011, y se le restarán las excepciones a simular.

Tabla 10. Restricciones para cada escenario y usos de suelo simulado

Categoría	Escenario de Tendencia	Escenario de Sostenibilidad
Agricultura de riego y humedad	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Agricultura de riego y humedad	Agricultura de riego y humedad, menos los mapas de: -Carreteras -Ríos
Agricultura temporal	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Agricultura de temporal	Agricultura de temporal, menos los mapas de: -Carreteras -Ríos
Asentamiento humano	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos
Bosque	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Bosques	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Bosques
Otros tipos	Categoría Otros tipos, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Otros tipos
Pastizales	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Pastizales	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Pastizales
Selvas	Categoría Selvas, menos los mapas de: -Carreteras -Ríos	Mapa base, menos los mapas de: -Carreteras -Cuerpos de agua -Ríos -Asentamientos humanos -Selvas

7.5.2.3 Factores

Una vez con la base de datos conformada, se realizó un análisis de cada uno de los objetivos de simulación, para conocer como influirían las variables en cada uno de estos. Partiendo de este análisis, se obtuvieron los factores para cada objetivo del escenario de tendencia y del escenario de sostenibilidad.

Proximidad a usos de suelo. Este factor representa la distancia hacia los usos de suelo en los que se ha experimentado el cambio de alguna categoría en particular, asignándosele un valor de idoneidad a cada uno de estos usos. Este factor se utiliza particularmente, para simular disminuciones de superficie de las categorías.

En el caso del escenario de tendencia, para la obtención de este factor, se utilizaron los datos obtenidos de la matriz de tabulación cruzada entre los mapas de usos de suelo de 1993 y 2011, de la cual se obtuvieron las transiciones y las tasas de cambio de cada una de las categorías, lo que permitió conocer sobre que categorías se dio el aumento de cada uso de suelo (porcentajes de cambio) y asignar mediante una reclasificación los valores de idoneidad para cada uno de las categorías a simular, representando así, solamente los usos en las que están crecerán.

Proximidad inversa a usos de suelo. Este factor representa la distancia hacia el interior de cada uno de los usos de suelo en los que se ha experimentado el crecimiento de cada categoría a simular, asignándosele un valor de idoneidad a cada uno de estos usos.

Altitud. La importancia de este factor radica en encontrar los umbrales que poseen cada una de las categorías de uso de suelo, para lo cual se realizó una sobreposición del MDT con cada uno de las categorías de usos de suelo a modelar.

Pendiente. Este factor representa las pendientes en las que se dará el cambio de cada objetivo de simulación en ambos escenarios.

Tipos de Suelo. En el área de estudio se cuentan con diversos tipos de suelos, es por ello que esta variable se modela según los suelos más idóneos para el desarrollo de cada actividad.

Proximidad a cada uso de suelo. Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más

cercanas al uso de suelo que se esté simulando, por ejemplo, en la simulación de asentamientos humanos, se dio mayor aptitud a las zonas más próximas a estos.

Proximidad a Canales. La accesibilidad a los canales se considera esencial para el desarrollo de algunas actividades. Así, los lugares más próximos a los canales se valoran como los más adecuados para que se desarrollen ciertos tipos de usos de suelo.

Proximidad a Ríos. La accesibilidad a los ríos se considera esencial para el desarrollo de algunas actividades de uso de suelo, por lo que, en algunas categorías, los lugares más próximos a los ríos se valoran como los más y en otros como menos óptimos.

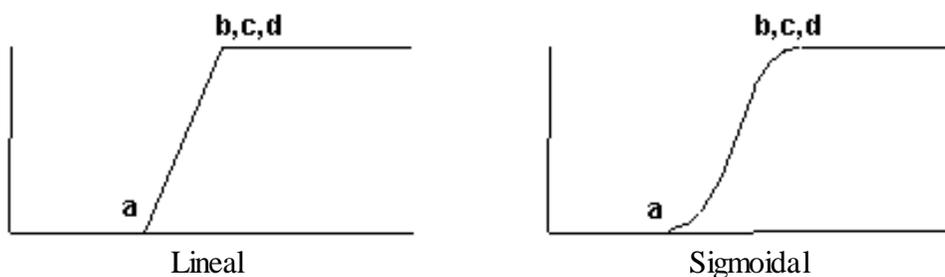
Proximidad a Carretera. Las carreteras juegan un papel importante en la movilidad y desarrollo de las actividades del ser humano. Es por ello que es importante considerar la distancia a las carreteras como un factor preponderante para mantener en funcionamiento las dinámicas del territorio. De tal manera, que se ha realizó un factor de proximidad a carreteras, en el cual, se da más aptitud a las zonas más próximas a las carreteras.

Proximidad a asentamientos humanos. Los asentamientos humanos son el detonante de las dinámicas en los usos de suelo, es por eso que en este factor, se consideró de mayor importancia a las zonas más próximas a ellos.

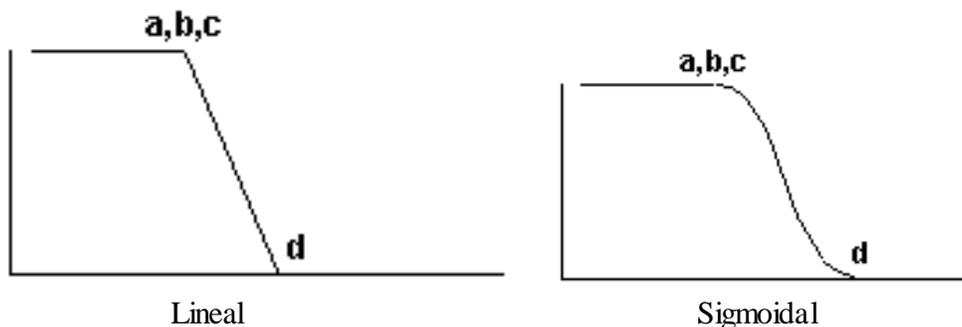
7.5.3 Normalización de los factores

Para la homogenización de las diferentes unidades de medida entre las variables, se realizó una normalización a una escala de 0 – 255 para generar factores finales. Para ello, se aplicaron operadores borrosos (fuzzy), en funciones lineales y sigmoidales implementadas en el módulo FUZZY en el software IDRISI, las cuales se ilustran a continuación.

Función monotónicamente creciente: se eleva de 0 a 255 y nunca disminuye



Función monotónicamente decreciente: comienza en 255, luego disminuye a 0.



En su mayoría se utilizaron funciones lineales decrecientes, pues la normalización de los factores de proximidad, se realizó dando mayor importancia a las distancias más cercanas a la actividad a simular. Es importante mencionar, que los valores mínimos y máximos utilizados al momento de la normalización se obtuvieron del análisis de la dinámica entre los usos de suelo. Considerando así, diferentes valores en las funciones de normalización para cada uno de los objetivos a simular.

7.5.4 Ponderación de los factores

Para la ponderación de los factores, se buscó que se cumpliera lo planteada en casa escenario; en el caso del escenario de tendencia, que los modelos de cada uso de suelo cumplieran con los principales agentes que incidieron en el proceso de cambio, tratando de manera jerárquica el impacto de los factores según su nivel de importancia dentro del proceso de cambio experimentado. Mientras que en el escenario de sostenibilidad, en la ponderación se persiguió

que se cumpliera, en la medida de lo posible, las condiciones de un modelo de uso de suelo óptimo, tratando de manera conjunta el interés que pudieran tener los diferentes grupos implicados en el desarrollo territorial.

A partir de esto, se procedió a la ponderación de los factores utilizando el método de jerarquías analíticas de Saaty (Saaty, 1980), el cual establece mediante una matriz de comparación entre pares de factores, el nivel de importancia de cada uno sobre los demás.

Para determinar las jerarquías de orden, se partió de la información derivada de la revisión bibliográfica realizada, junto a la opinión consensuada con expertos del grupo de Investigación de Geomática de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Finalmente determinadas todas las jerarquías, la obtención de pesos se obtuvo utilizando el módulo WEIGHT de IDRISI, en el cual se introducen los niveles de importancia de los factores para obtener los pesos correspondientes a cada factor.

7.5.5 Sumatoria Lineal Ponderada

Para obtener una evaluación final de las alternativas se utilizó la sumatoria lineal ponderada, la cual es uno de los métodos más utilizados en la EMC por su relativa sencillez 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:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (7)$$

La sumatoria obtenida, es multiplicada por el mapa de restricciones, obteniendo así e mapa de aptitud o adecuación (Figura 9).

7.5.6 Asignación Multiobjetivo

Finalmente, con los mapas de adecuación obtenidos, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA, *MultiObjective Land Allocation*) con las 7 categorías de usos de suelo, asumiendo que algunos de ellos (o cada uno) compite por el territorio más óptimo; la asignación multiobjetivo se utilizó para resolver problemas de conflictos entre los objetivos, para conocer el comportamiento de la asignación de los pixeles cuando hay competencia de los objetivos por los lugares más óptimos (Figura 9).

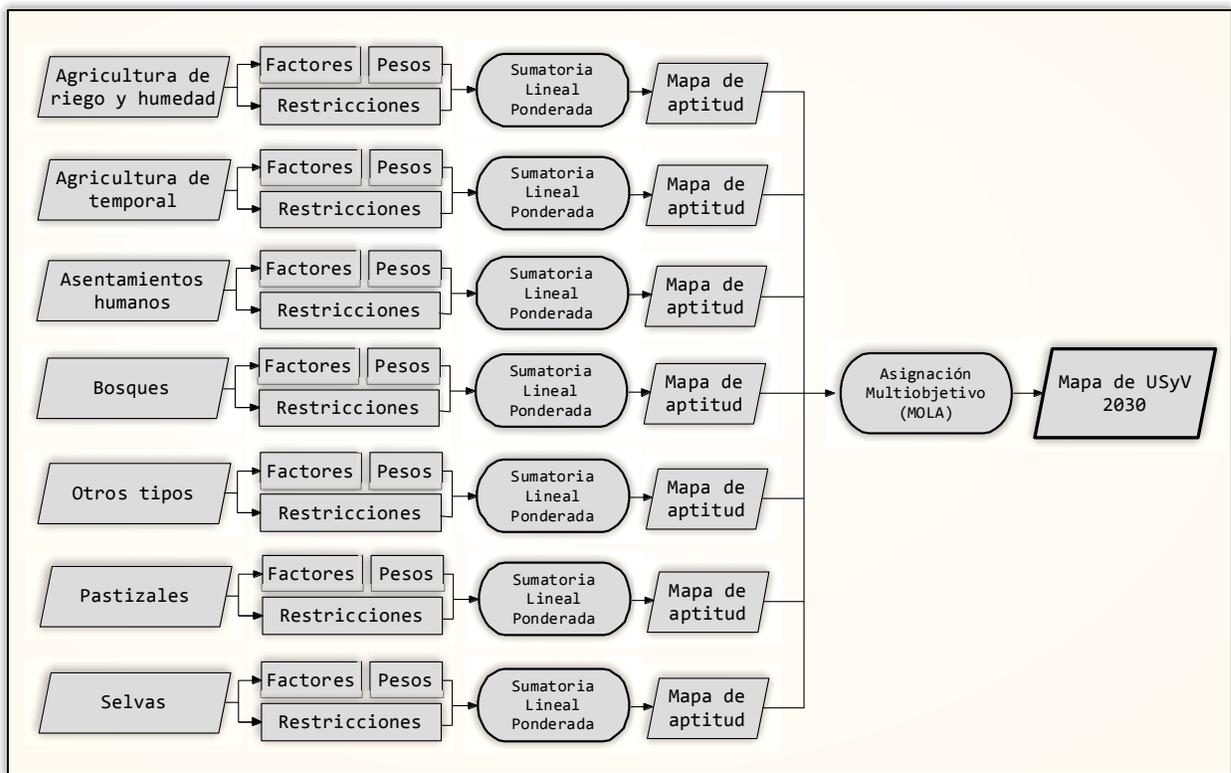


Figura 9. Procedimiento para la obtención de los mapas de aptitud y el mapa final de USyV 2030

Se utilizó la función MOLA, incorporada en el software IDRISI, la cual requiere los nombres de los objetivos y sus pesos relativos, los mapas de adecuación evaluados para cada uso y las áreas que deben ser asignadas a cada uno. Posteriormente reclasifica repetidamente los mapas de adecuación evaluados para realizar una asignación de primer paso, verifica los conflictos y después asigna los conflictos basándose en una regla de distancia mínima al punto ideal empleado los valores ponderados. El objetivo con un peso mayor cumplirá su meta de

superficie en primer lugar, es decir, si dos objetivos compiten por el mismo grupo de píxeles, el objetivo con el peso más alto se quedará con él. Por lo que el establecer los pesos para cada objetivo se vuelve muy importante.

La definición de los pesos de cada objetivo, se realizó dependiendo del escenario a simular; en ambos escenarios se estableció el nivel de importancia de cada objetivo y se utilizó el método de jerarquías analíticas de Saaty (Saaty, 1980); sin embargo, el orden jerárquico de cada uno fue diferente, en el escenario de tendencia, se obtuvieron a partir de las tasas de cambio de las categorías, las tasas de cambio más elevadas tienen un valor mayor, a excepción de las selvas, que tiene una alta tasa, pero negativa, la importancia de ésta se consideró como 0, pues todas las demás categorías cambiarán a base de ésta. Para el escenario de sostenibilidad, se consideraron las tasas de cambio, pero también se tomó en cuenta que se cumplieran las bases del escenario que permiten el desarrollo sostenible.

Para poder utilizar los mapas de aptitud obtenidos anteriormente, se siguió una metodología especial, dependiendo del objetivo de simulación de cada categoría, que en algunos casos consistió en simular aumento de superficies, mientras que en otros casos la superficie disminuiría. En el caso particular donde la superficie aumentaría, se sigue la siguiente metodología:

Se reclasificó un mapa con la superficie que la categoría tenía en el año 2011, asignándosele el valor de aptitud más alto (255). A éste mapa reclasificado se le sumó el mapa de aptitud simulado. Así al momento de realizar la función multiobjetivo, se tomara en cuenta, en primer lugar, la superficie inicial de la categoría (permanencia), así posteriormente, en base al mapa de adecuación, ir agregando los píxeles más óptimos hasta cumplir con la superficie establecida (simulada para el año 2030).

Para aquellas categorías, donde se simulaba una disminución de superficie, el procedimiento seguido fue el siguiente:

Se reclasificó de igual manera la superficie que la categoría tenía en el año 2011 con la máxima aptitud (255). A éste, se le restó el mapa de aptitud simulado, el cual fue elaborado para presentar pérdida o disminución de superficie; lo que nos dio como resultado un mapa

de adecuación que representa desde los píxeles más óptimos hasta los menos óptimos para el desarrollo de la actividad. Lo anterior, nos permitió realizar una asignación multiobjetivo, utilizando las superficies totales simuladas para cada uno de los escenarios, con lo que obtuvimos directamente los mapas de uso de suelo y vegetación para ambos escenarios.

7.6 Análisis de Sensibilidad

La metodología utilizada se basa en la propuesta por Plata Rocha, et al., 2013, la cual es una metodología de AS explícitamente espacial, fácil e intuitiva de aplicar utilizando las herramientas disponibles en un entorno SIG raster, utilizando IDRISI Selva.

La metodología utilizada, se basa en la introducción de un cierto porcentaje de variación ($\pm 25\%$) de forma aleatoria en los valores de adecuación de los factores espaciales y en los pesos rasterizados a nivel de píxel. Para llevar a cabo este proceso se siguieron los pasos representados en la Figura 10.

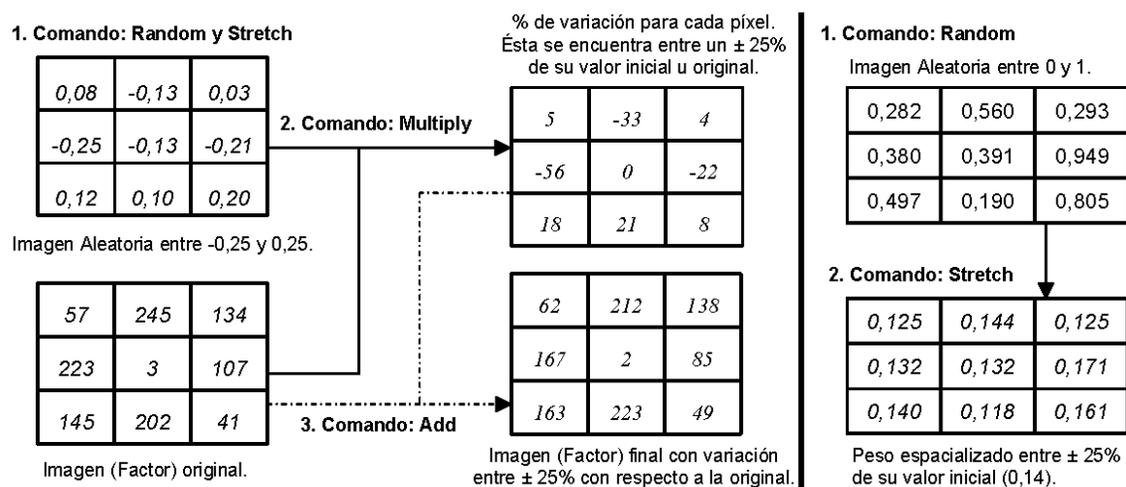


Figura 10. Proceso para obtener la variación espacial en los factores (izqda.) y pesos (dcha.)
Fuente. Plata Rocha, et al., 2013

En dicho esquema, el procedimiento seguido para obtener los factores con variación espacial (izquierda) es el siguiente: primero se generó una muestra aleatoria entre -0.25 y +0.25 (1. *Random y Stretch*) (mapa ráster); posteriormente se multiplica (2. *Multiply*) este mapa por el factor que deseamos modificar, obteniendo un segundo mapa ráster con la variación aleatoria entre ± 0.25 del valor de adecuación del factor; y, por último, dicho mapa se suma (3. *Add*) al factor original, obteniéndose el factor con una variación entre $\pm 25\%$ de su valor

de adecuación original a nivel de píxel. Por su parte, el proceso seguido para la rasterización de los pesos (derecha) se hizo de la siguiente forma: primero se generó una imagen aleatoria entre 0 y 1 (1. *Random*) y, posteriormente, dicha imagen se contrae entre $\pm 25\%$ del valor del peso correspondiente (2. *Stretch*).

Una vez obtenidos todos los factores y pesos con variación espacial, se utilizaron como insumo para generar una serie de mapas de aptitud para cada uno de los objetivos de simulación, aplicando una sumatoria lineal ponderada. Para ello se utilizó un procedimiento del tipo OAT, es decir, se ejecutaron los modelos introduciendo cada vez un factor modificado (variación espacial de $\pm 25\%$) y manteniendo los demás en su estado original. De igual forma, se modificaron los pesos, variando uno y manteniendo los demás en su estado original. Con la finalidad de contar con más mapas de aptitud y de comparar como se comporta cada factor y cada peso.

Para la simulación de cada modelo se consideraron los mismos parámetros introducidos en el modelo original. De este modo, se obtuvieron tantos mapas de aptitud como factores y pesos tenía cada modelo (12 para la agricultura de riego, asentamiento humano y selvas; 10 para la agricultura de temporal, bosques y pastizales; 6 para la cobertura de otros tipos).

A partir de dichos mapas de aptitud se hicieron tres análisis diferentes, con la finalidad de obtener la mayor información posible sobre el impacto de los factores y pesos modificados en los resultados de los modelos, cada análisis se realizó a nivel objetivo, obteniendo así un análisis de cada uso de suelo.

A) Cuantificación del impacto local de cada factor en el modelo para cada uso individual.

Para llevar a cabo este análisis fue necesario reclasificar los mapas de aptitud (continuos) en mapas binarios, considerando que el total de píxeles reclasificados es igual a la superficie de cambio (aumento o disminución) de cada categoría, según las superficies simuladas. Posteriormente, se utilizó el estadístico *Kappa* (K_R) para establecer el nivel de acuerdo o desacuerdo entre dichos mapas binarios y el obtenido con los factores y pesos originales.

De esta forma, a partir de los valores del estadístico K_R , y considerando la clasificación propuesta por (Landis & Koch, 1977), se determina el grado de influencia de cada factor y

su correspondiente peso en los modelos ejecutados (Tabla 11).

Tabla 11. Escala de valoración del índice Kappa

Clasificación K_R	Acuerdo	Desacuerdo
1 – 0.81	Casi perfecto	No significativo
0.80 – 0.61	Sustancia	Mediano (Menor)
0.60 – 0.41	Moderado	Moderado
0.40 – 0.21	Mediano	Sustancia
0.20 – 0	Insignificante	Casi total

Fuente: Landis y Koch (1977)

B) Cartografía del número de veces que los píxeles son reiteradamente seleccionados en los modelos ejecutados.

Para este fin, también se reclasificaron los mapas de aptitud en mapas binarios de acuerdo a la superficie simulada para cada uso de suelo. A partir de estos, se elaboró la cartografía de píxeles más veces seleccionados en todas las ejecuciones (suma de todos los modelos) y se extrajo el porcentaje de coincidencias que presentaba con el modelo original. La aplicación de este análisis es ampliamente utilizado para determinar el grado de robustez de modelos espaciales (Lodwick, 1989; Brunsden, et al., 1990; Lowry, et al., 1995; Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2004b; Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2009).

C) Diferencia media cuadrática entre el modelo original y los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados.

Dicho análisis consistió en determinar la diferencia existente entre los mapas de aptitud ejecutados con los factores y pesos modificados respecto a los originales, aplicando la expresión habitualmente utilizada para el cálculo del error medio cuadrático (Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2004b; Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2009):

$$M_j = \sqrt{\frac{\sum_i (X_{it} - X_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Donde: X_i es el mapa de aptitud obtenido en cada uno de los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados, X_{it} es el mapa de aptitud obtenido en el modelo original, n es el número de modelos ejecutados y M_j es el mapa que muestra el error medio cuadrático por

píxel para el uso J (en nuestro caso 7 mapas, uno para cada uso).

Como resultado se obtendrá un mapa para cada uso de suelo simulado, a partir del cual, se podrán determinar algunos estadísticos básicos sobre este resultado (media, desviación estándar, mínimo y máximo, etc.).

Es importante mencionar, que para automatizar estos procedimientos, se implementó una herramienta o módulo creado en C# como lenguaje de programación, y como entorno de desarrollo SharpDevelop 3, un entorno de código abierto para la tecnología .NET de Microsoft. La cual, se utilizó junto a IDRISI Selva para automatizar todos los procesos. Realizando desde la obtención de los mapas de aptitud originales, utilizando sumatoria lineal ponderada, así como la obtención de los mapas de aptitud modificando los factores y los pesos. Además, de la cartografía del número de veces que los píxeles son reiteradamente seleccionados en los modelos ejecutados y la diferencia media cuadrática entre el modelo original y los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados.

VIII. RESULTADOS

8.1 Análisis histórico de los cambios de uso y cobertura de suelo

En primer lugar, se obtuvieron los cambios de uso de suelo del año 1993 al 2011, mediante una matriz de tabulación cruzada.

Analizando la dinámica de los usos de suelo, en dicho periodo 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. En la Tabla 12 aparecen las transiciones entre todas las categorías. 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. En la Figura 11 podemos apreciar espacialmente las principales transiciones ocurridas en el periodo analizado.

Tabla 12. Matriz de cambios: 1993 a 2011

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

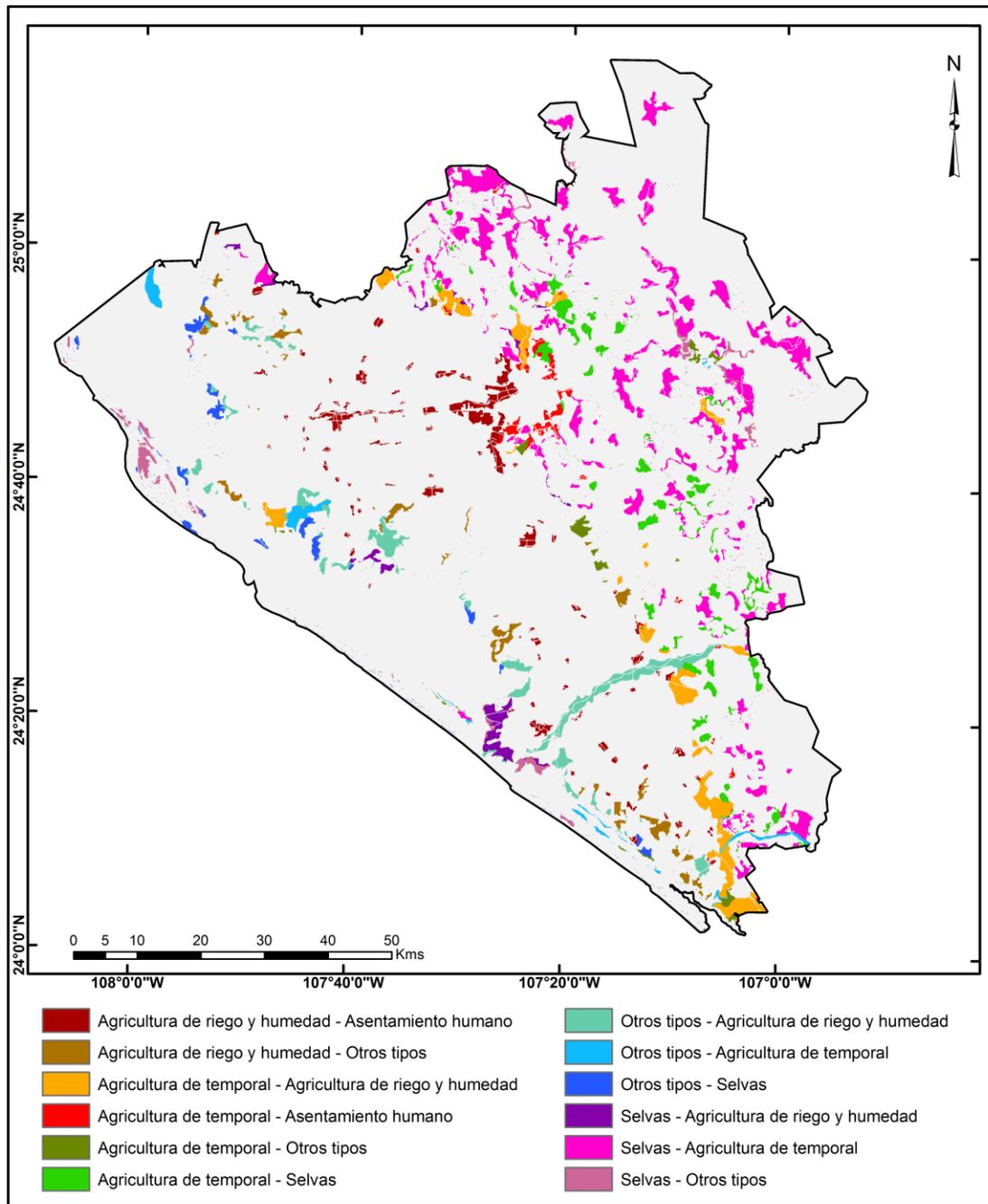


Figura 11. Mapa de cambios de 1993 a 2011

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 13). 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 13. Cambios ocurridos de 1993 al 2011

Categoría	Ganancia	Pérdida	Persistencia	Cambios Netos	Cambios totales
Agricultura de riego y humedad	26,384	16,414	267,398	9,970	42,798
Agricultura temporal	39,808	27,568	116,343	12,240	67,376
Asentamiento humano	13,475	9	6,641	13,466	13,484
Bosque	2,019	803	26,166	1,216	2,822
Otros tipos	12,622	17,826	146,326	5,204	30,448
Pastizales	2,683	3	337	2,680	2,686
Selvas	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 el territorio tiene una tendencia a la pérdida de selvas y al incremento de las superficies artificiales, a la agricultura de temporal en primer lugar. En la Figura 12, se muestran las categorías con los cambios (ganancias y pérdidas) más significativas.

Dicha dinámica no nos 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 de dichas dinámicas de usos de suelo, es decir, un escenario de tendencia, que permita evaluar nuestro territorio futuro si se dieran las pautas seguidas en el pasado, dicho escenario sería el base para medir un escenario alternativo sostenibles a mediano y largo plazo de las dinámicas de los usos de suelo en nuestro territorio.

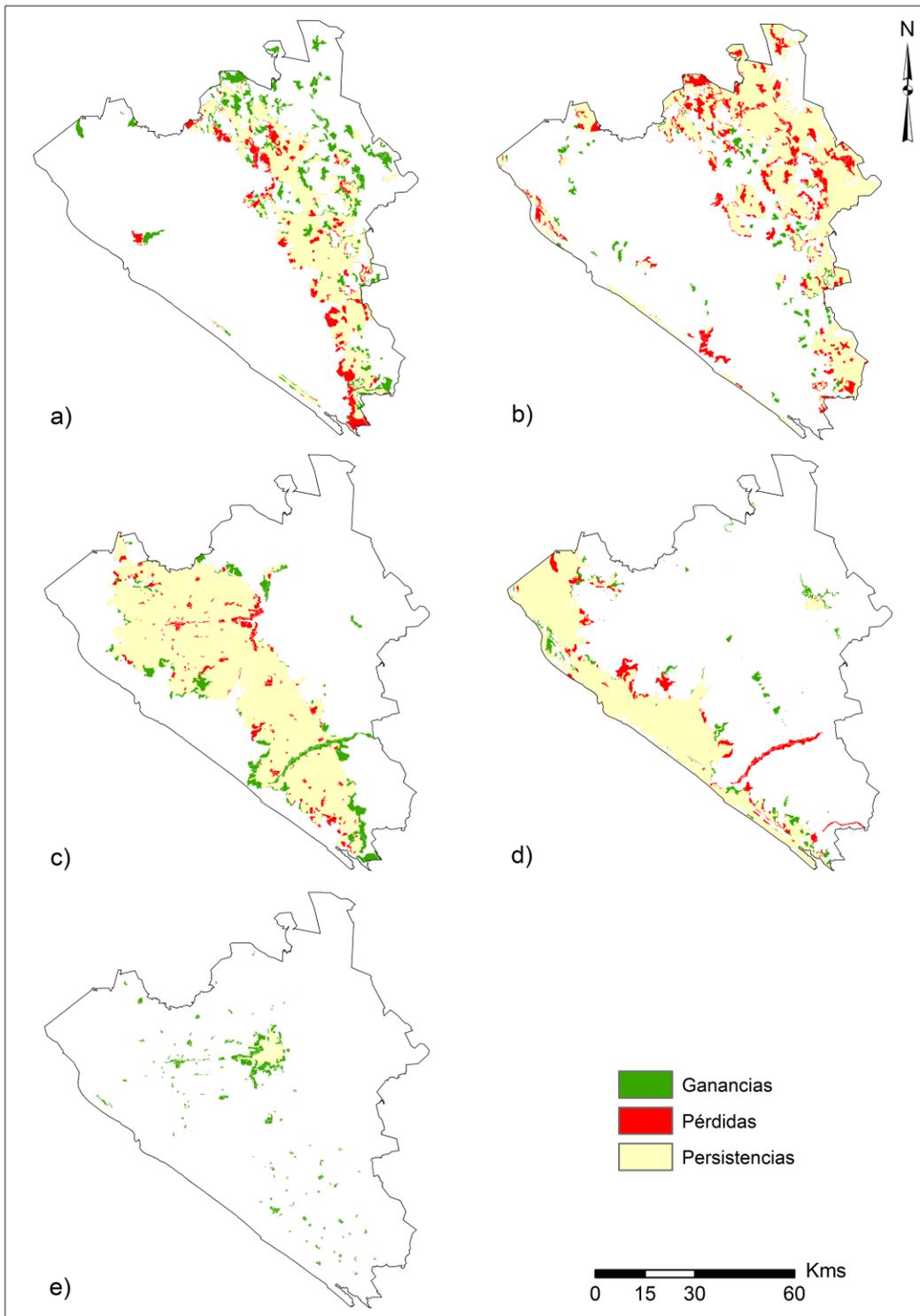


Figura 12. Cambios más importantes. a) Agricultura de temporal, b) Selvas, c) Agricultura de riego, d) Otros tipos y e) Asentamientos humanos

8.2 Descripción cualitativa de los escenarios

Escenario de tendencia

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 que se mantendrá elevado en lo que respecta al crecimiento de los asentamientos humanos, de la agricultura, los pastizales y bosques; mientras que las selvas continuarán con su alta pérdida de superficie. Pues se basa en la idea de que los cambios de uso del suelo que han ocurrido en el pasado están influidos por una serie de elementos y factores que seguirán influyendo en el futuro.

Escenario de sostenibilidad

La búsqueda de nuevos modelos y fórmulas de crecimiento que minimizan el impacto ambiental y maximizan el beneficio social y económico constituye la primicia de éste escenario. Las tasas de crecimiento de las superficies agrícolas 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.

Mientras que, las superficies urbanas se mantienen con una tasa de crecimiento muy baja, ya que se optaría por nuevas formas de edificación, tales como generar un crecimiento urbano vertical, la ocupación de los huecos urbanos, es decir, se urbanizarán las áreas vacías que hay al interior de las ciudades. La expansión de la ciudad se dará sólo para el crecimiento que no pueda ser absorbido en el interior de la ciudad, previéndose espacios siempre adyacentes a la mancha urbana.

8.3 Cálculo de la demanda de uso de suelo / Modelo de demanda de superficie de uso de suelo

8.3.1 Obtención de las variables

Teniendo como insumo la matriz de cambios entre 1993 y 2011, se obtuvieron las tasas anuales para cada transición. Observándose, la mayor tasa para la transición de selvas hacia agricultura de temporal, seguida por transiciones de ambas agriculturas hacia las demás categorías (Tabla 14).

Tabla 14. Tasas anuales de transiciones entre 1993 y 2011

	Agricultura de riego y humedad	Agricultura temporal	Asentamiento humano	Bosque	Otros tipos	Pastizales	Selvas
Agricultura de riego y humedad	-	679.22	0.22	0.00	604.28	0.11	181.94
Agricultura temporal	13.89	-	0.17	21.11	180.56	0.00	1,995.83
Asentamiento humano	525.67	149.28	-	0.00	11.61	0.00	62.06
Bosque	0.00	0.00	0.00	-	0.000	0.00	112.17
Otros tipos	329.22	128.50	0.00	0.00	-	0.00	243.50
Pastizales	8.11	24.00	0.00	12.83	0.000	-	104.11
Selvas	35.00	550.56	0.11	10.67	193.89	0.06	-

8.3.2 Descripción y funcionamiento del modelo de demanda

En primer lugar, se generó la interfaz gráfica del modelo que relacionó las 7 variables de nivel con sus respectivos flujos de entrada y salida, correspondientes a las 42 variables auxiliares (Figura 13).

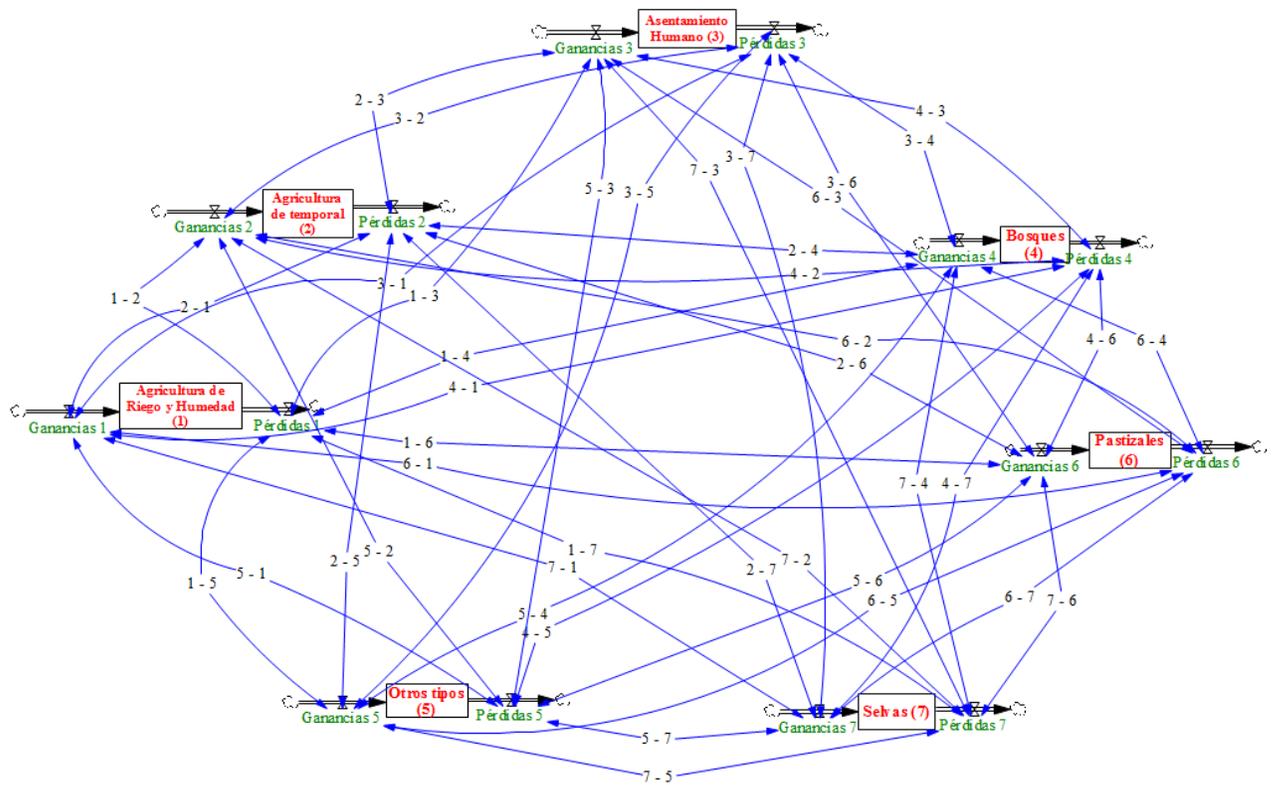


Figura 13. Interfaz gráfica del modelo diseñado en el software VenSim PLE

En dicha estructura del modelo se introdujeron los datos de partida de cada variable, correspondientes a las superficies iniciales para cada categoría y sus tasas, y se realizó, en primer instancia, una simulación del año 1993 al año 2011, con la finalidad de verificar que el modelo se ajustara a la información de las superficies de los mapas de 1993 y 2011.

Después de obtener la superficie simulada y compararla con la superficie real del año 2011, al ser estas iguales, se pudo concluir que el modelo se auto-ajusta, debido a que el modelo está basado únicamente en las transiciones entre las categorías, representando fielmente la dinámica existente entre ellas (Tabla 15).

Tabla 15. Resultado 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

Posteriormente, con el modelo ajustado, se ejecutó con 19 iteraciones (años) para obtener la demanda de cada categoría del año 2011 al año 2030 para ambos escenarios 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.

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 a lo planteado. Dicho ajuste se realizó subiendo o bajando las tasas de transiciones ocurridas en el pasado, la selección de las tasas que cambiarían, dependió de un previo análisis que buscaba representar fielmente las pautas que rigen este escenario, la cantidad variada, estuvo en función de éste análisis, así como del porcentaje de cada transición respecto a la superficie de cada categoría; obteniendo así, las siguientes tasas (Tabla 16).

Tabla 16. Tasas de transiciones para el Escenario Sostenible

	Agricultura de riego y humedad	Agricultura temporal	Asentamiento humano	Bosque	Otros tipos	Pastizales	Selvas
Agricultura de riego y humedad	-	459.263	0.000	0.000	377.737	0.105	0.000
Agricultura temporal	197.368	-	0.000	20.000	65.789	0.000	680.263
Asentamiento humano	27.737	7.842	-	0.000	0.000	0.000	0.000
Bosque	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	106.263
Otros tipos	506.632	227.000	0.000	0.000	-	0.000	72.789
Pastizales	7.684	22.737	0.000	12.158	0.000	-	46.000
Selvas	205.526	1,732.105	0.000	10.105	341.579	0.053	-

8.3.3 Superficies simuladas

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. Con respecto al escenario de sostenibilidad, vemos una disminución de la agricultura de temporal debido al incremento de las selvas y pastizales, las superficies urbanas se mantiene constantes, con una tasa de crecimiento muy baja. En la Tabla 17 se muestra la superficie obtenida para cada escenario y un indicador de su dinámica de cambio neto. En la Figura 14, podemos ver y comparar cómo se comportan las superficies de cada uso de suelo en ambos escenarios, así como la evolución que tuvieron respecto al año de partida (2011)

Tabla 17. Superficies simuladas

Categoría	Superficie Real 2011	Escenario de Tendencia (ET) 2030	Escenario Sostenible (ES) 2030	Cambios netos 2031 – 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
Asentamiento humano	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

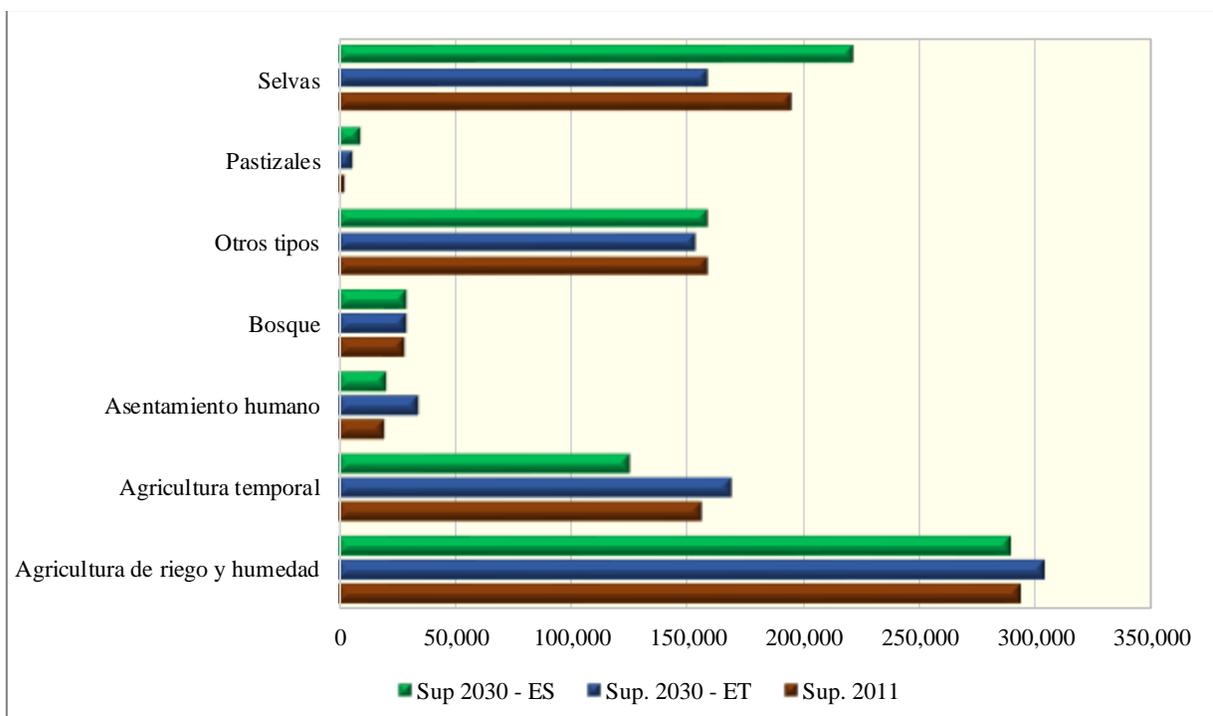


Figura 14. Superficie 2011 y superficies simuladas (2030)

8.4 Selección de los criterios, factores y restricciones

8.4.1 Reestrcciones

Como exclusiones de las simulaciones realizadas, se tomaron en cuenta las áreas donde cada objetivo a simular no se presenta, tales como: zonas urbanas, vías de comunicación, cuerpos de agua, red hidrográfica y algunos usos de suelo en particular. Obteniendo como resultado los mapas de restricciones para cada una de las categorías a simular en los dos escenarios planteados, mismas que se muestran a continuación (Figura 15, Figura 16 y Figura 17).

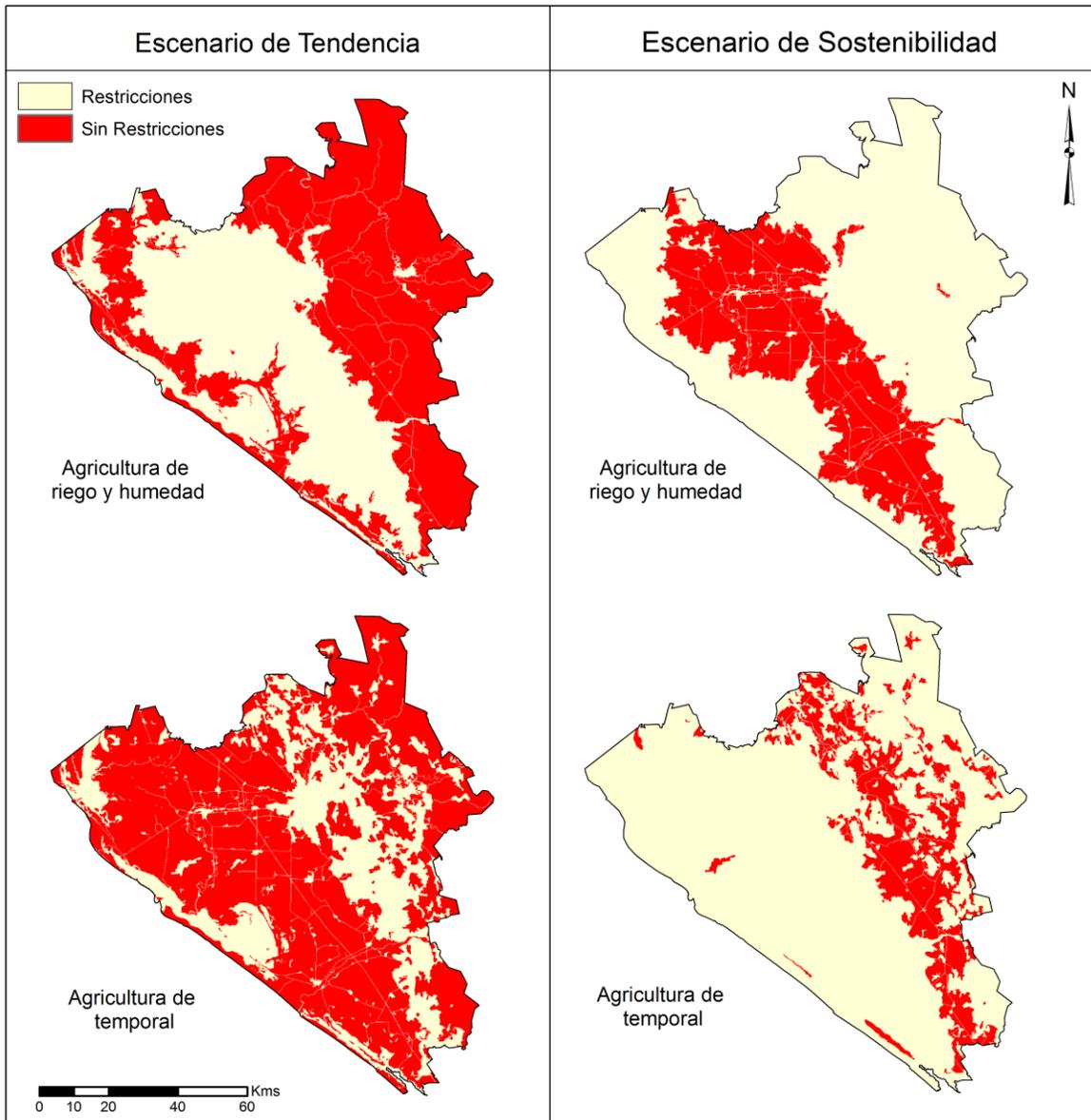


Figura 15. Mapa de restricciones, 1

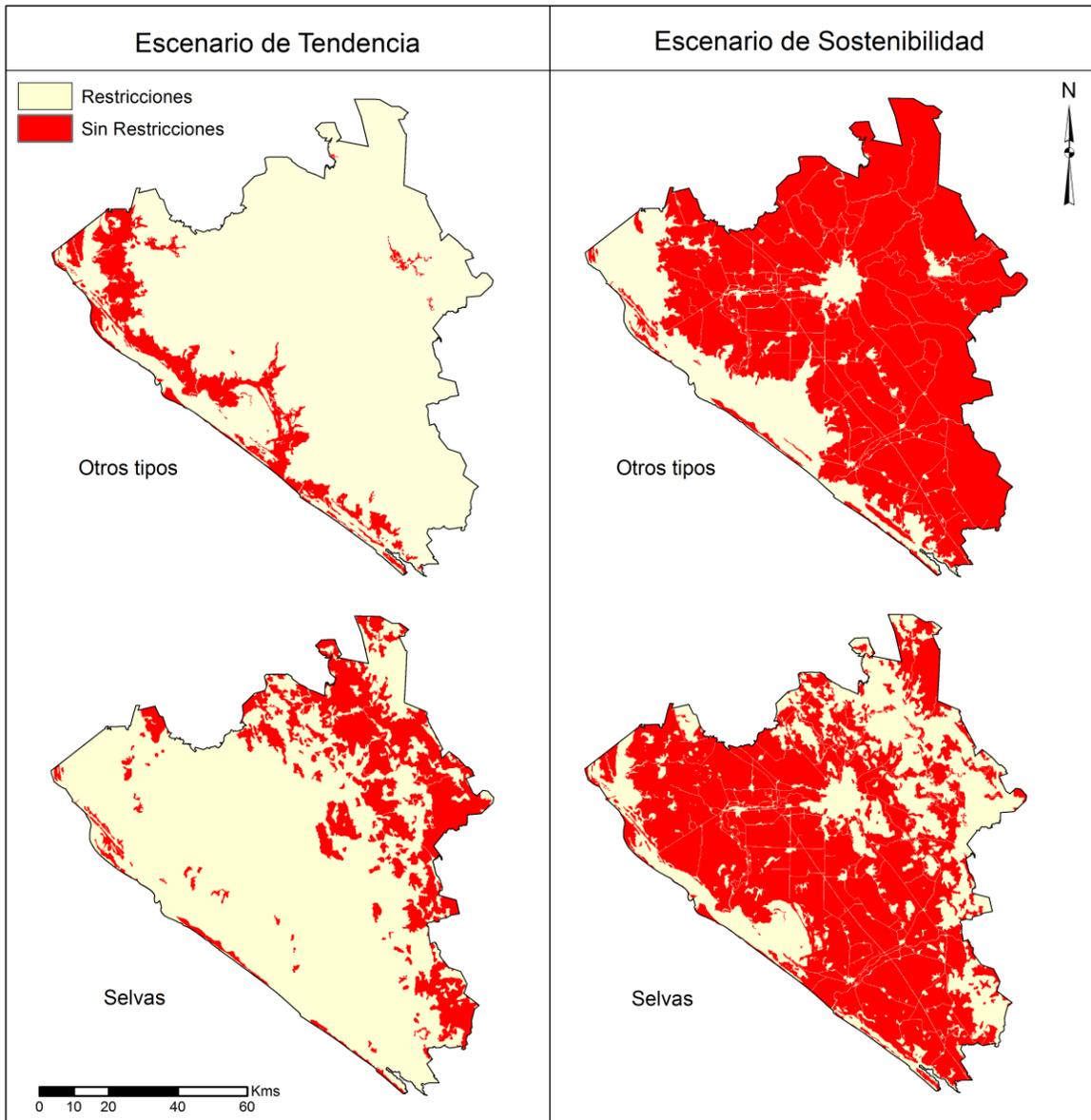


Figura 16. Mapa de restricciones, 2

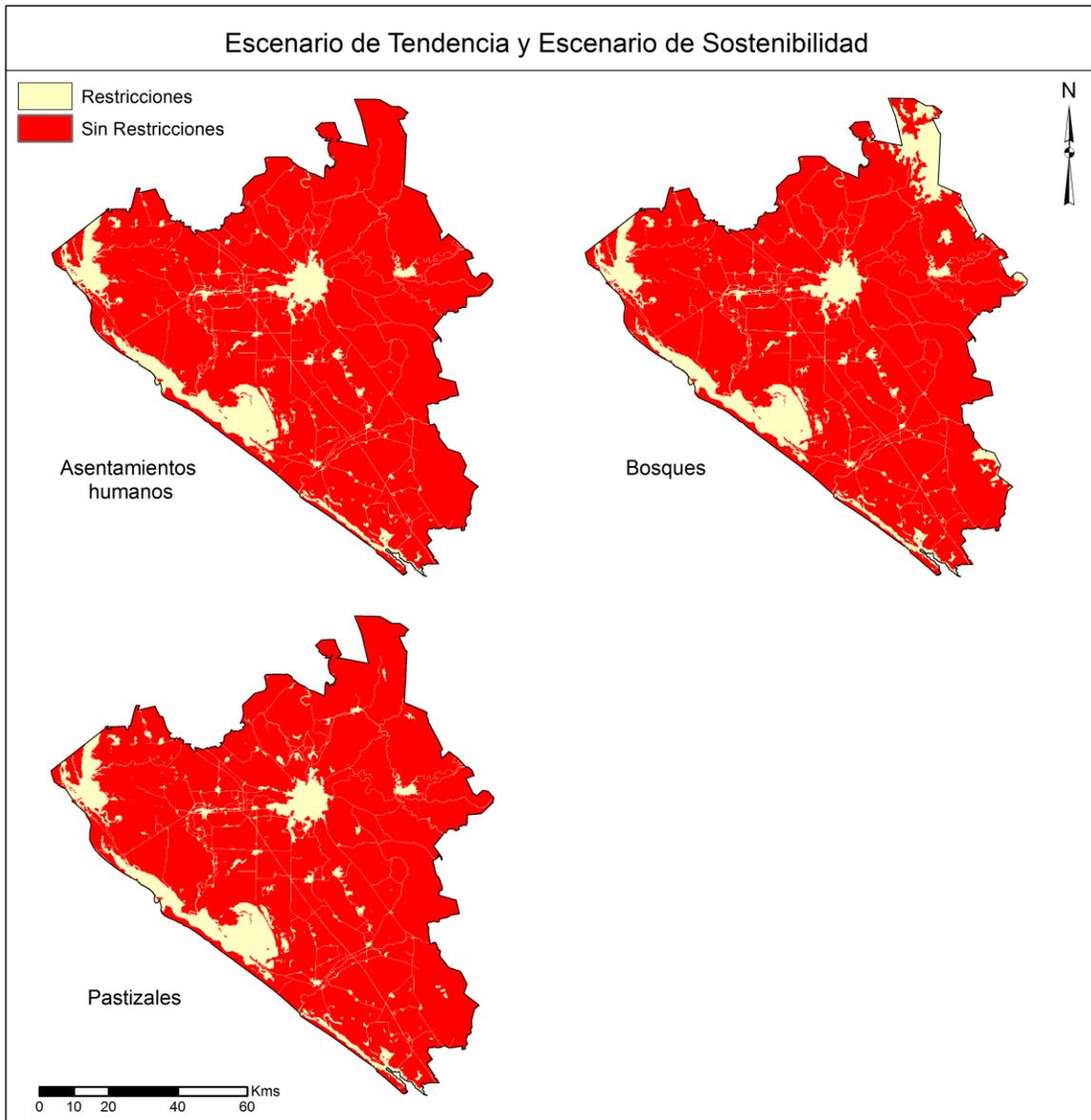


Figura 17. Mapa de restricciones, 3

8.4.2 Normalización

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

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la normalización de cada uno de los factores para todas las categorías de usos de suelo a simular en los dos escenarios planteados.

8.4.2.1 Agricultura de Riego y humedad

Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utiliza solo para el escenario de sostenibilidad, en el cual se presentará una disminución de superficie de ésta 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 18).

Tabla 18. 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, pues 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 19).

Tabla 19. 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 sigmoideal 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 sigmoideal 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 sobreposición 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 12).

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 20).

Tabla 20. Pesos de los tipos de suelo para la agricultura de riego

Tipos de suelo	Pesos	
	E. Tendencial	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 21 se muestran los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

Tabla 21. 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 18 y Figura 19 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de riego en ambos escenarios.

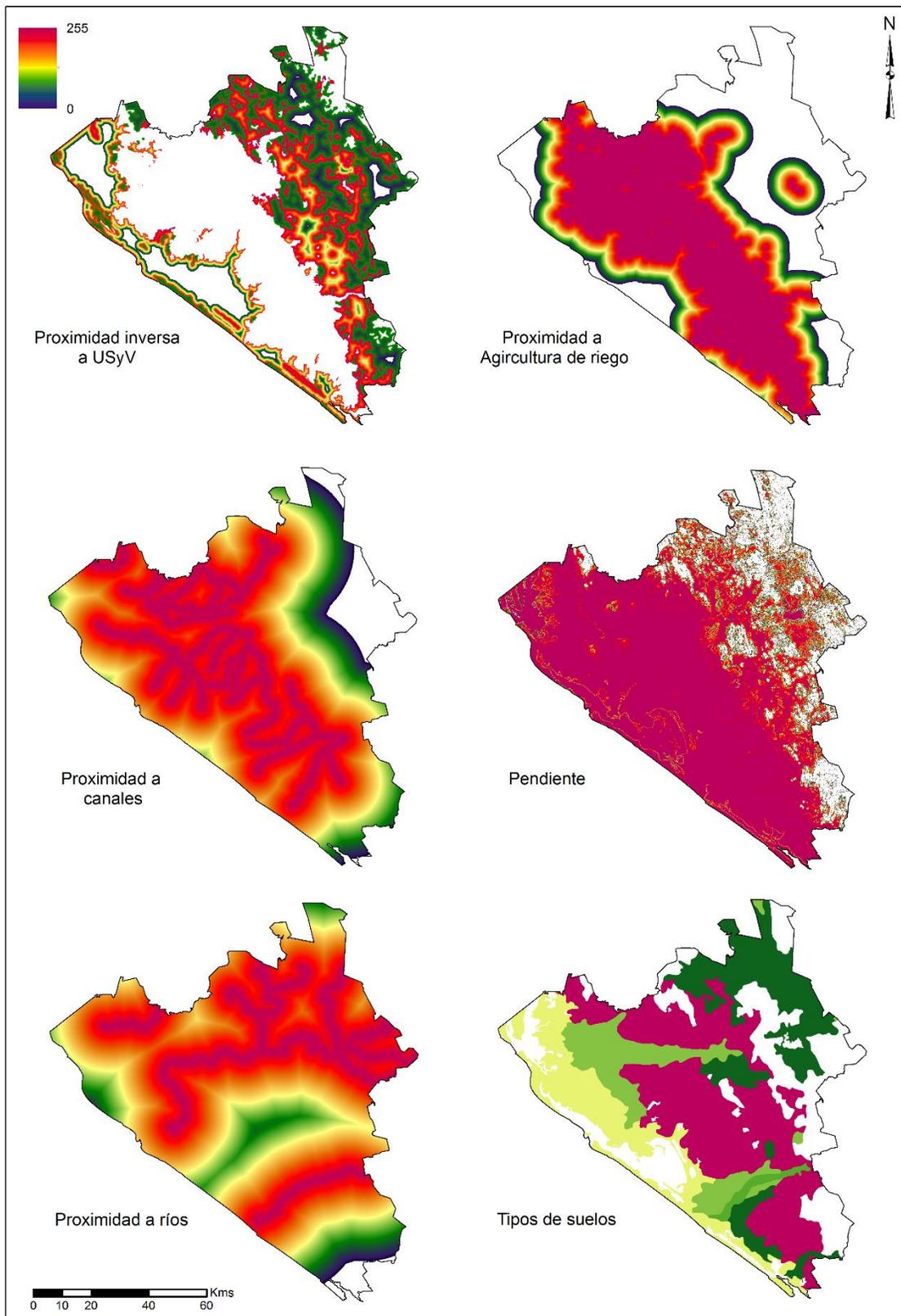


Figura 18. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de tendencia

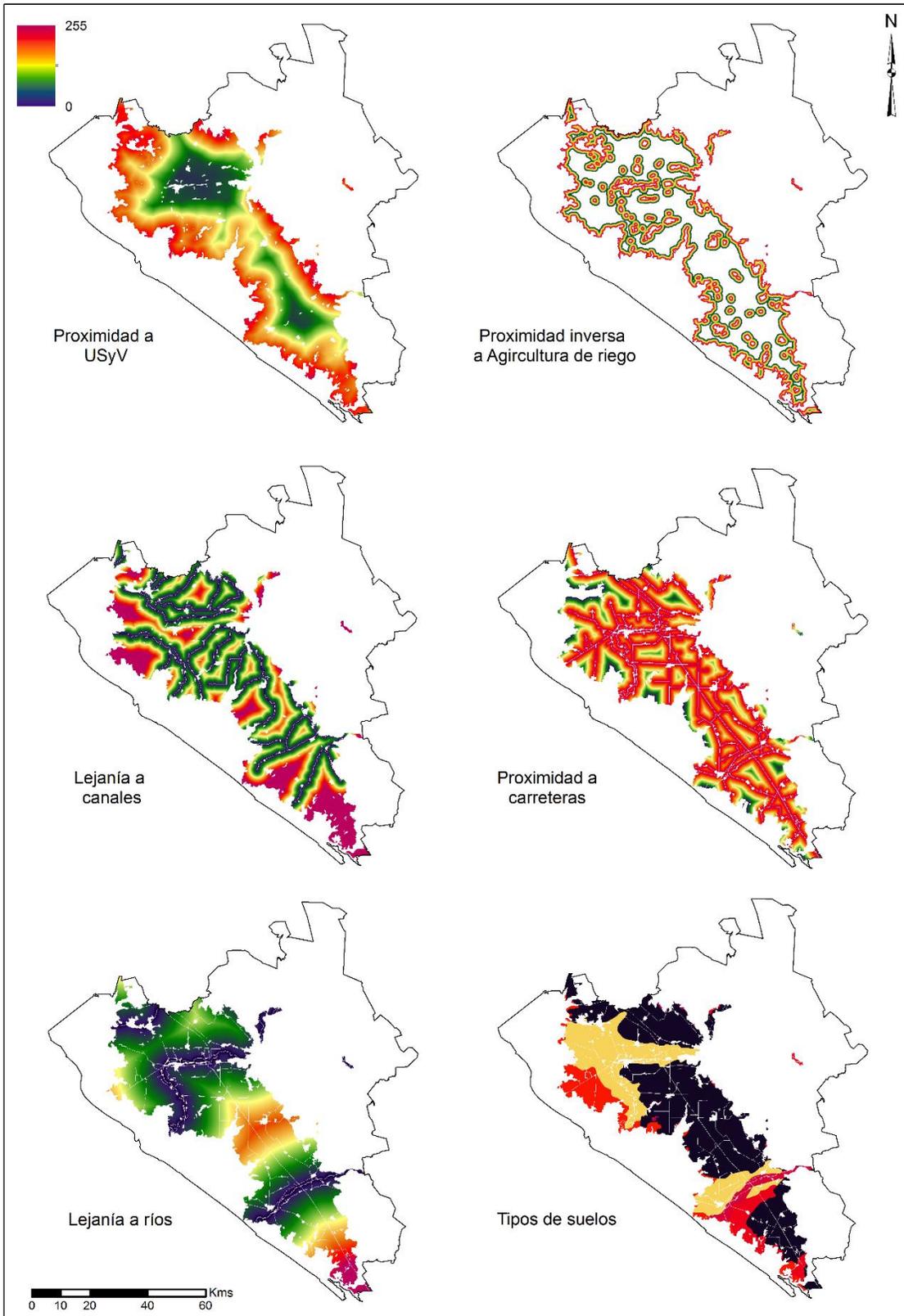


Figura 19. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de sostenibilidad

8.4.2.2 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 22).

Tabla 22. Proximidad a USyV reclasificados según su idoneidad para la agricultura de temporal

	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 23).

Tabla 23. Proximidad inversa a USyV reclasificados según su aptitud para la agricultura de temporal

	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 sigmoideal 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 24).

Tabla 24. Pesos de los tipos de suelo para la agricultura de temporal

Tipos de suelo	Pesos	
	E. Tendencial	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 25 se muestran todos los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

Tabla 25. 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 20 y Figura 21 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.

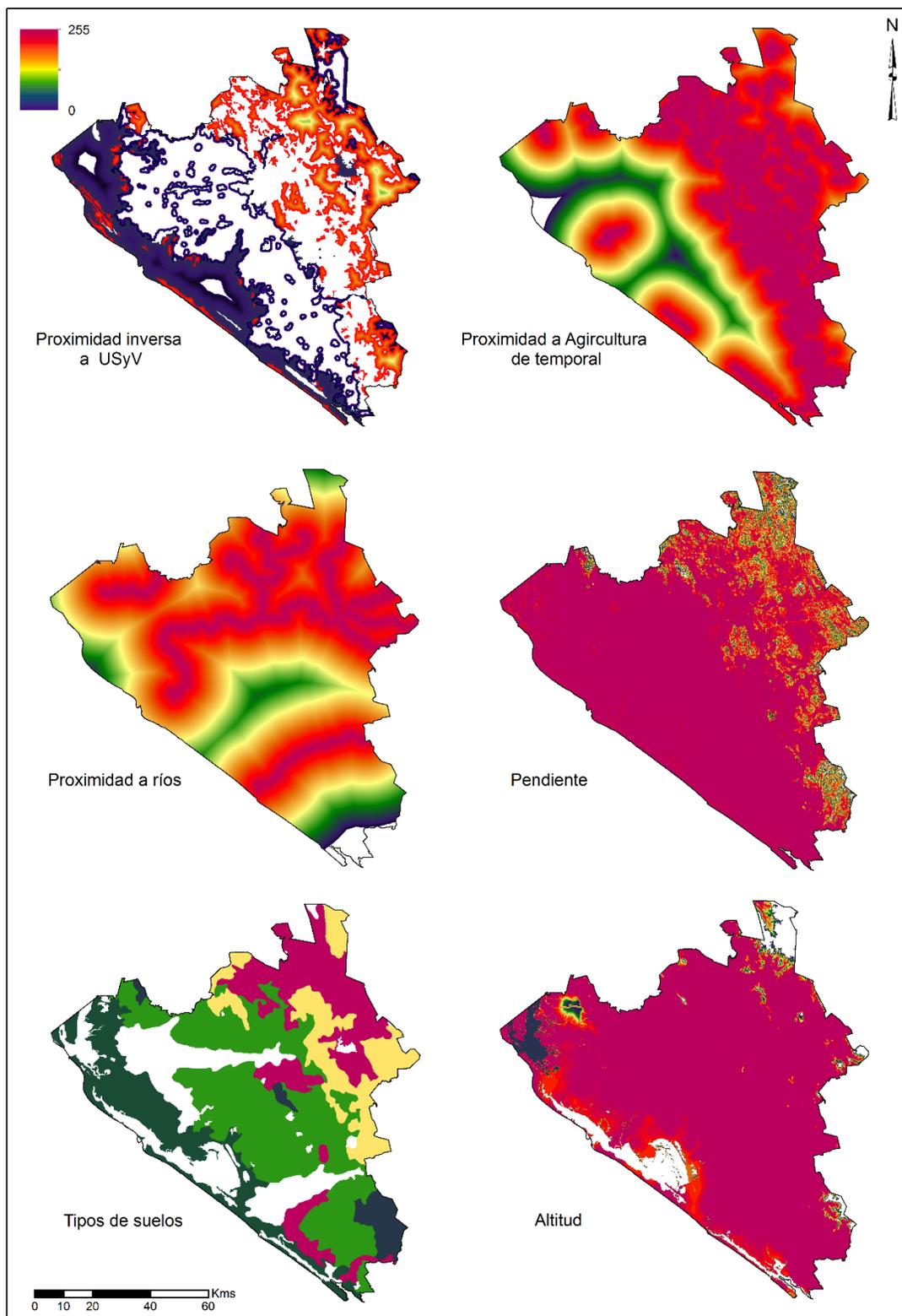


Figura 20. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de tendencia

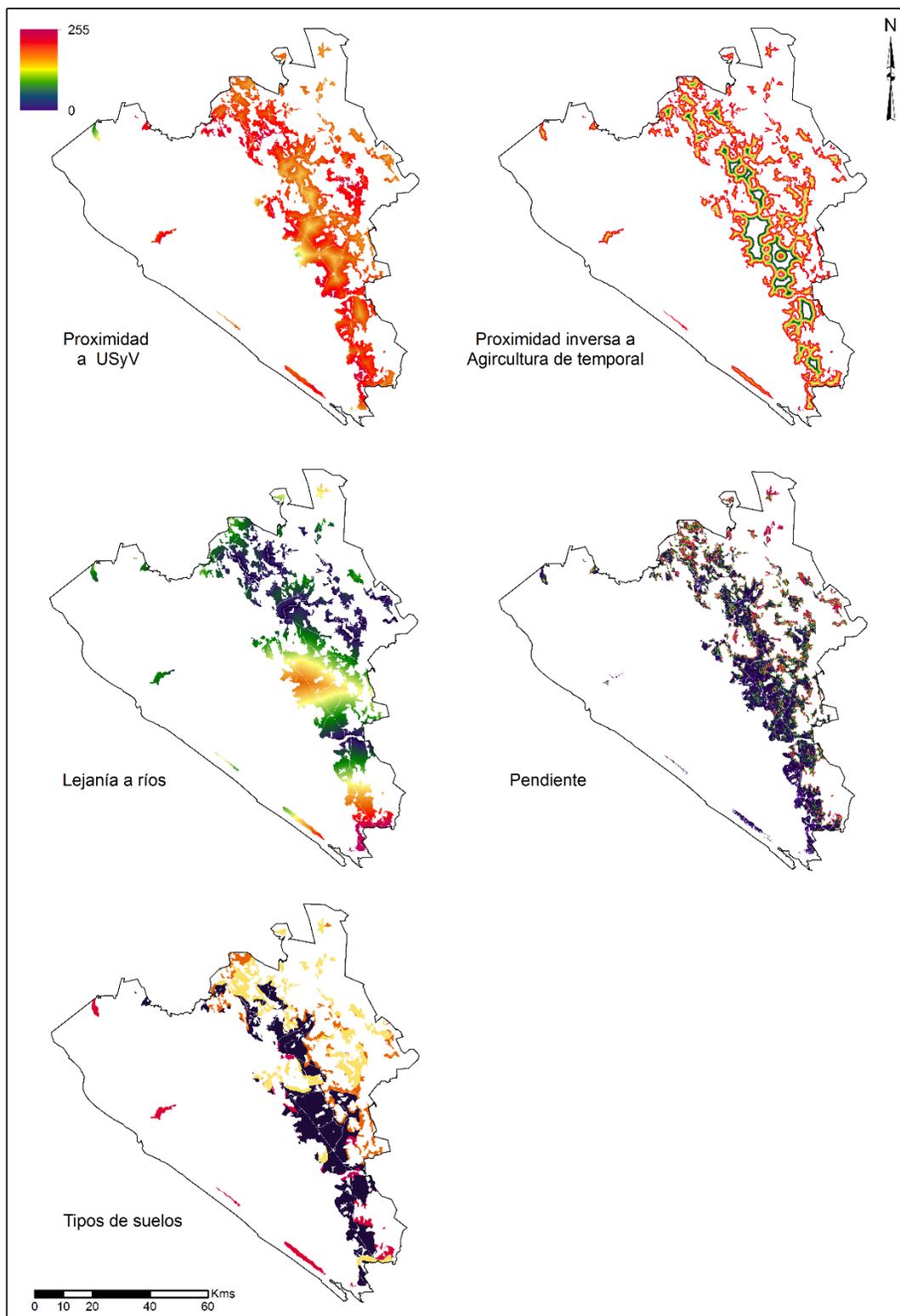


Figura 21. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de sostenibilidad

8.4.2.3 Asentamientos humanos

Proximidad a Asentamientos humanos

Para la normalización de éste factor, se siguió una metodología particular, con la finalidad de obtener las distancias (ponderadas) a los asentamientos humanos más importantes. Primero, se realizó una clasificación de los asentamientos humanos en función de la población de cada uno de ellos y del crecimiento que han experimentado; obteniéndose 5 mapas de asentamientos humanos, los cuales representan los asentamientos más importantes en orden descendente (Tabla 26).

Posteriormente, se realizaron mapas de distancias de los mapas obtenidos, y se normalización utilizando una función lineal decreciente. Las distancias máximas utilizadas, para el escenario de tendencia, se obtuvieron analizando la distancia a la que se dio el crecimiento de los asentamientos humanos del año 1993 al 2011. Se establecieron pesos para cada uno de los mapas normalizados, la ponderación se realizó utilizando el método de comparación por pares de Saaty, el cual establece mediante una matriz de comparación entre pares de factores, el nivel de importancia de cada uno sobre los demás. En este caso, el nivel de importancia se obtuvo promediando la población y el crecimiento experimentado por cada uno de los de asentamientos humanos. Por último, se realizó una sumatoria lineal pondera con los mapas normalizados y los pesos establecidos, para obtener el mapa final de proximidad a asentamientos humanos.

De forma similar se normaliza dicho factor para el escenario de sostenibilidad, diferenciándose solo en la ponderación de los asentamientos humanos clasificados, pues en ésta se da un peso mayor a los poblados de Culiacán y Navolato, con el fin de ajustarse a lo planteado en éste escenario; disminuir el crecimiento no planeado y desconsiderado, utilizando las áreas disponibles dentro de la ciudad. En la Tabla 26, se resumen las distancias y los pesos que se utilizaron en la normalización de este factor en los dos escenarios.

Tabla 26. Distancias y pesos para la obtención del factor Proximidad a asentamientos humanos

Asentamientos humanos	Dist. de Normalización	Pesos E. Tendencial	Pesos E. Sostenible
1.- Culiacán	0 a 5,000	0.65	0.40
2.- Navolato	0 a 4,000	0.15	0.25
3.- Costa Rica y Villa Juárez	0 a 2,000	0.10	0.20
4.- El dorado	0 a 1,800	0.07	0.10
5.- Todos los demás	0 a 1,500	0.03	0.05

Proximidad a Carreteras

Este factor considera, que mientras menor sea la distancia a las carreteras habrá un mayor nivel de adecuación para que se dé el crecimiento de los asentamientos humanos, pues la cercanía a las vías de acceso se considera como un factor importante para el desarrollo de dicha actividad. La normalización se realizó partiendo de un mapa de distancias a carreteras, se utilizó una función lineal decreciente, donde el valor máximo, para el escenario de tendencia, se utilizó la distancia máxima a carreteras a la que se dio el crecimiento de asentamientos humanos en el pasado. Para el escenario de sostenibilidad se utilizó el mismo valor, pues éste se considera adecuado para que el resultado de su aplicación presente una buena accesibilidad, así como patrones de crecimiento compactos.

Proximidad inversa a Usos de suelo

Para este criterio, primero, se obtienen la distancia inversa a la que se debe dar el crecimiento de los asentamientos humanos sobre cada categoría de uso de suelo, después, con los mapas de distancias se obtiene un mapa de aptitud mediante una sumatoria lineal ponderada, utilizando como pesos las tasas de crecimiento de los asentamientos humanos sobre las demás categorías, para ambos escenarios se utilizan la misma distancia para realizar la normalización, la diferencia radica en los pesos de cada uno, mientras que en el escenario tendencial las selvas tiene un peso elevado, en el sostenible tienen uno igual a cero, pues se descartan para que se el crecimiento de ésta actividad (Tabla 27).

Tabla 27. Distancias y pesos para la obtención del factor Proximidad inversa a Usos de suelo

USyV	Dist. de Normalización	Pesos E. Tendencial	Pesos E. Sostenible
Agricultura de riego y humedad	0 a 6,000	0.71	0.71
Agricultura de temporal	0 a 4,500	0.19	0.19
Selvas	0 a 4,000	0.10	0.10

Pendientes

Para el escenario de tendencia, se analizó la pendiente a la que se ha dado el crecimiento de los asentamientos humanos en el pasado, obteniendo que las pendientes van de 0 hasta 12 %. La normalización se realizó, mediante una función sigmoideal decreciente, donde el valor más óptimo es igual a 0 y el valor de menor aptitud es 12.

Para el escenario sostenible, la adecuación fue considerada inversamente proporcional al

valor de la pendiente en cada píxel, fijándose adecuación nula a partir del 10 % de pendiente del terreno. Con esto se intenta garantizar que las nuevas zonas urbanas se asignen en sitios topográficamente llanos, con la finalidad de minimizar el coste de construcción y de introducción de los servicios básicos.

Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos como la más adecuadas para que se presente la expansión de los asentamientos humanos. Es decir, a menor distancia a los ríos, mayor aptitud. Este criterio se normalizó utilizando una función lineal decreciente de 0 a 9,000 para ambos escenarios.

Proximidad a Asentamientos humanos y a Carreteras (Restricción)

Es un mapa binario restrictivo de las distancias a carreteras y a asentamientos humanos existentes. Representa solo el área próxima a las carreteras y a los asentamientos humanos en la que es posible que se presente el crecimiento.

Para su obtención, primero se analizó a que distancias de las carreteras y de los asentamientos humanos se ha dado el crecimiento en el pasado. También se tomó en cuenta las distancias máximas hacia estos que son más apropiadas para que se presente la expansión de asentamientos humanos. Una vez determinadas las distancias, se realizaron buffers de los mapas de carreteras y de asentamientos humanos, los cuales se sumaron para conformar el mapa restrictivo de distancias a carreteras y asentamientos humanos. Este factor se utilizó en el escenario de sostenibilidad con la finalidad de que los posibles poblados se presenten dentro de las distancias propicias.

Área urbanizable programada:

Este factor se utiliza solo para el escenario sostenible, partió del mapa de zonas urbanizables programadas proporcionado por el IMPLAN, dicho mapa se reclasificó dando un valor de 255 a todas las áreas del mapa. Pues se espera que cualquier crecimiento que pueda darse en torno a la ciudad se presente en éstas zonas, que son las prioritarias para que se dé el crecimiento de la mancha urbana, según las propuestas para un adecuado ordenamiento territorial de los Planes Estatales y Municipales de Desarrollo vigentes.

En la Tabla 28 se muestran todos los valores utilizados en la normalización de los factores, asimismo, en la Figura 22 y la Figura 23 se presentan los factores normalizados finales.

Tabla 28. Valores utilizados para la normalización de los factores de Asentamientos humanos

Factores	Función	Valores de adecuación			
		E. Tendencia		E. Sostenible	
		Min	Max	Min	Max
-Proximidad a Asentamientos humanos	Especial SLP				
-Área urbanizable programada	Lineal Creciente	-	-	0	1
-Proximidad inversa a USyV	Especial				
-Proximidad a Carreteras	Lineal Decreciente	0	1,500	0	1,500
-Pendientes	Sigmoidal Decreciente	0	12	0	10
-Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	9000	0	9000
Restricciones					
-Proximidad a Asentamientos humanos y carreteras	Mapa binario			0	2000
-Áreas no urbanizable		No	No		
-Ríos, carreteras y áreas urbanas existentes.					

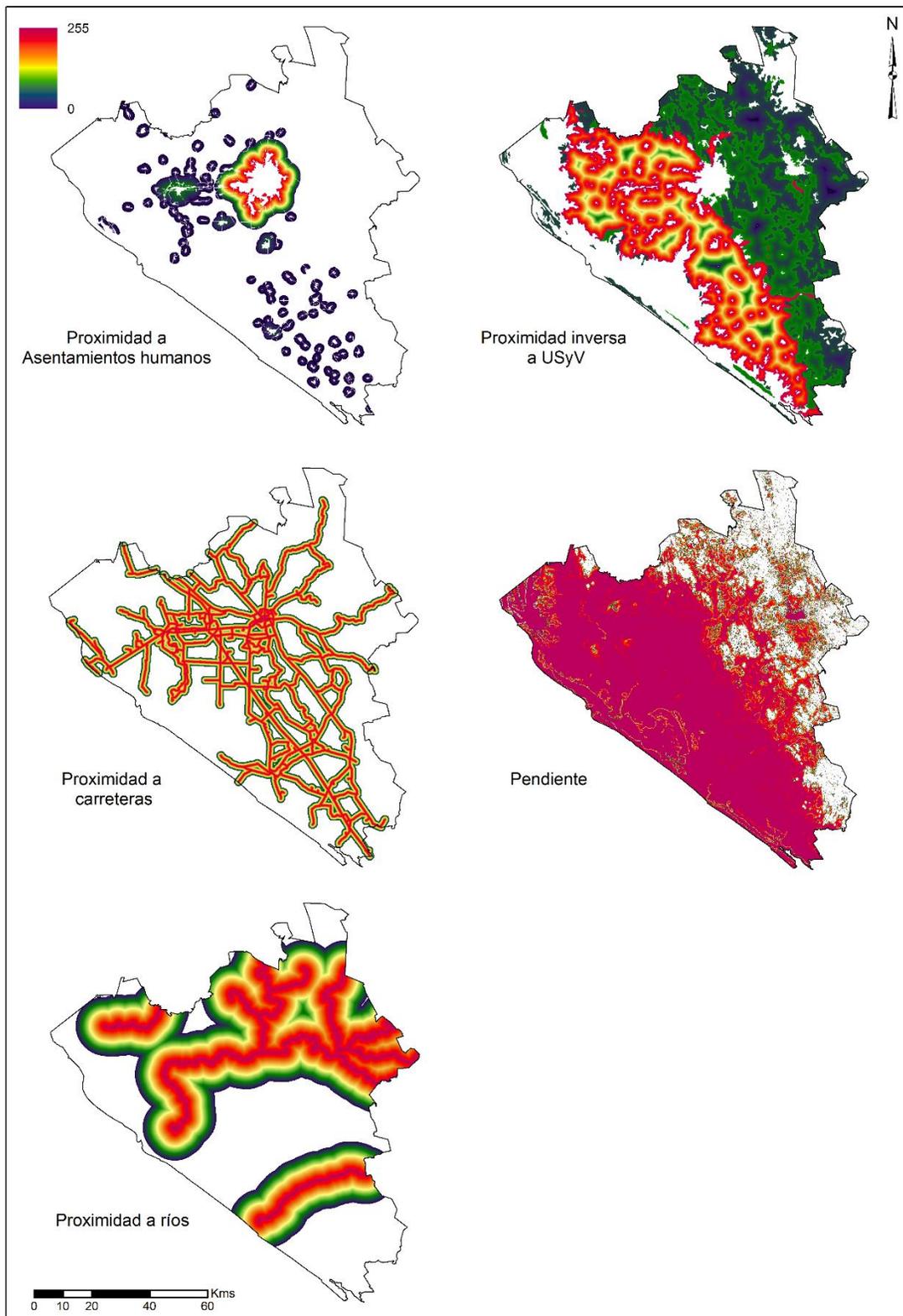


Figura 22. Factores para Asentamientos humanos. Escenario de tendencia

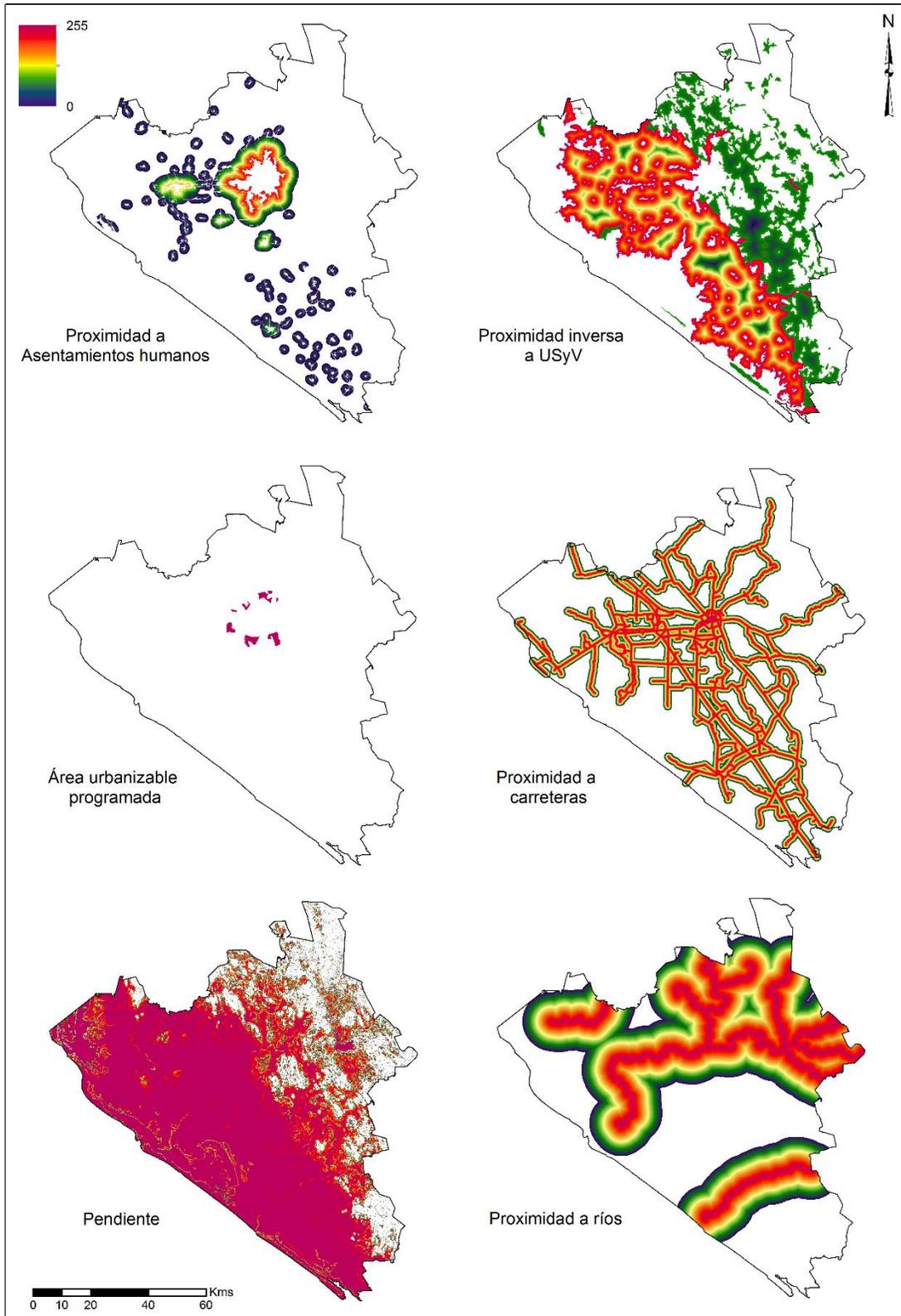


Figura 23. Factores para Asentamientos humanos. Escenario de sostenibilidad

8.4.2.4 Bosques

Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio representa los usos de suelo sobre los que se dará el crecimiento de bosques en ambos escenarios, la cual realmente es una superficie muy baja. Básicamente, las pocas hectáreas que aumente ésta categoría se prevé que sea sobre las selvas, por lo que, se obtiene un mapa de distancias hacia el interior de las selvas, y se determina cual es la distancia máxima sobre las que los bosques pudieran crecer. Dicha distancia es 2,500 en ambos escenarios, por lo que se normaliza usando una función lineal decreciente de 0 a 2,500.

Proximidad a bosques

Considera con mayor aptitud para que se presente el aumento de bosques a aquellas zonas más próximas a estos. Se utiliza en ambos escenarios y se normaliza de la misma forma, primero se obtiene un mapa de distancias a bosques y se normalizada utilizando una función lineal decreciente, donde los valores van de 0 a 3,000.

Altitud

En este factor se representa la altitud propicia para el crecimiento o aumento de superficie de los bosques, utilizándose en los dos escenarios planteados. Para su normalización, se obtuvieron los umbrales de altitud sobre los que se dio el crecimiento de ésta categoría en el pasado, particularmente en el periodo de 1993 a 2011; en conjunto con un análisis de las alturas más idóneas para el desarrollo de dicha actividad. De esta manera, se determinó el umbral de altitud más adecuado para ambos escenarios y se utilizó una función sigmoideal simétrica.

Tipos de suelo ocupados

Representa los tipos de suelo más adecuados para el aumento de los bosques. Para su obtención, se realizó un análisis histórico que consistió en una sobreposición del mapa de cambios de bosques 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, en conjunto con los tipos de suelo más idóneos para que se presente el aumento de bosques. 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 29).

Tabla 29. Pesos de los tipos de suelo para los bosques

Tipos de suelo	Pesos
	E. Tendencial y Sostenible
Cambisol	0.16
Feozem	0.47
Litosol	0.29
Regosol	0.08

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 en ambos escenarios.

En la Tabla 30 se muestran todos los valores utilizados en la normalización de los factores, asimismo, en la Figura 24 se presentan los factores normalizados finales.

Tabla 30. Valores utilizados para la normalización de los factores de los Bosques

Factores	Función	Valores de adecuación			
		E. Tendencia		E. Sostenible	
		Min	Max	Min	Max
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	SLP	SLP
Proximidad a Bosques	Lineal decreciente	0	3,000	0	3,000
Altitud	Sigmoidal simétrica	a = 250	b = 300	c = 700	d = 810
Tipos de Suelos	Lineal creciente	0	0.47	0	0.47
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	24,000	0	24,000

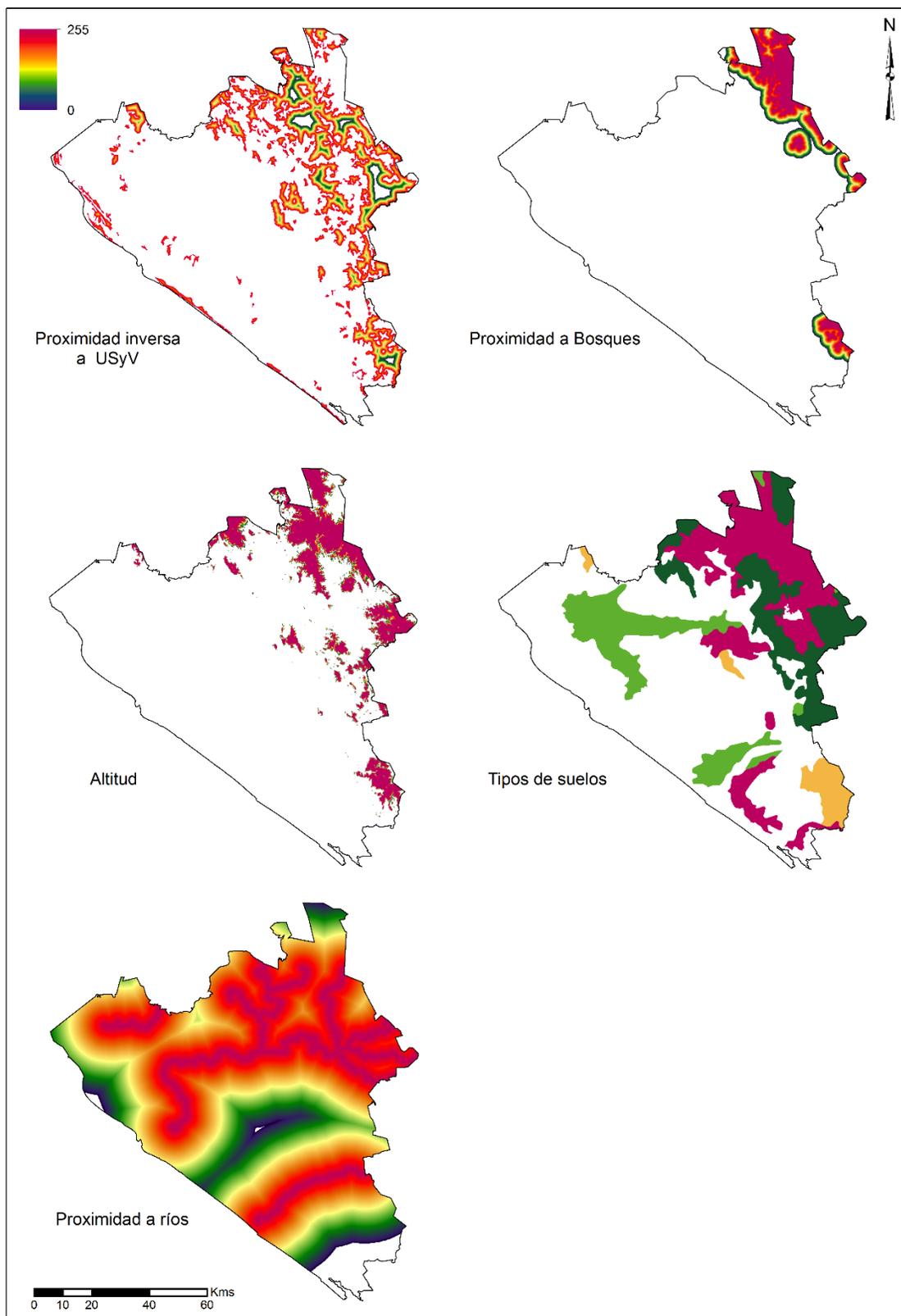


Figura 24. Factores para Bosques. Escenario de tendencia y escenario sostenible

8.4.2.1 Otros tipos

En ésta categoría se agrupan los cuerpos de agua, la vegetación hidrófila, las áreas sin vegetación aparente y la vegetación halófila y gipsófila. Sin embargo, los cuerpos de agua son excluidos de todas las simulaciones al incluirse dentro de las restricciones, por lo tanto, en esta categoría se enfoca en simular los demás usos que la conforman.

Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utiliza solo en el escenario de tendencia, teniendo como objetivo simular la disminución de superficie de esta categoría. Se tomaron en cuenta solo los usos de suelo que contribuirán a las pérdidas, así como las distancias hacia estos. Las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final, se obtuvieron a partir del análisis histórico de los cambios (Tabla 31).

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.62	0 a 8,500
Agricultura de temporal	0.18	0 a 35,000
Pastizales	0.20	0 a 13,000

Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio es utilizado para el escenario de sostenibilidad representa los usos de suelo sobre los que se debe dar el crecimiento de esta categoría, así como las distancias más adecuadas para el desarrollo de esta actividad (Tabla 32).

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.68	0 a 4,000
Agricultura de temporal	0.32	0 a 3,000

Proximidad a Otros tipos

Representa la distancia máxima a la que se debería de dar el crecimiento de esta categoría. Este factor se utiliza en la simulación del crecimiento de la categoría de otros tipos de coberturas en el escenario sostenible.

Proximidad inversa a Otros tipos

Tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de otros tipos se dan las pérdidas de éstas. Considerando las distancias más cercanas como las más óptimas para sufrir pérdidas. Este criterio se utiliza solo en el escenario de tendencia.

Proximidad a Ríos

Este factor se utilizó en el escenario de tendencia para simular las pérdidas de esta categoría, se normalizó considerando las zonas más cercanas a los ríos, como las de mayor aptitud para que esta categoría disminuya.

Proximidad a Carreteras

La proximidad a carreteras es un factor importante para la pérdida de esta categoría, utilizado en el escenario de tendencia, este factor considera la distancia máxima a la que se dan las pérdidas, considerando de mayor aptitud cuanto menor es la distancia a las carreteras.

Altitud

En este factor se representa las mejores alturas para que se presente el crecimiento de esta categoría. Se utilizó en el escenario sostenible y se normalizó mediante una función de tipo borrosa sigmoideal decreciente.

En la Tabla 33 se muestran todos los valores utilizados en la normalización de los factores, asimismo, en la Figura 25 y en la Figura 26 se presentan los factores normalizados finales.

Tabla 33. Valores utilizados para la normalización de Otros tipos

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 Otros tipos	Lineal decreciente	-	-	0	3,000
Proximidad inversa a Otros tipos	Lineal decreciente	0	6,000	-	-
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	24,000	-	-
Proximidad a Carreteras	Lineal decreciente	0	13,000	-	-
Altitud	Sigmoidal decreciente	-	-	0	50

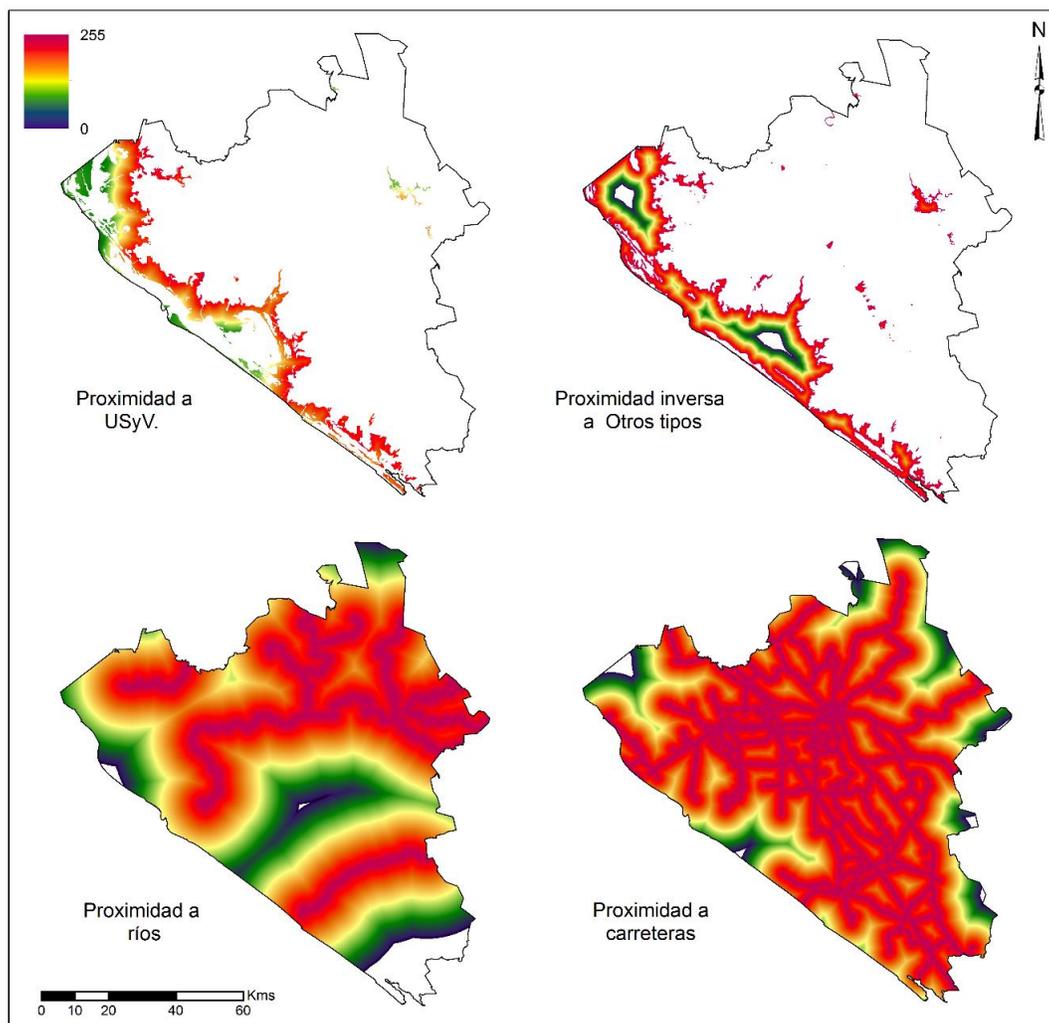


Figura 25. Factores para Otros tipos. Escenario de tendencia

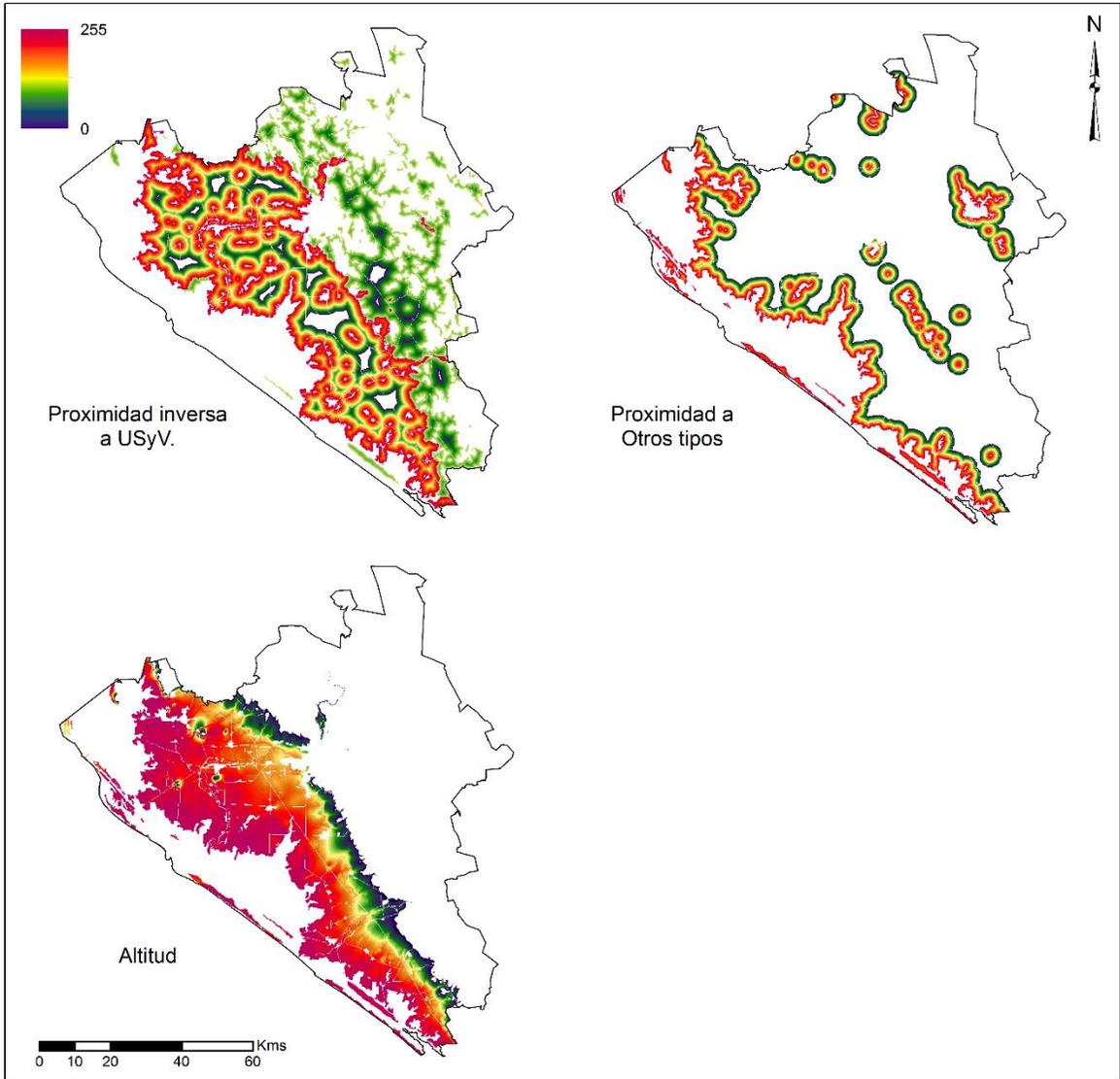


Figura 26. Factores para Otros tipos. Escenario de sostenibilidad

8.4.2.2 Pastizales

Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio representa los usos de suelo sobre los que se dará el crecimiento de pastizales en ambos escenarios, sin embargo, para cada uno se normaliza de diferente forma; para el escenario de tendencia, se realizó un análisis de lo ocurrido en el pasado, para determinar así sobre que usos será el crecimiento y a que distancias según el planteamiento de este escenario, teniendo como resultado las siguientes distancias y pesos, con lo cuales se realizó una sumatoria lineal ponderada para obtener así, el criterio final para este escenario (Tabla 34).

Tabla 34. Proximidad inversa a USyV según su idoneidad para los Pastizales, escenario de tendencia

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.06	0 a 1,100
Agricultura de temporal	0.16	0 a 2,500
Bosques	0.08	0 a 2,300
Selvas	0.7	0 a 7,000

Para el escenario sostenible, este factor se realizó de igual manera, pero tomando en cuenta que el crecimiento de pastizales no afecte las áreas forestales y se de en base de otros usos (Tabla 35).

Tabla 35. Proximidad inversa a USyV según su idoneidad para los Pastizales, escenario sostenible

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.15	0 a 1,100
Agricultura de temporal	0.82	0 a 2,500
Selvas	0.03	0 a 5,000

Proximidad a Pastizales

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a los pastizales, es utilizado para la simulación de crecimiento de dicha categoría en los dos escenarios.

Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría para ambos escenarios.

Pendiente

En este factor se representan las alturas más óptimas para el aumento de pastizales en ambos

escenarios. Se obtuvieron los umbrales adecuados, para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoideal decreciente.

Tipos de suelo ocupados

Representa los tipos de suelo más adecuados para que se presente esta actividad. Para su obtención, se realizó un análisis histórico que consistió en una sobreposición del mapa de cambios de pastizales 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 tipo de suelo, de acuerdo con 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. En ambos escenarios se normaliza mediante una función borrosa de tipo lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el valor máximo corresponde al valor del peso más alto (Tabla 36).

Tabla 36. Pesos de los tipos de suelo para los pastizales

Tipos de suelo	Pesos
	E. Tendencial y Sostenible
Feozem	0.48
Litosol	0.11
Vertisol	0.41

En la Tabla 37 se muestran todos los valores utilizados en la normalización de los factores, asimismo, en la Figura 27 se presentan los factores normalizados finales para pastizales.

Tabla 37. Valores utilizados para la normalización de los factores de Pastizales

Factores	Función	Valores de adecuación			
		E. Tendencia		E. Sostenible	
		Min	Max	Min	Max
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	SLP	SLP
Proximidad a Pastizales	Lineal decreciente	0	30,000	0	30,000
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	12,000	0	12,000
Pendiente	Sigmoideal decreciente	0	55	0	55
Tipos de Suelo	Lineal creciente	0	0.48	0	0.48

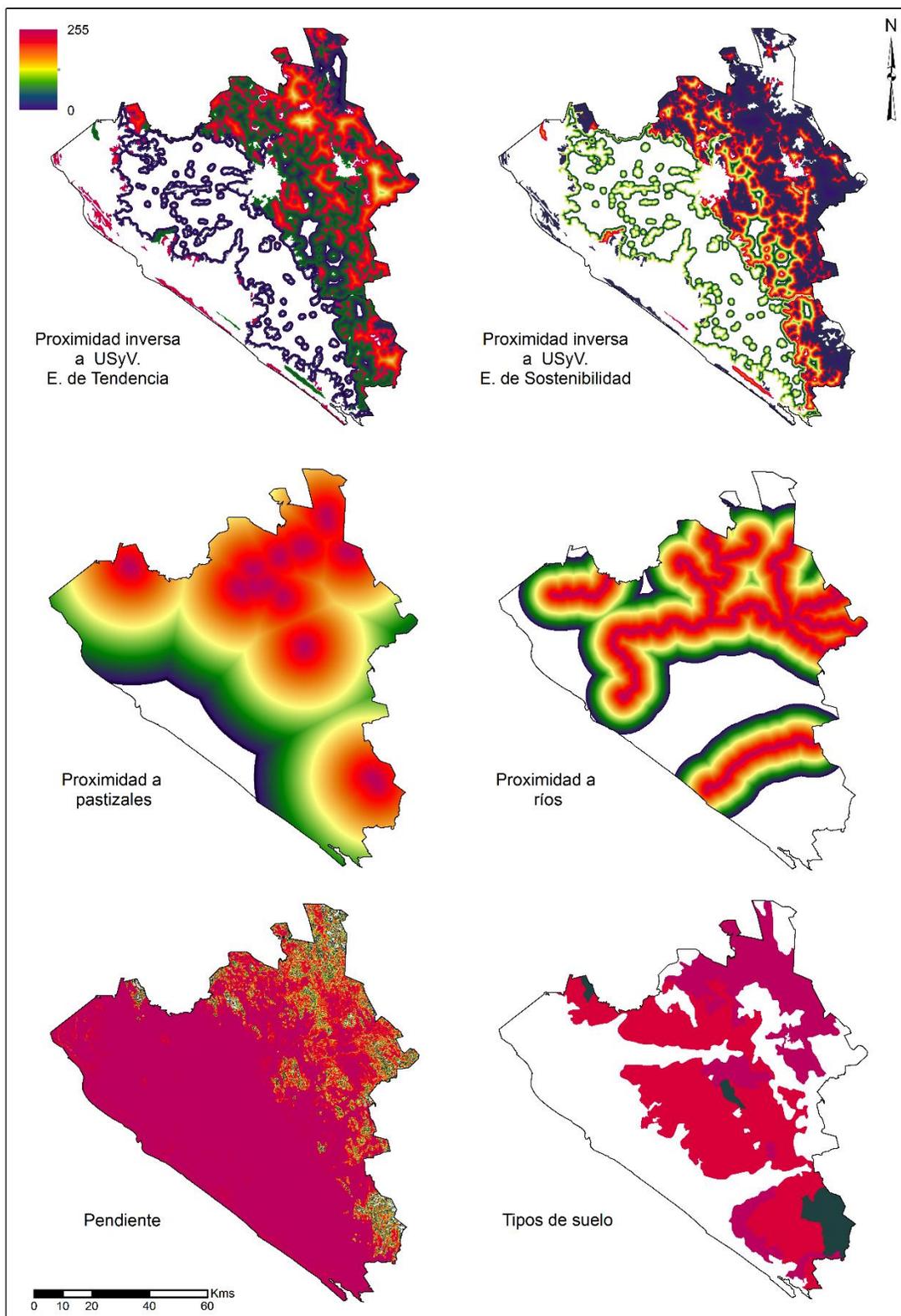


Figura 27. Factores para Pastizales. Escenario de tendencia y de sostenibilidad

8.4.2.3 Selvas

Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utiliza solo en el escenario de tendencia, teniendo como objetivo simular la disminución de superficie de las selvas. Se tomaron en cuenta aquellos usos de suelo que contribuirán a las pérdidas de selvas y se obtuvieron mapas de distancias de estos, para analizar a que distancias se producirán las pérdidas. Resumiéndose a continuación las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el factor final (Tabla 38).

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.07	0 a 40,000
Agricultura de temporal	0.74	0 a 30,000
Asentamiento humano	0.02	0 a 50,000
Bosques	0.04	0 a 10,000
Otros tipos	0.09	0 a 25,000
Pastizales	0.04	0 a 15,000

Proximidad inversa a Usos de suelo

Este factor es utilizado para representar los usos de suelo sobre los que se debe dar el crecimiento de las selvas en el escenario de sostenibilidad. De esta forma los usos de suelo en los cuales se dará el crecimiento de esta categoría, así como las distancias más adecuadas para el desarrollo de esta actividad se muestran en la Tabla 39.

	Pesos	Dist. de Normalización
Agricultura de riego y humedad	0.14	0 a 4,000
Agricultura de temporal	0.78	0 a 3,000
Otros tipos	0.08	0 a 4,000

Proximidad a Selvas

Representa la distancia máxima a la que se debería de dar el crecimiento de las selvas. Este factor se utiliza en la simulación del crecimiento de selvas en el escenario sostenible.

Proximidad inversa a Selvas

Tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de las selvas se dan las pérdidas de éstas. Considerando las distancias más cercanas como las más óptimas para sufrir pérdidas. Este criterio se utiliza solo en el escenario de tendencia.

Proximidad a Carreteras

La proximidad a carreteras es un factor importante para la pérdida de las selvas, utilizado en el escenario de tendencia, este factor considera la distancia máxima a la que se dan las pérdidas, considerando de mayor aptitud cuanto menor es la distancia a las carreteras.

Lejanía a Carreteras

Al contrario del factor de proximidad a carreteras, en este criterio se valora con mayor aptitud para el desarrollo de selvas a aquellas zonas más lejanas a las carreteras, si consideramos que mientras más alejados se encuentran de éstas, se producirá menor pérdida de superficie, teniéndose menor riesgo de deforestación y mayor posibilidad de reforestación. Este factor, es utilizado en el escenario de sostenibilidad, y se normaliza utilizando una función lineal creciente.

Proximidad a Ríos

Este factor se utiliza para simular el crecimiento de las selvas, planteado en el escenario sostenible. Se considera que el crecimiento de las selvas se darás en las zonas más cercanas a los ríos pues la accesibilidad al agua es fundamental para el desarrollo de cualquier tipo de vegetación. Así, los lugares más próximos a los cuerpos de agua se valoran como los más óptimos para que se pudiera presentar el desarrollo de las selvas.

Proximidad a Asentamientos humanos.

Este factor considera que a menor distancia de los asentamientos humanos, habrá mayor aptitud para las pérdidas de las selvas. Se utiliza en el escenario tendencial.

Altitud

En este factor se representa las mejores alturas para que se presente el crecimiento de las selvas. Se utilizó en el escenario sostenible y se normalizó mediante una función de tipo borrosa sigmoideal decreciente.

Tipos de suelo ocupados

Este factor representa a los tipos de suelo en los que es posible que se presente el desarrollo de las selvas. Se utiliza en el escenario sostenible y se normaliza dando mayor aptitud al tipo de suelo más adecuado para que se presente el crecimiento de ésta categoría, primero se

establecieron ordenes de importancia de cada tipo de suelo, con lo que se calculó el peso de cada uno. Con los pesos, se reclasificó el mapa de tipos de suelo, el cual fue normalizado utilizando una función lineal creciente, que va de 0 a 0.38, pues el valor de peso más alto (Tabla 40).

Tabla 40. Pesos de los tipos de suelo para las selvas

Tipos de suelo	Pesos
	E. Sostenible
Feozem	0.35
Litosol	0.12
Regosol	0.38
Solonchak	0.07
Vertisol	0.07

En la Tabla 41 se muestran todos los valores utilizados en la normalización de los factores, asimismo, en la Figura 28 y en la Figura 29 se presentan los factores normalizados finales para pastizales.

Tabla 41. Valores utilizados para la normalización de los factores de las Selvas

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 Selvas	Lineal decreciente	-	-	0	10,000
Proximidad inversa a Selvas	Lineal decreciente	0	7,000	-	-
Proximidad a Carreteras	Lineal decreciente	0	10,000	-	-
Lejanía a Carreteras	Lineal creciente	-	-	0	15,000
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	20,000	0	15,000
Proximidad a Asentamientos humanos	Lineal decreciente	0	50,000		
Altitud	Sigmoidal simétrica	-	-	a = 1 b = 2	c = 400 d =1000
Tipos de Suelo	Lineal creciente	-	-	0	0.38

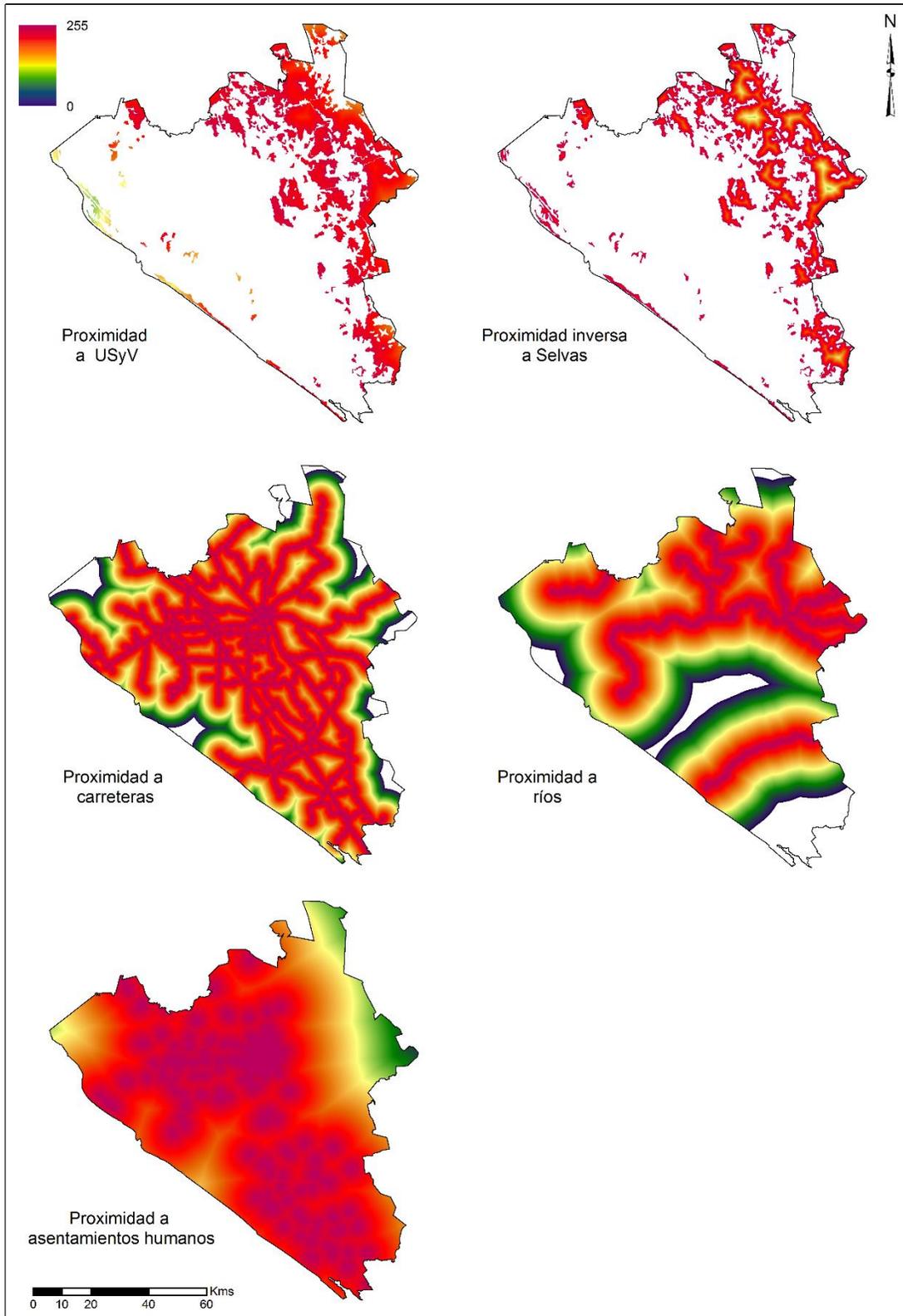


Figura 28. Factores para Selvas. Escenario de tendencia

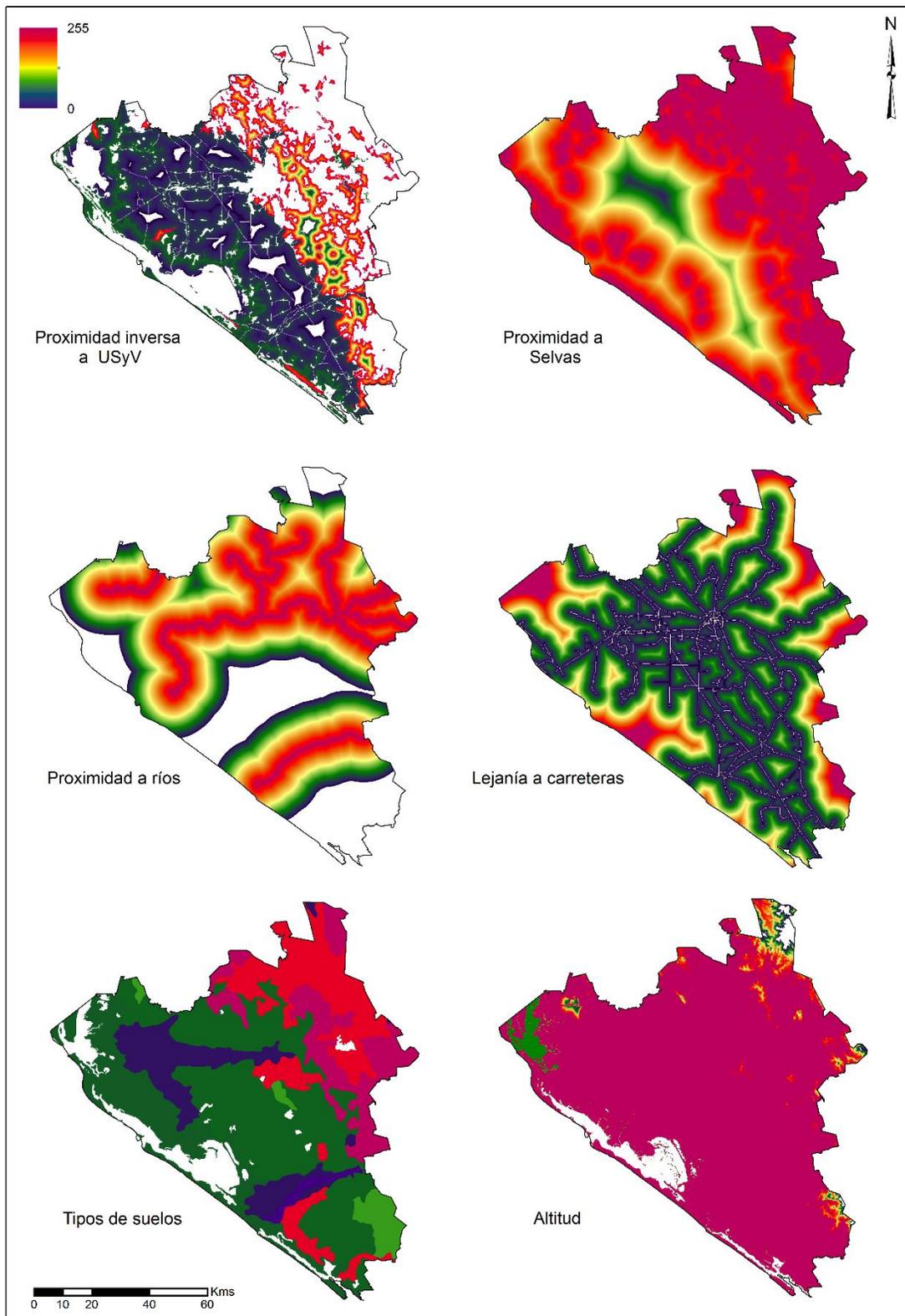


Figura 29. Factores para Selvas. Escenario de sostenibilidad

8.4.3 Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para cada objetivo

8.4.3.1 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 42 y Tabla 43).

Tabla 42. 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 43. 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	1.333	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 30, vemos el mapa de aptitud de la Agricultura de riego y humedad para el escenario de

tendencia, así como 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.

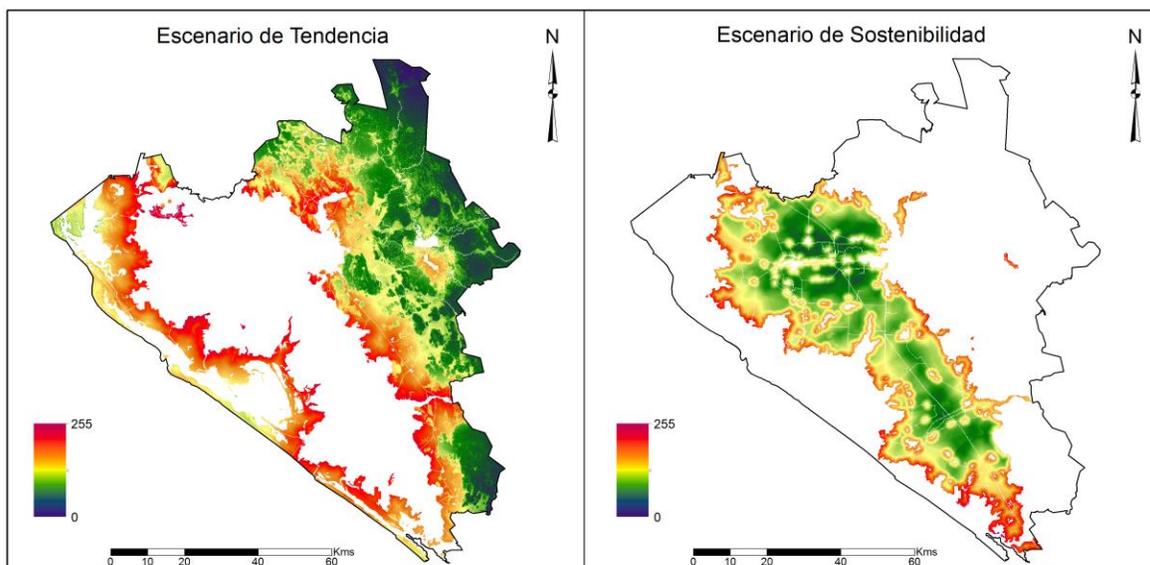


Figura 30. Mapas de aptitud para la agricultura de riego y humedad

8.4.3.2 Agricultura de temporal

La ponderación de los factores para la simulación de agricultura de temporal en ambos escenarios se muestra en la Tabla 44 y la Tabla 45, donde podemos ver el orden jerárquico de cada uno de ellos, así como el peso resultante.

Tabla 44. 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 45. 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 31).

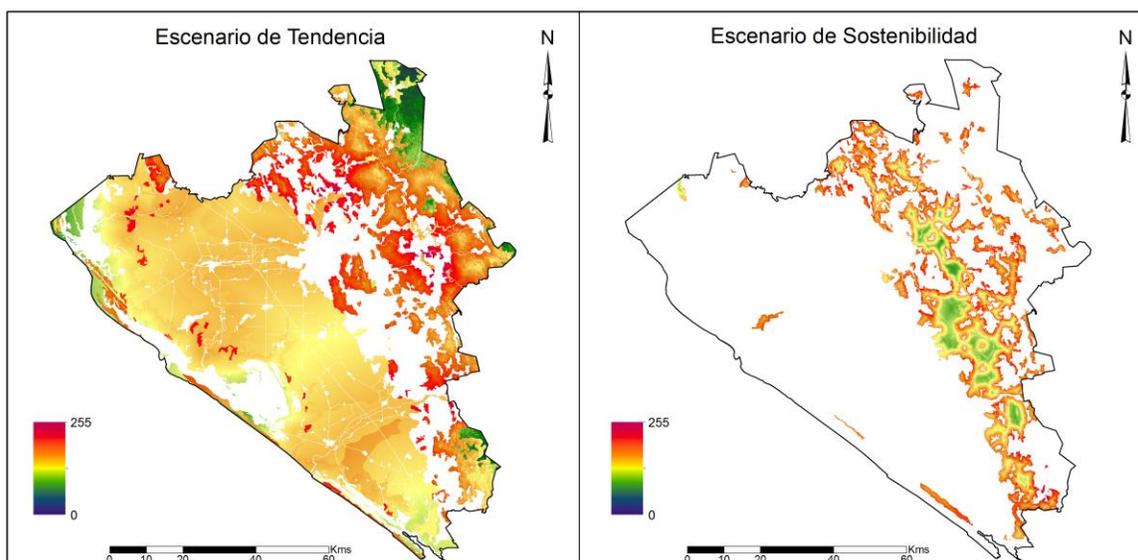


Figura 31. Mapas de aptitud para la agricultura de temporal

8.4.3.3 Asentamientos humanos

En la Tabla 46 y la Tabla 47, se presenta el orden jerárquico y el peso resultante de éste, para cada factor utilizado en la simulación de asentamientos humanos en ambos escenarios. Con los cuales, mediante la utilización de sumatoria lineal ponderada, se obtuvieron los mapas de aptitud para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad (Figura 32)

Tabla 46. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Asentamientos humanos en el Escenario de tendencia

Factores	5	4	3	2	1	Peso
5) Proximidad a Ríos	1	---	---	---	---	0.05
4) Pendiente	2	1	---	---	---	0.10
3) Proximidad a Carreteras	3	1.5	1	---	---	0.25
2) Proximidad inversa a USyV	5	2.5	1.667	1	--	0.15
1) Proximidad a Asentamiento humano	9	4.5	3	1.8	1	0.45

Tabla 47. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Asentamientos humanos en el Escenario de Sostenibilidad

Factores	6	5	4	3	2	1	Peso
6) Proximidad a Ríos	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Pendiente	2	1	---	---	---	---	0.09
4) Proximidad a Carreteras	3	1.5	1	---	---	---	0.20
3) Área urbanizable programada	4	2	1.332	1	---	---	0.11
2) Proximidad inversa a USyV	5	2.5	1.667	1.25	1	--	0.15
1) Proximidad a Asentamiento humano	9	4.5	3	2.25	1.8	1	0.40

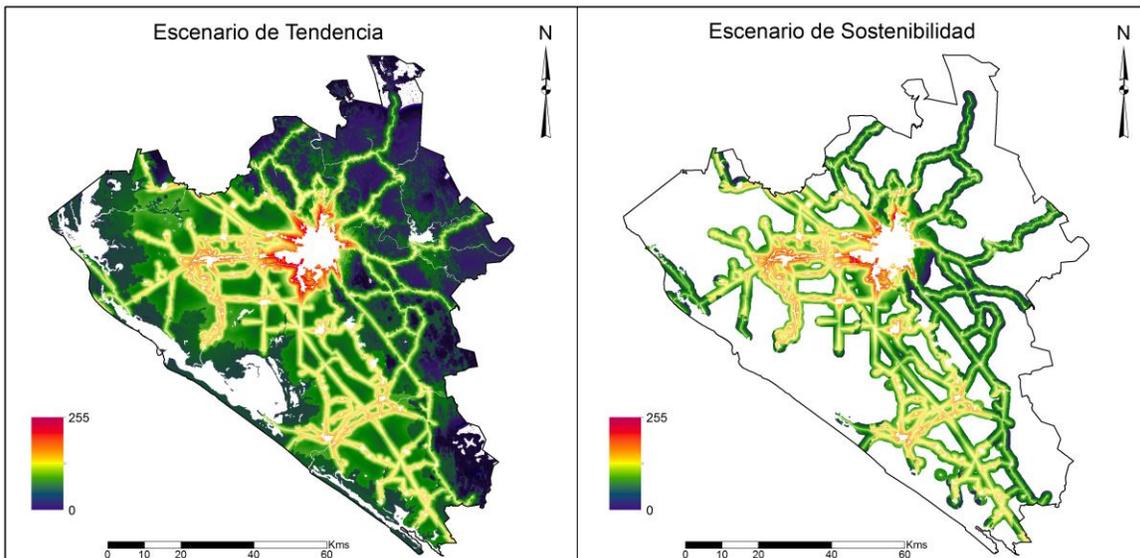


Figura 32. Mapas de aptitud para la asentamiento humano

8.4.3.4 Bosques

El objetivo de simulación de esta categoría es el mismo para ambos escenarios, por lo que, el orden jerárquico, así como el peso resultante, es el mismo para los dos, el factor de mayor peso es la proximidad inversa a USyV y la proximidad a bosques, seguidas por la altitud (Tabla 48).

Tabla 48. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Bosques en el Escenario de tendencia y en el de Sostenibilidad

Factores	5	4	3	2	1	Peso
5) Proximidad a Ríos	1	---	---	---	---	0.07
4) Tipos de suelo	2	1	---	---	---	0.12
3) Altitud	3	1.5	1	---	---	0.20
2) Proximidad a Bosques	4	2	1.333	1	--	0.26
1) Proximidad inversa a USyV	5	3.5	1.667	1.25	1	0.35

Con los pesos determinados y con los factores diseñados, se obtuvo el mapa de aptitud para el escenario de tendencia y de sostenibilidad (Figura 33).

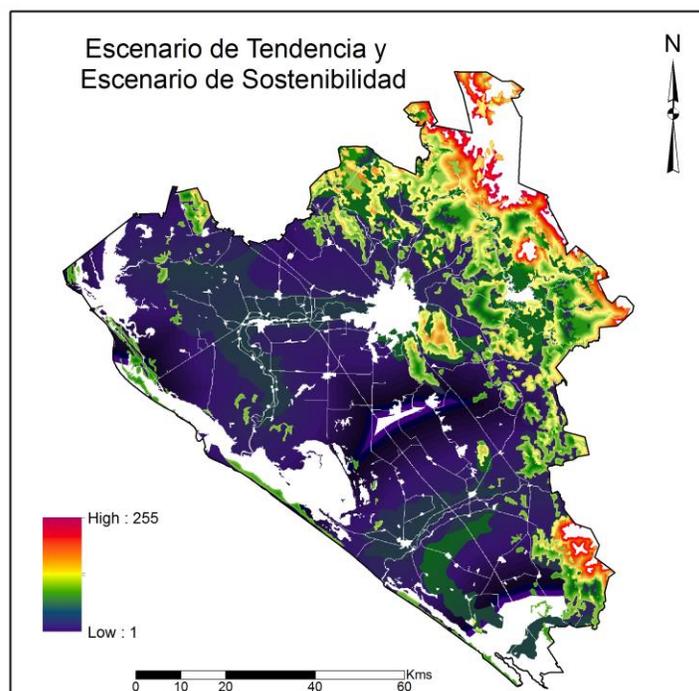


Figura 33. Mapas de aptitud para los bosques

8.4.3.5 Otros tipos

La ponderación de los factores para la simulación de agricultura de temporal en ambos escenarios se muestra en la Tabla 49 y en la Tabla 50, donde podemos ver el orden jerárquico de cada uno de ellos, así como el peso resultante.

Tabla 49. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Otros tipos en el Escenario de tendencia

Factores	4	3	2	1	Peso
4) Proximidad a Ríos	1	---	---	---	0.10
3) Proximidad a Carreteras	2	1	---	---	0.20
2) Proximidad inversa a Otros tipos	3	1.5	1	--	0.30
1) Proximidad a USyV	4	2	1.33	1	0.40

Tabla 50. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Otros tipos en el Escenario de Sostenibilidad

Factores	3	2	1	Peso
3) Altitud	1	---	---	0.20
2) Proximidad a Otros tipos	2	1	--	0.30
1) Proximidad inversa a USyV	3	1.5	1	0.50

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 34).

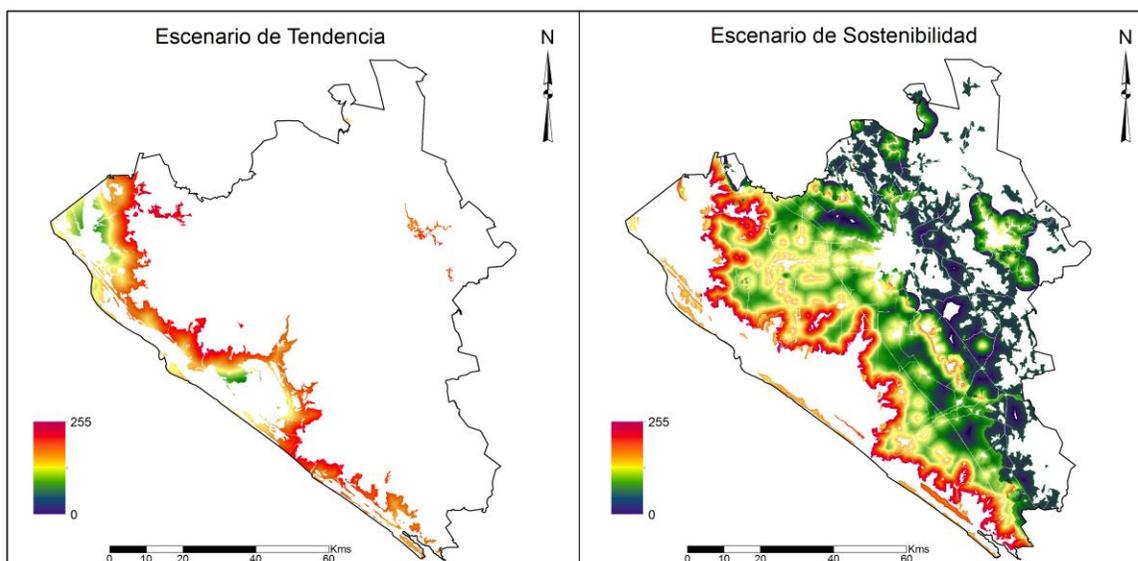


Figura 34. Mapas de aptitud para otros tipos

8.4.3.6 Pastizales

El orden jerárquico, así como el peso resultante de los factores para la simulación de los pastizales, tienen los mismos valores para ambos escenarios (Tabla 51).

Tabla 51. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para Pastizales en el Escenario de tendencia y en el de Sostenibilidad

Factores	5	4	3	2	1	Peso
5) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	0.07
4) Pendiente	2	1	---	---	---	0.12
3) Proximidad a Ríos	3	1.5	1	---	---	0.20
2) Proximidad a Pastizales	4	2	1.333	1	--	0.26
1) Proximidad a inversa a USyV	5	3.5	1.667	1.25	1	0.35

Con los pesos determinados y con los factores diseñados, se obtuvo el mapa de aptitud para el escenario de tendencia y de sostenibilidad (Figura 35).

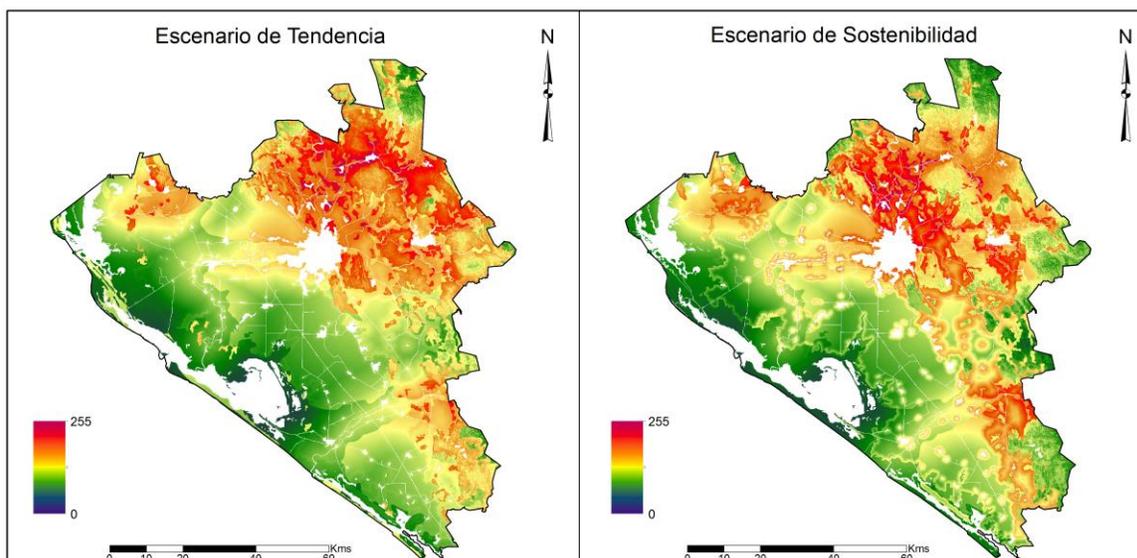


Figura 35. Mapas de aptitud para los pastizales

8.4.3.7 Selvas

En la Tabla 52 y en la Tabla 53, se presenta el orden jerárquico y el peso resultante de éste, para cada factor utilizado en la simulación de las selvas en ambos escenarios.

Tabla 52. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para las Selvas en el Escenario de tendencia

Factores	5	4	3	2	1	Peso
5) Proximidad a A. humanos	1	---	---	---	---	0.05
4) Proximidad a Ríos	2	1	---	---	---	0.10
3) Proximidad a Carreteras	3	1.5	1	---	---	0.15
2) Proximidad inversa a Selvas	5	2.5	1.667	1	--	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	3	1.8	1	0.45

Tabla 53. Jerarquía de importancia de los factores y pesos resultantes para las Selvas en el Escenario de Sostenibilidad

Factores	6	5	4	3	2	1	Peso
6) Altitud	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Tipos de suelo	2	1	---	---	---	---	0.07
4) Lejanía a Carreteras	3	1.5	1	---	---	---	0.10
3) Proximidad a Ríos	4	2	1.333	1	---	---	0.15
2) Proximidad a Selvas	6	3	2	1.5	1	--	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	3	2.25	1.5	1	0.38

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 36).

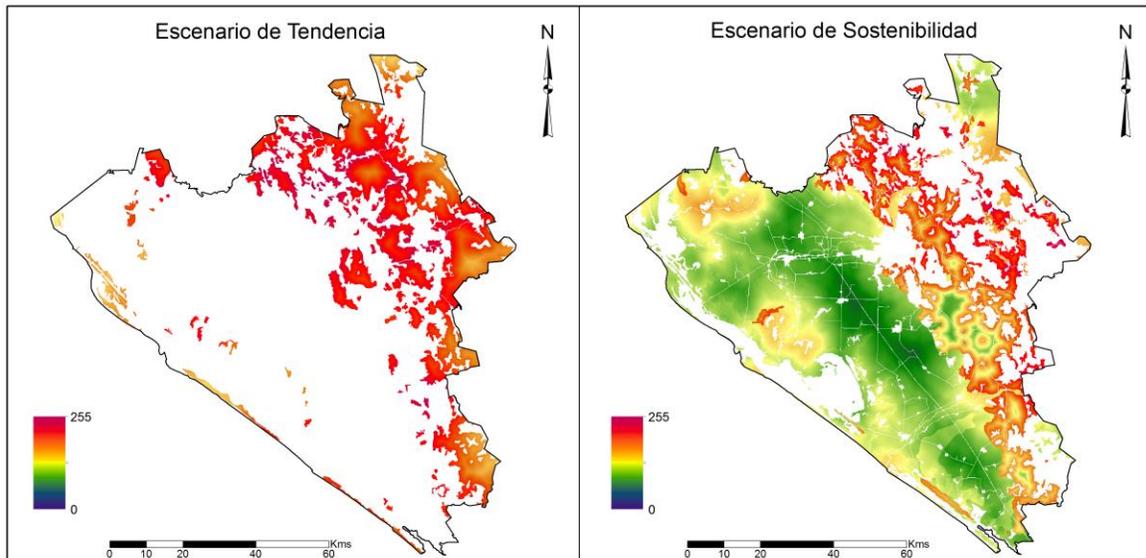


Figura 36. Mapas de aptitud para las selvas

8.4.4 Asignación Multiobjetivo

Una vez con los mapas de aptitud simulados, para resolver posibles conflictos entre ellos, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA), obteniendo un mapa con todos los objetivos (todas las categorías.).

Como los mapas de aptitud se obtuvieron en base a los objetivos de simulación para cada escenario, es decir, si la finalidad en cada categoría era simular aumento o disminución de superficie, dependiendo esto, de los resultados obtenidos en la simulación de demanda de superficie. Fue necesario realizar un procedimiento especial a los mapas antes de efectuar la asignación multiobjetivo. Esto, con la finalidad de obtener directamente un mapa de uso de suelo y vegetación conformado por todas las categorías, es decir, obtener de los mapas de aptitud, las áreas simuladas para el año 2030.

El procedimiento seguido, consistió en reclasificar cada una de las categorías de usos de suelo con una aptitud de 255; posteriormente a estos mapas, se le sumaron o restaron los mapas de aptitud simulados, dependiendo de cuál era el objetivo de simulación, en el caso de las categorías que aumentan de superficies, se sumaron; mientras que, en las que disminuyen de superficie, se restaron.

Obteniendo así, los mapas de adecuación finales para la asignación multiobjetivo para el

escenario de tendencia (Figura 37 y Figura 38) y para el escenario de sostenibilidad (Figura 39 y Figura 40)

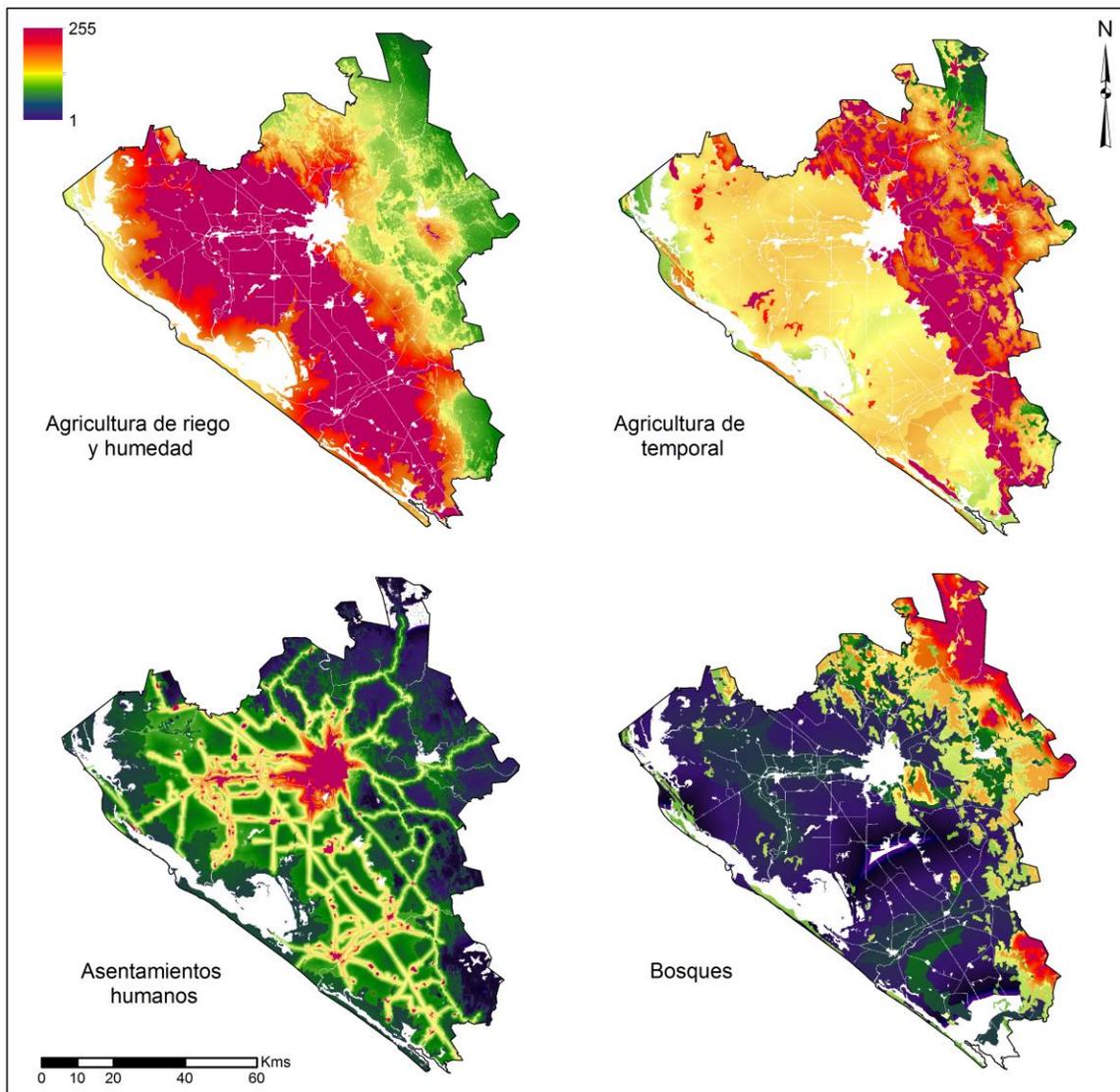


Figura 37. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de tendencia

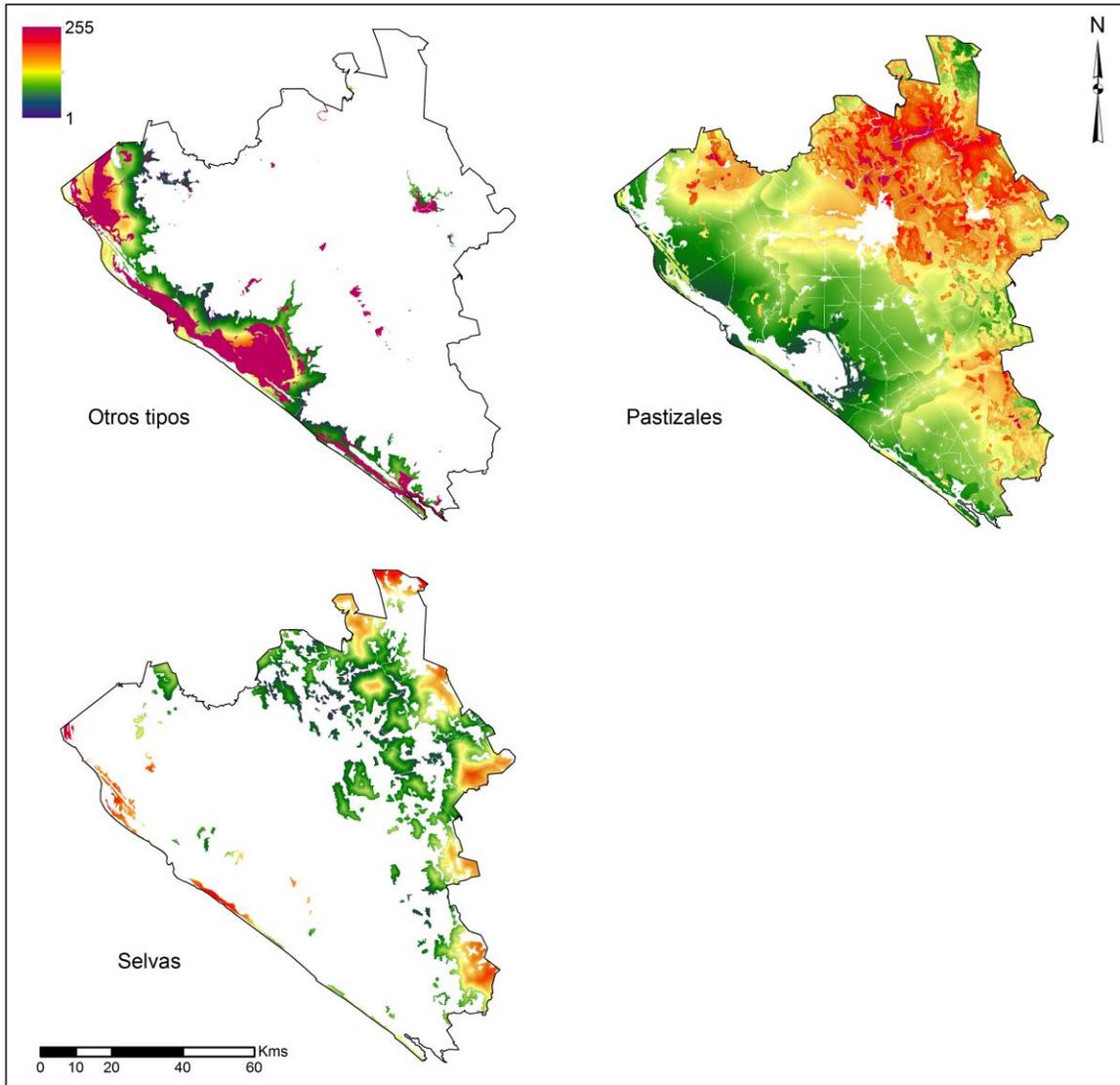


Figura 38. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de tendencia (continuación)

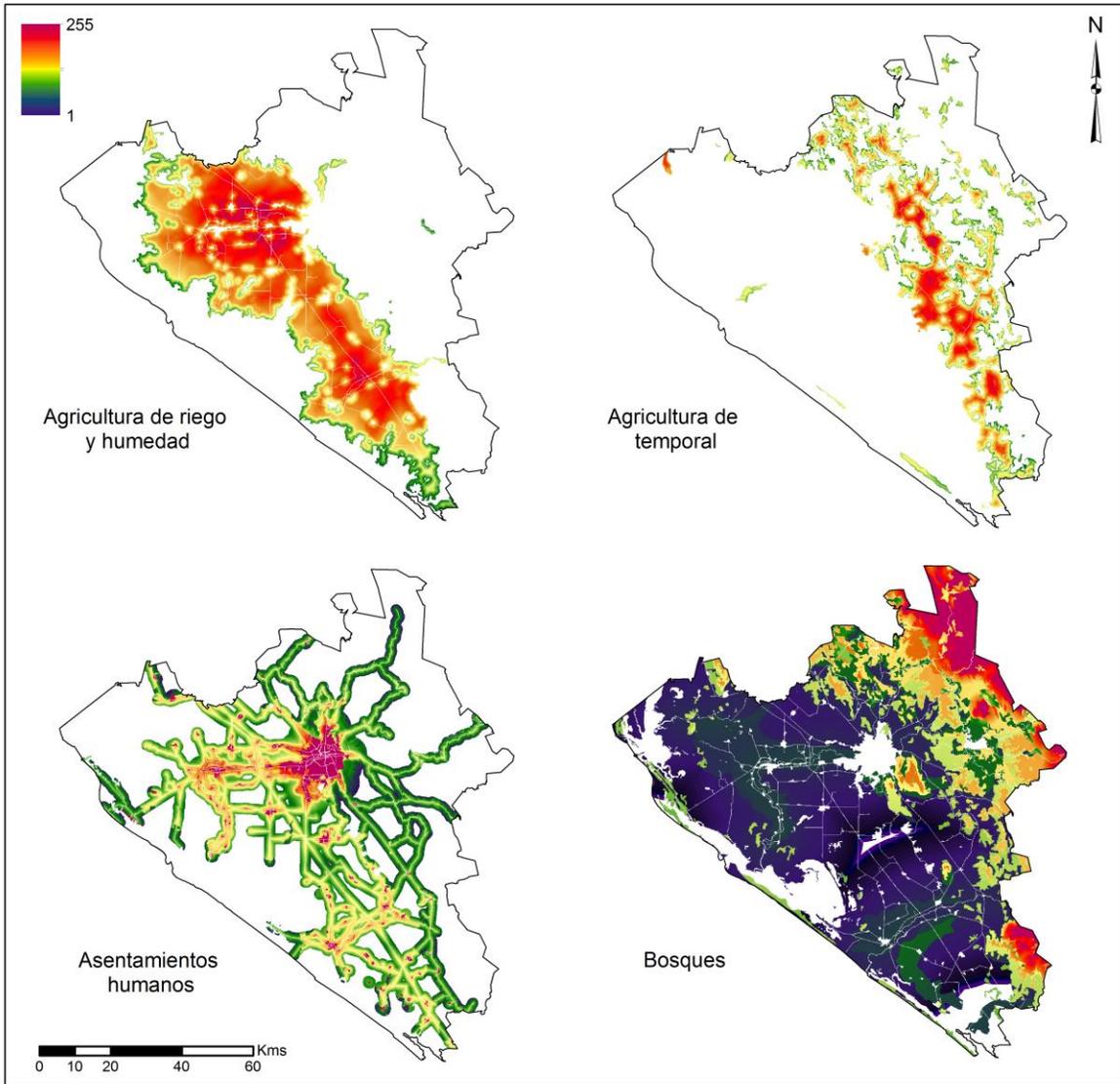


Figura 39. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de sostenibilidad

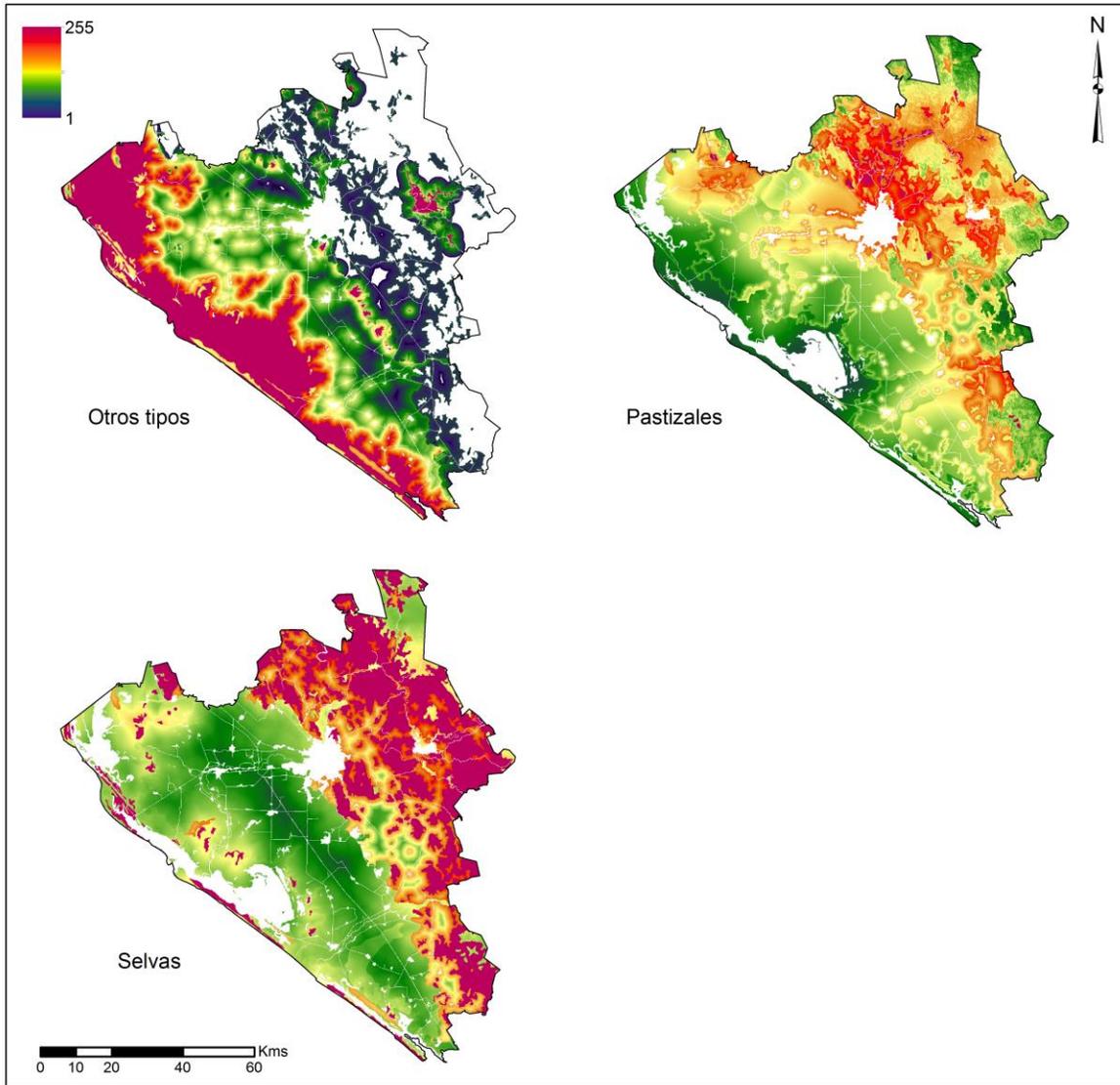


Figura 40. Mapa de aptitud para la asignación multiobjetivo. Escenario de sostenibilidad (continuación)

Con respecto a los pesos de cada objetivo, estos se obtuvieron en el escenario de tendencia, de acuerdo con las tasas de cambios ocurridas en el pasado, de manera que en la asignación multiobjetivo se reflejará la dinámica de cambios de usos de suelo seguidas en los últimos años. Se considera pues, en primer lugar a los asentamientos humanos, seguidos por la agricultura de temporal y la agricultura de riego y humedad, después por la categoría de otros tipos, luego por los pastizales y bosques, las selvas se consideran como el último objetivo, con un peso de cero, para evitar sobrevalorar esta transición, pues al ser ésta la categoría que

más superficie pierde, sobre ella se dará el crecimiento de las demás. Pues de la manera en la que fueron elaborados los factores y los mapas de aptitud, al elegir los mejores pixeles para el crecimiento de la agricultura de temporal, se eligen los mejores para la pérdida de superficie de las selvas.

Para el escenario de sostenibilidad, se buscó dar un peso más equitativo a todas las coberturas, dando un poco más de importancia a las coberturas forestales, posicionando así, a las selvas en primer lugar, con el peso más alto, seguidas por los bosques. Después están, los asentamientos humanos, y las demás categorías con pesos muy cercanos entre sí. Pues se pretende un desarrollo del territorio equitativo y ordenado (Tabla 54).

Tabla 54. Pesos para los objetivos de simulación. MOLA

Usos de Suelo	E. Tendencia	E. Sostenible
1.-Agricultura de Riego	0.20	0.13
2.-Agricultura de temporal	0.25	0.12
3.-Asentamiento humano	0.30	0.15
4.-Bosque	0.03	0.18
5.-Otros tipos	0.15	0.12
6.-Pastizales	0.07	0.10
7.-Selvas	0	0.20

8.4.4.1 Escenarios obtenidos

Finalmente, en base a la información de los mapas de aptitud elaborador para el MOLA, de los pesos para asignar a cada uno de ellos y de la cantidad de área que se asignará a cada uno, obtenida de la simulación de demanda de superficie; se determinó una solución para todos los objetivos. Obteniendo los mapas de uso de suelo y vegetación de cada escenario (Figura 41 y Figura 42).

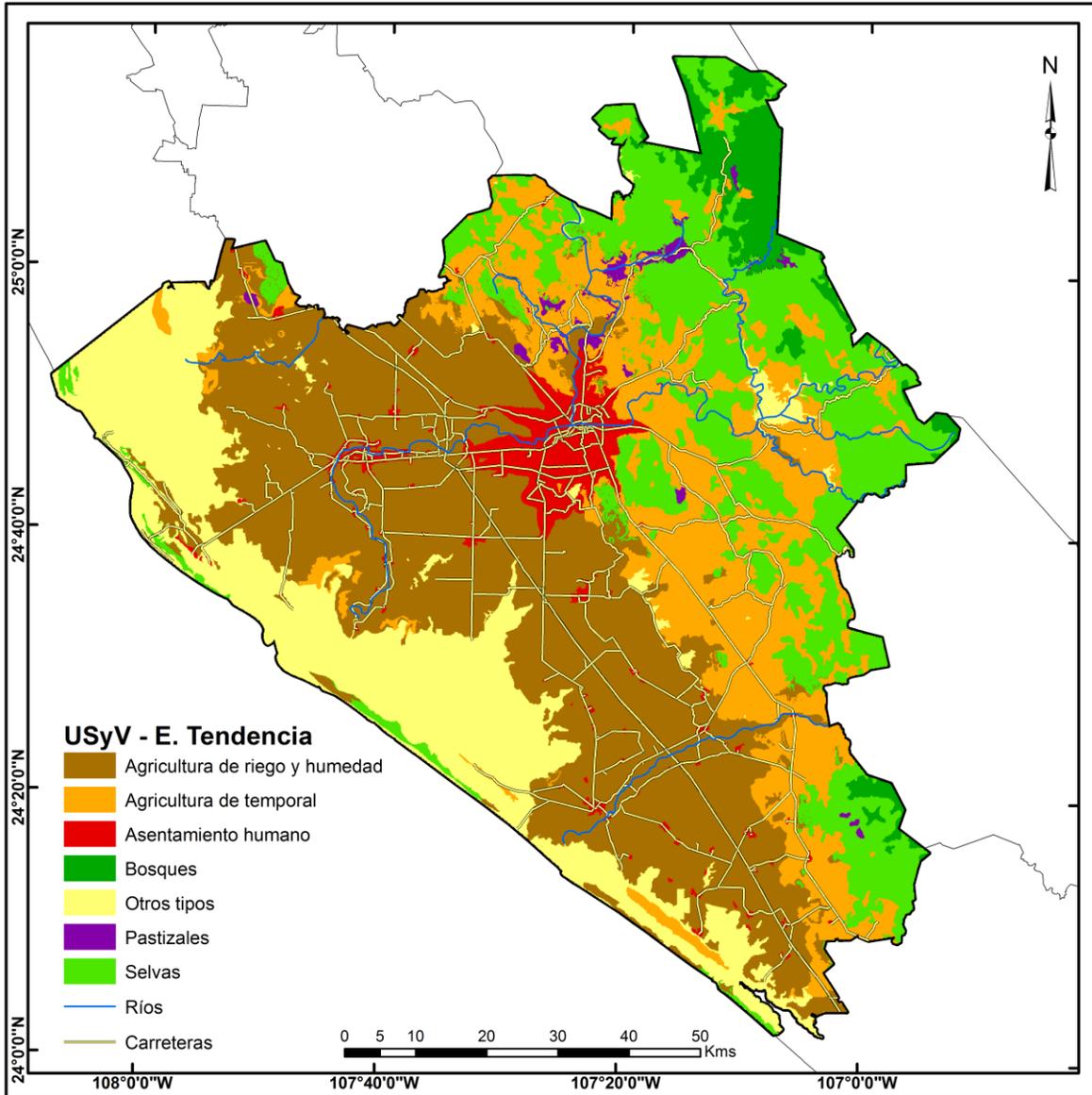


Figura 41. Uso de Suelo y Vegetación 2030. Escenario de Tendencia

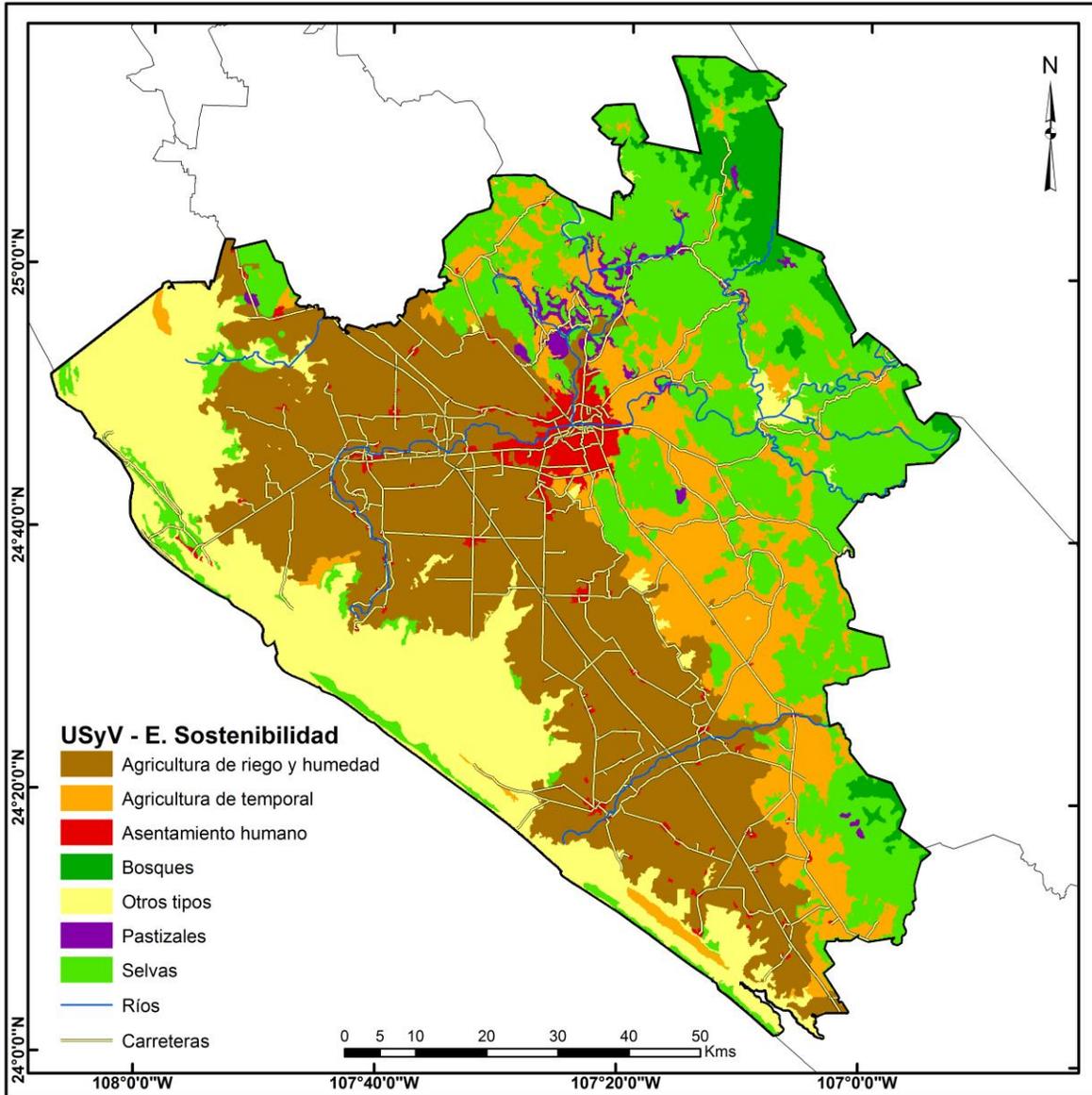


Figura 42. Uso de Suelo y Vegetación 2030. Escenario de Sostenibilidad

8.5 Descripción de la evolución de los cambios en ambos escenario

Considerando los resultados obtenidos en las imágenes alternativas se realizó un análisis de los cambios de usos de suelo futuros para cada escenario al año 2030 tomando como base el mapa base del año 2011. Dicho análisis se obtuvo mediante una matriz de cambios (2011-2030) la cual nos permitió validar las hipótesis de partida de cada línea evolutiva. Es decir, 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, una evolución de las zonas agrícolas sostenible en cuanto al consumo de suelo y un crecimiento de las zonas urbanas mesurado.

Lo anterior se obtiene de forma cuantitativa en las matrices de cambio (Tabla 55 y Tabla 56), donde podemos ver todas las transiciones ocurridas, en el escenario de tendencia, las selvas presentan transiciones prácticamente hacia todas las categorías; mientras que en el de sostenibilidad, las transiciones importantes se dan hacia las selvas.

Tabla 55. Matriz de cambios: 2011 a 2030. Escenario de tendencia

	Agricultura de riego y humedad	Agricultura temporal	Asentamiento humano	Bosque	Otros tipos	Pastizales	Selvas	Total 2030
Agricultura de riego y humedad	282,657	309	0	0	5,493	0	15,777	304,306
Agricultura temporal	0	152,405	0	0	0	0	16,285	169,069
Asentamiento humano	10,746	3,367	20,116	0	0	0	101	34,330
Bosque	0	0	0	28,185	0	0	1,285	29,470
Otros tipos	0	0	0	0	153,455	0	0	153,455
Pastizales	379	0	0	0	0	3,020	2,829	6,228
Selvas	0	0	0	0	0	0	158,816	158,816
Total 1993	293,782	156,151	20,116	28,185	158,948	3,020	195,093	855,295

Tabla 56. Matriz de cambios: 2011 a 2030. Escenario de Sostenibilidad

	Agricultura de riego y humedad	Agricultura temporal	Asentamiento humano	Bosque	Otros tipos	Pastizales	Selvas	Total 2030
Agricultura de riego y humedad	289,733	0	0	0	0	0	0	289,733
Agricultura temporal	0	125,176	0	0	0	0	0	125,176
Asentamiento humano	676	0	20,116	0	0	0	0	20,792
Bosque	0	0	0	28,185	0	0	1,216	29,401
Otros tipos	405	0	0	0	158,948	0	0	159,353
Pastizales	0	6,430	0	0	0	3,020	0	9,450
Selvas	2,968	24,545	0	0	0	0	193,877	221,390
Total 2011	293,782	156,151	20,116	28,185	158,948	3,020	195,093	855,295

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, así como los asentamientos humanos presentan unas ganancias altas, mientras las selvas sufren una enorme pérdida. Al contrario, en el escenario de sostenibilidad, el crecimiento de los asentamientos humanos es pequeño, la agricultura de temporal presenta una pérdida considerable de superficie, mientras que las selvas tienen un aumento de su superficie (Tabla 57).

En cuanto al cambio neto experimentado, en el escenario de tendencia, el crecimiento de todas las categorías, se da en base a las selvas, y en una cantidad mucho menor a la categoría de otros tipos. Mientras que en el escenario de sostenibilidad, vemos una dinámica diferente, pues las selvas, así como las demás categorías, presentan ganancias y son las agriculturas las que sufren pérdida de superficie (Figura 43 y Figura 44).

Tabla 57. Indicadores de cambios del 2011 al 2030 en ambos escenarios

Categoría	Ganancia		Pérdida		Cambio Neto		Cambio Total	
	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES
Agricultura de riego y humedad	21,649	0	11,125	4,049	10,524	4,049	32,774	4,049
Agricultura temporal	16,285	0	3,746	30,975	12,539	30,975	20,031	30,975
Asentamiento humano	14,214	676	0	0	14,214	676	14,214	676
Bosque	1,285	1,216	0	0	1,285	1,216	1,285	1,216
Otros tipos	0	405	5,493	0	5,493	405	5,493	405
Pastizales	3,208	6,430	0	0	3,208	6,430	3,208	6,430
Selvas	0	27,513	36,277	1,216	36,277	26,297	36,277	28,729
Σ	56,641	36,240	56,641	36,240	83,540	70,048	113,282	72,480

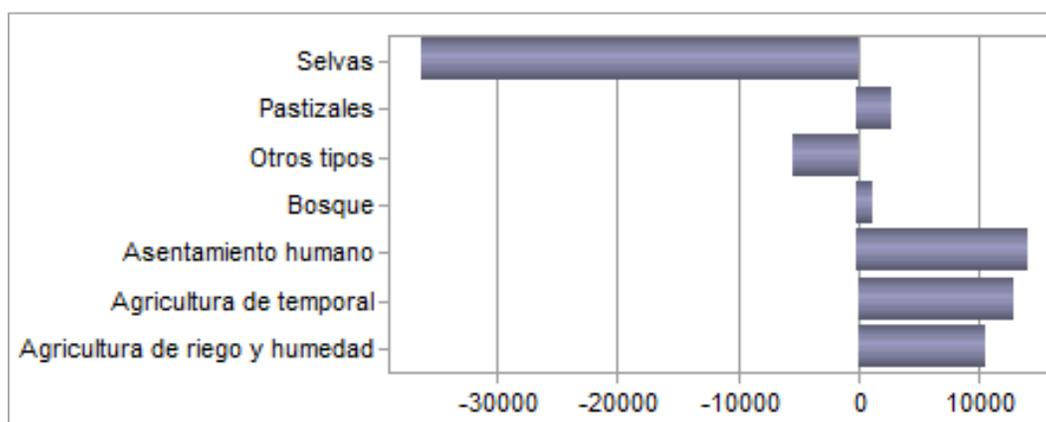


Figura 43. Cambios netos entre 2011 y 2030 escenario de tendencia

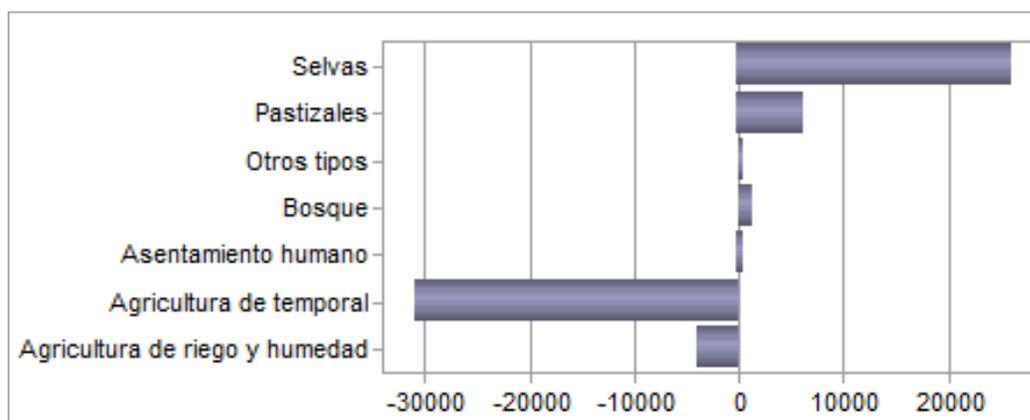


Figura 44. Cambios netos entre 2011 y 2030 escenario de Sostenibilidad

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 45 y Figura 46).

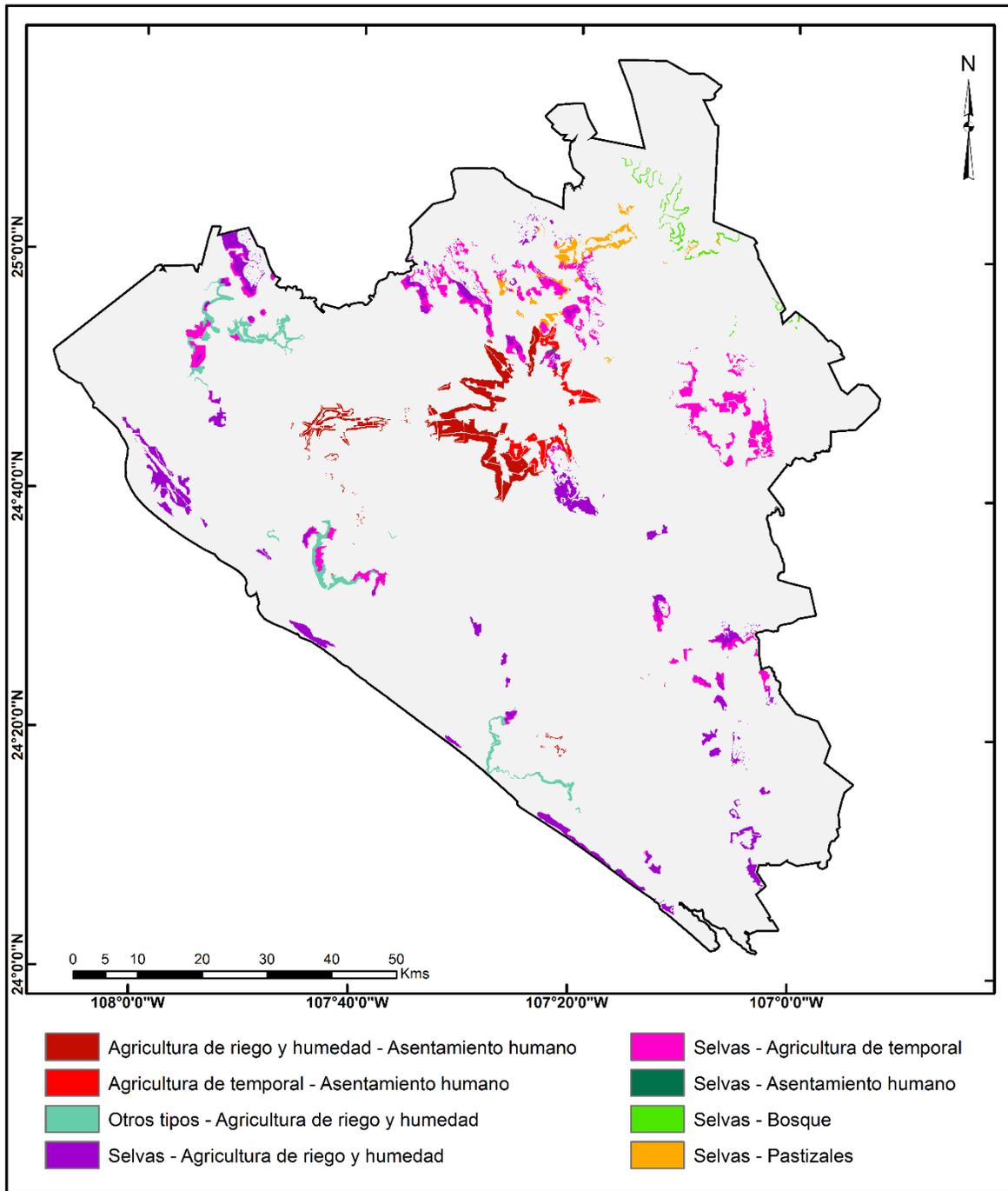


Figura 45. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de tendencia

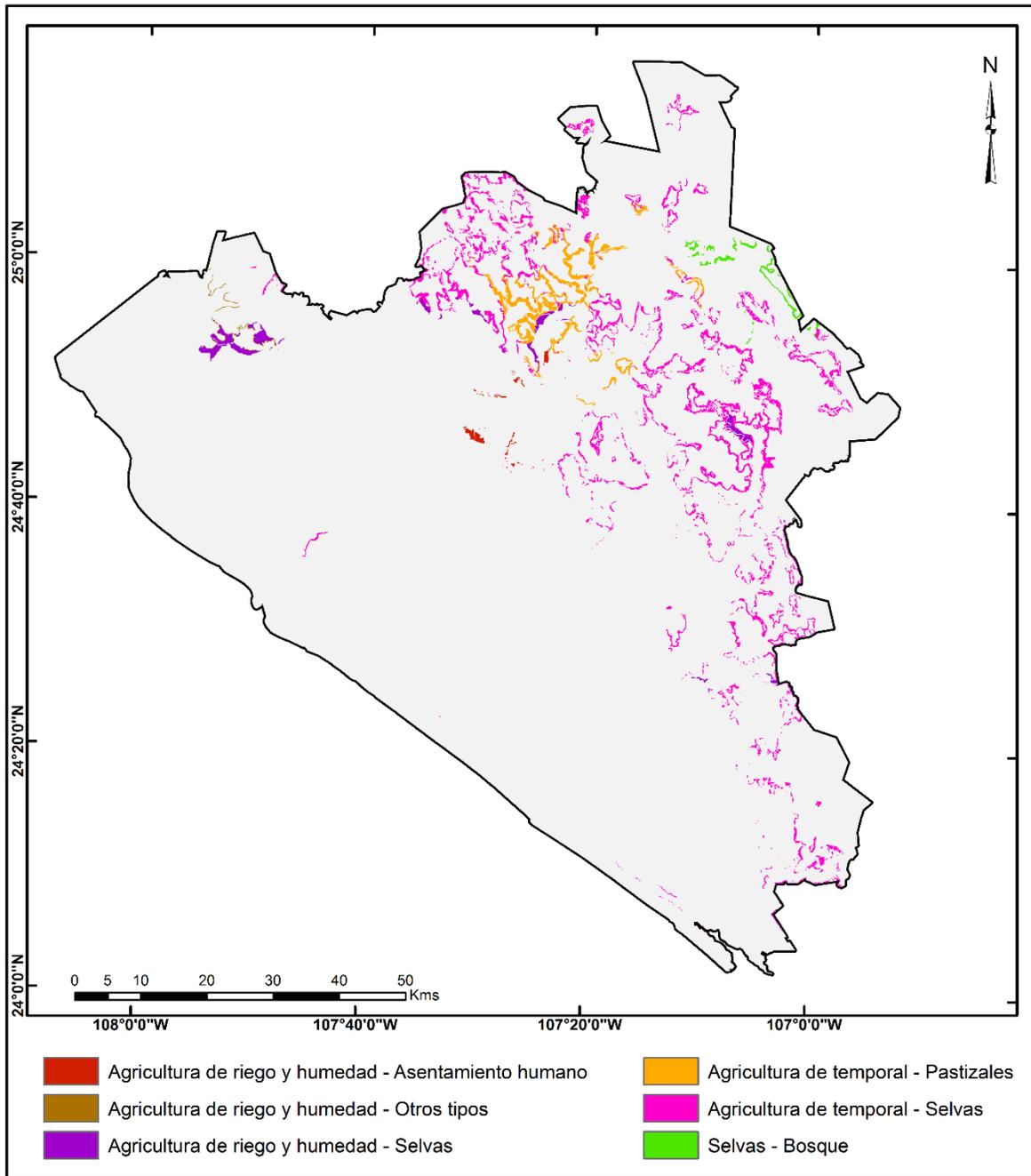


Figura 46. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de Sostenibilidad

En cuanto al comportamiento de los asentamientos humanos, en ambos escenarios las zonas de aumento se presentan en torno a la ciudad de Culiacán, mientras que, en el escenario de tendencia también existe un crecimiento alrededor de la ciudad de Navolato, y en menor medida se presentan crecimientos alrededor de El dorado, Quila, y en el corredor de pueblos que van desde Navolato hasta la playa (El Castillo).

En la Figura 47 percibimos como en el escenario de tendencia, el crecimiento se da en torno a la ciudad de Culiacán y de Navolato, dicho crecimiento se presenta en las inmediaciones de la mancha urbana existente, así como en torno a las carreteras principales. En el escenario de sostenibilidad, donde la superficie de crecimiento es mucho menor, el crecimiento se da solo alrededor del área urbana de Culiacán, coincidiendo siempre con la superficie de crecimiento en el escenario de tendencia, estas coincidencias ocurren en la zona sur-oeste de la ciudad, principalmente hacia el poniente, adyacente a la carretera “Culiacán – Navolato”; además de, a un costado de la zona norte de la mancha urbana, al costado izquierdo de la carretera “Álvaro Obregón”; y en menor área en la zona noroeste, a un costado de la carretera “Culiacán – Los Mochis”.

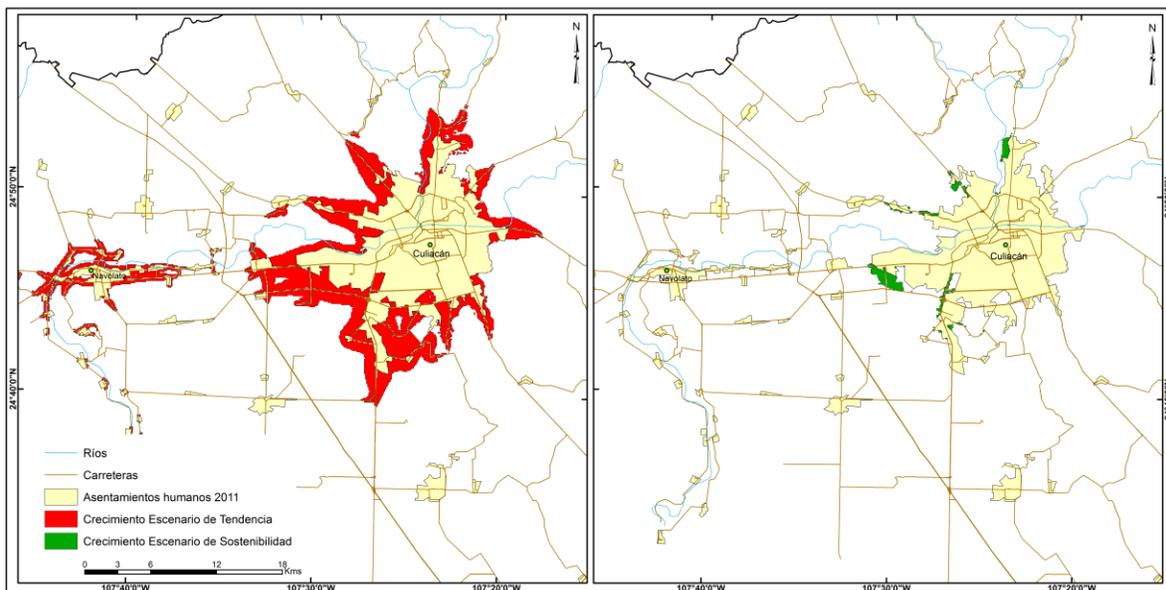


Figura 47. Crecimiento de los asentamientos humanos en los dos escenarios

8.6 Análisis de Sensibilidad

Para valorar el grado de confiabilidad de los modelos de simulación realizados, se siguió una metodología de Análisis de Sensibilidad (AS) explícitamente espacial, llevando a cabo una variación independiente para cada factor y peso. El objetivo del AS es comprobar que pequeñas modificaciones a los factores y pesos no alteran significativamente los resultados, o ver qué factores son más sensibles a dichas modificaciones.

Dicha metodología, nos permitió determinar cuáles son las variables más importante en función de la variabilidad que se refleja en la variación de los resultados del modelo, junto a una representación cartográfica que permita visualizar, cuantificar y evaluar espacialmente los sitios donde el impacto de dichas variables es mayor o menor.

Para automatizar la aplicación de la metodología, se desarrolló un módulo creado en C# y utilizado en IDRISI Selva, el cual nos permitió obtener todos los mapas con variaciones, así como los análisis realizados (Figura 48).

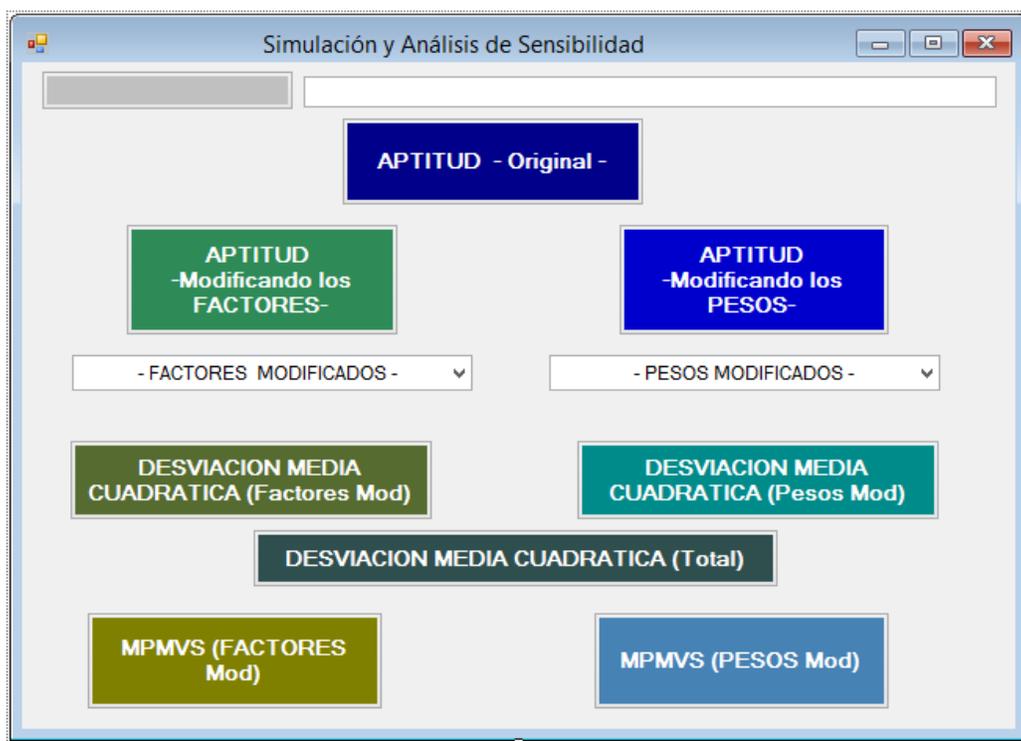


Figura 48. Interfaz gráfica del módulo desarrollado

Los resultados obtenidos, mostraron que los factores que no influyen de manera significativa en los resultados (K_R entre 1 y 0.81) son 40 de los 72 modelos realizados. Son 24 modelos los que tienen una influencia mediana y 8 los que influyen de manera moderada (Tabla 58).

Así podemos señalar que en la simulación de la Agricultura de riego y humedad, el factor de proximidad a USyV y su respectivo peso, influyen de manera más significativa en dicho modelo, los factores de proximidad inversa a agricultura de riego y el de proximidad a canales, así como sus pesos, tienen una influencia mediana, mientras que los demás factores no son significativos. En la simulación de la agricultura de temporal, solo el factor de proximidad a USyV y su respectivo peso, tienen una influencia menor en el modelo. En cuanto a los asentamientos humanos, ningún factor y/o pesos influye de manera significativa en los resultados del modelo. Mientras que en el modelo de bosques, los factores y pesos de la proximidad inversa a USyV y la proximidad a bosques, influyen de manera moderada en el moderada en el modelo. En cuanto a los pastizales, es el factor de proximidad a pastizales el que tiene una influencia moderada en los resultados del modelo. Respecto a las selvas, los factores y pesos de proximidad a USyV y proximidad a selvas, tienen una influencia menor en el modelo, todos los demás no influyen en los resultados de éste. No obstante, de los factores y pesos analizados, ninguno influye de manera sustancial (K_R entre 0.21 y 0.41) en los resultados de los modelos (Tabla 58).

Tabla 58. Coincidencias de píxeles de los mapas simulados con variaciones respecto al mapa original. Kappas

Factor – Peso modificado	Agricultura de riego	Agricultura de Temporal	Asentamiento humano	Bosques	Otros tipos	Pastizales	Selvas
FM_1	0.5619	0.7093	0.8239	0.4338	0.7231	0.6497	0.7214
FM_2	0.6859	0.8257	0.8816	0.5038	0.7282	0.5859	0.7325
FM_3	0.7829	0.9803	0.898	0.6359	0.8653	0.6572	0.8696
FM_4	0.8851	0.9587	0.8047	0.7404	---	0.7538	0.9627
FM_5	0.9215	0.9685	0.8772	0.8206	---	0.8503	0.9299
FM_6	0.9515	---	0.9572	---	---	---	0.9408
PM_1	0.5524	0.7083	0.8121	0.4132	0.6985	0.6514	0.7142
PM_2	0.6784	0.8232	0.8727	0.5717	0.7887	0.5903	0.7279
PM_3	0.777	0.976	0.8905	0.612	0.8331	0.6652	0.8649
PM_4	0.8849	0.9553	0.7943	0.7354	---	0.7582	0.9644
PM_5	0.9242	0.9678	0.8831	0.8206	---	0.8516	0.9287
PM_6	0.9423	---	0.9556	---	---	---	0.94

Con el análisis anterior se determinaron los factores más influyentes en los resultados de las simulaciones de usos de suelo en el escenario sostenible, así como la robustez del modelo. Adicionalmente, el resultado de la cartografía de píxeles más veces seleccionados nos corroborará la estabilidad del modelo y proporcionará una información complementaria sobre su robustez a nivel cartográfico.

De este modo, en la Tabla 59 se recogen los porcentajes de coincidencias entre los modelos originales (los usos de suelo simulados en el escenario de sostenibilidad) y los modelos ejecutados con variaciones en los factores y pesos. Donde podemos observar que en la agricultura de riego, el total de modelos ejecutados coincide en un 33.13% con el modelo original, un 54.56% en la agricultura de temporal, un 67.86% en los asentamientos humanos, en los bosques solo el 19.23%, en la categoría de otros tipos un 73.07%, en los pastizales un 37.51% y un 54.22% en las selvas. Ahora bien, se puede decir que algunos de estos valores son relativamente bajos, especialmente en el caso de los bosques. No obstante, si se consideran las coincidencias del modelo no en todas las ejecuciones, si no, en la mayoría de ellas (más de la mitad de veces posibles), estos porcentajes aumentan significativamente, con un porcentaje mayor a 70 para la agricultura de riego y humedad y los pastizales, más de 80% para la agricultura de temporal, asentamiento humanos y selvas, un 97% para la categoría de otros tipos y con el menor valor los bosques con 63% (Tabla 59).

Tabla 59. Porcentaje de coincidencias entre el modelo original y los modelos ejecutados con variaciones

No. de veces seleccionado	%						
	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Asentamiento humano	Bosques	Otros tipos	Pastizales	Selvas
1	0.65	0.21	1.04	6.47	0.25	2.65	0.47
2	1.35	0.58	2.38	4.60	0.75	2.32	0.79
3	1.20	0.40	0.89	6.21	2.00	2.57	0.88
4	1.70	1.21	1.04	6.04	5.74	2.65	0.73
5	2.02	1.84	1.79	6.38	18.20	5.32	0.82
6	6.14	5.09	4.32	6.55	73.07	7.44	4.11
7	6.16	6.16	5.51	11.66		11.61	5.11
8	8.33	14.45	2.23	14.21		11.87	4.59
9	11.42	15.49	1.34	18.64		16.07	7.90
10	12.87	54.56	6.55	19.23		37.51	17.70
11	15.04		5.06				2.67
12	33.13		67.86				54.22
Σ = Total	100	100	100	100	100	100	100
Más repetidos	72.46	84.50	80.80	63.74	97.01	77.05	82.50

Asimismo de la Figura 49 a la Figura 55, se puede apreciar espacialmente las coincidencias entre el modelo original y los modelos ejecutados con variaciones en los factores y pesos para todos los usos simulados. En estas, podemos apreciar como en la mayoría de las ejecuciones con variaciones aparecen los mismos pixeles del modelo original.

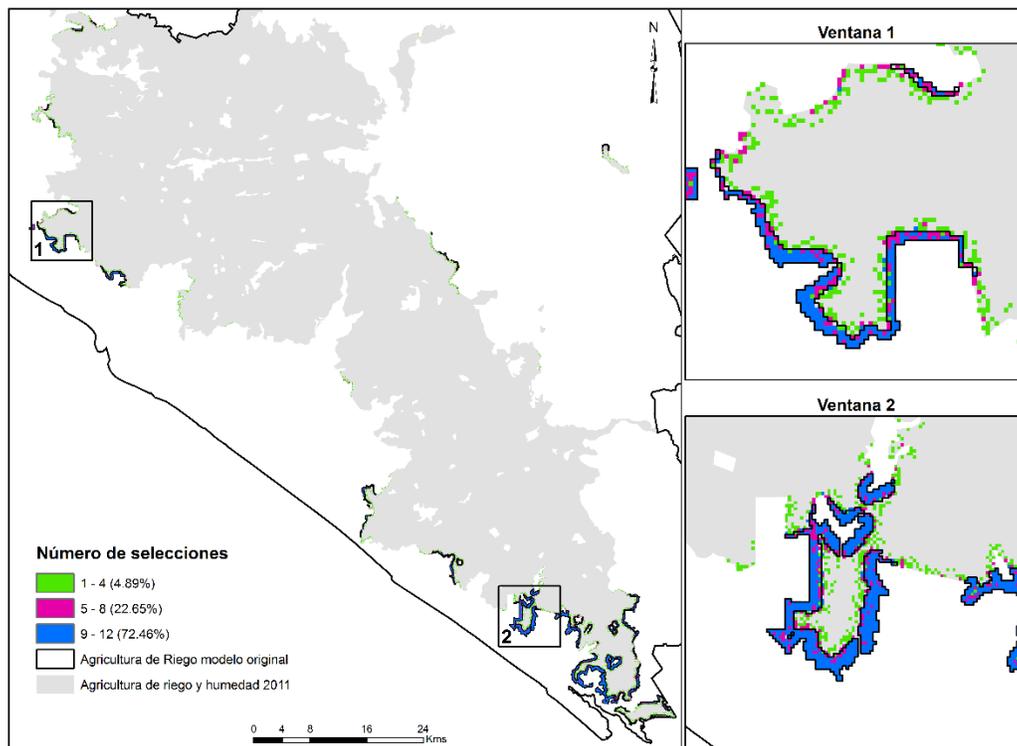


Figura 49. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para la Agricultura de riego y humedad

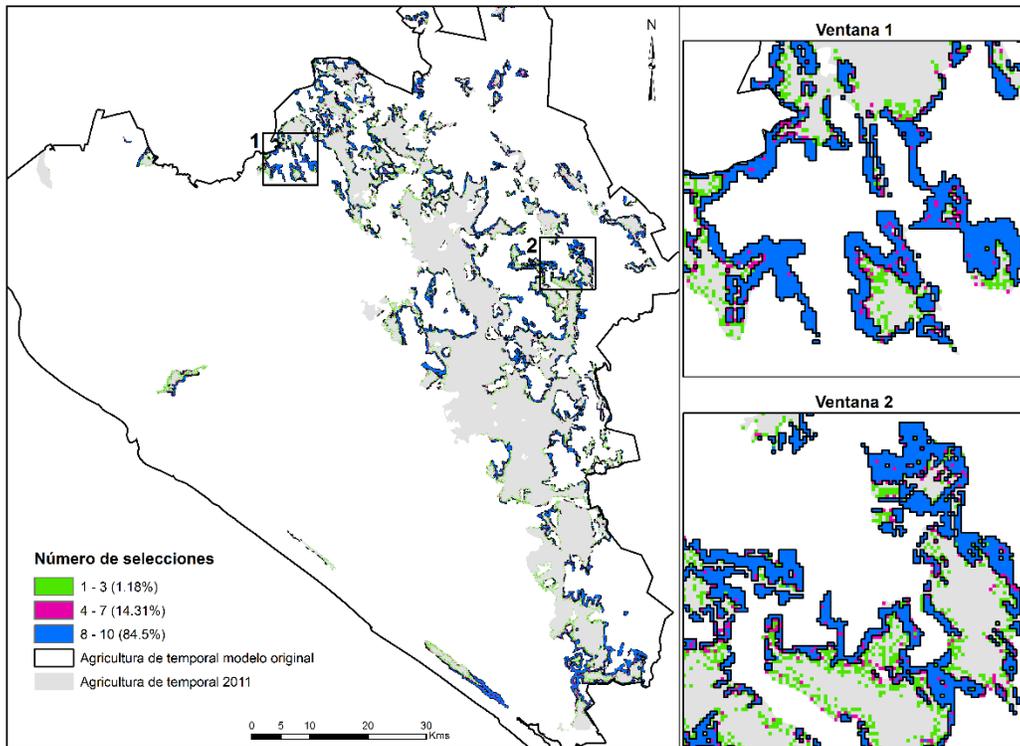


Figura 50. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para la Agricultura de temporal

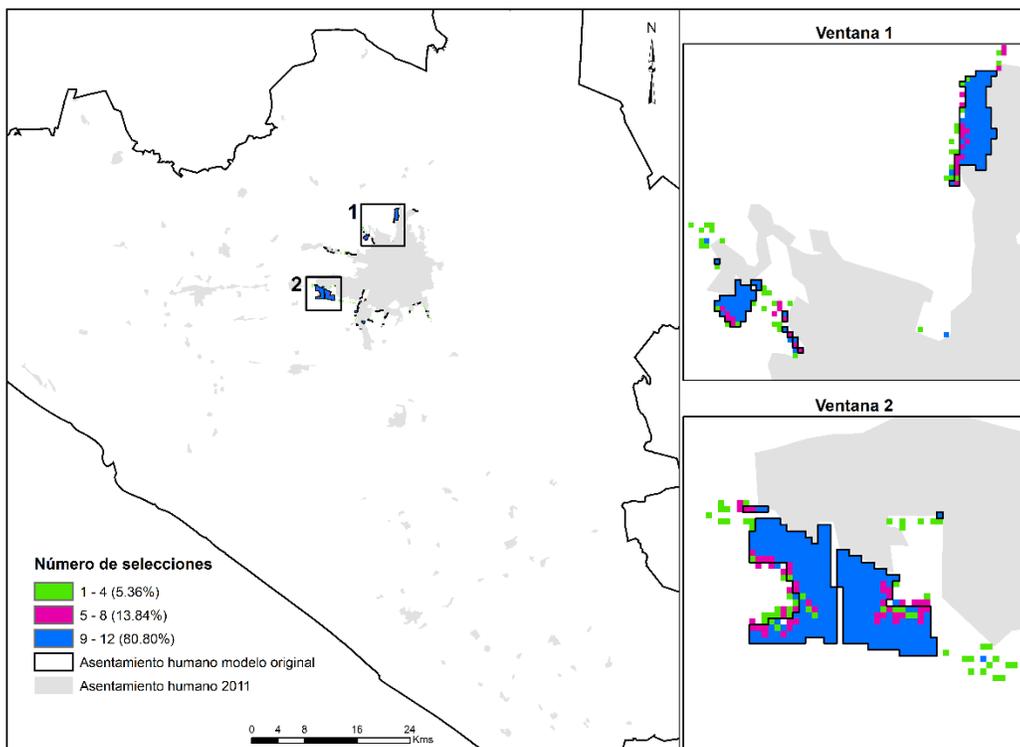


Figura 51. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Asentamientos humanos

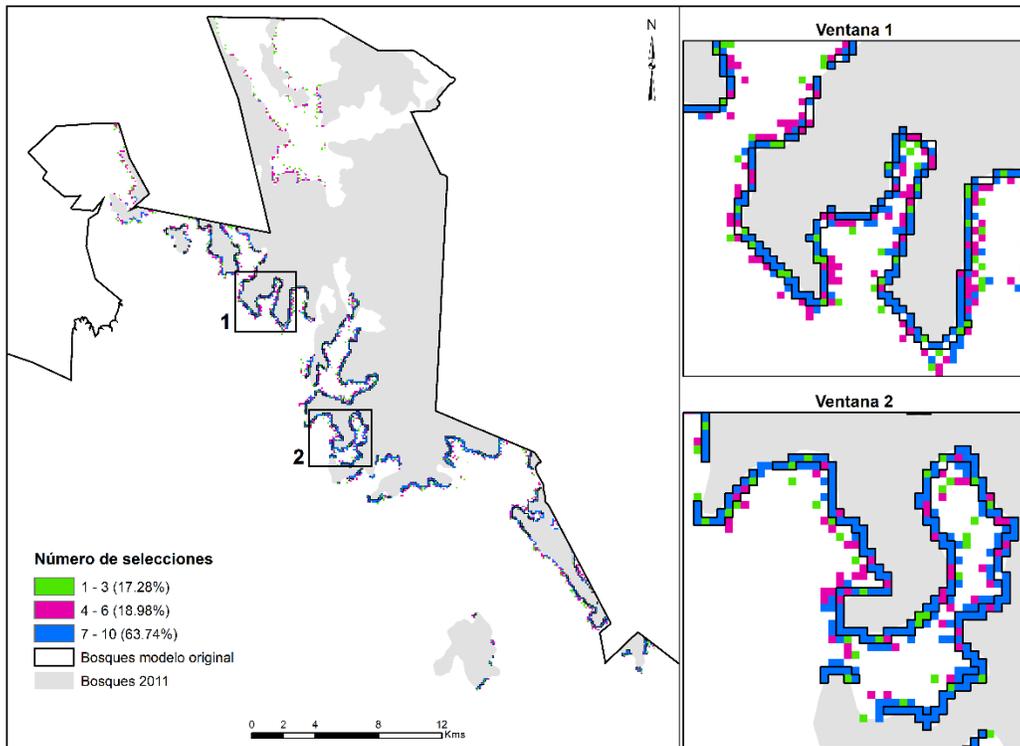


Figura 52. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Bosques

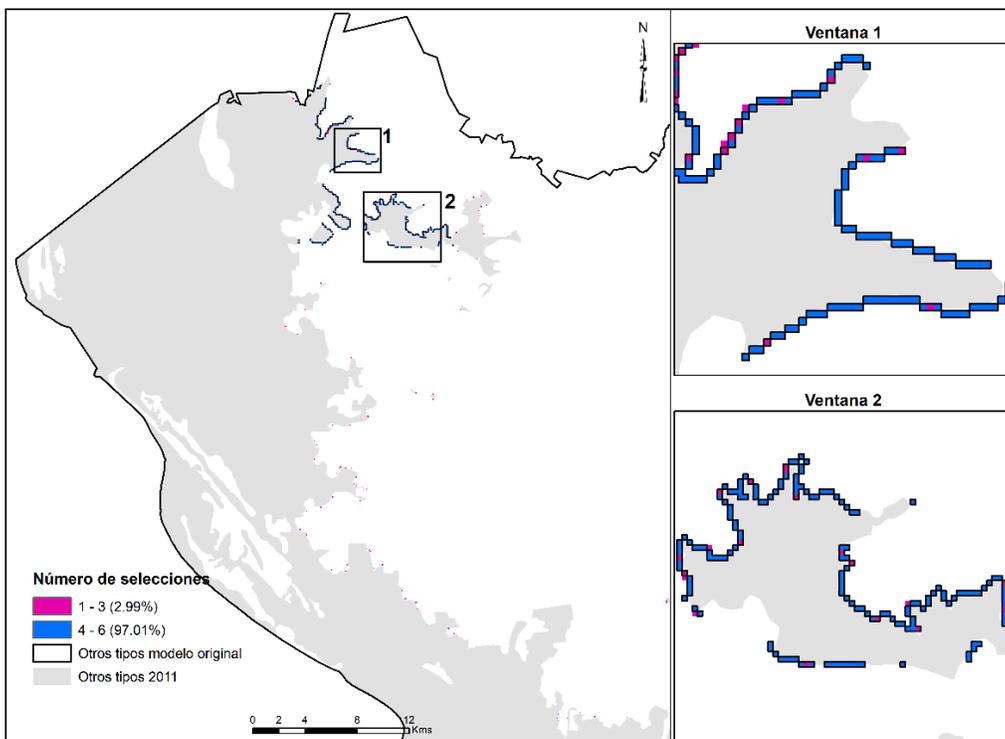


Figura 53. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Otros tipos

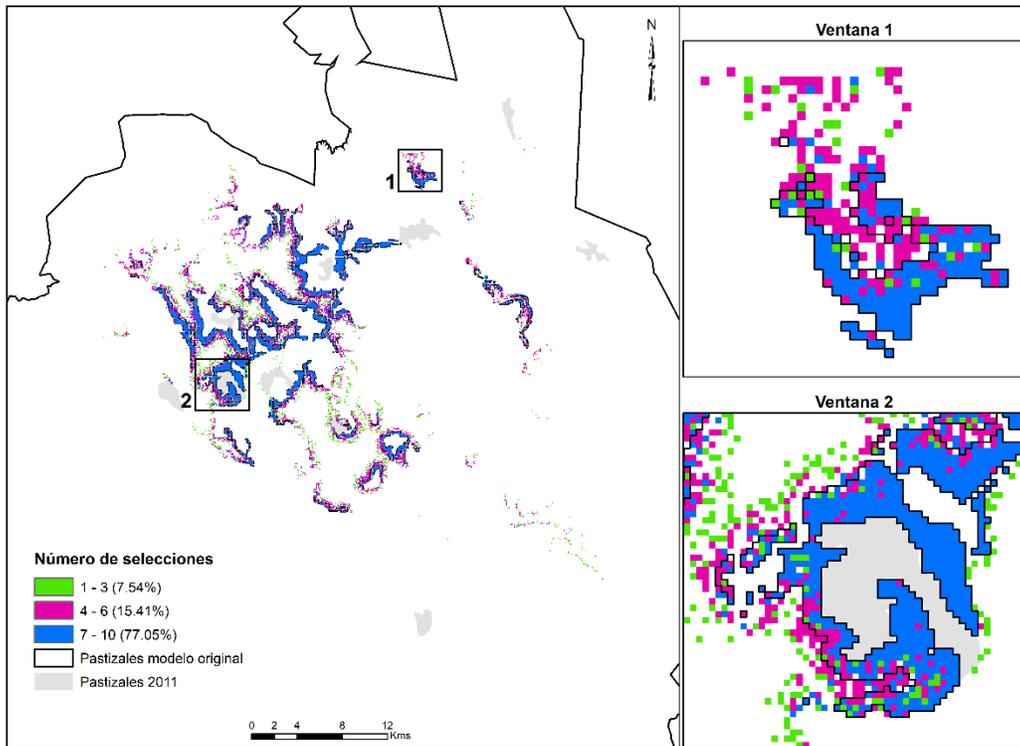


Figura 54. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para Pastizales

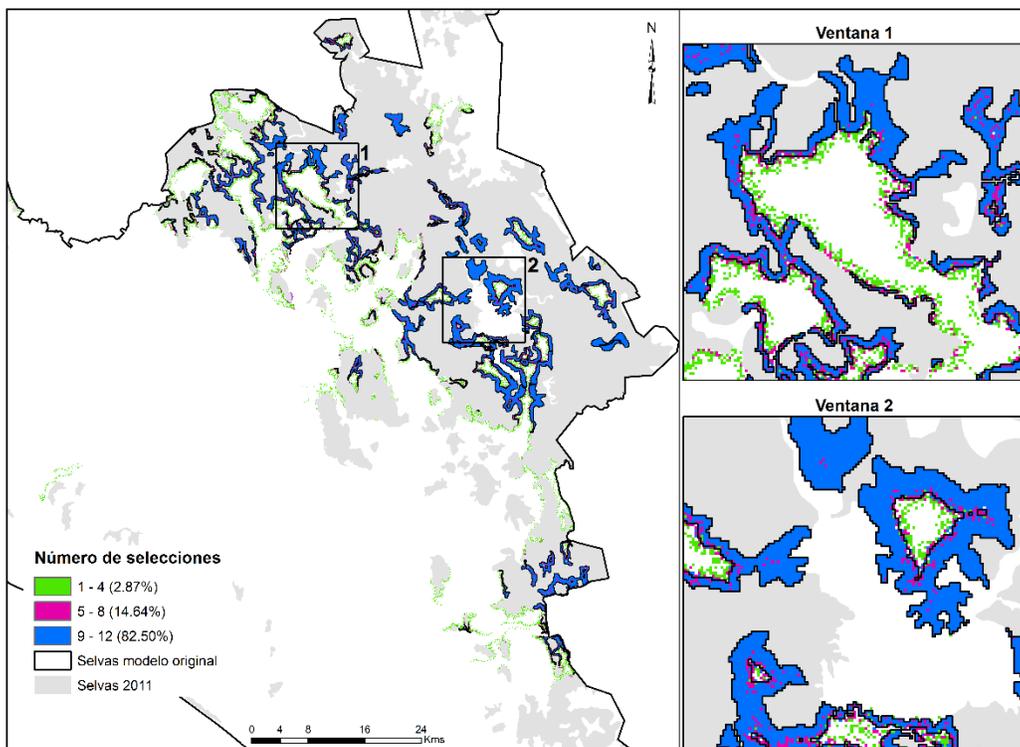


Figura 55. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los modelos con variaciones para las Selvas

Por otro lado, si consideramos como indicador de robustez del modelo la diferencia media cuadrática, observamos que ésta no sobrepasa en ningún píxel las 5 unidades de aptitud para los 7 usos simulados y que el valor medio de dicha diferencia no es mayor a 2.4 unidades. Asimismo, se observó que los mayores porcentajes de no coincidencia se encuentran en un intervalo igual a la media \pm una desviación estándar (Tabla 60).

Tabla 60. Estadísticos básicos extraídos de los mapas de la diferencia media cuadrática para cada uso

Parámetros	Agricultura de riego	Agricultura de Temporal	Asentamiento humano	Bosques	Otros tipos	Pastizales	Selvas
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	4.369	4.607	4.045	4.978	6.812	4.955	4.390
Media	1.997	2.371	1.164	1.201	1.960	2.304	2.016
SD	0.72	0.82	0.68	0.868	1.575	0.763	0.695
Total	293,783	156,151	770,217	742,108	676,231	767,197	575,124

IX. CONCLUSIONES GENERALES

9.1 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.

La creación de escenarios futuros no está exenta de dificultades. Los usos del suelo operan en sistemas complejos, sobre sistemas sociales y ecológicos interrelacionados. La simulación de múltiples usos de suelo es, además, más difícil que la simulación de un único uso, debido a las numerosas variables, así como a los conflictos entre todos los objetivos. Los métodos empleados ayudaron sin duda a generar información valiosa para resolver problemas de asignación de actividades. En este sentido, la EMC fue fundamental para el desarrollo de los modelos.

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 usarse 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) pues es común que se utilicen las técnicas EMC para la elaboración de modelos óptimos. Dichos escenarios proporcionan información importante sobre los potenciales impactos ambientales, territoriales 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). En este sentido, podemos decir que la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio para la simulación de modelos de usos de suelo se presenta como una alternativa más en la ciencia de la geosimulación.

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, 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.

No hay que olvidar que dichas simulación se hacen a futuro, partiendo de la ocupación y uso de suelo del año 2011 y con un horizonte al 2030, y utilizando variables espaciales ponderadas según el nivel de importancia que tengan en el planteamiento conceptual de cada escenario, por lo cual, los resultados obtenidos deben ser tratados con cautela, ya que no es posible realizar una comparación real con datos futuros.

Una alternativa utilizada en este trabajo para estimar la confiabilidad de los resultados de dichas simulaciones de futuro es el Análisis de Sensibilidad (AS). Con dicho análisis se pudo determinar las variables más importantes en la simulación del escenario de sostenibilidad, así

como evaluar el grado de confiabilidad en nuestros modelos. Mediante la obtención de los factores más influyentes en los resultados de modelo; además, de obtener el impacto de dichos factores a nivel espacial, representado por medio de la cartografía de píxeles más veces seleccionados en las ejecuciones realizadas.

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 y 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.

9.2 Futuras líneas de investigación

- Profundizar más en la aplicación de otras técnicas EMC, tales como: el análisis del punto ideal, la sumatoria lineal ponderada borrosa, entre otras. Así como la modelación de usos de suelo aplicando técnicas de simulación como los Modelos Basados en Agentes o Autómatas Celulares.

- Para tener una validación más completa, si bien el procedimiento utilizado nos permitió estimar la fiabilidad de los resultados obtenidos de los modelos. Se podría ampliar la aplicación de análisis de sensibilidad, ampliar el número de variaciones o combinaciones si se utiliza el método *One-at-a-Time-Factor* (OAT). También, se debe explorar en el uso de

técnicas diferentes, las cuales permitan sin duda mejorar, simplificar y dar mayor certidumbre a estos métodos.

- Aplicar las metodologías aquí propuestas con información cartográfica actualizada y mejorada; con escalas espaciales y temporales más adecuadas. Ya sea mediante la generación de información cartográfica propia usando imágenes satelitales.

- Enlazar los estudios de cambios de usos del suelo y de proyecciones a futuro con estudios de vulnerabilidad ecológica, con el objetivo de evaluar los impactos que los cambios de usos del suelo tienen sobre la sociedad y los ecosistemas.

- Realizar posibles sugerencias encaminadas a una planificación más sostenible del territorio.

X. BIBLIOGRAFÍA

- 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*, pp. 144-154.
- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J. & Gómez Delgado, M., 2009. Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, Issue 4.
- Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L. M. & Bosque Sendra, J., 2010. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA A TRAVÉS DE MODELOS BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- Aguilera Benavente, F. y otros, 2011. Escenarios y modelos de simulación como instrumento en la planificación territorial y metropolitana. *Serie Geográfica*, Volumen 17, pp. 11-28.
- Aguilera, F., 2008. Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada.. En: *Tesis Doctoral. Universidad de Granada*. s.l.:s.n.
- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J. & Gómez Delgado, M., 2009. "Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos".. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, pp. 54-80.
- Alcamo, J., Kok, K., Busch, G. & Priess, J., 2006. Searching from the future of land: scenarios from the local to global scale. En: H. G. Eric F. Lambin, ed. *Land-use and landcover change. Local processes and Global Impacts*.. Berlin.: Springer, pp. 137-156.
- Alo, C. & Pontius, R., 2007. Identifying systematic land cover transitions using remote sensing and GIS: the fate of forest inside and outside protected areas of Southwestern Ghana. *Environment and Planning*, Volumen en prensa.
- Anon., 2010. *INEGI*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx/>
- Anon., 2015. *IMPLAN*. [En línea]
Available at: <http://www.implanln.gob.mx/>
- Aracil, J., 1995. *Dinámica de Sistemas*. 1 ed. Madrid.
- Aronoff, S., 2010. *Remote Sensing for GIS*.

- Baja, S., Chapman, D. M. & Dragovich, D., 2007. Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning. *Environmental Model & Assessment*, Volumen 12, pp. 171-184.
- Barredo Cano, J. & Gómez Delgado, M., 2008. Towards a set of IPCC SRES urban landuse scenarios: modelling urban land-use in the Madrid region. En: M. P. a. M. Camacho, ed. *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions*. s.l.:Springer, pp. 363- 385.
- Barredo, J. & Gómez, M., 2008. Toward a set of IPCC SRES urban land use scenarios:modelling urban land use in the Madrid region. En: *Modelling Environmental Dynamics*. s.l.:Springer-Verlag. Berlín.
- Bocco, G., Mendoza, M. & Masera, O., 2001. La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación”,. *Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México,,* pp. 18-38.
- Borjeson, L. y otros, 2006. Scenario types and techniques: Towards a user’s guide.. *Futures*, 38(723-739).
- Braimoh, A. K., 2006. Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana.. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113(1-4), p. 254–263.
- Brunsdon, C., Carver, S., Charlton, M. & Openshaw, S., 1990. A review of methods for handling error propagation in GIS. *Proceedings of the European Conference on GIS*, pp. 106-116.
- Camacho Olmedo, M. T., Molero Melgarejo, E. & Paegelow, M., 2010. *MODELOS GEOMÁTICOS APLICADOS A LA SIMULACIÓN DE CAMBIOS DE USOS DEL SUELO. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL CAMBIO*, Sevilla, España.
- Carrero, R., Navas, F., Malvárez, G. & Cáceres, F., 2010. APLICABILIDAD DE LAS TIG EN LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE FUTURO PARA UNA GESTIÓN INTEGRADA DE LAS ZONAS COSTERAS. *Tecnologías de la Información Geográfica*.
- Carsjens, G., 2009. Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes. En: *Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen*.
- Carsjens, G., 2009. Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes.. En: *Tesis Doctoral*. Universidad de Wageningen.
- Carter, T. R., Parry, M. L., Harasawa, H. & Nishioka, S., 1994. IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations. En: *Intergovernmental Panel on*

Climate Change, Génova.

- Castillo, S. y otros, 1988. *Diagnóstico geográfico y cambios de uso del suelo en la Selva El Ocote, Chiapas*. , U.S. AID: Informe Final. El Colegio de la Frontera Sur-Word Wildlife Found-México, Biodiversity Support Program.
- CEOTMA, 1991. Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología.. En: *Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente*. Madrid.
- Chang, N. B., Parvathinathan, G. & Breeden, J. B., 2008. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, Volumen 87, pp. 139 - 153.
- Chi, H., 2000. Computer Simulation Models for Sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Educations*, 1(2), pp. 154-167.
- Chuvieco, E., 2010. *Teledetección Ambiental*.
- Corrales Barraza, G., 2013. *Análisis de Cambio de Uso de Suelo para el estado de Sinaloa, utilizando Sistemas de Información Geográfica*. Culiacán Rosales, Sinaloa.
- Corrales Barraza, G., Plata Rocha, W., Hinojoza Castro, G. G. & Aguilar Villegas, J. M., 2014. Análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo para el Estado de Sinaloa mediante Sistemas de Información Geográfica. En: *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Alicante.: s.n.
- Cuevas García, G. & Mas Causse, J. F., 2008. *APLICACIÓN DE UN MODELO ESPACIAL PARA LA ELABORACIÓN DE ESCENARIOS DE USO/COBERTURA DEL SUELO EN LA HUACANA, MICHOACÁN*. MÉXICO, D.F.
- de Nijs, T., de Niet, R. & Crommentuijn, L., 2004. Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management*, Volumen 72, pp. 35-42.
- De Pietri, D., Dietrich, P., Mayo, P. & Carcagno, A., 2011. Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina.
- Defries, R., Rudel, T., Uriarte, M. & Hansen, M., 2010. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, Volumen 3, pp. 178-181.
- Dreborg, K., 2004. Scenarios and structural uncertainty: explorations in the field of sustainable transport.. En: *Tesis doctoral. Real Instituto Tecnológico de Estocolmo*.

- Eastman, J., 2003. "The Evolution of Modeling Tools in GIS". *Directions Magazine*, Volumen <http://www.directionsmag.com>.
- Eastman, J., Jin, W., Kyem, P. & Toledano, J., 1993. An algorithm for Multi-Objective Land Allocation Using GIS. *Proceedings International Workshop on GIS*, pp. 261-270.
- FAO, 2006. *Ordenación responsable de los bosques plantados: Directrices voluntarias. Documento de Trabajo sobre los bosques y árboles plantados*, Roma.
- Fernández, R. A., Martín, F. & Ortega, E., 2010. Recent changes in landscape structure and function in Mediterranean region of SW Spain. *Landscape Ecology*, 7(1), pp. 3-18.
- Forrester, J., 1969. *Urban Dynamics*. Portland: Productivity Pres.
- Franco Prieto, C. A., 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.
- Franco Prieto, C. A., 2011. *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.
- Galacho Jiménez, F. B. & Arrebola Castaño, J. A., 2013. "MODELO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ACOGIDA DEL TERRITORIO CON SIG Y TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO RESPECTO A LA IMPLANTACIÓN DE EDIFICACIONES EN ESPACIOS RURALES".
- Galacho Jiménez, F. B. & Arrebola Castaño, J. A., 2013. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ACOGIDA DEL TERRITORIO CON SIG Y TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO RESPECTO A LA IMPLANTACIÓN DE EDIFICACIONES EN ESPACIOS RURALES. *INGEO*.
- Galacho Jiménez, F. B. & Ocaña Ocala, C., 2013. TRATAMIENTO CON SIG Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA CAPACIDAD DE ACOGIDA DEL TERRITORIO PARA USOS URBANÍSTICOS: RESIDENCIALES Y COMERCIALES.
- Gallardo, M. & Martínez-Vega, J., 2012. *Estudio de la dinámica de los usos del suelo en la Comunidad de Madrid. Su importancia en la planificación territorial..* Madrid, Conferencia Esri España.
- Geneletti, D. & van Duren, 2008. Protected area zoning for conservation and use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation. *Landscape and Urban Planning*, Volumen 85, pp. 97-110.

- Gómez Delgado, M. & Barredo Cano, J. I., 2005. *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: Ra-Ma.
- Gómez Delgado, M. & Barredo, J., 2005. *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio*. Madrid: Ra-Ma.
- Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2004a. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review. *Human and Ecological Risk Assessment*, Volumen 10, pp. 1173-1187.
- Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2004b. Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *Geofocus*, Volumen 4, pp. 179-208.
- Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2009. Validation of GIS-Performed analysis. En: *Geoinformatics for Natural Resource Management*. s.l.:Nova Science Publishers, pp. 559-571.
- Gómez Delgado, M. & Tarantola, S., 2006. Global sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of hazardous waste disposal site in Spain. *International Journal of Geographical Information Science*, Volumen 449-466, p. 20.
- Guerra, M. & Ochoa, G., 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990- 2000)". *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM(59), pp. 7-25.
- Guevara, S., De la Torre, A. J. & Rivera, P., 2001. *Pobreza y degradación ambiental. Un enfoque de acervos*. México. D.F.: INE-SEMARNAT.
- Guhathakurta, S., 2001. Urban Modelling as Story telling: Using Simulation Models as a Narrative. En: *Working Papers Series, Centre for Advanced Spatial Analysis (University College, London)*. s.l.s.n., p. <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper37.pdf>.
- Gutiérrez Angonese, J., Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2010. SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y TIG EN EL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMAN (ARGENTINA).
- Han, J., Hayashi, Y., Cao X & Imura, H., 2008. 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), pp. 133-141.
- Henríquez Dole, L. E. & Pulido Velázquez, M., 2012. *ESCENARIOS FUTUROS DE USO DE SUELO PARA EL ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO GLOBAL EN LOS RECURSOS HÍDRICOS APLICADO AL ACUÍFERO DE LA MANCHA ORIENTAL*. Universidad Politécnica de Valencia.

- Henríquez Ruiz, C. & Qüense Abarzúa, J., 2009. EVALUACIÓN MULTICRITERIO/MULTIOBJETIVO APLICADA A LOS USOS Y COBERTURAS DE SUELO EN LA CUENCA DE CHILLÁN. *IV Encuentro de la Red Iberoamericana de la Evaluación y Decisión Multicriterio*.
- Henríquez, C., Azócar, G. & Aguayo, M., 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Redalyc*.
- 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..
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, M. d. P., 2010. *Metodología de la Investigación*. Quinta ed. México, DF: McGraw-Hill.
- Hinojoza C., G. G. & Plata R., W., 2015. Change Analysis of Land Use and Urban Growth in the Municipalities of Culiacan and Navolato, Sinaloa, Mexico Using Statistical Techniques and GIS. *Journal of Geographic Information System*, Volumen 7, pp. 620 - 630.
- Houet, T. & Verbug, P., 2009. “Monitoring and modelling landscape dynamics”.. *Springer*.
- Houet, T., Verbug, P. H. & Loveland, T. R., 2010. Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landscape Ecol.*
- Ibarra Montoya, J. y otros, 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”.
- Ibarra-Montoya, J. L. y otros, 2011. Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Revista Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*;, 6(2).
- IMPLAN, 2015. *IMPLAN*. [En línea]
Available at: <http://www.implanln.gob.mx/>
- INEGI, 2010. *INEGI*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx/>
- Jankowski, P., 1995. Integrating geographic information systems and multiple criteria decision making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, Volumen 9, pp. 251-273.
- Ju Song, H. & Hun Lee, Y., 2013. A Study on the Disk Performance Comparison. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 8(3).
- 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.
- Lambin, E. y otros, 2001. The Causes of Land-Use and -Cover Change: Moving beyond the Myths. *Global Environmental Change*, Volumen 11, pp. 261-269.
- Lamelas Gracia, M. T., 2009. Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial. *Geofocus*, Volumen 9, pp. 28-66.
- Landis, J. R. & Koch, G. G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, Volumen 33, pp. 159-174.
- Li, D. y otros, 2012. GPU-CA model for large-scale land-use change simulation. *Chinese Science Bulletin*, Volumen 57.
- Lilburne, L. & Tarantola, S., 2009. Sensitivity analysis of spatial models. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2), pp. 151-168.
- Li, T. & Li, W., 2015. Multiple land use change simulation with Monte Carlo approach and CA-ANN model, a case study in Shenzhen, China.. *Environmental Systems Research*. Springer.
- Liu, X., Wang, H., Wang, J. & Gao, H., 2013. *Plan, Generating Power-Efficient Query Execution*.
- Lodwick, W., 1989. Developing confidence limits on errors of suitability analysis in GIS. En: M. y. G. S. Goodchild, ed. *The accuracy of spatial databases..* s.l.:s.n., pp. 69-78.
- López Beltrán, M. A., Aguilar Villegas, J. M. & Plata Rocha, W., 2014. Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geospaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México.. En: Culiacán, Sinaloa, México.
- Lopez Klocker, C. & Bosque Sendra, J., 2005. SIG y Dinámica de sistemas". En: *X Conferencia Iberoamericana de SIG*. San Juan de Puerto Rico, p. 10.
- Lowry, J. H., Miller, H. J. & Hepner, G. F., 1995. A GIS-based sensitivity analysis of community vulnerability to hazardous contaminants on the Mexico/US border. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(11), pp. 1347-1359.
- 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.
- Mas, J. & Ferndandez, T., 2003. Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones Geográficas*, Boletín

del Instituto de Geografía(51), pp. 73-87.

- Mas, J. F. y otros, 2004. Monitoreo de los recursos forestales de México en las tres últimas décadas. Aplicaciones de geotecnologías para la ingeniería forestal. *Memorias del VI seminario de actualización en Sensores Remotos y SIG aplicados a la ingeniería forestal*, editado por A.A. Disperati y J.R. dos Santos, pp. 41-49.
- Mas, J.-F. y otros, 2011. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*.
- Mas, J.-F. & Sandoval, A. F., 2011. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*.
- Mas, J., Velásquez, J., Bocco, G. & Fernández, T., 2004. Monitoreo de los recursos forestales de México en las tres últimas décadas. Aplicaciones de geotecnologías para la ingeniería forestal. *Memorias del VI seminario de actualización en Sensores Remotos y SIG aplicados a la ingeniería forestal.*, pp. pp. 44-49.
- Mas, J. y otros, 2004. Monitoreo de los recursos forestales de México en las tres últimas décadas. Aplicaciones de geotecnologías para la ingeniería forestal. En: A. D. J.R., ed. *Memorias del VI seminario de actualización en Sensores Remotos y SIG aplicados a la ingeniería forestal*. s.l:s.n., pp. 41-49.
- Mena Frau, C., Gajardo Valenzuela, J. & Ormazábal Rojas, Y., 2006. MODELACIÓN ESPACIAL MEDIANTE GEOMÁTICA Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA ORDENACIÓN TERRITORIAL.
- Méndez Morales, M., 2012. Predicción del impacto del cambio temporal en el uso del suelo sobre cuencas hidrológicas de alta pendiente en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, Volumen 26.
- Méndez Morales, M., 2013. Predicción del impacto del cambio temporal en el uso del suelo sobre cuencas hidrológicas de alta pendiente en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 26(3).
- Mendoza, M., Bocco, G., López, E. & Bravo, M., 2002. "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán".. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, pp. Núm. 49, pp. 92-117.
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. & Asensio Rodríguez, J. J., 2007. ESCENARIOS DE APTITUD Y MODELIZACIÓN CARTOGRÁFICA DEL CRECIMIENTO URBANO MEDIANTE TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO. *Geofocus*.
- 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*, Volumen 7, pp. 120-147.

Monjardín Armenta, S. A., 2015. *ANÁLISIS DE DEFORESTACIÓN EN EL ESTADO DE SINALOA, MÉXICO. APORTACIONES METODOLÓGICAS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO HÍBRIDO DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y CONSULTA A EXPERTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN, EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA HOT SPOT MÁS CRÍTICA....* Culiacán, Sinaloa.

Monjardin Armenta, S. A. y otros, 2016. Determination and Analysis of Hot Spot Areas of Deforestation Using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. Case Study: State Sinaloa, México. *Open Journal of Forestry*, Volumen 6, pp. 295-304.

Motserrat Gómez, D., 2015. La necesidad de la validación en los procesos de geosimulación. *Ciencias espaciales*, 8(2), pp. 495-518.

Mustard, J. F. y otros, 2004. "Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts". *Springer*.

Mustard, J. F., Fisher, T. R. & Moran, E., 2004. *Land-use and land-cover change pathways and impacts, in Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Nogueira Terra, T., Ferreira dos Santos, R. & Cortijo Costa, D., 2013. Land use changes in protected áreas and their future: The legal effectiveness of land scape protection.. *El Sevier*.

Omara, F. A., Khattab, S. M. & Sahal, R., 2014. Optimum Resource Allocation of Database in Cloud. *ELSERVIER*.

Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F. & Maass, M., 2014. Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*.

Ott, T. & Swiaczny, F., 2001. Time-Integrative geographic information systems. Management and analysis of spatio-temporal data. En: *Springer-Verlag*. Berlin.

Paegelow, M., Camacho, M. T. & Menor, J., 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Geofocus*, Volumen 3, pp. 24-44.

Parker, D., Berger & Manson, S., 2002. Agent-based models of Land-use and Land-cover change. *LULC Report Series*, p. 124.

Pascual Rosa, V. y otros, 2012. CRECIMIENTO URBANO DESEABLE PARA LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA EN 2020.

- Pascual Rosa, V. y otros, 2010. SIMULACIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO: MÉTODOS DE COMPARACIÓN CON LOS MAPAS REALES. *Tecnologías de la Información Geográfica: la Información Geográfica al Servicio de los Ciudadanos*.
- Patel, M., Kok, K. & Rothman, D., 2007. Participatory scenario construction in land use analysis: an insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy*, Volumen 24, pp. 546-561.
- Paterson, G. D., 2003. Scenario Planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation biology*, 17(2), pp. 358-366.
- Pérez Verdín, G., Hernández Díaz, J. C., Márquez Linares, M. A. & Teclé, A., 2009. Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México.. *Madera y Bosques*.
- Pettit, C. J., 2002. Land use planning scenarios for urban growth: a case study approach. En: *Phd Thesis. University of Queensland*.
- 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.
- Pineda Jaimes, N. B., 2010. *DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE PROCESOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MÉXICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Alcalá de Henares, Madrid.
- Pineda Jaimes, N. B., 2010. *DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE PROCESOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MÉXICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*.. Alcalá de Henares, Madrid.
- Plata Rocha, W., 2010. *Descripción, Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano*. Alcalá de Henares.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2010. “DESARROLLO DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO ÓPTIMO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID APLICANDO METODOS DE EVALUACION MULTICRITERIO Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA”.. *GeoFocus*.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J., 2010. DESARROLLO DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO ÓPTIMO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID APLICANDO METODOS DE EVALUACION MULTICRITERIO Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA. *Geofocus*.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. & Aguilar Villegas, J. M., 2013. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN DE

CRECIMIENTO URBANO. PROPUESTA METODOLÓGICA EXPLÍCITAMENTE ESPACIAL. *Geofocus*, 2(13), pp. 158 - 178.

- Pontius, R., Shusas, E. & McEachern, M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), pp. 251-268.
- Prakash, T., 2003. Land Suitability Analysis for Agricultural Crops: A Fuzzy Multicriteria Decision Making Approach. En: *Thesis for the degree of Master of Science in Geoinformatics. International Institute For Geoinformation Science and Earth Observation Enschede*. The Netherlands.
- Quiroz Ortuño, Y. & Mas, J. F., 2009. “Modelo dinámico de cambio de cobertura y uso de suelo en una zona de transición urbano - rural, entre la ciudad de Morelia y el ejido Jesús del Monte”. En: México.
- Qureshi, M. E., Harrison, S. R. & Wegener, M. K., 1999. Validation of multicriteria analysis models. *Agricultural Systems*, Volumen 62, pp. 105-116.
- 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.
- Reid, R. y otros, 2006. Linking land-change science and policy: current lessons and future integration. En: E. L. a. H. Geist, ed. *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*.. Berlin: Springer, pp. 157-172.
- Reyes, G., García, G. & Castillo, A., 2001. “Uso del suelo y transformación de selvas en un ejido de la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México”.. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*., pp. Num. 44, pp. 39-53.
- Rindfuss, R., Walsh, S., Fox, J. & Mishra, V., 2004. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues”.. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. , p. Vol. 101 No. 39 13976-13981.
- Rodríguez Eraso, N. & Retana A., J., 2011. Land-Cover and Land-Use change and Deforestation in Colombia: Spatial Dynamics, Drivers and Modelling.
- Roldán López, H., 2006. *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Gobierno de Sinaloa: Fontamara.
- Rosete Vergés, F. A. & Bocco Verdinelli, G., 2008. MODELOS PREDICTIVOS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.
- Rudel, T., Defries, R., Asner, G. & Laurance, W., 2009. Changing drivers of deforestation and new opportunities for Conservation. *Conservation Biology*, 23(6), p. 1396–1405.

- Saaty, T. L., 1980. *The analytic hierarchy process planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
- Sahagún Sánchez, F. J., Reyes Hernández, H., Flores Flores, J. L. & Chapa Vargas, L., 2011. Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México.. *Journal of Latin American Geography*, 10(2).
- Saltelle, A., Chan, K. & Scott, E. M., 2000. *Sensitivity Analysis*. LTD ed. UK: Wiley.
- Saltelli, A. y otros, 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. LTD ed. UK: Wiley.
- Sánchez, S. & Velázquez, A., 2008. *Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. II Estudio de país.*, México, DF.
- Sandoval Verdugo, G. S., 2009. "ANÁLISIS DEL PROCESO DE CAMBIO DE USO Y, Santiago, Chile.
- Sandoval Verdugo, G. S. & Romero Aravena, H. I., 2009. "ANÁLISIS DEL PROCESO DE CAMBIO DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA EXPANSIÓN URBANA DEL GRAN VALPARAÍSO, SUEVOLUCIÓN Y ESCENARIOS FUTUROS".. Valparaiso, Chile.
- Santos, P. J. M. & Borderías, U., 2002. Introducción al análisis medioambiental de un territorio. Volumen 84363 de Educación permanente. UNED., p. 357.
- Stillwell, J., Geertman, S. & Openshaw, S., 1999. Geographical information and planning. En: *Heidelberg, Springer Verlag*.
- Turner, B., Lambin, E. & Reenberg, A., 2007. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability.. *National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 104 No. 52, pp. 266-271.
- Veldkamp, A. & Lambin, E., 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Volumen 85, pp. 1-6.
- 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.
- Verburg, P., Kok, K., Pontius, R. & Veldkamp, A., 2006. Modeling land-use and land-cover change. En: E. L. a. H. Geist, ed. *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*.. Berlin: Springer, pp. 117-135.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J., 1997. "Human domination of Earth's ecosystems". *Science*, 277:494-499..

Von Thaden Ugalde, Clark Tapia Ricardo & Venegas Barrera, C. S., 2012. *CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN EL MUNICIPIO DE GUELATAO DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO*. Oaxaca, México.: s.n.

Voogd, H., 1983. *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. London: Pion.

ANEXOS

ANEXO 1

Categorías/leyenda de los mapas de usos de suelo.

Leyenda jerárquica del mapa de Uso de Suelo de 1993

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
Cultivos	Agricultura (riego y humedad) Agricultura de Temporal	Agricultura de riego Agricultura de humedad Riego suspendido Pastizal cultivado Agricultura de temporal
Bosques	Coníferas Coníferas-latifoliadas Latifoliadas Mesófilo de montaña	Bosque de táscate Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque bajo-abierto Bosque de pino-encino Bosque de encino Bosque mesófilo de montaña
Selvas	Perennifolia y subperennifolia Caducifolia y Subcaducifolia	Selva alta y mediana perennifolia Selva baja perennifolia Selva alta y mediana subperennifolia Selva baja subperennifolia Selva mediana caducifolia y Subcaducifolia Selva baja espinosa
Pastizal	Pastizal	Pradera de alta montaña Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal) Pastizal inducido
Vegetación Hidrófila	Vegetación hidrófila	Manglar Popal-tular Vegetación de galería
Otros tipos de vegetación	Otros tipos de vegetación Área sin vegetación n aparente	Palmar Vegetación halófila y gipsófila Vegetación de dunas costeras Área sin vegetación aparente
Otras Coberturas	Asentamiento humano Cuerpo de agua	Asentamiento humano Cuerpo de agua

Leyenda jerárquica del mapa de Uso de Suelo del 2011

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
Ecológica-Florística-Fisonómica	Bosque de Coníferas	Bosque de Ayarín Bosque de Pino Bosque de Pino-Encino
	Bosque de Encino	Bosque de Encino Bosque de Encino-Pino
	Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña
	Especial (Otros tipos)	Bosque de mezquite
	Pastizal	Pastizal natural
	Selva Caducifolia	Selva baja caducifolia
	Selva Subcaducifolia	Selva mediana Subcaducifolia
	Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente
	Vegetación hidrófila	Vegetación de galería
	Vegetación Inducida	Pastizal inducido.
Agricultura-Pecuaria-Forestal	Agrícola	Agricultura de riego Agricultura de temporal
	Pecuario	Pastizal
Información Complementaria	No aplicable	Asentamientos humanos Cuerpo de agua

ANEXO 2

Descripción de cada categoría

- **Agricultura de riego y humedad**

En lo que respecta a la agricultura de riego, se practica en aquellos terrenos donde el ciclo vegetativo de los cultivos está asegurado totalmente mediante un sistema de riego (método con el que se proporciona agua suplementaria a los cultivos durante el ciclo agrícola), puede ser por gravedad, bombeo, aspersión, goteo o cualquier otra técnica. Las zonas agrícolas de riego, corresponden a las áreas donde se obtienen mejores rendimientos y donde se practica la agricultura de manera intensiva.

En el área de estudio, la agricultura se concentra en la planicie costera; donde las precipitaciones son insuficientes para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, por ello la mayoría de las tierras cuenta con infraestructura para riego.

En el caso de la agricultura de humedad, se desarrolla en zonas donde se aprovecha la humedad del suelo, independientemente del ciclo de las lluvias y que aún en épocas secas conservan humedad, por ejemplo, zonas inundables, como pueden ser los lechos de los embalses cuando dejan de tener agua, o bien aquellos terrenos que después de la temporada de lluvias guardan suficiente humedad para desarrollar cultivos, llamados comúnmente de invierno.

- **Agricultura de temporal**

Se clasifica como tal, al tipo de agricultura de todos aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran dependen del agua de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, que puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien son periodos dentro de un año como los cultivos de verano.

Estas zonas, para ser clasificadas como de temporal deberán permanecer sembradas al menos un 80% del ciclo agrícola. Pueden ser áreas de monocultivo o de policultivo y pueden

combinarse con pastizales o bien estar mezcladas con zonas de riego, lo que conforma un mosaico complejo, difícil de separar, pero que generalmente presenta dominancia de los cultivos cuyo crecimiento depende del agua de lluvia.

- **Asentamiento humano**

Establecimiento de un conglomerado demográfico, con el conjunto de sus sistemas de convivencia, en un área físicamente localizada, considerando dentro de la misma los elementos naturales y las obras materiales que la integran. La estructura de los asentamientos humanos está formada por elementos físicos, construcciones y/o edificaciones hechas por el hombre para su servicio y beneficio. Se distribuyen en zonas rurales y zonas urbanas.

- **Bosque**

Vegetación arbórea de origen septentrional (holártico) principalmente de regiones de climas templado y semifrío, con diferentes grados de humedad, propias de las regiones montañosas; de acuerdo con la FAO, se denomina bosque a las comunidades con presencia predominante de árboles con una cubierta de copa de más del 10 por ciento de la zona y una superficie superior a 0.5 has. Este término incluye los bosques utilizados con fines de producción, protección, conservación o usos múltiples (es decir, bosques que integran parques nacionales, reservas de la naturaleza y otras áreas protegidas). Se considera que un bosque es natural cuando depende del clima y del suelo de una región, sin haber influido sensiblemente otros factores para su establecimiento. Se caracteriza por la poca variación de especies en estas comunidades.

- **Pastizales**

Ecosistemas constituidos por comunidades herbáceas en las que predominan las gramíneas (pastos o zacates) y las gramínoideas, en algunos casos son de origen natural, pero en otros, obedece a condiciones de perturbación por sobrepastoreo. Aunque existen Pastizales de algún tipo casi en todas partes del país, estos son mucho más extensos en las regiones semiáridas y de clima más bien fresco. Son comunes en zonas planas o de topografía ligeramente ondulada.

Los pastizales de origen natural, son considerados como un producto natural de la interacción del clima y suelo de una región. Su principal área de distribución se localiza en

la zona de transición entre los matorrales xerófilos y la zona de bosques. Mientras que los pastizales inducidos y cultivados, son aquellos que surgen cuando es eliminada la vegetación original, son introducidos intencionalmente y para su establecimiento y conservación se realizan algunas labores de cultivo y manejo.

- **Selvas**

Las selvas son comunidades formadas por vegetación arbórea de origen meridional; generalmente se encuentran en climas cálido húmedo, subhúmedo y semiseco. Están compuestas por la mezcla de un gran número de especies de árboles. A diferencia de los bosques, las selvas son comunidades muy complejas en cuanto a la composición de su flora, por lo que su clasificación se realiza con base principalmente en su aspecto fisonómico y secundariamente en su composición florística. Se clasifican de acuerdo con su altura y a la persistencia o caducidad de la hoja durante la época más seca del año.

- **Otros tipos**

Esta categoría engloba los usos de suelo que presentan una dinámica muy pequeña, es decir, que no modifican su superficie de manera considerable, estas son; cuerpos de agua, matorral, vegetación hidrófila, vegetación halófila y gipsófila y las áreas sin vegetación aparente.