



MODELO MULTI OBJETIVO DE ASIGNACIÓN SOSTENIBLE DE USOS DEL SUELO

TESIS DOCTORAL

Presentada por

Guadalupe Azuara García

Directores

M^a Pilar Montesinos Barrios

Alfonso García-Ferrer Porras

Programa doctoral:

Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación eidA3

**Ingeniería agraria, alimentaria, forestal y de desarrollo rural
sostenible**

Octubre 2017

TITULO: *Modelo multiobjetivo de asignación sostenible de usos del suelo*

AUTOR: *Guadalupe Azuara García*

© Edita: UCOPress. 2017
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS Y
MONTES

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELO MULTIOBJETIVO DE ASIGNACIÓN SOSTENIBLE DE USOS DEL SUELO

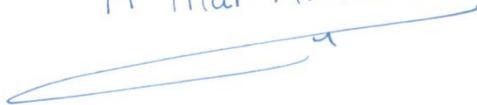
Tesis Doctoral presentada por Guadalupe Azuara García, en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo dirigida por los Drs. Ma. Pilar Montesinos Barrios y Alfonso García-Ferrer Porras

Los directores:

La doctoranda:

Fdo: Dra. Ma. Pilar Montesinos Barrios

Fdo: Guadalupe Azuara García

MS Pilar Montesinos




Fdo: Dr. Alfonso García-Ferrer Porras



Córdoba, Octubre de 2017



TÍTULO DE LA TESIS:

Modelo Multiobjetivo de Asignación Sostenible de Usos de Suelo

DOCTORANDA: Guadalupe Azuara García

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

El problema de asignación de óptima de usos del suelo es un problema clásico de planeación territorial que ha ido evolucionando en el último siglo incorporando criterios de ordenamiento que satisfagan las necesidades de la sociedad actual.

En la actualidad, la sociedad demanda la consideración de criterios de sostenibilidad en la explotación de los recursos territoriales, en particular el suelo por su influencia directa en el desarrollo de cualquier región del planeta.

La falta de racionalidad en la asignación de usos de suelo es un problema que se agrava en los países en desarrollo, de ahí la necesidad de desarrollar procedimientos capaces de establecer la distribución óptima de usos del suelo en un territorio basados en criterios de sostenibilidad, que generen beneficios sociales y económicos a la vez que reducen los impactos de la actividades humanas en el entorno, preservándolo para el uso y disfrute de las próximas generaciones.

En esta tesis se aborda la asignación de usos al territorio en función del cumplimiento simultáneo de objetivos tales como la maximización de la renta per cápita y la minimización de los impactos ambientales derivados de la explotación de un territorio (en términos de Huella Hídrica y calidad del agua así como de emisión de gases efecto invernadero). Se considera como objetivo adicional la minimización del déficit alimentario, aspecto no considerado en planteamientos anteriores del problema objeto de esta tesis, incorporando explícitamente los aspectos sociales al problema de planeación territorial, de singular importancia en países en vías de desarrollo, para evitar localizaciones de usos de suelo que no tengan en cuenta las necesidades básicas de la población local.

La asignación de usos del suelo de un territorio se aborda combinando por una parte un algoritmo de optimización multiobjetivo de tipo heurístico adaptado a las particularidades de un problema de carácter territorial, que requiere así mismo el análisis y procesado de la información espacial a escala de celda (o pixel), dando lugar al Modelo de Asignación de Usos Sostenibles de Suelo, MAUSS. Este modelo permite obtener mapas óptimos de distribución de usos de suelo en un territorio a partir de información de amplio espectro (de tipo económico, demográfico, cartográfico sobre aptitudes territoriales para distintos usos, disponibilidad de recursos hídricos o localización de las vías de comunicación, planes locales de ordenación territorial, etc.). Los mapas de distribución óptima bajo criterios de sostenibilidad generados por MAUSS proporcionan información básica para el desarrollo de planes racionales de ordenación territorial para las circunstancias particulares de cada territorio.

La explotación de un territorio es un proceso dinámico, así en esta tesis se avanza al combinar

las técnicas de dinámica de sistemas, DS, con la capacidad de localización espacial óptima del modelo MAUSS. De esta combinación resulta el modelo MAUSS-DS que permite obtener la evolución temporal de los mapas de localización óptima de usos del suelo bajo una serie de escenarios de cambio de las variables que condicionan la extensión de las superficies dedicadas a los distintos usos de suelo para diversos horizontes temporales (corto, medio y largo plazo), bajo una perspectiva sostenible. MAUSS-DS es una herramienta clave en la toma de decisiones de política territorial, pues permite simular la evolución en el tiempo de la distribución espacial usos de suelo de un territorio ante diversos escenarios de cambio generados según el interés del planificador.

Los modelos MAUSS y MAUSS-DS se han aplicado en la región occidental de los Llanos de San Juan, Puebla (México) para determinar distribuciones espaciales óptimas de usos del suelo en la condiciones actuales tras la instalación de la multinacional del sector del automóvil AUDI en la zona, así como para obtener proyecciones a corto, medio y largo plazo de tales mapas de usos de suelo bajo una perspectiva sostenible. Los resultados obtenidos muestran que cumpliendo las restricciones territoriales locales es posible encontrar soluciones más sostenibles, que tiene en cuenta simultáneamente aspectos sociales, económicos y ambientales, que la ordenación territorial actual y su posible evolución en los próximos años.

La Tesis se estructura en tres grandes bloques. En el primero de ellos se analiza el estado del arte de los modelo de planeación territorial y se realiza una descripción detallada de la zona de estudio basada en un análisis profundo tanto de la información cartográfica como estadística de zona respecto a los distintos usos de suelo.

El segundo bloque está dedicado al desarrollo e implementación en lenguaje MATLAB del modelo MAUSS, así como su aplicación a la zona de estudio seleccionada, para obtener las distribuciones espaciales óptimas de usos del suelo en las condiciones actuales.

Por último, en el tercer bloque, se desarrolla el modelo MAUSS-DS que incorpora la variable tiempo al análisis territorial. Al igual que MAUSS, el modelo MAUSS-DS se implementa en lenguaje de programación MATLAB. La aplicación de MAUSS-DS en la zona de estudio proporciona la evolución temporal de las distribuciones espaciales óptimas de usos de suelo bajo diversos escenarios de cambio.

Por todo esto, consideramos que se trata de una Tesis de gran calidad y que aborda un problema real, de actualidad y con gran aplicabilidad en el campo de la planificación territorial. La Tesis ha dado lugar a un artículo científico publicado en la revista indexada en JCR *Sustainability*, clasificada en el segundo cuartil del área de Estudios Ambientales:

Guadalupe Azuara García, Efrén Palacios Rosas, Alfonso García-Ferrer and Pilar Montesinos Barrios, 2017. Multi-objective spatial optimization: Sustainable land use allocation at sub-regional scale. *Sustainability*. 9, 927; doi:10.3390/su9060927.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral “Modelo Multiobjetivo de Asignación Sostenible de Usos de Suelo”.

Córdoba, 18 de Septiembre de 2017

Firma de los directores

Handwritten signature in blue ink that reads "MS Pilar Montesinos" above a long horizontal stroke.

Fdo. Prof. Dra. Pilar Montesinos Barrios

Handwritten signature in blue ink that reads "Alfonso" above a long horizontal stroke.

Fdo: Prof. Dr. Alfonso García-Ferrer Porras

Agradecimientos

A mis queridos directores de tesis Dra. Pilar Montesinos Barrios y Dr. Alfonso García-Ferrer; por haber labrado con verdadero compromiso y dedicación esta tesis; construyendo al paso con infinita calidad académica y humana una novel investigadora dispuesta a seguir su ejemplo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por haber financiado mi proceso de formación doctoral en el extranjero y a la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP) por abrir las puertas de posgrados internacionales y movilidad a estudiantes iberoamericanos.

Al Dr. Rafael Navarro y a la Dra. María del Mar Delgado; los mejores emisarios de la ciencia: de la UCO para el mundo, por su gran apoyo y confianza, por estar dispuestos a sembrar conocimiento.

Al Dr. José Manuel Recio Espejo y al matemático Juan Manuel Rojano Sánchez, por su valiosísima colaboración en temas de su especialidad, que han apuntalado la calidad de esta tesis.

A mis compañeros Irene Fernández y Rafael González, de quienes recibí apoyo incondicional en un grupo donde permea la amistad, el talento y la solidaridad.

Al Lic. Miguel Ángel Rosas Burgess, por ser el promotor de esta fructífera aventura; gracias primo, ha valido la pena.

A mi hijo, Fidel, por estar siempre tan cerca, por ser indispensable, por darle sentido a mis acciones, por disfrutar juntos de la vida.

Y muy en especial, toda mi gratitud y reconocimiento a mi esposo Efrén, porque sin tu apoyo y trabajo esta tesis no sería lo que es. Por todo tu esfuerzo y amor. Vamos juntos, lo logramos juntos...

Resumen

Los usos de suelo juegan un papel preponderante en el complejo proceso de planeación espacial; constituyen el sustento territorial de la mayoría de las actividades económicas de las sociedades, y en consecuencia evidencian el ritmo de explotación de los recursos naturales del planeta. El control de las asignaciones y el establecimiento de los límites de su utilización son tareas urgentes a todas las escalas territoriales puesto que permitirían alcanzar significativas contribuciones en la preservación del medio ambiente y la biodiversidad de nuestro hogar común. La tarea no es sencilla al estar en juego los grandes intereses económicos surgidos precisamente de las formas irracionales de su explotación. La situación de Iberoamérica ejemplifica la problemática; la devastación de la Selva Amazónica, las altas tasas de deforestación de las selvas mexicanas, los crecimientos caóticos y desmedidos de sus ciudades importantes, las contaminantes actividades mineras fuera de cualquier regulación ambiental, la degradación de los suelos agrícolas entre otras, son ejemplos de la dinámica de los usos de suelo de la mayoría de estos países, además del rezago existente en materia de creación y empleo de sistemas integrales para la planeación espacial.

Por ello el desarrollo del conocimiento y de las herramientas científicas y metodológicas que posibilitan y facilitan la sostenibilidad espacial es imprescindible para cualquier territorio, pero fundamentalmente para aquellos países pobres y en vías de desarrollo. Los modelos de optimización espacial, como instrumentos informáticos de ayuda a la toma de decisiones territoriales, se han aplicado escasamente en países desarrollados o con fuertes economías emergentes, sin apenas considerar criterios de sostenibilidad.

Atendiendo a la carencia de instrumentos, en esta tesis se desarrolla el diseño y construcción de un Modelo de Asignación de Usos Sostenibles de Suelo (MAUSS), aplicado en la región de los Llanos de San Juan, estado de Puebla (México). La instauración de una armadora trasnacional del sector automotriz (Audi) en una región predominantemente agropecuaria y los fuertes procesos de transformación de usos de suelo no planificados impulsaron la creación de dicho modelo.

Esta tesis se estructura en siete capítulos y varios anexos con información complementaria. En el capítulo 1 se pone en contexto el problema de asignación de usos de suelo, estando dedicado el capítulo 2 a la presentación de la estructura y los objetivos de la tesis.

En el capítulo 3 de este trabajo se caracteriza el territorio de la zona de estudio: conformada por una población aproximada de 80.000 habitantes y 526,65 km² de superficie que abarcan en su totalidad 5 municipios sobre una cuenca endorreica bordeada de poniente a sureste por una pequeña cordillera boscosa. La importancia de su producción de granos básicos y productos pecuarios (para el autoconsumo y comercio regional), su trascendencia estatal y nacional en producción de leguminosas, su especialización industrial en el sector agroalimentario así como la fragilidad ecológica de esta región de características lacustres, hacen cuestionar la decisión oficial de localización automotriz, cuyo polígono se implantó casi en su totalidad sobre la

llanura aluvial, en la zona de descarga.

La metodología de la construcción del modelo de asignación de usos sostenibles de suelo, MAUSS, se describe en el capítulo 4; donde se definen los criterios sobre los que será evaluado el territorio para ofrecer las mejores distribuciones de usos dentro de la zona de estudio. Dichos criterios son de carácter medioambiental, social y económico. En el primer caso se trata de apuntalar los tópicos de mayor relevancia global en las evaluaciones territoriales específicas; el agua y las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), para ello se incorporan los conceptos de Huella Hídrica y potencial contaminante del recurso en aguas superficiales o subterráneas, y se contabilizan las emisiones de CO₂ equivalente por tipo de actividad entendida, como en el caso del agua, como uso de suelo. Los aspectos sociales se refieren en este trabajo a la autosuficiencia alimentaria de la región, que es otro de los grandes retos de la humanidad de cara a los significativos incrementos poblacionales esperados e indisolublemente ligado a los temas medioambientales y a los económicos. Éstos últimos son también incorporados en este estudio a partir de la medición del PIB.

La evaluación de todos estos aspectos se hace por cada unidad de superficie en que se divide el mapa y por tipo de uso de suelo, circunscribiéndose en tres objetivos: 1. Maximización de la renta, 2. Minimización de las presiones negativas sobre el medio ambiente y 3. Minimización del déficit alimentario. La búsqueda de los mejores mapas de ubicación de usos de suelo se hace utilizando el algoritmo genético multiobjetivo, NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm) considerablemente modificado para adaptarlo al problema de carácter territorial planteado en esta tesis. Los resultados obtenidos mejoran los que la propuesta oficial de distribución espacial, logrando reducir en 9% y 5,2% las presiones negativas sobre el medio ambiente y el déficit/superávit alimentario respectivamente, generando incluso un pequeño aumento de la renta (1%).

Los cambios que a lo largo del tiempo sufren los usos de suelo no podían quedar fuera de un modelo prospectivo como MAUSS, que si bien ya constituye por sí mismo un generador de soluciones espaciales a escala sub-regional éstas son para un momento determinado, de presente o futuro. Por ello, en el capítulo 5, el territorio, como sistema complejo y dinámico, es sometido a un procedimiento de simulaciones anuales sucesivas hasta el año horizonte deseado mediante la técnica Dinámica de Sistemas (DS) que se incorpora a MAUSS para dar lugar al modelo MAUSS-DS, incluyendo la variable tiempo en la metodología de optimización territorial; con lo que período a período se obtienen las mejores soluciones espaciales en el área de estudio. Gracias al acoplamiento de estas dos metodologías programadas en lenguaje Matlab, los objetivos de planeación definidos basados en criterios de sostenibilidad, que en esta etapa actúan como restricciones, se garantizan período a período a través de los mecanismos de realimentación definidos en el sistema. La simulación de la evolución temporal de un territorio parte tanto del frente de Pareto que genera MAUSS en la primera etapa, como de cualquier otra distribución espacial de los usos del suelo en tres escenarios de simulación o cambio definidos previamente: a) Escenario de Tendencia Histórica (ETH), que atiende a la evolución tendencial de los factores de cambio (variables

económicas, sociodemográficas y biofísicas) en el contexto nacional y local del área de estudio; b) Escenario de gran crecimiento Urbano Industrial, en el que las tasas de cambio y valores iniciales que asumen dichas variables responden a grandes incrementos poblacionales y económicos y c) Escenario de desarrollo Sostenible (ES), en el que los factores de cambio buscan satisfacer las necesidades de generaciones presentes y futuras, reduciendo la pobreza y conservando los sistemas de soporte vital (Kates, 2011).

Los resultados de MAUSS-DS en la zona de estudio muestran que las soluciones espaciales obtenidas desde MAUSS en sus transformaciones temporales para el periodo 2018-2050, arrojan mejores valores de las funciones objetivo en cada escenario de cambio respecto a la evolución de la propuesta oficial bajo dichos escenarios. Los resultados más significativos los proporciona el escenario ES, donde se logra mejorar la renta un 7,9%, y disminuir 6,1% las presiones ambientales en relación a la distribución de usos prevista para 2050 comparada con la propuesta oficial en dicho escenario. Se observa gran similitud espacial en el conjunto de soluciones óptimas al final de los períodos simulados en todos los escenarios, de lo que se desprende la consistencia del modelo integrado ante distintos escenarios de cambio al identificar las mejores ubicaciones de usos a lo largo del tiempo.

La aplicación de los modelos MAUSS y MAUSS-DS en la búsqueda de alternativas territoriales sostenibles, tanto bajo determinadas condiciones como a largo plazo, facilitan la incorporación de criterios racionales en el proceso de planificación territorial a diversas escalas espaciales.

Summary

Land use distribution is the core of the complex process of spatial planning as it constitutes the basis for most productive activities; it exhibits, therefore, the rate of resources exploitation by man. Spatial regulations and the establishment of maximum limits of resources utilization are urgent tasks at any territorial level as they would allow significant contributions to environmental preservation and biodiversity protection. The challenge is not simple; major economic interests, those emerged from the irrational forms of resources exploitation, are at stake. Ibero-American countries illustrate that situation; the Amazon forest devastation, the higher deforestation rate of Mexican forests, the chaotic and extended urban expansion of main cities, the unregulated and polluting mining activities, the agricultural soil degradation among others, epitomize their land use dynamics, besides the lag in developing integral systems for spatial planning.

The development of scientific tools for a territorial sustainability is critical for any region, especially for poor and undeveloped countries. Spatial optimization models as informatics tools for decision making support systems have hardly been used in developed countries with a few traces of sustainability criteria.

Facing this problem, a spatial optimization model (MAUSS for its Spanish initials) is developed in this thesis. It was applied to “Los Llanos de San Juan” in Puebla State (Mexico) due to the great land use transformations ongoing after an industrial allocation of the automotive sector (Audi) in a predominantly agricultural region.

This thesis holds seven chapters and several appendices with supplementary information. Chapter 1 contextualizes the land use allocation problem whereas chapter 2 details the thesis structure and objectives.

In Chapter 3 study areal is characterized; it is constituted by a population of 80.000 inhabitants from 5 municipalities that occupies an area of 526,5 square kilometers in an endorheic basin. It is surrounded from West to Southeast by a small mountain range. The importance of grain production and livestock products (for self-consumption and regional trade), the national significance of local pulses production, the agri-food industry specialization of the region as much as its ecological fragility calls into a question the feasibility of new industrial and urban allocations on the alluvial plain.

The methodology of MAUSS is outlined in chapter 4; territorial evaluation criteria are defined including environmental, social and economic issues. In the first case, main global aspects are addressed for local assessments, such as water (through the concepts of Water footprint and polluting potential for surface and ground water) and Green House Gas emissions, quantifying the emissions per human activity defined, in both cases, as land use type. As another crucial challenge towards future population growth, social aspects refer to the alimentary self-sufficiency in the region which is inextricably linked to the environmental and economic subjects. This latter included as GDP at regional scale.

The assessment is made by surface and land use type through the following objective functions: 1. Income maximization, 2. Minimization of negative pressures on the environment and 3. Minimization of food deficit/surplus. The search of the best land use allocations is performed by the NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm), which has been substantially modified to fit the spatial problem stated in this work. Results reveal that optimized solutions obtained a 9% lower pressure on the environment and 5,2% lower food excess, even generating a 1% higher income.

Land use spatio-temporal changes are included in MAUSS. In chapter 5 the territory is analyzed as a complex and dynamic system; annual variations are simulated for several periods through the Dynamic Systems technique coupled to MAUSS, giving rise to the integrated model MAUSS-DS. That is, time variable is included in the spatial optimization methodology in order to obtain best spatial land use allocations in the study area. Due to the coupling of both methodologies programmed in Matlab language, spatial targets defined on the sustainability basis that perform as restrictions at this stage, are period by period guaranteed via feedback loops previously defined. Temporary simulation of a territory performed by MAUSS-DS can come from different sources besides the Pareto front solutions thrown by MAUSS in three different simulation scenarios: a) Historical tendency (ETH) in accordance to the historical trends of drivers (economic, demographic and biophysical parameters) in the national and local context of the study area. b) Fast urban and industrial development scenario (EUI) and c) Sustainable Scenario (ES), in which drivers enable the challenge of sustainability: meeting the need of present and future generations while substantially reducing poverty and conserving the planet's life-support systems. (Kates, 2011).

The results of MAUSS-DS in the study area showed that optimal solutions derived from MAUSS in their temporary transformations for the period 2018-2050 deliver better values of the objective functions in each change scenario than the official proposal. The most significant results proceed from ES, where land use distributions achieve an income 7,9% higher and 6,1% lower negative pressures than the official proposal. It is noticeable a great spatial similarity in the optimal solution set at the end of the simulated periods in all scenarios, which suggest the consistency of the integrated model in identifying the best land use locations in all change scenarios over time.

The application of MAUSS and MAUSS-DS models in searching sustainable spatial alternatives, under certain conditions and for the long term, facilitate the incorporation of rational criteria in the territorial planning process for several geographic extents.

ÍNDICE GENERAL

Resumen

Summary

Índice General

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Índice de Términos y Símbolos

Índice de Abreviaturas.

Capítulo 1.	Introducción.....	1
1.1	La planeación territorial	2
1.2	El estado del arte de los modelos de optimización para la planeación espacial....	3
1.3	Los usos de suelo como componentes territoriales dinámicos.....	6
1.4	Criterios de planeación territorial	6
1.4.1	La protección del medio ambiente	7
1.4.2	La incorporación de la producción de alimentos a la planeación espacial	8
1.4.3	La renta como criterio de asignación de usos al suelo	8
1.5	La planeación territorial en México	9
Capítulo 2.	Descripción, objetivos y estructura de la tesis	11
2.1.	Normativa y programa de doctorado	12
2.2.	Líneas de investigación en las que se encuadra la tesis	12
2.3.	Objetivos y estructura de la tesis	12
2.3.1.	Objetivos	12
2.3.2.	Estructura de la tesis	13
2.4.	Publicaciones y resultados obtenidos	15
Capítulo 3.	Caracterización de la zona de estudio	17
3.1.	Localización y dimensión de la zona de estudio	18
3.2.	Medio Físico.....	19
3.3.	Usos de suelo	22
3.3.1.	Uso forestal.....	23
3.3.2.	Uso pecuario.....	24

3.3.3.	Usos agrícolas.....	25
3.3.4.	Uso Industrial.....	26
3.3.5.	Uso urbano.....	28
3.4.	Ordenamiento Territorial.....	29
3.4.1.	Planes urbanos.....	30
3.4.2.	Planes de gestión de recursos hídricos.....	30
3.4.3.	Planes de control de emisiones de GEI.....	31
3.4.4.	Planes de desarrollo económico.....	32
Capítulo 4.	Modelo multiobjetivo de asignación de usos sostenibles del suelo.....	33
4.1.	Introducción.....	34
4.2.	Formulación del problema.....	34
4.3.	Modelo Multiobjetivo de Asignación de Usos Sostenibles del Suelo: MAUSS.....	40
4.3.1.	Representación del cromosoma.....	40
4.3.2.	Inicialización	41
4.3.3.	Operadores del modelo.....	42
4.3.3.1.	Operadores Genéticos.....	42
4.3.3.2.	Operadores Geométricos.....	45
4.4.	Aplicación del modelo MAUSS a Los llanos de San Juan (México).....	46
4.4.1.	Resultados.....	46
4.4.1.1.	Parámetros del modelo.....	47
4.4.1.2.	Rendimiento del proceso evolutivo.....	48
4.4.2.	Discusión.....	53
4.3.	Conclusiones.....	59
Capítulo 5.	Evolución temporal de la distribución de usos en un territorio.....	61
5.1.	Introducción.....	62
5.1.1.	Fundamentos de la Dinámica de Sistemas.....	62
5.1.2.	La Dinámica de Sistemas aplicada a problemas territoriales.....	64
5.2.	Formulación del problema	65
5.2.1.	Factores de cambio de la extensión de usos del suelo: ciclo principal del flujo del módulo de DS.....	66
5.2.2.	Mecanismos de autorregulación: Ciclos de realimentación secundarios del	

módulo de DS.....	71
5.2.2.1. Autorregulación del déficit/superávit alimentario.....	71
5.2.2.2. Autorregulación de las presiones negativas en medio ambiente.....	73
5.2.3. Combinación de la Dinámica de Sistemas con MAUSS: Algoritmo MAUSS-DS.....	75
5.2.3.1. Escenarios de simulación.....	77
5.2.3.2. Restricciones de MAUSS-DS.....	78
5.3. Resultados	78
5.3.1. Variación temporal del territorio por escenario de cambio.....	79
5.3.2. Variación de las superficies por tipo de uso de suelo en cada escenario de cambio.....	81
5.3.3. Mapas de usos de suelo óptimos para 2050 por escenario de cambio...84	
5.3.4. Mapas seleccionados de los frentes de Pareto de cada escenario de cambio.....	87
5.4. Discusión de resultados.....	92
5.5. Conclusiones.....	94
Capítulo 6. Conclusiones Generales.....	97
Capítulo 7. Bibliografía.....	101
Anexos.....	111
Índice de Anexos.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Localización del área de estudio.....	17
Figura 3.2. Mapa de Altimetría y Edafología.....	18
Figura 3.3. Hidrografía del área de estudio.....	19
Figura 3.4. Clima y precipitación media anual.....	20
Figura 3.5. Precipitación normal mensual período 1951-2010.....	21
Figura 3.6. Evapotranspiración media mensual período 2005-2017(fuente: INIFAP, 2015).....	21
Figura 3.7. Usos de Suelo actuales.....	22
Figura 3.8. Localización AUDI (fuente: Google Earth, 2016).....	26
Figura 4.1. Diagrama de flujo proceso de optimización de usos de suelo de MAUSS..	39
Figura 4.2. Operador de cruzamiento del modelo MAUSS.....	43
Figura 4.3. Operador de mutación del modelo MAUSS.....	43
Figura 4.4 Operadores geométricos del modelo MAUSS. a) Operador de dispersión geográfica (GDO) y b) operador de proporción (PO).....	45
Figura 4.5. Evolución de las funciones objetivo a lo largo de las generaciones (valores medios por iteración) en unidades adimensionales: a) Maximización de la renta, O1; b) Minimización de la presión negativa en el medio ambiente O2 y Minimización del déficit alimentario O3.....	47
Figura 4.6. Representación tridimensional del frente de Pareto después de 150 generaciones de MAUSS.....	48
Figura 4.7. Mejores mapas-solución por escenario, a) Maximización de la renta (SA), b) Minimización de la presión negativa en el medio ambiente (SB), c) Minimización del superávit alimentario (SC), d) Compensación de los tres objetivos (SD).....	52
Figura 4.8. Valores de las funciones objetivo de los escenarios óptimos SA, SB, SC, y SD (soluciones no dominadas) vs S01 (propuesta oficial): a) ingreso <i>versus</i> presiones negativas en el medio ambiente (PNA en unidades adimensionales), b) ingreso <i>versus</i> superávit alimentario en Gigacalorías (Gcal); y c) presiones negativas en el medio ambiente (PNA) <i>versus</i> superávit alimentario.....	53
Figura 4.9. Comparación de localizaciones de uso industrial según escenario.....	54

Figura 4.10. Correspondencia de ubicación de acuerdo a su aptitud territorial del uso pecuario en escenarios óptimos SA, SB, SC y SD.....	55
Figura 4.11. Comparación de localizaciones de uso forestal según escenario.....	56
Figura 4.12. Correspondencia de ubicación de los usos agrícolas conforme aptitud territorial y la distribución de la precipitación anual en escenarios óptimos SA, SB, SC y SD.....	57
Figura 4.13. Comparación de localizaciones de uso urbano según escenario.....	58
Figura 5.1. Diagrama básico de funcionamiento de la dinámica de un sistema de primer orden: a) con realimentación negativa o autorregulador, y b) con realimentación positiva. (Fuente: González-Busto, 1999).....	62
Figura 5.2. Diagrama causal de un sistema de segundo orden y sus tipos de oscilaciones (Fuente: González-Busto, 1999).....	62
Figura 5.3. Bucle principal del módulo de Dinámica de Sistemas de MAUSS-DS.....	69
Figura 5.4. Bucles de autorregulación de MAUSS-DS.....	73
Figura 5.5. Diagrama general de MAUSS-DS.....	75
Figura 5.6. Evolución del PIB (a) y de la población (b) a lo largo de los períodos por escenario de cambio.....	79
Figura 5.7. Variaciones porcentuales del escenario EUI en los rendimientos de los usos a) agrícola seco y b) pastizal; en los años 2027 a 2035.....	80
Figura 5.8. Variaciones de superficie por tipo de uso de suelo y escenario a lo largo de los períodos: a) superficie industrial, b) superficie urbana, c) superficie de seco, d) superficie de pastizal.....	82
Figura 5.9. Variaciones de los rendimientos agropecuarios para los escenarios EUI y ES: a) rendimiento en seco ($t \cdot ha^{-1}$); b) rendimiento en pastizal ($t \cdot ha^{-1}$).....	83
Figura 5.10. Desempeño de las funciones O 1, O 2 y O 3 y su comparación con la evolución de S01 en cada uno de los escenarios de cambio: a) ETH, b) EUI, c) ES.....	85
Figura 5.11. Distribuciones espaciales escenario de cambio ETH. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario; d) Equilibrado.....	87
Figura 5.12. Distribuciones espaciales escenario de cambio EUI. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario; d) Equilibrado.....	88
Figura 5.13. Distribuciones espaciales escenario de cambio ES. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario=mapa equilibrado.....	89

Figura 5.14. Evolución temporal del escenario S01 en cada uno de los escenarios de cambio al año 2050.....	90
Figura 5.15. Evolución temporal de la solución SC. a) Mapa-solución SD (2018); b) Mapa-solución SD-ETH (2050); c) Mapa-solución SD-EUI (2050); d) Mapa-solución SD-ES (2050).....	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Renta y aporte de calorías (Gcal) de los productos pecuarios en la zona de estudio.....	23
Tabla 3.2. Estadísticas agrícolas del área de estudio.....	24
Tabla 3.3. Tamaño de los asentamientos del área de estudio al año 2010.....	27
Tabla 4.1. O1: Renta Anual en millones de pesos.....	49
Tabla 4.2. O2: Valores anuales de presión negativa en el medio ambiente en unidades adimensionales.....	50
Tabla 4.3. O3: Superávit alimentario de los usos agrícolas en Gigacalorías (Gcal).....	51
Tabla 5.1. Factores de cambio y variables del sistema.....	66
Tabla 5.2. Valores de los parámetros en cada escenario de cambio.....	78

INDICE DE TÉRMINOS Y SÍMBOLOS

α_{u*ij}	Factor de aptitud territorial para el uso de suelo u^* ubicado en la celda ij
β_{gw}	Proporción de agua subterránea existente en la zona de estudio (%)
β_{sw}	Proporción de agua superficial existente en la zona de estudio (%)
γ_u^{-1}	Factor de penalización adimensional dependiente del tipo de uso u que sustituye al bosque
δ_{u*}	Factor de conversión de los alimentos producidos en el uso u^* a unidades alimentarias (cal)
τ_{u*}	Proporción que ocupa el uso agropecuario u^* en el mapa (%)
A_{ij}	Índice de accesibilidad de la celda ij
AC	Autómatas celulares
$ACelda$	Área de cada unidad de superficie o celda del mapa (m^2)
AE	Algoritmos evolutivos
AN_p	Área necesaria por persona (m^2)
AU_p	Requerimientos nutricionales anuales por habitante (kilocalorías)
C	Columnas de la malla desde j hasta C
$CO_2 e$	Dióxido de Carbono equivalente
$CO_{2\ uij}$	Emisiones de CO_2 equivalente (t) de la celda ij con el uso u
D_{ij}	Distancia desde la celda ij a la vía de comunicación más cercana (km)
DS	Dinámica de sistemas
ES	Escenario Sostenible
ETH	Escenario de variación tendencial histórica en la DS
EUI	Escenario de gran crecimiento urbano-industrial
$FBKF$	Tasa de formación bruta de capital fijo (%)
Gcal	Gigacalorías
GDO	Operador de dispersión geográfica
HL_{u*}	Superficie cosechada del uso u^* (%)

$IncPIB$	Tasa de incremento del PIB (%)
$InvI$	Tasa de inversión en el sector industrial
LUC_{uij}	Emisiones de CO ₂ e (t) provocadas por el cambio de uso de suelo u (bosque) de la celda ij (pérdida neta de bosque)
M	Número de funciones objetivo del modelo, de j a M
MAUSS	Modelo Multiobjetivo de asignación de usos sostenibles del suelo
MAUSS-DS	Modelo integrado de asignación de usos sostenibles del suelo y dinámica de sistemas
$maxAU_{u*ij}$	Máximo posible de unidades alimentarias (cal) que se pueden producir en la celda ij con el uso de suelo u^*
$maxV$	Valor máximo del índice de vulnerabilidad hídrica
$maxP$	Valor máximo del índice de potencial contaminante
$maxD$	Distancia máxima a las vías de comunicación (km)
$minD$	Distancia mínima a las vías de comunicación (km)
$maxCO_{2uij}$	Máximo posible de emisiones (t) que podría generar la celda ij con el uso
NSGA-II	Non-sorting genetic algorithm - II
O1	Función Objetivo 1: Maximización de la renta
O2	Función Objetivo 2: Minimización de PNA
O3	Función Objetivo 3: Minimización del Déficit/Superávit alimentario
OU	Función especial de minimización de diferencias porcentuales de los usos de suelo (dentro del cruzamiento)
PA_{uij}	Presión negativa sobre el aire que ejerce el uso u en la celda ij
PM_{iju^*}	Precio medio de los cultivos del uso u^*
PNA	Índice de la presión negativa sobre el medio ambiente
PO	Operador de proporción
Pop	Población (habitantes)
pop	Población total del área de estudio (habitantes)
P_u	Superficie del uso de suelo u (celdas)

P_{uij}	Índice de potencial contaminante del uso u en la celda ij
$P_{u low}$	Límite inferior de superficie del uso u (celdas)
$P_{u low}$	Límite superior de superficie del uso u (celdas)
PW_{uij}	Presión negativa sobre los recursos hídricos que ejerce el uso u en la celda ij
R	Filas de la malla, desde i hasta R
S	Número de soluciones sometidas a la simulación temporal desde s hasta S
S00	Escenario 00 (antes de la implantación industrial)
S01	Escenario 01 (usos actuales del suelo, propuesta oficial)
SA	Escenario óptimo A (mejor individuo seleccionado en O1)
SB	Escenario óptimo B (mejor individuo seleccionado en O2)
SC	Escenario óptimo C (mejor individuo seleccionado en F O3)
SD	Escenario óptimo D (individuo con mayor compensación de las funciones objetivo)
Sv_u	Sub-conjunto idóneo de celdas de la malla o mapa para el uso u (celdas)
t	Período de simulación de t_0 a T
TC	Tasa de crecimiento de la población (%)
u	Tipo de uso de suelo, que varía de u hasta U
u^*	Uso de suelo de tipo agropecuario (productor de alimentos), que varía desde u^* hasta U^* , como subconjunto de los tipos de uso de suelo de u a U
$U_{ij}(x)$	Valor del uso de suelo en proceso –desde i hasta U - evaluado en el j ésimo objetivo para el padre (x) (padre 1 o padre 2), dentro de la función especial de minimización
U_{ij}^{max}	Valor máximo obtenido del conjunto de la población inicial evaluado para el i ésimo uso (en proceso) en la j ésima función objetivo, dentro de la función especial de minimización
U_{ij}^{min}	Valor mínimo obtenido del conjunto de la población inicial evaluado para el i ésimo uso (en proceso) en la j ésima función objetivo, dentro de la función especial de minimización

V_{ij}	Índice de vulnerabilidad hídrica de la celda ij
WA_{ij}	Disponibilidad de agua en la celda ij ($m^3/celda \cdot año$)
WF_{uij}	Huella hídrica del uso u en la celda ij ($m^3/celda \cdot año$)
X_{uij}	Variable de decisión binaria que solamente puede alojar un tipo de uso de suelo u en la celda ubicada en la fila i , columna j
Y_{u^*t}	Rendimientos promedio del uso u^* en el período t
Y_{u^*}	Rendimientos iniciales del uso agropecuario u^*

INDICE DE ABREVIATURAS

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua, México
E.E.	Energía Eléctrica
FAO	Food and Agriculture Organization
GEI	Gases de efecto invernadero
HH	Huella hídrica
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuariasmdp
mdp	millones de pesos (mexicanos)
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
SFA	Secretaría de Finanzas y Administración del Estado de Puebla, México
SIAP	Sistema de Información Agrícola y Pecuaria´
SSAOT	Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento del Terrotorio. Puebla, México.
PIB	Producto interno bruto
UN	United Nations (ONU)
USDA	United States Department of Agriculture



Capítulo 1.

Introducción General

1.1 La planeación territorial

Vestigios de planeación espacial se encuentran desde las sociedades antiguas (Espinel, 2002), no obstante la Revolución Industrial desata en las ciudades y regiones consecuencias sanitarias, ambientales y económicas que emergen como causantes de una articulación normativa (Canales, 1993; Buchan, 1932) y por ende como antecedentes de la planificación, para regular y hacer “viable” la vida en las ciudades en un contexto de explotación de los recursos naturales, humanos y de utilización de combustibles fósiles nunca antes experimentado por la humanidad.

De acuerdo con Troitiño (2008), en Europa de inicios del siglo XX se dieron dos formas principales de planeación espacial: la planeación física a escala regional o subregional (ordenamiento territorial) y la planeación económica y social. En la primera, países como Alemania, Austria, Suiza, Holanda, España, Italia y Portugal pugnaron por la estructuración territorial a través de elementos como los componentes infraestructurales y la asignación de usos de suelo, mientras que la planeación económica y social se verificó fundamentalmente en Reino Unido y en menor medida en Francia con la preocupación de corregir desequilibrios regionales.

Algunos países de América Latina como Perú, Brasil y México iniciaron en la década de los años 40 del siglo pasado sus primeros intentos de planificación regional, teniendo como paradigma una estrategia de cuencas hidrográficas del modelo norteamericano de la Tennessee Valley Authority (TVA) en 1933 (Riffo, 2013). No obstante, la dirección que tomó el desarrollo del capitalismo como modelo económico preponderante después de la segunda guerra mundial, sometió a los países pobres de todo el planeta, entre ellos la mayoría de los países latinoamericanos, a un proceso de industrialización y explotación intensiva de sus recursos naturales de los que se desprendieron acelerados crecimientos demográficos en sus ciudades más importantes (Massiris, 2008). Para estos países y sus gobiernos, la planeación “sólo” fue posible a partir del financiamiento de diversos organismos internacionales como el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional, bajo el enfoque *desarrollista* (Gutiérrez, 2013), en el que la planeación era vista como un medio para “satisfacer” las necesidades de desarrollo (Troitiño, 2008) a través de polos de desarrollo. Los desequilibrios socio-espaciales y ambientales en esos territorios son ingentes y evidencian hoy día los costos del desarrollo neoliberal que generó, a partir de la desregulación y financierización de las economías, una gran riqueza económica concentrada en unos cuantos individuos a escala planetaria.

Algunas acciones específicas en Latinoamérica para los años 70 en materia de planeación espacial fueron la elaboración de importantes planes y normas reguladoras de usos de suelo en Argentina, Brasil, Costa Rica, Colombia, México y Cuba (Massiris, 2008). El concepto de ordenamiento territorial que se acuñó como instrumento de gestión ambiental y desarrollo sostenible llegó formalmente a América Latina con la Ley Orgánica de Ordenación del Territorio de Venezuela de 1983, más de veinte años después de afianzado en Europa. El germen de la planificación ambiental empieza a surgir en esos años y a desarrollarse en la siguiente década, verificándose su

consolidación a partir de la Declaración de Río (ONU, 1992). Como característica común de la mayoría de los países latinoamericanos, los instrumentos normativos resultantes de las nuevas concepciones ambientalistas mostraron una débil visión prospectiva ya que, de acuerdo con Massiris (2008), no incorporaron visiones alternativas de futuros deseados o posibles ni los métodos para alcanzarlos; carecieron de objetivos de largo plazo en medio del rezago y múltiples limitaciones provocadas por el sistema económico al interior de cada nación.

La incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en América Latina en 1987 (Buzai y Robinson 2010) tuvo lugar a partir de un proceso de transferencia tecnológica impulsado por The Ohio State University y a través de Duane Marble y Esri, marcas que hicieron las primeras donaciones de software para manejo de cartografía raster y vectorial a partir de un importante apalancamiento de lo que se constituiría como Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG), instancia que ha jugado un rol destacado al organizar periódicamente la Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (CONFIBSIG) como instrumento de transferencia tanto de tecnología como de enfoques teóricos que sin lugar a dudas han impactado en Latinoamérica.

1.2 El estado del arte de los modelos de optimización para la planeación espacial

Si bien la planeación espacial compendia un complejo proceso de gestión, participación social, instrumentación, regulación, etc., la elaboración de propuestas iniciales de asignaciones de usos de suelo constituye el sustento técnico-científico de la ordenación del territorio que, dependiendo de su enfoque teórico, puede ir orientando la toma de decisiones; de ahí la importancia de construir modelos con carácter prescriptivo realmente sostenibles.

Un avance significativo en el trabajo de los planificadores, incluso anterior a los SIG, radica en el desarrollo de la informática, particularmente para el proceso de construcción de modelos de optimización, al permitir incorporar con facilidad gran cantidad de variables y restricciones (sin dejar de ser simplificaciones de la realidad con propósitos específicos) así como métodos y técnicas que ayudan a optimizar la asignación de usos de suelo.

En un primer momento estos modelos mostraron sus virtudes para optimizar localizaciones singulares como industrias, equipamientos, infraestructuras, zonas comerciales, áreas residenciales y continúan siendo muy eficientes cuando el propósito es obtener localizaciones puntuales óptimas (López, *et al.* 2007). Posteriormente, dado su potencial, el grado de complejidad de los modelos de optimización espacial se ha incrementado permitiendo optimizar de forma simultánea la ubicación de varios usos que compiten en un territorio con el propósito de ofrecer alternativas equilibradas de planeación espacial.

El camino que ha seguido el desarrollo computacional en materia de optimización

espacial ha sido significativo, diverso y ampliamente documentado: desde la Programación Lineal (PL) para uno o varios objetivos (Herbert y Stevens 1960, Schlager 1965, Chuvieco 1993, Arthur y Nalle, 1997, Malczewski 1999), hasta las técnicas heurísticas (Feng y Lin, 1999, Balling *et al.*, 1999), a través de las cuales es posible encontrar no una única solución sino un conjunto de soluciones factibles (frente de Pareto) en las que se compensan varios objetivos frecuentemente confrontados como la competencia por los usos de suelo, con un desempeño mejor y menos restrictivo que los primeros intentos computacionales, convirtiéndose en herramientas muy útiles para los tomadores de decisiones.

Como técnicas heurísticas dirigidas a la obtención del frente de Pareto, los modelos de optimización han encajado muy bien en la solución de problemas de asignación de usos de suelo; muchos de los algoritmos que utilizan son bio-inspirados y poseen una cualidad adaptativa. De entre ellas podemos mencionar los algoritmos genéticos (AG), inmunológicos, de enjambre y de colonia de hormigas (Goldberg, 1989, Ma y Zhao, 2015, Huang, *et al.* 2013, Liu, *et al.* 2013, Dorigo y Blum, 2005) entre otros. Todos ellos se han convertido en herramientas muy difundidas debido a su gran capacidad adaptativa para resolver problemas de diversa índole, desde aplicaciones en la ingeniería hidráulica (Fernández *et al.*, 2013; Fernández *et al.*, 2014) hasta la optimización en la administración de hospitales (Delgado-Osuna, *et al.* 2016). Al combinar estos algoritmos con otras herramientas, ganan efectividad y se convierten en poderosos motores de búsqueda de soluciones.

A pesar de la amplia utilización y desarrollo de los modelos de optimización en múltiples disciplinas, su aplicación en la planeación espacial está aún restringida a ciertos países, como Estados Unidos con una gran cantidad de aplicaciones fundamentalmente de modelos de programación lineal desde hace varias décadas: *The Du Page County Regional Planning Commission's Model* en Illinois, (Bammi y Bammi. 1979), Pen Jersey Model en Filadelfia. (Herbert and Stevens, 1960), etc.; Holanda (Aerts *et al.* 2003, Stewart *et al.* 2004), Reino Unido (Matthews *et al.* 1999, Caparros-Midwood y Dawson, 2015), España (Chuvieco 1993, Porta *et al.* 2013) o Japón (Haque y Asami, 2014). También existen algunos modelos de planeación territorial en países con economías emergentes y con graves problemas ambientales como el caso de China (Cao *et al.* 2011, Huang, *et al.* 2013, Liu X. *et al.* 2013, Liu Y. 2015). Adicionalmente existen algunos modelos de planeación espacial en territorios en los que ha habido un desarrollo científico importante en la materia, como Grecia (Karakostas, 2014), Portugal (Datta, *et al.* 2006) e Irán (Sadeghi *et al.* 2009) entre otros. No obstante se trata de una herramienta de aplicación poco extendida o inexistente en países pobres o *en vías de desarrollo*.

El uso de estos modelos se ha verificado para diversas escalas geográficas, desde las locales (urbanas) hasta las meso-regionales o grupos de naciones, como es el caso de la Unión Europea, en la que los enfoques teóricos de planeación plasmados en la Estrategia Territorial Europea (ETE, 1999) encontraron alternativa de cristalización primero mediante el uso de un modelo multi-objetivo de Programación Lineal

(Latesteijn, 1995, citado por Briassoulis, 2000) denominado “Interactive Multiple Goal Programming” (IMGP), aunque dada la escala de trabajo sólo ofrece escenarios de comportamiento y no de distribución espacial específica.

El uso específico de los AG data de la década de los noventa, evaluando la información territorial a través de representaciones vectoriales (Matthews et al. 1999) o como malla de celdas (Stewart, et al. 2004) generalmente asistidas por sistemas de información geográfica (SIG); ambas formas de representación del territorio han mejorado su resolución, sin embargo para la última, la mejora ha sido más significativa porque de representaciones esquemáticas con celdas de gran tamaño (Feng y Lin, 1999) se pasó hoy día a representaciones muy precisas a través de mallas con celdas de un tamaño muy pequeño gracias a las fuentes cartográficas (satelitales) accesibles que permiten una evaluación muy detallada del territorio. No obstante estas mejoras, la resolución espacial depende más de la escala geográfica con la que se va a trabajar.

El principal reto de los AG usados para las asignaciones de usos de suelo es obtener, a diferencia de sus aplicaciones en problemas no espaciales, no solamente un conjunto de soluciones óptimas de acuerdo a las funciones objetivo del modelo sino también obtener soluciones espacialmente coherentes basados en procedimientos cargados de aleatoriedad para simular el proceso evolutivo de los seres vivos. Estos procedimientos son aplicados a gran cantidad de variables de decisión, en este caso unidades territoriales de análisis que asumirán un tipo de suelo. Para solucionar este problema, los investigadores han optado en la práctica por una de las siguientes dos opciones: (1) incluir, desde la perspectiva de la geometría espacial (Buzai, 2010), los aspectos geométricos como funciones objetivo del algoritmo para optimizar el tamaño y compactación de los usos de suelo; y (2) usar, ajustar e incluso crear nuevos operadores genéticos para alcanzar la coherencia geométrica, resguardando las funciones objetivo como metas finales del proceso de planeación espacial.

Desde la primera perspectiva, que es más útil a escala local, se han realizado varios trabajos con buenos resultados espaciales y computacionales aunque también con una enorme simplificación en la evaluación territorial, la cual se circunscribe a una sola función de idoneidad o aptitud. Desde la segunda aproximación, preferida en este trabajo, en la que la ubicación de una celda o polígono de uso de suelo es tratado como un problema combinatorio de optimización o un problema de programación de enteros (Datta, et al. 2006) se han observado excelentes resultados cuantitativos de distribución espacial para diversas escalas de trabajo (local y regional) y una evaluación territorial más detallada a través de funciones objetivo que permiten mejores ubicaciones de uso de suelo. Ambas aproximaciones de los AG han incorporado procedimientos adicionales tales como la teoría de juegos, algoritmos paralelos, la programación por objetivos o el método de la suma ponderada, etc., convirtiéndose en componentes fundamentales de los sistemas de apoyo a la decisión (Liu et al. 2015, Porta et al. 2013, Stewart et al. 2003) en el proceso de planeación territorial.

Uno de los algoritmos genéticos multi-objetivo más empleados para la optimización de

soluciones de diversas áreas del conocimiento por su eficiencia y efectividad de optimización es el Non Sorting Genetic Algorithm II o NSGA-II (Deb *et al.* 2002) mismo que ya ha sido utilizado exitosamente para la planeación espacial (Datta, *et al.* 2006, Cao *et al.* 2011, Karakostas, 2014) y se toma como base en esta tesis para el desarrollo de un modelo de asignación de usos sostenibles de suelo.

1.3. Los usos de suelo como componentes territoriales dinámicos

Inherentes al modelo económico predominante, los cambios de uso de suelo son procesos que describen la intensidad de la explotación de los recursos naturales en el territorio y son por tanto procesos dinámicos. Ante estas circunstancias, los modelos de optimización espacial además de resolver las asignaciones de usos de suelo para un momento determinado, sea éste de presente o de futuro, enfrentan la necesidad de conocer las posibles evoluciones en el tiempo de los usos de suelo y su distribución espacial. La dinámica de sistemas (DS) emanada de aplicaciones industriales (Forrester, 1961) constituye una técnica de simulación importante (Forrester, 1969) para cuestiones espaciales al asumirse éstas como sistemas complejos interrelacionados; al principio evaluando las interacciones de la dinámica urbana y los límites del crecimiento de las ciudades y posteriormente para problemas regionales o ambientales (Guo *et al.* 2001); sin embargo, al carecer de vinculación estrecha con los atributos territoriales, su precisión como modelos predictivos para problemas espaciales quedaba limitada.

Una forma de trascender las limitaciones en la evaluación de los cambios espacio-temporales de los usos de suelo ha sido a través de la combinación de la DS con otros modelos de simulación como los autómatas celulares (AC), permitiendo incluir los aspectos socio-económicos que modulan los crecimientos urbanos (Han *et al.* 2009). Con ello se hace posible la evaluación conjunta de factores regionales y patrones locales (Lauf *et al.* 2012) involucrados en la dinámica de uso de suelo. No obstante, este tipo de modelos están más abocados a anticipar espacialmente los crecimientos poblacionales (Sanders y Sanders, 2004) y dinámicas residenciales en contextos físicos y socioeconómicos regionales (Han *et al.* 2009), que a proveer el equilibrio entre todos los usos de suelo en un territorio.

Las evoluciones temporales de los usos de suelo han sido poco incorporadas (Datta *et al.* 2006; Liu *et al.* 2013) a los algoritmos evolutivos desaprovechando su gran potencial de optimización de distribución ante cambios espaciales a largo plazo.

1.4. Criterios de planeación territorial

De forma convencional, el principal objetivo de los modelos de la planeación (referida al territorio) ha sido la búsqueda de la mayor rentabilidad en las asignaciones de usos de suelo, relacionados con aspectos que van desde la ordenación de cultivos, la centralidad, la localización industrial, localización de polos de desarrollo, verificados en los modelos de Von Thunen 1826, Weber 1909, Christaller 1933, Palander 1935, Perroux 1954, (citados por López 2003, y Rodríguez, 2000), Tiebaut 1956, ente otros. Sin embargo, los impactos negativos y desequilibrios medioambientales derivados de

ese tipo de explotación del territorio, están obligando, como se ha comentado, al replanteamiento de los criterios de planeación espacial.

El enfoque de sostenibilidad engloba al territorio puesto que éste sirve de base para promover un *desarrollo sostenible*, del tipo de desarrollo que satisfaga las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (UN, 1987).

Los nuevos modelos multi-objetivo facilitan la tarea de la introducción de los criterios de sostenibilidad de forma cuantitativa, así como su evaluación respecto de otros objetivos a alcanzar en un territorio. Si bien los problemas específicos en materia ambiental, social y económica pueden variar de un lugar a otro, a continuación se describen aquellos criterios que pueden generalizarse para lograr asignaciones de uso sostenibles.

1.4.1. La protección del medio ambiente

Para la FAO (2005), uso de suelo es la “función o propósito para el cual es usada la tierra por la población local humana... actividades humanas que están directamente relacionadas al suelo haciendo uso de sus recursos o teniendo un impacto en ellos”. El suelo es en sí mismo uno de esos recursos, pero la explotación se extiende a todos los recursos de un territorio. Por ello de forma simplificada, las distribuciones espaciales de esas explotaciones se pueden ver como usos de suelo a los que, como consecuencia, están ligados gran parte de los impactos ambientales. De ahí la importancia del control sobre los usos de suelo para permitir una explotación sostenible de los territorios y evitar desastres ambientales irreversibles, como ya ha ocurrido con la devastación del Amazonas (Laurance *et al.* 2013) o la desaparición del Mar de Aral (UNEP, 2002) entre otros.

Con el Informe Brundtland (UN, 1987) la noción de sostenibilidad y desarrollo sostenible cobra uniformidad y peso a nivel internacional; los sistemas naturales que soportan la vida en el planeta quedan apuntalados (atmósfera, aguas, suelos y seres vivos) y se establece que como mínimo, el desarrollo sostenible no debe dañarlos. La Declaración de Río (ONU, 1992) es un hito importante a nivel mundial en la toma de conciencia de las consecuencias de la degradación ambiental a nivel planetario y ha dado pauta a la proliferación de gran cantidad de trabajos científicos en prácticamente todas las áreas del conocimiento relacionadas con la problemática ambiental y la sostenibilidad. Todos esos esfuerzos investigativos constituyen un acervo disponible para la humanidad al margen de la efectividad del diseño y aplicación de las regulaciones ambientales en países y grandes regiones, del carácter no vinculante de los acuerdos internacionales en la materia al interior de cada nación, y de la postura negacionista que sostienen quienes defienden su interés económico, la extracción y degradación de los recursos naturales para la producción irracional de bienes de consumo.

Al respecto, temas como las emisiones de CO₂, la erosión del suelo, el valor natural de

áreas, pérdida neta de bosque por cambios de uso de suelo, idoneidad del uso de suelo, beneficio ecológico, entre otros, han sido incluidos como componentes ambientales de los modelos de planeación espacial (Cao, *et al.* 2012, Datta, *et al.* 2006, Ma y Zhao, 2015).

La degradación y sobreexplotación de los recursos hídricos y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han sido problemáticas nodales que conllevan a innumerables repercusiones ambientales en los territorios. Su inclusión dentro de los planes de ordenación territorial no ha sido sencilla debido a la complejidad de las evaluaciones y las escalas de trabajo regionales así como su concreción como políticas de asignación de usos.

Una carencia dentro de la planeación espacial consiste en la falta de vinculación de las problemáticas territoriales relacionadas con el recurso hídrico. A pesar de existir un enorme desarrollo científico y tecnológico en relación al agua, la ordenación territorial difícilmente integra su evaluación (Jalem, 2016).

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) podrían considerarse como el tema ambiental de mayor relevancia a nivel global puesto que constituyen la principal causa del calentamiento global y por ende del cambio climático y la pérdida de ecosistemas y biodiversidad. Las emisiones de dióxido de carbono aportan el 76% del total de los GEI (EPA, 2017) y su utilización ha crecido un 45% en las dos décadas pasadas (globalcarbonatlas.org, 2015) por ello la disminución del uso de los combustibles fósiles y su paulatina desaparición son el mayor objetivo a alcanzar en el corto plazo. Dada la trascendencia del tema, algunos trabajos de optimización de usos de suelo lo han considerado en el ámbito de la planeación espacial (Cao *et al.*, 2011).

1.4.2. Incorporación de la producción de alimentos a la planeación espacial

La satisfacción de las necesidades alimentarias de la población muestra una brecha muy grande entre países; los países pobres en muchas ocasiones a pesar de la riqueza de sus territorios, se encuentran en una situación de dependencia alimentaria importante o sin más, en riesgo de hambruna, a pesar del creciente porcentaje de alimentos que se convierten en desperdicio (ONU, 2017; FAO, 2012). La seguridad alimentaria apenas se tiene en cuenta en la planeación espacial, tan sólo la han considerado ahora países con economías más planificadas, como el caso de China (Liu X., *et al.* 2013, Song *et al.* 2012), o casos subnacionales particulares como las ecovillas (Menconi *et al.* 2013) en las que la concepción de los asentamientos humanos contempla la producción de los alimentos necesarios para sus habitantes, en un esquema de autosuficiencia alimentaria y cuidado del medio ambiente.

1.4.3. La renta como criterio de asignación de usos al suelo

Muchas investigaciones de optimización espacial continúan hoy día incluyendo formas variadas de la renta como objetivo de la planeación; ya sea como minimización de los costos de conversión de los usos de suelo (Cao *et al.* 2012) o como maximización del

valor económico de las actividades propuestas en una zona, etc. (Datta *et al.* 2006)). Este objetivo no deja de ser válido puesto que el territorio es uno de los principales sustentos de la generación de riqueza, sin embargo la problemática a la que actualmente se enfrenta el planificador y la sociedad en su conjunto es que las actividades económicas, entendidas en este caso como usos de suelo deben apalancar el *desarrollo sostenible*, promoviendo el equilibrio entre medio ambiente, sociedad y beneficio económico. Desde este enfoque, la inclusión de la renta como criterio de planeación debe estar bien acotado por las otras dos esferas de la sostenibilidad para alcanzar el equilibrio territorial.

1.5. La planeación territorial en México

Para el caso de la planeación espacial en México diversos autores coinciden en aspectos fundamentales; la existencia de un rezago teórico-conceptual en la materia desde hace más de 30 años (Gutiérrez, 2013) y la carencia de adopción de conceptos y esquemas de sistemas complejos que involucren métodos interdisciplinarios (Sánchez, *et al.* 2013).

La práctica de planeación en México se ha abocado a engrosar su carácter normativo y centralizado en detrimento de su carácter sustantivo (Gutiérrez, 2013) y se cristaliza en una Ley de Planeación (LGP) de principios de los años 80 que sólo formaliza la promulgación de planes mientras que la capacidad y voluntad de intervención en el territorio se vuelve cada vez más raquítica (Hiernaux y Torres, 2008). En materia de política territorial y derivado de este esquema de planeación, se ha generado una división del Ordenamiento, que se percibe innecesaria y hasta problemática ya que se persiguen objetivos similares, en dos vertientes; la abocada a aspectos ambientales (Ordenamiento Ecológico, que ha alcanzado una mayor desarrollo técnico y normativo) y la referida al ordenamiento Territorial, que en general privilegia la planeación urbana y cuenta con menos fuerza de aplicación (Sánchez *et al.*, 2013).

Como consecuencia de ello, los especialistas en la materia han coincidido en que en México se opta por una planeación de intervenciones parciales y/o focalizadas, abandonando la intervención integral en el territorio (Hiernaux y Torres, 2008) y en la que se verifica una carencia de elementos de análisis mediante los que se construya un enfoque de mayor integralidad (Sánchez *et al.* 2013).

En medio de este panorama de rezago generalizado que algunos caracterizan como de *crisis de la planificación territorial tradicional* (Monterrubio, 2013), existe cierto avance en materia de la utilización y/o construcción de las herramientas técnicas e informáticas que constituyen insumos valiosos para los planificadores y que han sido producto del trabajo de instituciones como el Instituto de Geografía de la UNAM, del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEC) o la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO); sin embargo, hasta ahora, no se han aplicado de forma integradora ni han redundado en una verdadera sostenibilidad territorial del país, ya que son en su mayoría herramientas de carácter fundamentalmente predictivo y no prescriptivo.



Capítulo 2.

Descripción, objetivos y estructura de la tesis

2.1. Normativa y programa de doctorado

Como expresión de la vinculación internacional de las Universidades españolas, la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP) emitió la convocatoria del Programa de Doctorado Iberoamericano en Agroalimentación Puebla (México) – Córdoba (España) Bienio 2013-2015. Dicha iniciativa tendría lugar a través de la Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación (eidA3) de la Universidad de Córdoba para formar a los estudiantes iberoamericanos en sus distintos programas específicos. En ese marco, esta tesis surge del programa Ingeniería agraria, alimentaria, forestal y de desarrollo rural sostenible, que se imparte de forma conjunta con la Universidad de Sevilla, y se rige por la normativa RD 99/2011.

La tesis se ha escrito en español y está compuesta de 7 capítulos (incluyendo conclusiones y bibliografía) con sus correspondientes anexos.

2.2. Líneas de investigación en las que se encuadra la tesis

Es un trabajo que fusiona dos líneas de investigación que forman parte del programa doctoral relacionadas con la especialización de los directores de tesis y sus grupos de trabajo; por una parte la aplicación de técnicas de optimización al uso de los recursos agua y energía en la agricultura para mejorar su sostenibilidad y por otra la ingeniería geomática. En la construcción del modelo geoinformático de asignación sostenible de usos de suelo, objeto de esta tesis, las herramientas de optimización aplicadas en problemas de ingeniería hidráulica, en las que el primer grupo tiene una gran experiencia, han sido adaptadas como herramientas de optimización espacial a una escala de trabajo adecuada a la ordenación territorial (subregional). La geolocalización de los insumos de información y los resultados implicó desde el principio del proceso una indisoluble vinculación con las herramientas geográficas, muy desarrolladas por el segundo grupo, a partir de las cuales es posible la utilización de algoritmos evolutivos multiobjetivo para la planeación espacial.

La perspectiva de ordenación territorial asumida en esta tesis prioriza conceptos y criterios de sostenibilidad, muy trabajados por el grupo de ingeniería hidráulica, aunque apenas considerados en la planeación tradicional ante las dificultades para evaluar de forma cuantitativa y simultánea las características territoriales (económicas, ambientales y sociales) de las que se obtiene el sustento para la explotación sostenible del territorio.

2.3. Objetivos y estructura de la tesis

2.3.1. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es el desarrollo de un modelo multiobjetivo de asignación de usos sostenibles del suelo (MAUSS) a escala subregional con la capacidad de simular, a partir de soluciones óptimas obtenidas, la evolución espacio-temporal de las distribuciones de usos para preservar la sostenibilidad territorial a medio y largo plazo.

Para alcanzar este objetivo general, se formularon los siguientes objetivos particulares:

1. Maximización de la renta del territorio tomando como indicador el Producto Interno Bruto (PIB) de la subregión en estudio por actividad/uso debido a la facilidad de la obtención de los datos oficiales a escala municipal (INEGI, 2004, 2009, 2014; SAGARPA-SIAP, 2015). Se toma en cuenta el total del PIB por uso y no por habitante debido a que la tarea fundamental del algoritmo consiste en su maximización como indicador de riqueza producida en un territorio por tanto su desagregación per cápita no resulta indispensable.
2. Minimización de las presiones negativas en el medio ambiente del territorio en dos vertientes: sobre el recurso hídrico (uso y riesgo de contaminación) y sobre la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Cada actividad, entendida como uso de suelo, ejerce presiones sobre los recursos hídricos; esas presiones han sido evaluadas en este estudio atendiendo a dos aspectos fundamentales: la cantidad de recurso utilizado (Huella Hídrica) y la degradación o contaminación del mismo (en este caso como potencial contaminante). La huella hídrica (HH) como indicador integral de la apropiación del recurso hídrico que varía geográfica y temporalmente es contabilizado para estimar la explotación que se ejerce sobre el recurso en el territorio de estudio. El potencial contaminante depende tanto de la vulnerabilidad territorial como del riesgo de contaminación por tipo de actividad y se evalúa en el modelo para las aguas subterráneas y superficiales. El cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente por tipo de uso de suelo se realizó con base en la información oficial para los ámbitos nacional y estatal, retomando las metodologías convencionales para su cálculo a nivel municipal a partir de los datos disponibles a esa escala. El modelo orienta las distribuciones de usos mediante las que se obtengan las menores emisiones de GEI, puesto que son uno de los principales promotores del cambio climático y amenaza para los ecosistemas y la biodiversidad del planeta.
3. Minimización del déficit/superávit alimentario a partir de las necesidades nutricionales de la población del territorio, para que cada región produzca lo que su población local necesite y/o disminuya la dependencia alimentaria del exterior. En este estudio, la seguridad alimentaria se incorpora como un objetivo a alcanzar, atendiendo al aspecto social de la sostenibilidad, que sin lugar a dudas está íntimamente ligado tanto a las cuestiones económicas como a las ambientales.
4. Análisis de la evolución espacio-temporal de un conjunto de distribuciones sostenibles de usos del suelo ante diversos escenarios económicos y demográficos, proponiendo aquellas soluciones espaciales en las que la utilización del territorio pueda seguir siendo sostenible a largo plazo de acuerdo con los objetivos anteriores.

2.3.2. Estructura de la tesis

El primer capítulo es la introducción general en el que se abordan los antecedentes y el

contexto de aspectos multidisciplinarios propios de la planeación espacial, los modelos informáticos y los criterios de sostenibilidad territorial. El segundo capítulo presenta los objetivos y la estructura de la tesis. Los capítulos 3 a 6 contienen el desarrollo y los resultados de la investigación, organizados de la siguiente manera:

CAPÍTULO 3. Caracterización de la zona de estudio

En él se describe el contexto natural, social y económico de la zona de estudio como insumos de información necesarios para la construcción del modelo. Se realiza una caracterización de la dinámica demográfica de la subregión, de los rasgos geográficos que revelan el medio natural y se realiza la descripción de su área, localización, utilización de recursos hídricos y emisiones de CO₂ equivalente por tipo de uso de suelo. Así mismo se evalúa el aporte de alimentos que cada uso agropecuario produce para la población local y la renta que se desprende de cada actividad en la sub-región.

CAPÍTULO 4. Modelo Multiobjetivo de Asignación de Usos Sostenibles de Suelo (MAUSS)

Este capítulo desarrolla un algoritmo de optimización territorial evolutivo multiobjetivo; se formula el problema espacial a partir de la discretización del territorio en celdas homogéneas que, como unidades de análisis, funcionarán como variables de decisión durante el proceso de optimización. Se formulan y describen las funciones matemáticas (funciones objetivo) de evaluación del territorio: O1 maximización de la renta, O2 minimización de las presiones negativas sobre el medio ambiente, y O3 minimización del déficit alimentario; desagregando todas y cada una de las ecuaciones que las conforman.

El capítulo contiene también la explicación del funcionamiento del algoritmo genético y las modificaciones realizadas en el algoritmo base (NSGA-II); se describen las innovaciones en la inicialización de la población, la incorporación de los nuevos operadores genéticos diseñados y su funcionamiento, y el papel de los operadores geométricos construidos específicamente para la conformación de MAUSS. Así mismo se describen las restricciones generales del modelo, basadas en el concepto de territorio como espacio topológico.

Por último, se describen los resultados de la aplicación de MAUSS a la subregión de Los Llanos de San Juan, Puebla (México), sujeta a un rápido proceso de urbanización-industrialización. Se puntualizan las mejoras globales de la utilización del modelo y las mejoras desagregadas a nivel de uso de suelo. En él se analizan las mejores soluciones del frente de Pareto por función objetivo y se comparan con la actual distribución de usos de suelo (propuesta oficial), mostrando la superioridad de las soluciones óptimas derivadas del proceso evolutivo de más de 100 generaciones.

CAPÍTULO 5. Análisis de la evolución espacio-temporal de distribuciones sostenibles de usos de suelo

Con el propósito de prever los cambios temporales en las distribuciones por tipo de uso

de suelo, en este capítulo se incorpora la Dinámica de Sistemas como técnica de simulación de la evolución temporal de la extensión de las superficies dedicadas a cada uso a partir de los mapas de asignaciones de usos óptimas que proporciona MAUSS. Se acopla la dinámica de sistemas a MAUSS para dar paso al modelo integrado MAUSS-DS, que incorpora la variabilidad temporal al proceso de ubicación territorial óptima de usos del suelo bajo el prima de la sostenibilidad.

El territorio se concibe como sistema complejo con determinantes locales y regionales de diversa índole, cuyas interrelaciones modifican las configuraciones espaciales en el tiempo. Tales determinantes, denominadas factores de cambio (elementos claves de la dinámica territorial) se conforman de parámetros económicos, sociodemográficos y biofísicos cuyas tasas de variación permiten simular el comportamiento periódico de los usos de suelo. En este trabajo se proponen varios escenarios de cambio al asignar diferentes ritmos e intensidades de variación de los parámetros del sistema para diversos horizontes temporales: 1) Escenario de gran desarrollo urbano-industrial, 2) Escenario de variación tendencial histórica, correspondiente con las cifras promedio nacional de variación de los factores de cambio y 3) Escenario de desarrollo sostenible. Así para cada escenario e intervalo temporal de análisis MAUSS-DS obtiene distribuciones espaciales óptimas de usos del suelo.

Los resultados de la aplicación de MAUSS-DS a los Llanos de San Juan (México), expuestos al final del capítulo, proporcionan una estimación basada en criterios objetivos de la evolución territorial de los usos del suelo para el horizonte temporal 2050.

CAPÍTULOS 6. Conclusiones generales

Además de las conclusiones específicas de cada capítulo, se ha dedicado este capítulo a conclusiones generales en las que se aborda desde una perspectiva global las aportaciones de este trabajo, así como las posibles líneas de investigación a desarrollar en el futuro.

CAPÍTULOS 7. Bibliografía

Este capítulo recoge la bibliografía consultada para la realización de este trabajo.

ANEXOS

Finalmente esta tesis termina con la inclusión de una serie de anexos con datos adicionales de cada capítulo, que aporta detalles del proceso de generación de la información necesaria para el desarrollo y aplicación de los modelos MAUSS y MAUSS-DS, así como de los resultados obtenidos.

2.4. Publicaciones y resultados obtenidos

- Asistencia como Ponente al IV Simposio de becarios CONACYT en Europa. Realizado en Estrasburgo, Francia del 5 al 7 de noviembre de 2014, con la

ponencia: “Inclusión de criterios de Seguridad Alimentaria en la Planeación Territorial”, publicado en el siguiente vínculo:

<http://www.mufm.fr/es/simposio-conacyt-iv-simposio-de-becarios-conacyt-en-europa-2014/memorias-del-simposio>

- Primera estancia en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) campus Puebla, México del 19 al 31 de Enero de 2015 realizando las siguientes actividades:
 - Impartición de Conferencia “Modelos de Optimización de Usos de Suelo”
 - Participación y aportación de criterios en la discusión de la Línea de Investigación: Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- Segunda estancia en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) campus Puebla, México del 16 al 30 de junio de 2016, llevando a cabo las siguientes actividades:
 - Conferencia “Modelo de Asignación de Usos de Suelo Sostenibles. Programación Evolutiva para la planeación espacial.”
 - Impartición del Taller “Modelización del cambio de usos de suelo bajo un enfoque prospectivo” y
 - Sesiones de trabajo con el Dr. Angel Bustamante González, para analizar posibles contribuciones futuras del modelo desarrollado a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) “Medio Ambiente y Recursos Naturales”.
- Artículo científico (Anexo A.1.):
Guadalupe Azuara García, Efrén Palacios Rosas, Alfonso García-Ferrer and Pilar Montesinos Barrios, 2017. *Multi-objective spatial optimization: Sustainable land use allocation at sub-regional scale*. Sustainability. 9, 927; doi:10.3390/su9060927.

Este artículo recoge los contenidos del capítulo 4.

La revista *Sustainability* (ISSN: 2071-1050) (Open Access), indexada en JCR, tiene los siguientes indicadores de calidad:

IF (2016): 1.789.

Posición de la revista en la categoría *Estudios ambientales*: 47/105

Cuartil: 2



Capítulo 3.

Caracterización de la zona de estudio

3.1. Localización y dimensión de la zona de estudio

El área de estudio comprende 5 municipios: Mazapiltepec, Soltepec, Nopalucan, San José Chiapa y Rafael Lara Grajales ubicados en la parte central del estado de Puebla, México entre las latitudes 19° 10' 38" N a 19° 16' 41" N y longitudes 97° 55' 85" W a 97° 37' 79" W, dentro de la región denominada Llanos de San Juan (Figura 3.1.). La superficie que abarcan es de aproximadamente 526,6 km² y se encuentran inmersos en un rápido proceso de urbanización-industrialización, principalmente del sector automotriz promovido por la instalación de la armadora AUDI que desde octubre de 2016 inició operaciones de manera formal. Los últimos datos censales disponibles (INEGI, 2010) registran una población de 63.770 habitantes en la sub-región, sin embargo, después de 3 años de iniciada la construcción de la planta automotriz y sus empresas proveedoras, gran cantidad de población inmigrante se ha asentado en la zona y es posible estimar una población de al menos 80.000 habitantes que ha propiciado una expansión urbana sin regulaciones efectivas mientras los grandes cambios de uso de suelo ya han tenido lugar en la región.

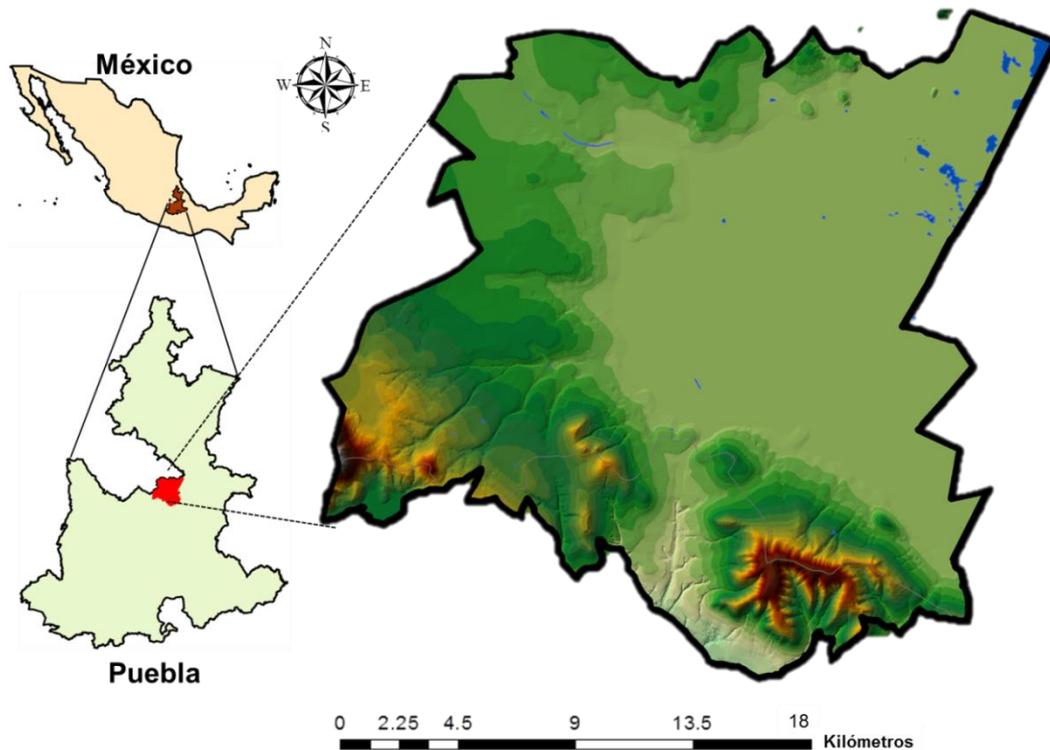


Figura 3.1. Localización del área de estudio (fuente: elaboración propia con cartografía INEGI 2000a)

Si bien el impacto que tendrá el *desarrollo industrial* se dejará sentir sobre una zona geográfica más amplia, se ha acotado el área de estudio a los 5 municipios con vecindad directa con el polígono industrial puesto que en dicha área se concentrará el proceso de industrialización-urbanización más intenso y por ende, las mayores repercusiones sociales y ambientales del mismo.

3.2. Medio Físico

Altimetría y edafología

La porción central de México, en la que se encuentra el eje Neo-volcánico, se caracteriza por elevaciones volcánicas de gran altura que alternan con amplias llanuras, formadas en su mayoría, por vasos lacustres (CONAGUA, 2012); los Llanos de San Juan conforman una de ellas y albergan en su extremo suroeste a los municipios en estudio; las elevaciones más importantes en el interior del área de estudio las otorga una pequeña cordillera con 3,270 m.s.n.m. al sur y suroeste (Figura 3.2), que va descendiendo hasta los 2,170 m.s.n.m. mediante suaves lomeríos hasta convertirse en llano, mismo que ocupa casi la mitad del territorio estudiado.

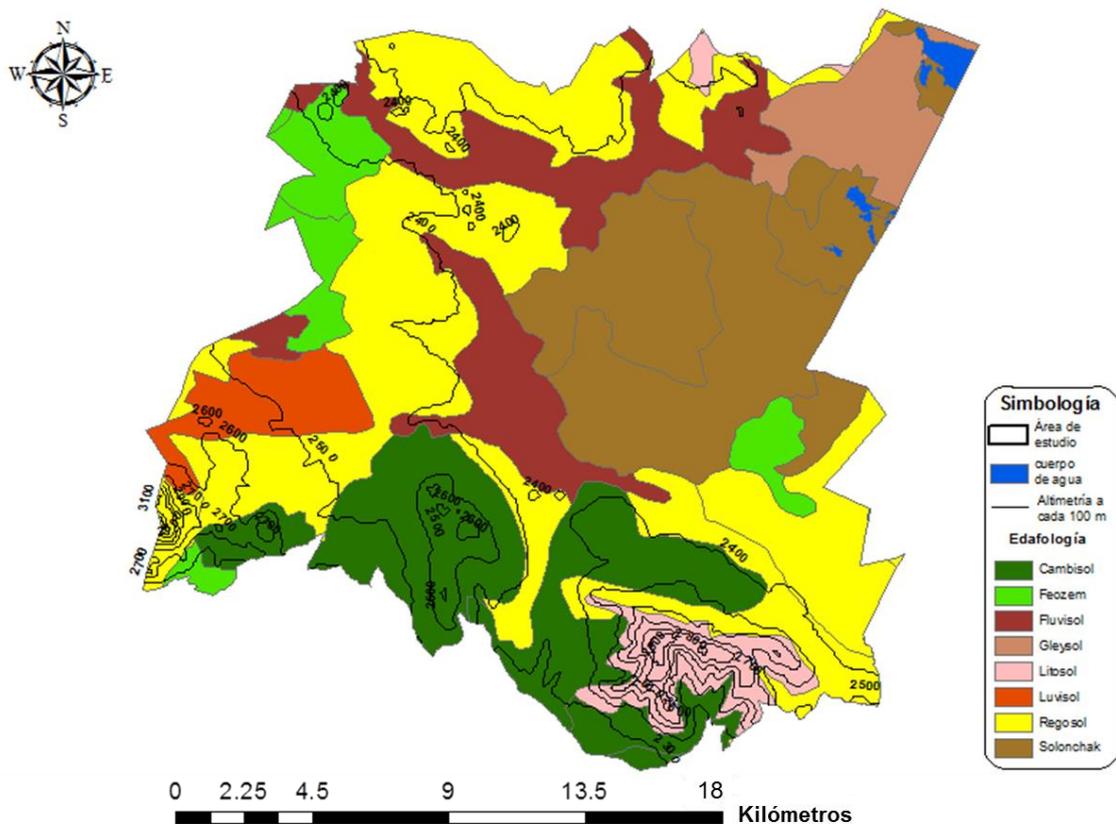


Figura 3.2. Mapa de Altimetría y Edafología (fuente: elaboración propia con cartografía INEGI 2000a)

La distribución de los tipos de suelo coincide con las topofomas, identificándose el gleysol al extremo noreste que es un suelo pantanoso y con probabilidad de inundación y en el que termina la laguna de Totolcingo (ubicada en su mayoría fuera del área de estudio), continúa hacia el sur el suelo solonchak cubriendo el llano de la subregión, se caracteriza por no estar consolidado, su salinidad y baja permeabilidad; rodeando al solonchak al poniente y norte se encuentran suelos fluvisoles cuya estructura es débil al estar formados por materiales acarreados por los escurrimientos superficiales; continúan suelos regosoles en la mayoría de los lomeríos, pobres en materia orgánica; al extremo poniente se ubican mayoritariamente los suelos feozem, con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, y luvisol con alto contenido de arcillas, mientras que los cerros

ubicados al sur presentan suelos cambisol y litosol, el primero, más abundante y con alta permeabilidad que permite una buena recarga pluvial y el segundo (el más abundante en México) rocoso con buena cantidad de arena (Figura 3.2).

Hidrogeología

La mayor parte del área de estudio (el 84%) pertenece a la sub-cuenca endorreica Libres-Oriental, que forma parte de la región hidrológica No. 18 denominada Río Balsas. La zona estudiada abarca una porción de la laguna (intermitente) de Totolcingo, que es, junto con la laguna de Tepeyahualco, la zona de descarga de las escasas aguas superficiales de la cuenca, puesto que, de acuerdo con CONAGUA (2012), la mayor parte del agua pluvial se infiltra antes de llegar a ella, en la zona de recarga del acuífero (Figura 3.3).

A grandes rasgos, se distinguen las zonas de recarga al sur y sureste de la sub-región en 3 diferentes unidades hidrogeológicas; una unidad acuífera no confinada y de recarga en vulcanitas, otra unidad acuífera profunda con recarga en calizas y la última como acuífero libre con recarga en tobas, lahares y piroclastos. La mayor parte de la superficie es considerada como zona de almacenamiento, con características de acuífero libre al poniente y de acuitardo superior en sedimentos lacustres al oriente y noreste (CONAGUA, 2009)

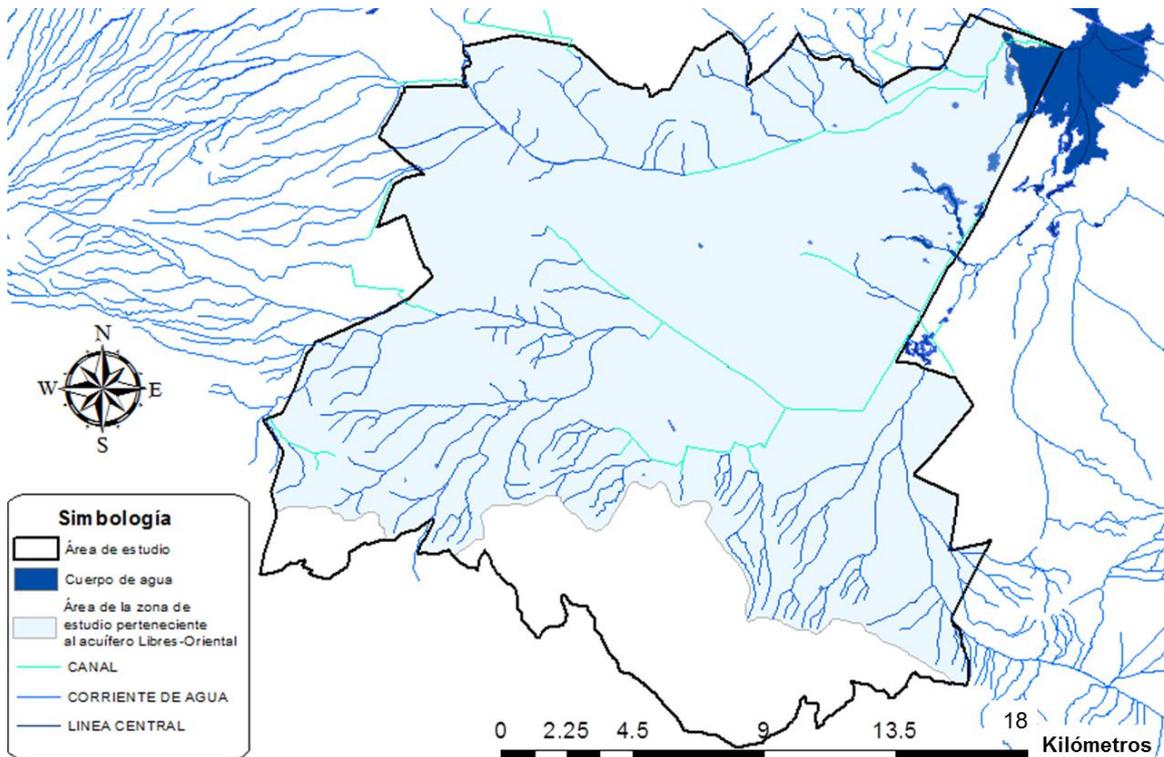


Figura 3.3. Hidrografía del área de estudio (fuente: elaboración propia con cartografía INEGI 2000a)

Clima

De acuerdo con la clasificación W. Köpen adaptada y revisada para México (INEGI 2000b) a escala 1:250.000, la zona presenta climas que van de semi-secos a templados

con variaciones en humedad de forma coincidente con el régimen de lluvias; las franjas climáticas van de mayor a menor humedad de suroeste a noreste de la siguiente manera: clima templado subhúmedo con lluvias en verano ($C(w_2)(w)$) y una precipitación media anual de 900 mm; templado subhúmedo con estación seca mediana ($C(w_1)(w)$) y entre 750 y 650 mm de precipitación; templado subhúmedo con estación seca de mediana a larga ($C(w_0)(w)$) con 650 a 550 mm de precipitación y estepario semiseco con estación seca larga ($BS_1k'w$) con 450 mm (Figura 3.4.).

La precipitación mensual obtenida de las series de datos del Sistema Meteorológico Nacional para dos estaciones meteorológicas cercanas (San Salvador el Seco y Oriental) durante el período 1951-2010 arrojan una media mensual de 70,5 mm para la primera y de 51,1 mm para la segunda, siendo junio, julio y septiembre los meses con mayor cantidad de lluvia (Figura 3.5). La temperatura media en la sub-región es de 16,6° C con mayo y junio como los meses más calurosos; y temperaturas máximas mensuales de entre de 22,2° a 27° y mínimas promedio mensual de entre 1,3° en el mes de enero y 8° en agosto (SMN, 2017). La presencia de heladas y granizadas es común en la zona; las primeras aparecen de octubre a marzo y las últimas tienen lugar durante los meses de marzo a mayo (CONAGUA, 2012).

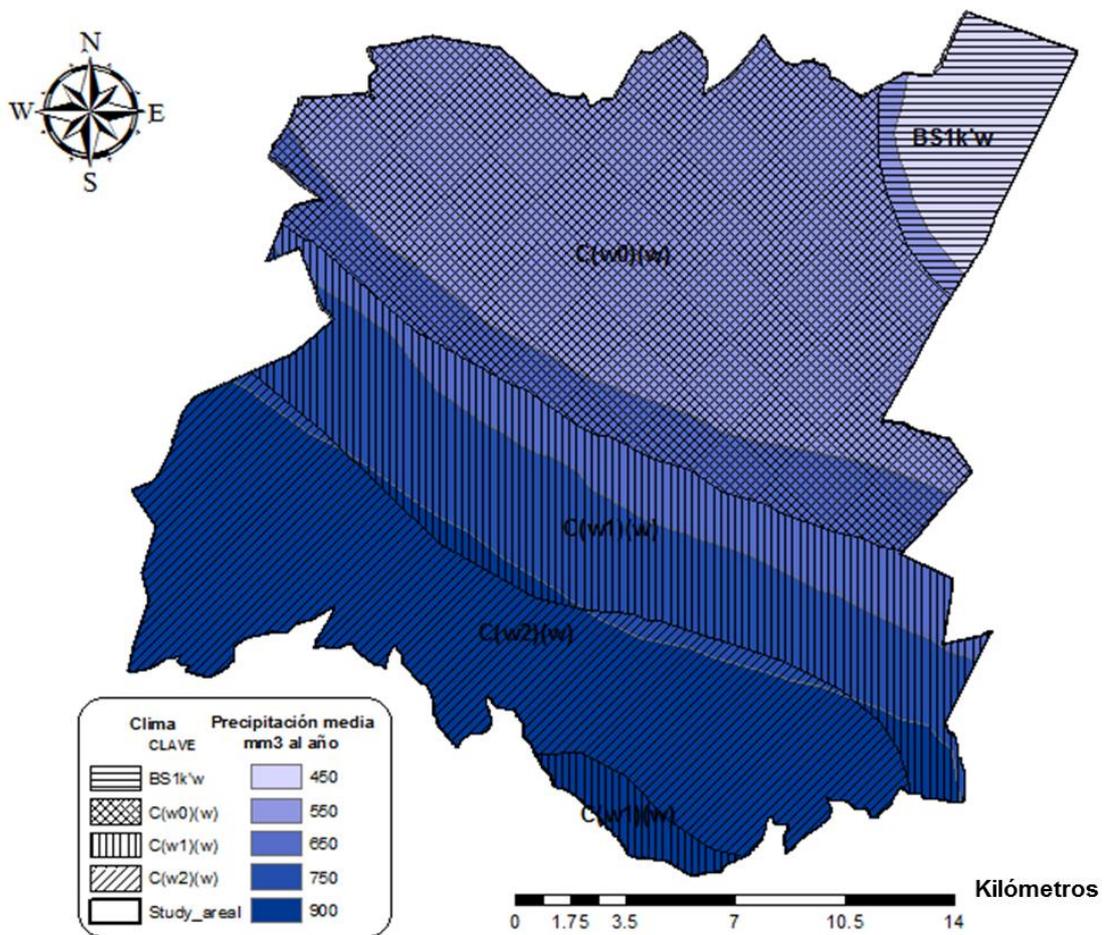


Figura 3.4. Clima y precipitación media anual (fuente: INEGI 2000a)

Los datos de evapotranspiración media mensual estuvieron disponibles en las estaciones

meteorológicas de San Salvador el Seco y San José Ovando (INIFAP, 2015). El promedio anual de milímetros al día registrados por la primera es de 4,05 mm/d y 3,9 mm/d la segunda, para el período que va de 2005 a 2017 (Figura 3.6).

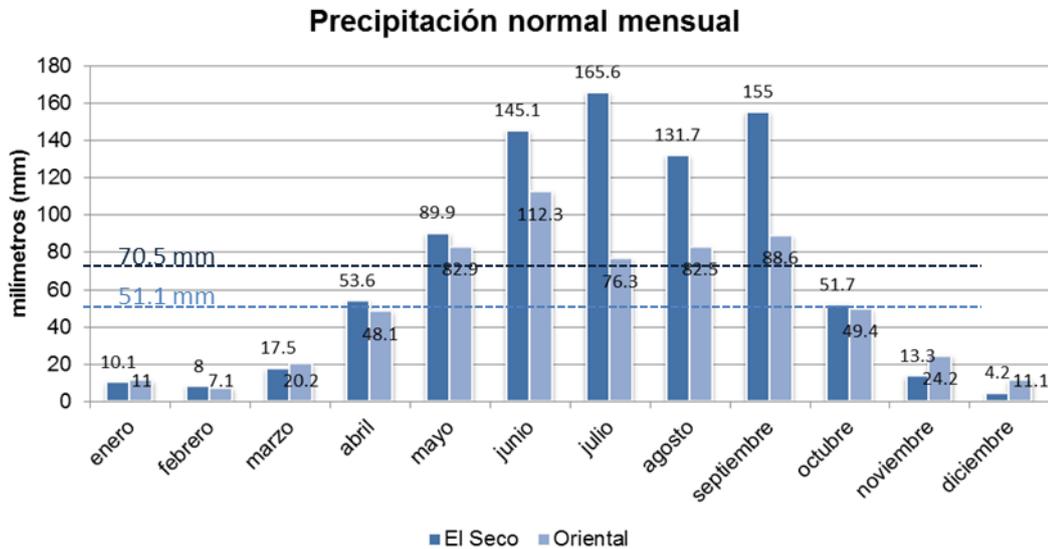


Figura 3.5. Precipitación normal mensual período 1951-2010 (fuente: SMN, 2017)



Figura 3.6. Evapotranspiración media mensual período 2005-2017(fuente: INIFAP, 2015)

3.3. Usos de suelo

El plano base de usos de suelo para este estudio es el Inventario Nacional Forestal a escala 1:250,000 (INEGI-UNAM, 2000). Este mapa ha sido actualizado con los polígonos de usos industrial y urbano recientemente asentados en la subregión (OPD, 2017). El total de usos de esta fuente cartográfica y las actualizaciones se han compendiado en seis, puesto que se identifican con el mismo número de actividades económicas en la sub-región estudiada: 1) uso forestal, 2) uso pecuario (pastizal), 3) uso

agrícola de temporal, 4) uso agrícola de riego, 5) uso industrial y 6) uso urbano. Para su procesamiento como malla de datos, se rasterizó desde Arc Gis 9.2, obteniendo una matriz de 111 x 121 celdas (Figura 3.7.).

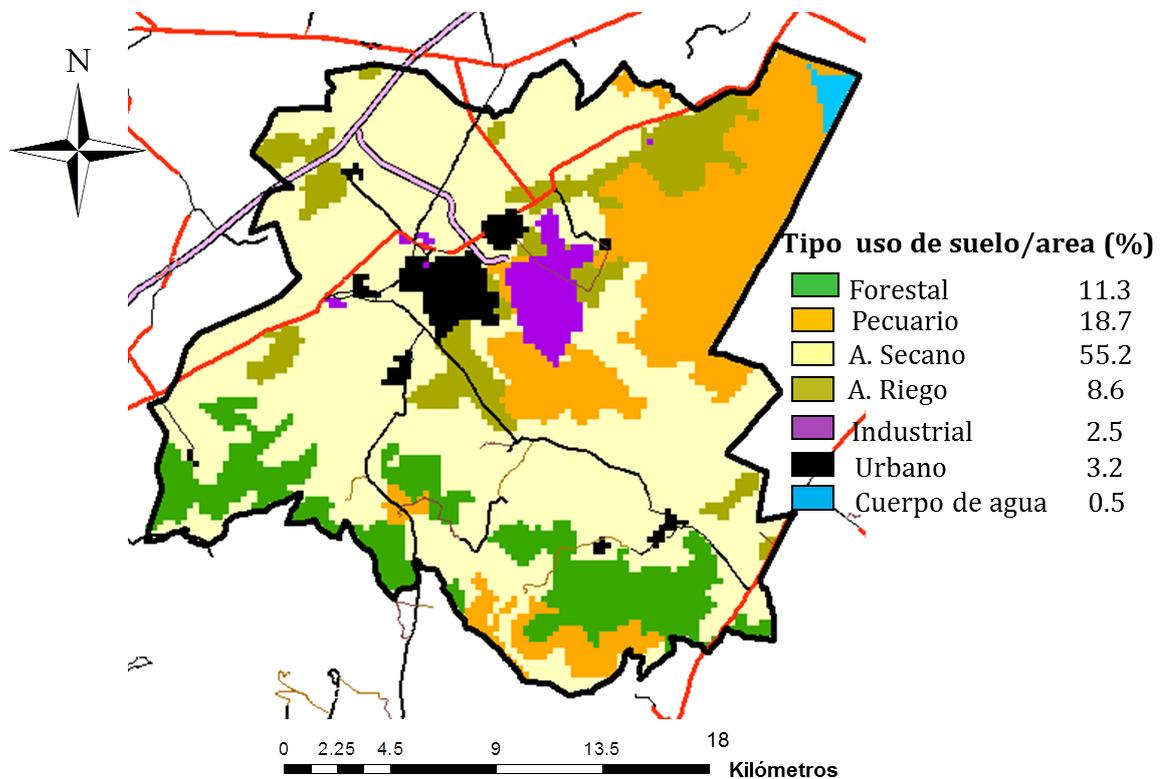


Figura 3.7. Usos de Suelo actuales (fuente: elaboración propia)

La caracterización de la región se ha hecho analizando cada uno de los usos de suelo en lo referente a los aspectos fundamentales que afectan a la sostenibilidad de los usos asignados al suelo: la renta generada en términos de Producto Interno Bruto (PIB), la presión negativa ejercida por cada uno de ellos al medio ambiente y la producción de alimentos para identificar el déficit alimentario de la región. A continuación se describen las características principales de cada uno de los usos del suelo considerados. Información complementaria a la descripción por tipo de uso se encuentra en el Anexo A.2.

3.3.1. Uso forestal

No existe explotación forestal en el área de estudio sino pequeños aprovechamientos para el abastecimiento de combustible de los hogares, por ello no es una actividad que registre ingresos brutos en la región aunque la deforestación en varios cerros de la cordillera así como la disminución de su superficie por el avance de la agricultura son procesos de cambio de usos y/o vegetación que se han verificado en la zona. Actualmente la superficie de bosques ocupa el 11,3% del total y se ubica en la parte sur de la zona de estudio. El equilibrio ecológico que propician estos bosques nativos es fundamental para la región tanto en la preservación de la biodiversidad de sus ecosistemas como en la absorción del dióxido de carbono producido regionalmente.

3.3.2. Uso pecuario

El uso pecuario de la zona de estudio está conformado por los pastizales naturales ubicados en el llano, y los pastizales inducidos emplazados a pie de montaña. La superficie de este uso disminuyó 780 ha al haber aportado el 37% del suelo sujeto a transformación urbana e industrial sucedido en la región. Actualmente, con 9.862 ha, el uso pecuario concentra el 18,7% del total del área de estudio en las que tiene lugar una producción pecuaria significativa entre los pequeños productores, que aunada a la producción del ganado estabulado constituye una importante actividad económica para la región.

Respecto a la influencia de este uso en la renta del territorio considerando el período de 2006 a 2014, supone unos 348,7 millones de pesos anuales en promedio (SAGARPA-SIAP, 2015) y constituía la segunda fuente de ingresos de la región (Tabla 3.1.), después de la industria existente en la zona antes de la implantación de la industria automotriz.

El uso pecuario ejerce presiones negativas sobre los recursos hídricos territoriales al ser un importante consumidor del agua de la región con 61,27 millones de m³ al año (CONAGUA, 2009), de los cuales el 99,9% corresponde a agua de lluvia. El restante 0.1% corresponde a riegos con aguas subterráneas, concedidos a las explotaciones de ganado estabulado. Por otra parte las emisiones de GEI de este uso provienen de la producción de metano (transformado a CO₂ equivalente) por cabeza de ganado de acuerdo al promedio nacional a partir de las fuentes oficiales (SSAOT-SEMARNAT 2012; SEMARNAT 2013; INEGI-SFA 2014) y ocupan el tercer lugar de las emisiones regionales con un total de 92.772 toneladas de CO₂ e al año.

En relación a participación del uso pecuario en la producción de alimentos, este uso supone un aporte actual de unidades alimentarias de 36,11 Gcal (Gigacalorías), como se visualiza en la Tabla 3.1., que representan el 19% del total de unidades alimentarias producidas en la región, capaces de satisfacer un 39% de las necesidades nutricionales de la población regional (80.000 habitantes) a partir de una dieta de 3.159 kcal por persona al día que corresponde con el promedio de ingesta de los mexicanos. (FAO, 2003).

Tabla 3.1. Renta y aporte de calorías (Gcal) de los productos pecuarios en la zona de estudio

producto pecuario	producción promedio anual (t)	kcal/100gr	Gcal	Contribución alimentaria por cultivo (%)	renta promedio anual (miles de pesos)
carne en canal (t)	3,884.76	203,00	7.89	21,8%	114,117.10
leche (miles de l)	17,717.38	68,00	12.05	33,4%	73,347.46
huevo (t)	9,727.79	162,00	15.76	43,6%	156,960.52
miel (t)	138.29	300,00	0.41	1,1%	4,299.37
suma			36,11	100,0%	348,724.44

(fuente: Elaboración propia a partir de datos de SAGARPA-SIAP 2015)

3.3.3. Usos agrícolas

El uso de suelo predominante en la zona estudiada es el agrícola con el 55,2% de la superficie total. La superficie de este uso también se vio disminuida por la instalación industrial (que aportó el 41% del suelo para “desarrollo”) y pasó de 29.867,5 a 29.006,5 ha, las cuales representan actualmente el 63,8% del total del área de la sub-región. De acuerdo con los datos del Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SAGARPA-SIAP, 2015) para un período de 10 años (2004-2014), se siembran en promedio 24.572,1 ha anualmente (el 84,7% del total de la superficie agrícola). La actividad agrícola opera en las modalidades de *temporal* o *secano*, principalmente para la siembra de granos y frutales, y de *regadío*, dedicado casi en su totalidad a la producción de piensos, forrajes y verduras. En términos de superficie la modalidad predominante es el *secano* (de bajos rendimientos) con 93% del total sembrado (Tabla 3.2). Bajo este régimen se encuentran la mayoría de los productores locales denominados pequeños productores quienes destinan sus cosechas principalmente al autoconsumo, mientras que la infraestructura para riego está concentrada por los grandes propietarios de la tierra.

Los ingresos medios derivados de las actividades agrícolas suponen 178 millones de pesos anuales (el 77% proviene de la agricultura de *secano* y el resto del *regadío*) siendo la renta más baja de la zona de estudio, pero al mismo tiempo la que mejor se distribuye entre la población, y fundamentalmente la que sirve de sustento alimentario para sus habitantes.

Tabla 3.2. Estadísticas agrícolas del área de estudio

modalidad	promedio modalidad <i>secano</i>	promedio modalidad <i>regadío</i>
Total superficie agrícola (ha)	24.572,10	
Total sup agrícola según modalidad (ha)	22.826,59	1.745,54
% por modalidad	93%	7%
Sup. Sembrada por modalidad (ha)	22.826,59	1.747,54
Sup. Cosechada (ha)	20.249,23	1.734,34
% sup cosechada	88%	99%
Producción (t)	50.119,12	43.499,80
Rendimiento (t/ha)	2,48	25,08
PMR (\$/Ton)	2.692,05	923,71
Valor Producción (miles de pesos)	137.023,29	41.032,44

(fuente: Elaboración propia con datos de SAGARPA-SIAP, 2015)

La actividad agrícola es uno de los principales consumidores de agua de la región. La suma del recurso utilizado tanto en la agricultura de riego como en el de *secano* es de 125,8 millones de m³ anuales. El 86,9% los usa la agricultura de *secano* (agua de lluvia) y el 13,1% restante son usados por la agricultura de riego (16,4 millones de m³) de los cuales el 47,3% es agua subterránea, ya que el riego se usa generalmente para

complementar las necesidades de los cultivos que no satisface la temporada de lluvias. El volumen de agua de riego contabilizado responde a las necesidades anuales de los cultivos y está por debajo del volumen concesionado a los productores por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Así, el sobrante de agua subterránea originalmente destinada a la agricultura, ha sido extraído durante los últimos cuatro años por las empresas constructoras mediante esquemas de compra-venta entre particulares y sin regulaciones ambientales de por medio.

En estos usos, las aguas subterráneas presentan un alto potencial de contaminación por la percolación de aguas con fertilizantes (Nitrógeno y Fósforo).

La suma de las emisiones de CO₂ de la agricultura de secano y de riego, por tratarse de una región con una gran extensión agrícola, es alta con 73.590 t anuales aproximadamente (tomando en consideración el consumo estimado de Nitrógeno como valor ajustado por hectárea fertilizada de acuerdo con la SAGARPA-FAO (2012)). Este monto representa el 17,5% del total producido en la zona de estudio.

La actividad agrícola es fundamental para la producción de alimentos porque abastece no sólo las necesidades alimentarias de la población de la zona, fundamentalmente con maíz como principal grano de la dieta mexicana, sino que aporta sus excedentes de granos a otras regiones cercanas (principalmente al consumo de la zona metropolitana de Puebla de alrededor de dos millones de habitantes). Entre los granos exportados se incluyen más de 1.300 toneladas anuales de las leguminosas haba y arvejón, la primera representa el 7% de la producción estatal y el segundo el 10% de la producción nacional, puesto que el estado de Puebla es uno de los principales productores de legumbres y leguminosas en el país, con un aporte al mercado nacional del 54% de haba grano y 82% de arvejón (Gaucín, 2016).

El aporte calórico alimentario de los cultivos tanto de riego como de temporal de la zona de estudio se ha hecho descontando aquellos cultivos destinados a la alimentación animal (piensos y forrajes), cuya producción de calorías se obtuvo a través de los productos pecuarios. La suma de unidades alimentarias de los usos agrícolas es de aproximadamente 153,5 Gcal cuyo potencial nutricional supera un 40% las necesidades actuales de 92,2 Gcal (con una dieta de 3.159 Kcal/día/hab) para una población de 80.000 habitantes, de ahí la importancia agrícola y pecuaria de la sub-región (Ver anexo A.3.).

3.3.4. Uso Industrial

La industria relevante de la región (agroalimentaria) sumaba en varios polígonos dentro del área de estudio una superficie de 99 ha que representan apenas el 0,2% de la superficie total. Actualmente esta superficie se ha incrementado 13 veces, sumando un total de 1.287,5 ha (2,5% del área total) para recibir a la industria automotriz Audi (Figura 3.8) y a sus principales proveedoras concentradas en un gran polígono bajo el esquema “*just in sequence*”(JIS) (Durán, 2014).



Figura 3.8. Localización AUDI (fuente: Google Earth, 2016)

El nuevo emplazamiento industrial se ubica en la parte central de la región (sobre el Llano), cuya cobertura vegetal constaba principalmente de pastizales naturales, y ocupa suelos no consolidados (solonchak); por esta causa la construcción de las naves industriales no pudo desplantar directamente de ellos sino a partir de plataformas con suelo mejorado acarreado de diversos puntos de la región. Según la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (PROFEPA) la sobreexplotación de estos bancos de material ha causado daños severos a las corrientes de agua subterránea de la región y “ha dañado considerablemente el ecosistema del sitio” (PROFEPA, 2016)

Los ingresos derivados de las actividades industriales en la zona eran de alrededor de 4.545 millones de pesos (mdp) anuales, seis veces mayor que la suma del resto de las actividades económicas (INEGI, 2014, INEGI-SFA, 2014). Con el nuevo emplazamiento automotriz se espera un ingreso anual 19 veces mayor (de más de 88.500 mdp) a partir de que se alcance la producción proyectada (150 mil unidades del modelo de lujo Q5). El total del ingreso industrial rondaría los 93.800 mdp, siendo la actividad que generará la mayor riqueza económica en la sub-región, aunque sólo permanezca en ella una proporción de la relativa a salarios y sueldos.

La presión que el sector industrial ejercía sobre los recursos hídricos (uso) antes de la instalación de Audi en la zona alcanzaba 1,97 millones de m³ anuales. Se espera que esta cantidad se incremente un 1,6% (322.500 m³) por el sector automotriz (Audi, 2014). Las emisiones totales de CO₂ estimadas para la industria automotriz son de aproximadamente 155.233,06 t anuales de las que el 34,5% corresponden a las nueva actividad industrial.

Las aguas residuales de origen industrial son un factor de alto riesgo para las aguas subterráneas de la zona. Las empresas agroalimentarias instaladas (cervecera Cuauhtémoc-Moctezuma, ahora Heineken; la empacadoras de chiles y conservas San Marcos y La Morena); todas ellas para consumo nacional y exportación, así como las productoras de lácteos Ojo de Agua y Tamariz, para el mercado nacional, no realizan un

tratamiento adecuado ni regular de sus aguas residuales, las cuales se mezclan con las aguas negras domésticas y recorren los escurrimientos y canales de manera conjunta, contaminando el suelo y elevando el potencial contaminante del agua subterránea en todo su recorrido hasta la zona de descarga ubicada en el llano de la zona de estudio.

Respecto a la producción de alimentos, los insumos locales de las industrias agroalimentarias se contabilizan en los usos agropecuarios, donde arrojan la cantidad de calorías que aportan a la dieta de la población regional.

3.3.5. Uso urbano

El uso urbano en el presente trabajo incluye las actividades comerciales y de servicios. La mayoría de los asentamientos humanos de la zona se clasifican, de acuerdo con el INEGI (2010), como rurales (de hasta 2.500 habitantes) (Tabla 3.3.) y presentan tasas de crecimiento poblacional de alrededor del 2% en el último decenio. La superficie urbana que ocupan esos asentamientos era el 1,5% del total del área de estudio con patrones de urbanización horizontales y bajas densidades poblacionales que encarecen la ampliación de las redes de infraestructura, con escaso o nulo manejo adecuado de los residuos sólidos y de las aguas negras, y en general con falta de previsión y regulación ambiental.

Tabla 3.3. Tamaño de los asentamientos del área de estudio al año 2010

rango	localidades
más de 10,000 habitantes	1
entre 5,000 y 9,999 habitantes	4
entre 2,500 y 4,999 habitantes	2
entre 1,000 y 2,499 habitantes	7
entre 100 y 999 habitantes	19
menores de 100 habitantes	69
total de localidades	102

(fuente: INEGI, 2010)

Las nuevas expansiones urbanas acotadas en la propuesta oficial (OPD, 2017) incrementan alrededor de 900 ha la superficie urbana para un total de 1.681 ha de uso urbano actual que representa el 3,2% de la superficie total de la sub-región.

Respecto a la repercusión de este uso en la renta de la zona, las actividades comerciales y de servicios consideradas como los componentes económicos del uso de suelo urbano han registrado incrementos desde antes de la implantación industrial automotriz según los datos de los censos económicos del INEGI (2004, 2009 y 2014); tanto en la producción bruta de ingresos -con un crecimiento de 31,6% en un decenio- como en la cantidad de unidades económicas¹ del sector (de 1.282 registradas en 2004 a 2.106 en

¹ Unidades estadísticas sobre tipos de actividad permanente que combinan acciones y recursos bajo el control de una sola entidad propietaria para la producción de bienes y servicios, sea con fines mercantiles o no (INEGI).

2014); sin embargo se trata principalmente de pequeños establecimientos con menos de 2 personas ocupadas en cada una (3.810 personas ocupadas en total) y que en su mayoría (el 77%) son propietarios, familiares o trabajadores no remunerados. La renta o producto interno bruto generado hasta antes del proceso de urbanización promovido por la industrialización reciente es de 223,2 mdp anuales que representaban el 4,2% de la renta total de la subregión. La renta potencial con la nueva superficie urbana asignada actualmente es de 488 mdp anuales; monto que desplazaría la importancia de las actividades pecuarias, para convertirse en la segunda actividad económica de mayor relevancia para la sub-región.

La presión de los usos urbanos sobre los recursos hídricos se deriva de un consumo promedio de agua por habitante en la cuenca de 150 l/día (54,75 m³ /hab/ año), por lo que el agua para consumo humano, clasificado como uso público-urbano en la zona estudiada es de 4,4 millones de m³ al año (para 80.000 habitantes) que equivalen al 21% de un total de 21,09 millones de m³ concesionados en los 5 municipios de la sub-región. En este trabajo los volúmenes concesionados en la zona de estudio por la CONAGUA al consumo doméstico, de servicios, y múltiple (el 1%) se agruparon con el consumo humano para contabilizar todas las extracciones de agua relativas al uso de suelo urbano, que suma 4,6 millones de m³ anuales.

Con una tasa de retorno de más del 80%, las descargas residuales de los usos urbano e industrial, generan un volumen de aguas negras de 16,8 millones de m³ anuales y casi en su totalidad (algunas industrias realizan procesos de aguas negras esporádicos y deficientes de tratamiento) se vierten directamente a canales y barrancas sin tratamiento previo, mezclándose con el agua de lluvia e infiltrándose al subsuelo, con un alto riesgo de contaminación del manto freático que en la parte del llano se encuentra a una profundidad de entre 3 y 10 metros.

La producción de CO₂ equivalente de las actividades urbanas es aproximadamente de 166.568,2 t anuales provenientes de los sectores transporte, combustión comercial, combustión doméstica, generación de energía eléctrica (E.E.), residuos sólidos y tratamiento aguas residuales industriales; los datos de las emisiones se obtuvieron de estadísticas oficiales estatales y nacionales para la zona (INECC 2013; SSAOT-SEMARNAT 2012; SEMARNAT 2013; INEGI-SFA 2014). Del análisis de la información disponible se desprende que el uso urbano es el principal productor de gases de efecto invernadero en la subregión, pues emite el 38,7% del total.

El uso de suelo urbano no está considerado como fuente de producción de alimentos.

3.4. Ordenamiento Territorial

El análisis del ordenamiento territorial y las distintas normativas legales que afectan y mediante los que se regula el territorio del área de estudio se describen a continuación.

3.4.1. Planes urbanos

En términos de planeación territorial específica para la zona, la distribución de usos de suelo ya establecida en la región se compiló en un Programa subregional de desarrollo urbano (SDROT, 2016); el área analizada en dicho plan comprende los mismos municipios de esta investigación. El producto central de este programa (poco difundido y consensuado entre los actores sociales) es la carta de usos de suelo, la cual se evaluará en términos de los objetivos del presente trabajo para establecer las comparaciones entre la propuesta oficial y las posibles distribuciones resultantes del modelo de esta tesis.

Atendiendo al contexto del plan subregional del ejecutivo estatal, se elaboraron los planes de desarrollo urbano para cada uno los cinco municipios (SDROT, 2016) que de la misma manera compilan en las cartas de usos, destinos y reservas, los usos de suelo ya instaurados previamente.

3.4.2. Planes de gestión de recursos hídricos

El plan hídrico vigente que enmarca la zona de estudio, denominado “*Manejo integrado de las aguas subterráneas en el acuífero Huamantla-Libres Oriental-Perote* (CONAGUA, 2009) resume en ocho objetivos las alternativas de manejo; contempla la mejora de la productividad en el sector agrícola, el incremento en el acceso y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, la compensación y conservación del medio ambiente de los acuíferos que lo conforman, la mejora técnica, administrativa y financiera del sector hidráulico, la participación de la sociedad en el buen manejo y uso del recurso, la prevención de los riesgos hidrometeorológicos, la evaluación del cambio climático y de cambios hidrológicos globales y locales, así como la creación de una cultura fiscal contributiva y de cumplimiento a la Ley en materia de aguas. Entre sus conclusiones se remarca la reducción de las descargas verticales del acuífero, manifestado en los grandes cambios en las lagunas que lo conforman puesto que se han vuelto estacionales y de formación más esporádica, así mismo alerta sobre los procesos de desertificación causados por deforestación, cambio de uso de suelo y desecación de los lagos; advierte por otra parte el riesgo ambiental que cualquier proyecto de trasvase de la cuenca en cuestión hacia cuencas externas podría representar dado el estado de sobreexplotación que ya presenta el acuífero. Concluye también que el uso eficiente del agua representaría una medida “suficiente” para la estabilización del acuífero y recomienda reducir los aprovechamientos de las aguas subterráneas en áreas próximas a las lagunas y lagos cráter.

Si bien este plan de manejo integrado está basado en los resultados de un modelo de simulación de flujo con los datos piezométricos de 30 años, no se observa en el mismo la previsión de un posible incremento muy significativo en la demanda del recurso como el que implicará el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial en consolidación.

El año 2011, dentro del marco del Plan de manejo integral descrito, se realizó un censo de los pozos concesionados y controlados en el Registro Público de Derechos del Agua

(REPD) denominado *Censo de Aprovechamientos del Acuífero en la parte Libres-Oriental del Estado de Puebla* (CONAGUA, 2012) con el propósito de actualizar la información de los aprovechamientos, incluidos sus niveles piezométricos; dentro de las conclusiones que arroja se desprende un monitoreo deficiente de la CONAGUA, puesto que los pozos registrados varían tanto en la cantidad como en el uso que se le da al recurso impidiendo una buena gestión y previsión del mismo, para ello se recomiendan monitoreos diversos; de tendencia (anuales), de referencia (semestrales), de efectividad (trimestrales) para evaluar la realización de las actividades propuestas en el Plan de Manejo, y de alerta (al menos mensual) para prevenir problemas en sitios sensibles a los cambios en los caudales de extracción como las zonas de alta actividad económica (que es el caso del desarrollo industrial). Este estudio advierte también sobre la contaminación desde las lagunas hacia las zonas someras del acuífero debido al régimen de extracción que prácticamente va secando los lagos, propiciando los cambios de uso de suelo en esas zonas lacustres (agricultura o vivienda aislada) dando paso a la “recarga directa de la lluvia, en áreas que originalmente servían como testigo del nivel de saturación del terreno”. De acuerdo con el estudio, las configuraciones piezométricas no revelan una sobreexplotación, salvo en zonas muy específicas, sin embargo advierte que los volúmenes concesionados exceden considerablemente el volumen de extracción calculada, pudiendo dar origen a una sobreexplotación. La restricción formal a la que está sujeta la cuenca es la veda, impuesta por decreto oficial desde antes de Plan, en cuestión; sin embargo la principal problemática es que no se cumple la restricción, por lo que de forma clandestina o validada se siguen perforando pozos.

3.4.3. Planes de control de emisiones de GEI

El estado de Puebla cuenta actualmente con el programa denominado “Programa de Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020” (SSAOT-SEMARNAT, 2012); elaborado de forma coordinada entre el gobierno estatal (a través de la Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento del Territorio, SSAOT) y el Federal (a través de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT). Las principales acciones derivadas de este instrumento se han verificado en el Eje 2 (Fuentes móviles y movilidad sustentable) en las zonas urbanas y metropolitanas del Estado a través de la reordenación y modernización del transporte público, sin embargo en el ámbito rural o semi-rural no existen acciones específicas que tengan un impacto real en la disminución de las emisiones. El Eje 4 (Manejo sostenible de los recursos naturales) establece solamente dos medidas estratégicas: Captura de carbono a través de programas de reforestación y la Regulación y control de la quema de residuos agrícolas, esquilmos y recursos forestales. La primera medida, ha demostrado su ineficacia a nivel nacional por la falta de consolidación de las zonas reforestadas; mientras que la segunda no es aplicada por ninguna autoridad (local, estatal o federal). La promoción de la eficiencia energética y fomento de energías renovables (Eje 6) es aún marginal puesto que el peso de estas acciones se deja en manos de las autoridades federales a través de programas sectoriales que sólo impactan a un reducido número de habitantes y productores del campo y la ciudad.

3.4.4. Planes de desarrollo económico

El Plan Estatal de Desarrollo de Puebla de la actual administración 2011-2017 (PED, 2011), apunta la atracción y retención de inversiones como el primer objetivo de desarrollo económico; seguido de la promoción de las exportaciones y el elemento de fomento de desarrollos industriales y logísticos, consolidando la política industrial actual que ha servido de marco para la atracción de la armadora Audi y de un conjunto de industrias complementarias del sector automotriz, las mismas que han contado con inversión estatal y subvenciones fiscales para su instalación y consolidación.

Las actuales administraciones municipales de los 5 municipios iniciaron su gestión en el año 2013, por lo que ya contemplan la llegada del complejo industrial a la subregión, no obstante de una forma desarticulada y la mayoría de ellos sin prever los impactos ambientales del proceso de industrialización acelerado en sus territorios.



Capítulo 4.

Modelo multiobjetivo de asignación de usos sostenibles del suelo

4.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrolla una herramienta que provee alternativas de asignación sostenible de usos de suelo a escala subregional denominada modelo multiobjetivo de asignación de usos sostenibles del suelo (MAUSS); su naturaleza informático-geográfica está guiada por criterios de sostenibilidad que evalúan las presiones negativas ejercidas por los usos de suelo en aire y agua ofreciendo, por un lado, alternativas de distribución de usos que las minimizan y garantizando, por otro, la seguridad alimentaria de sus habitantes; todo ello sin dejar de tomar en cuenta la renta producida por dichos usos como elemento a maximizar debidamente acotado.

El algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II (Non sorting genetic algorithm II) (Deb *et al.*, 2002), que se ha aplicado en otros estudios de planeación espacial (Cao, *et al.* 2011, Datta, *et al.* 2006, Karakostas 2014), es la base del presente trabajo debido a su eficacia y efectividad en la selección de mejores soluciones identificadas a lo largo de las generaciones procesadas. Se han realizado importantes modificaciones sobre el NSGA-II estándar. Por una parte se ha creado un mecanismo de inicialización mejorado que asegura la compactación de los usos de suelo en los mapas (soluciones) iniciales, y por otro lado se han diseñado nuevos operadores genéticos responsables de la contigüidad y tamaño de los polígonos de los usos de suelo de tal forma que se facilite la asignación de usos al incorporar las directrices de planificación.

4.2. Formulación del problema

El siguiente problema multiobjetivo pretende proporcionar alternativas de explotación territorial sostenible a escala subregional, enfocándose en los aspectos económicos, ambientales y sociales considerando una escala de tiempo anual. Para la localización de usos de suelo se ha optado por una discretización territorial en celdas homogéneas de acuerdo al detalle de la información disponible. Las características espaciales han sido analizadas en cada celda de la malla o mapa.

Maximización de la renta

A pesar de que no es posible generalizar un bienestar social basándose solamente en la renta o producto interno bruto (PIB), éste es considerado como un indicador de la riqueza generada por cada uso de suelo; de ahí la importancia de incluirlo como un objetivo a maximizar, estando limitado por los parámetros de sostenibilidad que minimizan los desequilibrios territoriales causados por el hombre. Muchos trabajos de optimización espacial han incluido, de diferentes maneras, los aspectos económicos como función objetivo; ya sea minimizando los costos de conversión del uso de suelo (Cao, *et al.* 2011; Cao *et al.* 2012) o maximizando las ganancias. En este caso particular, se ha definido la siguiente ecuación para evaluar la renta territorial:

Minimizar:

$$O1 = \frac{\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C X_{uij} \cdot (in_{uij} \cdot \alpha_{uij})}{\sum_{ij}^{RC} \max in_{ij}} \quad (4.1)$$

Donde X_{uij} es una variable de decisión binaria que solamente puede alojar un tipo de uso de suelo u en la celda ubicada en la fila i , columna j ; u es el tipo de uso de suelo, que varía entre u y U ; R son las filas de la malla, desde i hasta R ; C las columnas de la malla desde j hasta C ; in_{uij} es la renta promedio anual (millones de moneda corriente) de la celda ij con el uso de suelo u ; $\max in_{ij}$ es la renta máxima posible que puede tener la celda ij , y α_{uij} es el factor de aptitud territorial para el uso de suelo u ubicado en la celda ij , que varía entre 0.5 y 1. Este último término es un parámetro del modelo que se incluye en las tres funciones objetivo y solamente afecta a los usos de suelo directamente vinculados a la producción primaria de alimentos, es decir, a las tierras de cultivo (sean de secano o de riego) y al pastizal de acuerdo a la aptitud de la tierra y a los rendimientos históricos registrados en el área de estudio. Para el resto de los usos de suelo, este factor vale 1.

La renta promedio por uso y unidad de superficie (celda) se obtiene de dividir la renta de cada actividad (uso de suelo) entre el área que ocupa en el territorio. El resultado de esta operación está dado en unidades monetarias, por lo tanto, para facilitar las comparaciones entre funciones objetivo, éstas se adimensionalizan al dividir las entre la suma de la renta máxima posible de todas las celdas. El valor de la función O1 expresado en unidades adimensionales varía entre 0 y 4.

Maximización de las presiones negativas sobre el medio ambiente (PNA)

La sostenibilidad en los usos de suelo es necesaria para preservar nuestro medio ambiente; en consecuencia ésta se incluye dentro del problema de la planeación territorial de forma novedosa por medio de una función objetivo dirigida a minimizar las presiones negativas que ejercen los usos de suelo en el agua y en el aire. Acorde con la escala subregional, se realiza una evaluación simplificada de las presiones negativas para determinar, como a continuación se explica, cuáles ubicaciones de usos de suelo son ambientalmente más aceptables que otras.

Cada tipo de uso de suelo ejerce presiones sobre el recurso hídrico, sea debido a su uso y/o al deterioro de su calidad. El uso del agua puede analizarse usando el concepto de huella hídrica (HH) (Hoekstra *et al.*, 2011), definida como el volumen de agua requerido directa e indirectamente para obtener un producto o desarrollar una actividad, contabilizándose a todo lo largo de la cadena de suministro. La HH es un indicador integral de la apropiación del recurso hídrico que varía geográfica y temporalmente. El deterioro de la calidad de agua, se evalúa mediante el concepto de potencial contaminante por tipo de uso de suelo.

Las presiones en el aire ejercidas por los diferentes usos de suelo se evalúan usando el concepto de huella de carbono que cuantifica los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en

términos de CO₂ equivalente que constituyen la principal causa de calentamiento global, cambio climático y desequilibrio ambiental (incluida la pérdida de biodiversidad).

Al incluir la función O2, que suma las presiones negativas al medio ambiente (agua y aire) de forma adimensional, las distribuciones territoriales de los usos de suelo podrán guiarse de tal forma que se preserven los cuerpos de agua (superficiales y/o subterráneos) de sobreexplotación o deterioro de su calidad por contaminación. Adicionalmente se pueden disminuir las emisiones de CO₂ al mejorar la accesibilidad de ciertos usos, al promover la compactación de los mismos así como mediante la disminución de los cambios de uso de suelo (p.e. de usos forestales a urbanos o industriales). De esta manera, la función objetivo O2 se expresa como sigue.

Minimizar:

$$O2 = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C X_{uij} \cdot (PW_{uij} + PA_{uij}) \quad (4.2)$$

Donde PW_{uij} es la presión negativa sobre los recursos hídricos y PA_{uij} es la presión negativa al aire. PW_{uij} se calcula por medio de la siguiente ecuación que combina las presiones relacionadas con el uso y la calidad del agua en el primer y segundo sumando, respectivamente:

$$PW_{uij} = \left(\frac{WF_{uij} \cdot \alpha_{uij}}{WA_{ij}} \right) + \left(\left(\frac{(V_{ij}/\max V) \cdot (P_{uij}/\max P)}{R \cdot C} \cdot \beta_{gw} \right) + \left(\frac{(P_{uij}/\max P)}{R \cdot C} \cdot \beta_{sw} \right) \right) \quad (4.3)$$

Donde WA_{ij} es la disponibilidad de agua (m³/celda·año) en la celda ij . WF_{uij} es la Huella Hídrica (m³/celda·año) para el uso u en la celda ij ; y α_{uij} es el factor de aptitud territorial previamente definido de la celda ij para el uso u que solamente afecta las tierras de cultivo y el pastizal de acuerdo a la aptitud territorial. WF_u se calcula para cada uso a partir de las bases de datos oficiales (estadísticas globales, nacionales y estatales, información de los organismos de cuenca, reportes de las corporaciones, etc.). Es la suma de las huellas hídricas verde y azul de acuerdo con el origen del agua (la huella verde es la fracción del agua de lluvia almacenada en los suelos, y la huella hídrica azul representa la extracción del recurso de los cuerpos de agua). La HH urbana puede ser calculada a partir de los censos de población y/o de las densidades urbanas de acuerdo a los patrones de consumo per cápita locales; la HH industrial varía de acuerdo al tipo de producto, proceso de manufacturación y volumen de producción. En este trabajo la huella hídrica del uso industrial sólo se refiere a la actividad en el interior de las industrias. Para los usos agrícolas, pecuario y forestal la HH es la suma de las huellas hídricas verde y azul, dependiendo si se riegan o no. Los cálculos de la huella hídrica verde se hicieron mediante el uso del software gratuito CROPWAT desarrollado por la FAO basado en Allen *et al.* (2006) por su idoneidad para el cálculo de HH en productos de origen vegetal (Hoekstra *et al.* 2011, García *et al.* 2015 y González *et al.*, 2016). Los cálculos de HH para los cultivos de regadío se estiman a partir de la información de las concesiones oficiales de usos de agua (Montesinos *et al.*, 2011).

El segundo componente de la ecuación 4.3 evalúa el riesgo de contaminación del agua (variando desde 0 hasta 1) en un territorio; se toma en consideración la proporción de las fuentes de agua disponibles en un territorio: agua subterránea (β_{gw}) y/o agua superficial (β_{sw}). El riesgo de contaminación del agua subterránea se evalúa usando la metodología propuesta por Dávila (2011) en la que se consideran criterios de vulnerabilidad hidrogeológica a escala de celda por medio del índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y el potencial de contaminación del uso u ubicado en la celda ij . De acuerdo al índice, la vulnerabilidad natural del territorio se expresa en cada celda ij como V_{ij} (cuyos valores varían entre 65 y 223), siendo el potencial contaminante del uso u como P_{uij} (índice cuyos valores van de 10 a 50). Con el objeto de obtener valores de potencial contaminante más adecuados a escala de celda, se ha modificado la metodología de Dávila (2011), dividiendo V y P entre el valor máximo que cada uno puede asumir en una celda: ($max V$) y ($max P$) respectivamente. Ambos cocientes se multiplican y el producto resultante se divide entre el número total de las celdas de la malla ($R*C$), que se pondera por la proporción de agua subterránea (β_{gw}) en la zona de estudio. Se ha elegido esta metodología por su enfoque integral y su idoneidad con la escala espacial del modelo que no requiere evaluaciones específicas de sitio y por lo tanto su bajo costo de implementación, además de la buena disponibilidad de la fuentes de datos.

Para el caso de la evaluación del potencial de riesgo de las aguas superficiales, se evalúa directamente el potencial contaminante (P_{uij}) de cada uso u en la celda ij , ya que a diferencia de las aguas subterráneas, no existe ningún elemento intermedio (como los suelos o las rocas) que lo modifique. Este valor varía entre 0 y 1 y también se pondera por la proporción de agua superficial (β_{sw}) del área de estudio. La suma del riesgo de contaminación de los recursos hídricos (sean subterráneos y/o superficiales) tiene un rango entre 0 y 1, oscilando entre 0 y 2 los valores acumulados de PW.

Las presiones negativas adimensionales de los distintos usos del suelo sobre el aire (PA_{uij}), segundo término de la función objetivo O2, se cuantifican como emisiones de GEI en términos de CO₂ equivalente. Por lo tanto, la presión negativa que cada uso de suelo produce en su ubicación se estima de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PA_{uij} = \frac{(CO2_{uij} + (CO2_{uij}^{1-A_{ij}} \cdot \frac{D_{ij}}{\max D - \min D})) + (LUC_{uij} \cdot \gamma_u^{-1})}{\sum_{uij}^{URC} \max CO2_{uij}} \quad (4.4)$$

Donde $CO2_{uij}$ son las emisiones de CO₂ equivalente de la celda ij con el uso u . A_{ij} es el índice de accesibilidad de la celda ij dependiendo de la jerarquía de la vía de comunicación más cercana; D_{ij} es la distancia desde la celda ij a la vía de comunicación más cercana; $\max D$ y $\min D$ son las distancias máxima y mínima a las vías de comunicación del área de estudio; LUC_{uij} son las emisiones de CO₂ equivalente producidas por el cambio de uso de suelo (pérdida neta de bosques) de la celda ij ponderada por γ_u^{-1} que es un factor adimensional dependiente del tipo de uso que sustituye al bosque; y $\max CO2$ es el máximo posible de emisiones que podría generar la

celda ij .

La ecuación (4.4), como segundo componente de la función O2 estima a escala de celda la producción de CO₂ equivalente, basada en las estadísticas nacionales y estatales y en informes de corporaciones. Se expresa como fracción de toneladas de CO₂ equivalente por unidad de superficie con el uso de suelo u respecto del máximo nivel de emisiones que pueda producir la zona de estudio. Para los usos de suelo urbano e industrial, la función establece que mientras más extendidos en un territorio y más alejados de las vías de comunicación se encuentren, mayores serán las emisiones de CO₂ equivalente debido al uso de combustible fósil destinado al transporte de personas y bienes (Cao *et al.*, 2011). Adicionalmente se contempla que cuando el uso de suelo de la celda ij cambia de forestal a cualquier otro uso (pérdida neta de bosque), las emisiones generadas por el cambio de uso se penalizan mediante el factor γ_u^{-1} que depende del uso de suelo que sustituye al bosque existente para favorecer el mantenimiento de los usos forestales.

Los resultados de la ecuación (4.4) son adimensionales entre 0 y 4 puesto que PW y PA tienen igual peso en la ecuación (4.2).

Minimización del déficit alimentario

Cuando se incluye la seguridad alimentaria en los modelos de planeación espacial (Zhang, *et al.*, 2016) se trata generalmente como una restricción más que como un objetivo del modelo. En este trabajo la seguridad alimentaria se considera como un objetivo fundamental de la planeación territorial y por lo tanto está incluida como función objetivo dirigida a minimizar el déficit/superávit de alimentos. Está vinculada directamente a la dimensión social de la sostenibilidad en dos sentidos: para las regiones con una fuerte dependencia de las importaciones de alimentos, al promover el incremento de la producción local, así como para las regiones con superávit en producción alimentos, al controlar la sobreproducción de cultivos y con ello disminuir la degradación o la contaminación de otros recursos territoriales (principalmente suelos y agua). La función objetivo O3 minimiza tanto el déficit como el superávit de alimentos partiendo de la base de un mínimo de unidades alimentarias por persona (calorías), necesarias para garantizar los requerimientos nutricionales mínimos de determinada población así como la mejor ubicación de los cultivos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$O3 = \frac{|AU_p \cdot pop - (\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \cdot X_{u*ij} \cdot HL_{u*} \cdot Y_{u*} \cdot \alpha_{uij} \cdot \delta_{u*})|}{\sum_{ij}^{RC} \max AU_{ij}} \quad (4.5)$$

Sea AU_p los requerimientos nutricionales por habitante, expresados en unidades alimentarias (AU), basados en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014) adaptada a los cultivos locales; pop la población total del área de estudio, u^* el índice para los usos de suelo ligados a la producción de alimentos (agrícolas de riego y secano y pastizal), HL la superficie cosechada (%) del uso u^* (t),

Y_{u^*} a los rendimientos promedio del uso u^* , α_{uij} el índice de potencial agrícola (factor de aptitud territorial) de la celda ij con el uso u que ayuda a dirigir los suelos agrícolas y pecuarios a ubicaciones en áreas con alto potencial agrícola, δ_{u^*} el factor de conversión de los alimentos producidos en el uso u^* a AU (cal), que depende del cultivo y su producción (t) según su porcentaje de ocupación en la celda ij , y $max AU_{ij}$ el máximo posible de calorías que se pueden producir en la celda ij .

La ecuación 4.5 sólo toma en cuenta el valor absoluto de las diferencias entre las unidades alimentarias obtenidas en cada distribución de usos de suelo y las necesidades alimentarias de la población ya que tanto el déficit positivo (falta de alimento) y el déficit negativo (superávit de alimento), deberían ser mínimos para favorecer la sostenibilidad territorial (Menconi, *et al.* 2013). Los resultados de la ecuación (4.5) se dan en unidades alimentarias (cal), que se adimensionalizan al dividir las entre la suma de las máximas unidades alimentarias posibles por celda ij , variando entre 0 y 4.

Restricciones

La ubicación óptima de usos de suelo resultante del cumplimiento de los objetivos O1, O2 y O3 está sujeta a las siguientes restricciones espaciales generales:

-La superficie total por usos de suelo u , P_u varía entre los límites inferior y superior $P_{u low}$ y $P_{u up}$, respectivamente.

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C X_{uij} = P_u; \quad \forall u = 1, \dots, U; \quad P_{u low} \leq P_u \leq P_{u up} \quad (4.6)$$

-La suma de todos los usos de suelo arroja el área total de la malla de celdas.

$$\sum_{u=1}^U P_u = R \cdot C \quad (4.7)$$

-Los usos de suelo se ubican de acuerdo a la aptitud territorial. Se asume que una celda en el territorio puede ser idónea para varios usos al mismo tiempo, por lo que, visto el territorio como un espacio topológico, existe un subconjunto de celdas idóneas para cada uso u , S_u .

$$P_u \in S_u; \quad \forall u = 1, \dots, U \quad (4.8)$$

-La suma de todas las celdas ij con el uso u (P_u) siempre es menor que su subconjunto idóneo

$$P_u < S_u, \quad \forall u = 1, \dots, U \quad (4.9)$$

-Los subconjuntos idóneos están contenidos en la malla de celdas o mapa.

$$Sv_u \subset R \cdot C; \quad \forall u = 1, \dots, U \quad (4.10)$$

4.3. Modelo Multiobjetivo de Asignación de Usos Sostenibles del Suelo: MAUSS

El modelo multiobjetivo de asignación de usos sostenibles de suelo, MAUSS, resuelve el problema de optimización espacial multiobjetivo antes descrito. MAUSS incorpora el algoritmo genético denominado NSGA-II (Deb, *et al.* 2002), el cual ha sido sustancialmente modificado para adecuarse al problema de planeación espacial mencionado de acuerdo con el siguiente diagrama de flujo (Figura 4.1.)

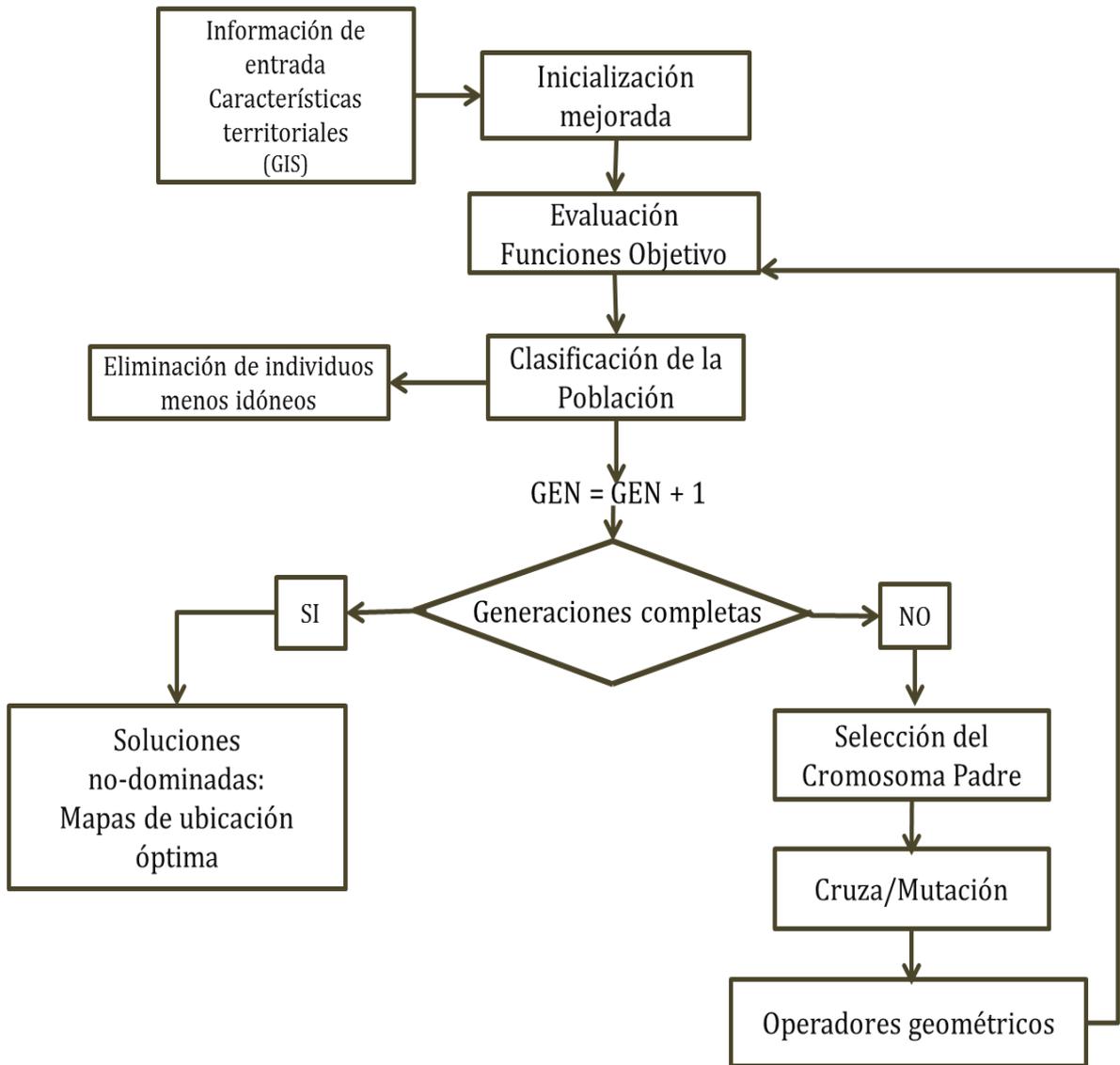


Figura 4.1. Diagrama de flujo del proceso de optimización de usos de suelo de MAUSS.

4.3.1. Representación del cromosoma

A pesar de que el uso de algoritmos genéticos para la planeación espacial puede hacerse a través de representaciones vectoriales, en este trabajo se opta por la representación de malla de celdas ya que las unidades territoriales homogéneas (celdas cuadradas) facilitan los procesos computacionales y son apropiadas para la escala de trabajo subregional, en la que las configuraciones de las parcelas se vuelven irrelevantes para el análisis territorial. Por consiguiente, siendo el cromosoma el elemento operacional de

cualquier algoritmo genético, un cromosoma es un mapa conformado por todas las celdas de la malla y constituye cada posible solución del problema de optimización. Cada gen del cromosoma es una celda del mapa.

4.3.2. Inicialización

La racionalidad espacial que mejore cuantitativa y cualitativamente la localización actual de los usos de suelo está basada en dos elementos vertebrales: la compactación de las aglomeraciones de los usos de suelo y el tamaño necesario de cada uso, éste último de acuerdo a las necesidades de cada caso de estudio. De acuerdo con eso, se ha diseñado un proceso de generación de los cromosomas o mapas de partida que conformen una población inicial espacialmente racional para ser mejorada a través del proceso de evolutivo. El proceso de inicialización se basa en la aglomeración de celdas (manchas) por tipo de uso de suelo (seleccionado aleatoriamente) a partir de una celda semilla aleatoria o núcleo. Aunque el concepto de celda semilla ya ha sido usado en otros trabajos (Stewart y Janssen, 2014), el procedimiento de MAUSS resulta más expedito debido a que no condiciona el número y el tamaño de las manchas puesto que indirecta y simultáneamente son controlados por un parámetro del modelo denominado parámetro de aleatorización, en el que se establece el porcentaje de celdas semilla asignadas por tipo de uso de suelo. En consecuencia, mientras menor sea el parámetro, menor cantidad de celdas semilla asignadas y por lo tanto será mayor el tamaño de cada aglomeración. Las manchas de cada uso de suelo se expandirán hasta que el número preestablecido de celdas se alcance. Las condiciones preliminares para la ubicación de los usos de suelo en los cromosomas iniciales son las siguientes:

- a) Las celdas semilla aleatorias y su subsiguiente aglomeración debe estar ubicada en una celda vacía dentro de un subconjunto idóneo.
- b) La suma de las celdas por uso de suelo no debe exceder el área preestablecida. Cada uso de suelo puede estar ubicado en una o varias aglomeraciones dependiendo del parámetro de aleatorización de las celdas semilla.
- c) Cada celda sólo puede alojar un único tipo de uso de suelo.

El proceso de inicialización sigue los siguientes pasos:

1. Selección aleatoria de orden de los usos de suelo a alojar
2. Selección aleatoria de las celdas semilla para iniciar la aglomeración, asignando el uso de suelo de la semilla en sus 8 celdas vecinas que se encuentren vacías (en una ventana de celdas de 3 x 3). Posteriormente se identifican las celdas adyacentes (ventana de 5 x 5 celdas) para actuar como nuevas semillas hasta que el área dentro del rango mínimo y máximo por uso se alcance.
3. Una vez que todas las celdas del uso de suelo actual se han ubicado, el proceso continúa con el siguiente uso de suelo elegido aleatoriamente hasta que todos los usos de suelo queden ubicados dentro del cromosoma.
4. El proceso de inicialización itera hasta que el conjunto de cromosomas o mapas iniciales (población) se completa, cumpliendo en cada paso las restricciones establecidas.

Como estructura topológica, los subconjuntos idóneos para cada uso de suelo en un mapa pueden compartir entre ellos una porción, ninguna o su dimensión entera con otro u otros subconjuntos idóneos debido a que el territorio puede ser apto para más de un tipo de uso de suelo. Por lo tanto, un uso de suelo podría no alcanzar su extensión preestablecida al encontrarse con que su subconjunto idóneo ya ha sido ocupado por otro u otros usos de suelo. Para solucionar este problema dentro del proceso de inicialización, los usos deficitarios ocupan las celdas que permanezcan vacías, aunque no correspondan con su subconjunto, hasta completar su superficie. Las ubicaciones fuera de los subconjuntos idóneos serán corregidas posteriormente a través de los operadores genéticos.

Este procedimiento de inicialización garantiza tanto la diversidad entre los individuos como la compactación de los usos de suelo, lo que permite un inicio adecuado del proceso evolutivo, evitando el análisis de múltiples soluciones (mapas de usos de suelo) inadmisibles que ralentizarían considerablemente el proceso de búsqueda de soluciones válidas.

4.3.3. Operadores del modelo

Los operadores de MAUSS se clasifican en genéticos y geométricos de acuerdo a la siguiente descripción.

4.3.3.1. Operadores Genéticos

El cruzamiento y la mutación desempeñan generalmente, dentro de los algoritmos genéticos, las tareas de recombinación o reproducción de la población, promoviendo la diversidad entre la descendencia de la que surgen las soluciones finales.

Operador de cruzamiento

Tradicionalmente la reproducción de la población se realiza mayoritariamente por cruzamiento, es decir por intercambio de segmentos de dos cromosomas o padres. Esos segmentos, que pueden estar definidos por un punto o varios puntos de cruce a lo largo del cromosoma, generan la descendencia de acuerdo con cierto criterio, y contienen la información genética de ambos padres. El operador de cruce del NSGA-II difiere del operador tradicional, sin embargo no resulta adecuado para obtener soluciones racionales en problemas de optimización espacial; de él se retoma lo siguiente: el procedimiento de selección (torneo) y la cantidad de padres más aptos para la reproducción (que generalmente es la mitad de la población inicial), así como la selección aleatoria de cada pareja de padres de la que se obtienen dos hijos por cada iteración del operador. La probabilidad de cruzamiento, como parámetro del modelo, es del 90%. Posteriormente el mecanismo de cruzamiento se modifica en el presente trabajo (Figura 4.2) de la siguiente manera:

- 1) Etapa de superposición: Las dos soluciones hijas heredan las celdas de los padres uno y dos en las que coincida el mismo tipo de uso de suelo (celdas solapadas o

superpuestas) siempre y cuando los usos se ubiquen dentro de sus subconjuntos idóneos. Las celdas donde no hay coincidencia permanecen vacías.

- 2) Etapa de búsqueda local: Para llenar las celdas vacías, en este trabajo se aplica una búsqueda local por uso de suelo mediante un procedimiento similar al propuesto por Datta *et al.* (2006). Las funciones objetivo del modelo se evalúan en cada padre por uso de suelo mediante la función de minimización de diferencias porcentuales OU , que se define como:

$$\text{minimizar } OU: \sum_{j=1}^M \frac{(|U_{ij}^{max} - U_{ij}(x)|)}{(|U_{ij}^{max} - U_{ij}^{min}|)} \quad (4.11)$$

donde M es el número de funciones objetivo del modelo, de j hasta M ; $U_{ij}(x)$ es el valor del uso de suelo en proceso –desde i hasta U - evaluado en el j ésimo objetivo para el padre (x) (padre 1 o padre 2); U_{ij}^{max} y U_{ij}^{min} son los valores máximo y mínimo obtenidos del conjunto de la población inicial evaluado para el i ésimo uso (en proceso) en la j ésima función objetivo.

A diferencia de los autores mencionados, los resultados de cada uso de suelo no se ponderan si no que se comparan directamente entre ambos padres; el uso de suelo del padre que arroje el valor mínimo en esta función es el que se aloja en las celdas vacías tanto para el hijo uno como para el hijo dos, siempre que se estén cumpliendo las restricciones ya descritas (ecuaciones 4.6 – 4.10). Bajo este procedimiento, la descendencia hereda las mejores ubicaciones por uso de suelo obtenidas mediante la búsqueda local, mejorando la evaluación global del cromosoma.

- 3) Etapa de llenado: Las celdas vacías restantes, aquellas fuera de su subconjunto idóneo (mal ubicadas), pasan por un proceso de llenado similar al de la inicialización ya descrita. Específicamente, el proceso empieza por alojar celdas semilla de forma aleatoria (de acuerdo con el parámetro de aleatorización) por cada uso de suelo con superficie deficitaria hasta que alcancen al menos la superficie mínima establecida. Este proceso itera en orden descendente alojando primero los usos con un mayor déficit (que puede ser del 100%). Si existe más de un uso de suelo ausente en la descendencia, el proceso de iteración empieza con el uso de menor tamaño (o menor superficie) siempre y cuando las restricciones generales se cumplan.

El proceso de cruzamiento termina cuando ya no hay celdas vacías en la descendencia.

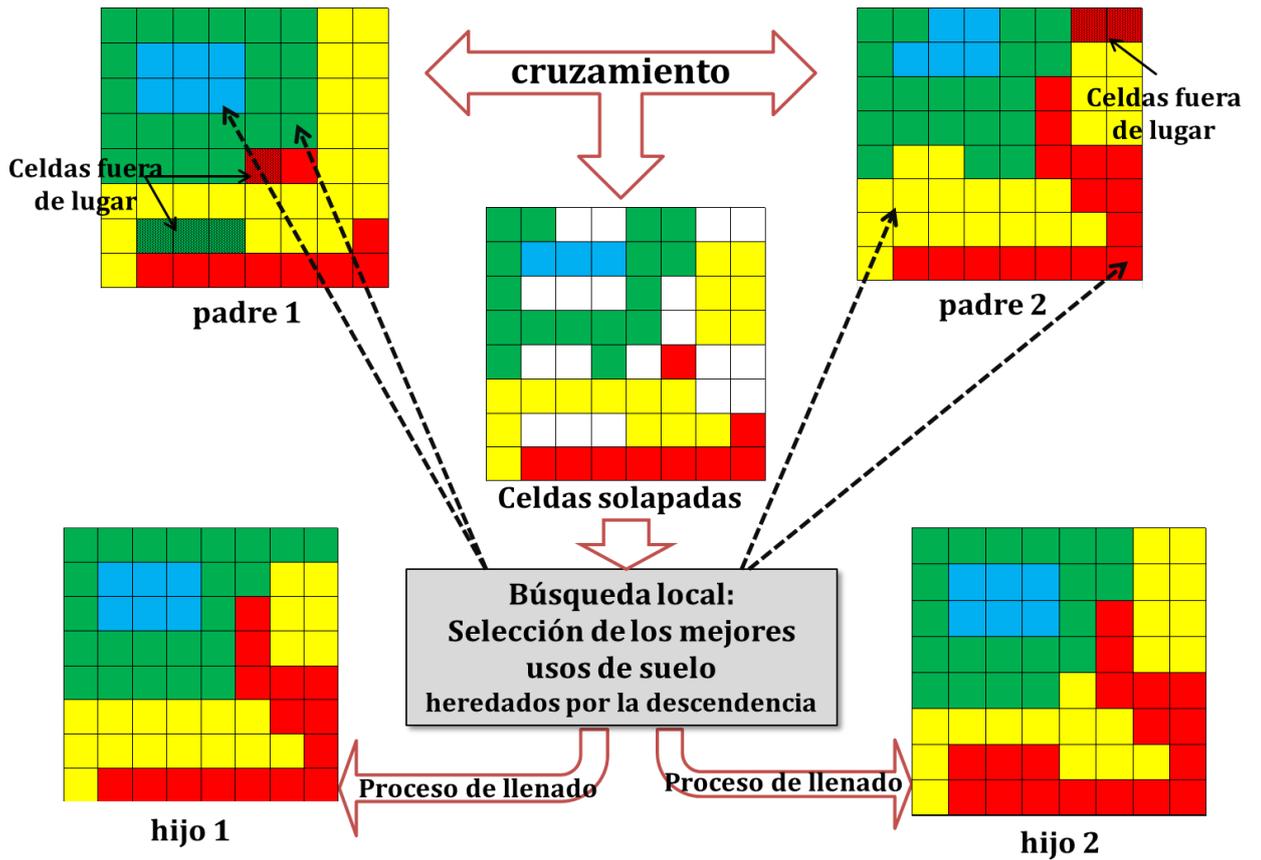


Figura 4.2. Operador de cruzamiento del modelo MAUSS

Operador de mutación

El objetivo de este operador consiste en reubicar aquellas celdas con usos de suelo fuera de su subconjunto idóneo, promoviendo así mismo diversidad entre individuos. Con una probabilidad del 10%, la mutación se ejecuta como se indica a continuación (Figura 4.3):

- 1) Se identifican las celdas mal alojadas
- 2) Mediante una ventana de análisis de 3 x 3 celdas, las celdas mal alojadas toman el uso más frecuente de las celdas vecinas sólo si se encuentran dentro de su subconjunto idóneo.

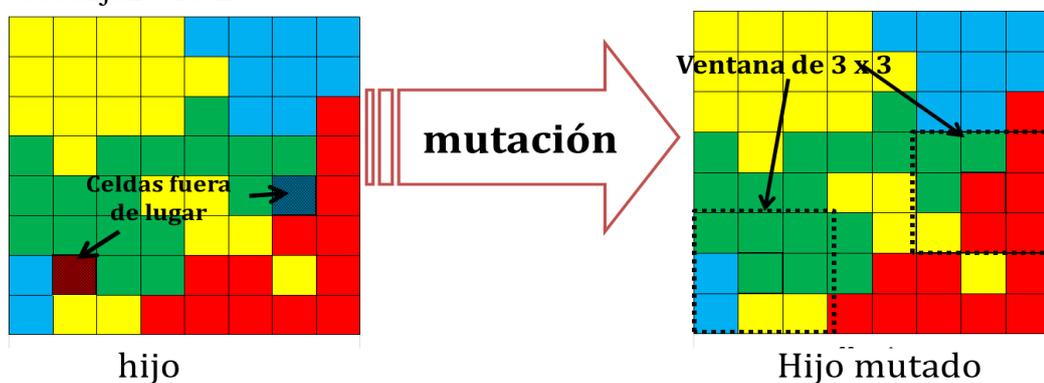
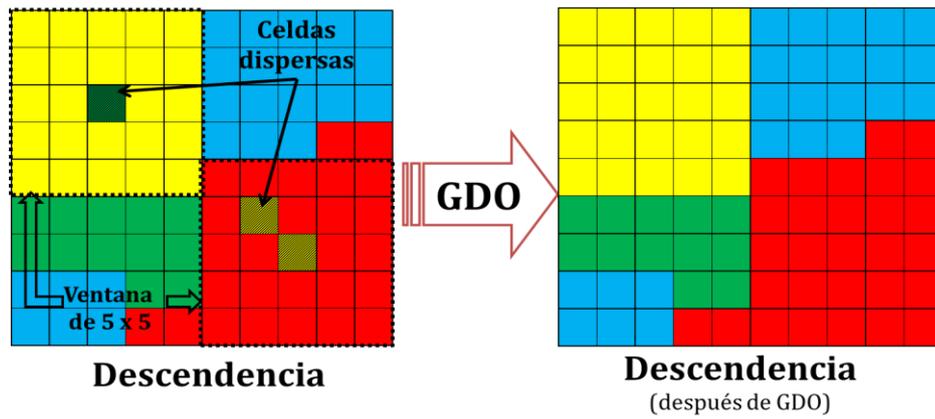


Figura 4.3. Operador de mutación del modelo MAUSS

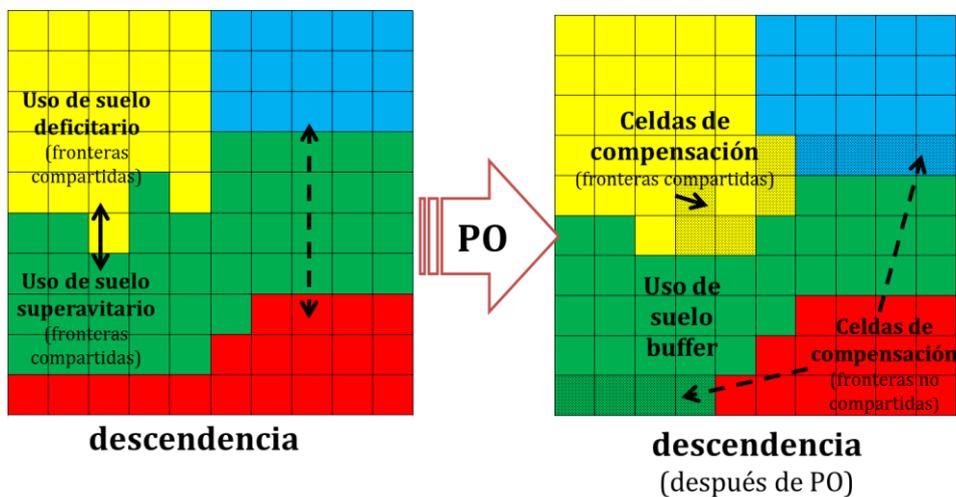
4.3.3.2. Operadores geométricos

Para mantener y mejorar el tamaño de las manchas de los distintos usos de suelo y su compactación, en este trabajo se han desarrollado dos operadores geométricos. Como ha sido evidenciado en la literatura, en la mayoría de los modelos de optimización espacial, los elementos clave para mejorar las aglomeraciones de los usos de suelo son sus fronteras. Por lo tanto, en estos modelos se incluye el análisis basado en fronteras o perímetros (Datta, *et al.* 2006, Cao, *et al.* 2011) porque permiten controlar el tamaño y la compactación de los distintos usos hasta alcanzar el número de celdas requeridas en cada uno de ellos. En esta tesis, gracias a las ventajas derivadas de la inicialización inducida de la población inicial de cromosomas, el análisis de fronteras se ha simplificado sustancialmente, y se realiza a través de dos operadores geométricos manteniendo la racionalidad espacial de la descendencia en dos pasos:

- 1) El operador de dispersión geográfica (GDO) se ha diseñado para mejorar la compactación de las manchas. Identifica, mediante una ventana de análisis 5 x 5 celdas, los usos de suelo dispersos (Figura 4.4 a) tanto dentro como fuera de sus subconjuntos idóneos. Una vez identificadas las celdas dispersas éstas se cambian al uso de suelo más frecuente de sus celdas vecinas dentro de la ventana. La definición de dispersión geográfica se debe establecer para cada implementación particular del modelo debido a que depende de la escala de trabajo, del tamaño de las celdas, así como de los objetivos espaciales específicos de optimización y de la cartografía disponible. En este trabajo, la dispersión se entiende como una o máximo dos celdas cuyo tipo de uso de suelo difiere del resto de sus vecinas en la ventana de análisis. El proceso se repite hasta que no existen más celdas dispersas.
- 2) El operador de proporción (PO) se ejecuta por parejas de usos a la vez y controla el número de celdas necesarias por uso de suelo a través del análisis de fronteras. En primer lugar el operador identifica los usos desproporcionados (déficit o superávit). Cada uso desproporcionado puede balancearse en una o varias manchas. Inicialmente, se escoge la pareja compuesta por el uso de suelo con el déficit más alto y por el uso con el mayor superávit. A continuación, el análisis de fronteras indica si ambos usos son vecinos al menos en una mancha o no lo son; en el primer caso el intercambio de celdas es inmediato en aquellas celdas que cumplen las restricciones, equilibrando o al menos disminuyendo el déficit/superávit de superficies y permitiendo en ese último caso la selección de una nueva pareja de usos desequilibrados para compensarlos usando el mismo criterio. El proceso continúa hasta que se compensan las superficies de todos los usos de suelo o hasta que no existe vecindad ente los usos que permanecen desequilibrados. En ese caso se elige otro uso que comparta vecindad con un uso deficitario, al que le cede celdas que luego compensa con un uso con superávit. Este operador se aplica en dos o más aglomeraciones hasta que se alcanza la proporción adecuada de los usos de suelo del mapa (dentro de los límites superior e inferior de las áreas establecidas), siempre y cuando se cumplan las restricciones espaciales generales (Figura 4.4b).



a)



b)

Figura 4.4 Operadores geométricos del modelo MAUSS. a) Operador de dispersión geográfica (GDO) y b) operador de proporción (PO)

Después de que los operadores geométricos corrijan la compactación y el tamaño del último hijo sujeto a los operadores genéticos (cruzamiento y mutación), se evalúan las funciones objetivo de la descendencia y el proceso evolutivo se repite hasta completar todas las generaciones y obtener el correspondiente conjunto de soluciones no dominadas.

4.4. Aplicación del modelo MAUSS a Los llanos de San Juan (México)

4.4.1. Resultados

El modelo MAUSS se ha aplicado en una región de los Llanos de San Juan (México), descrita ampliamente en el capítulo 3, para buscar el conjunto cuasi óptimo de opciones de distribución de usos de suelo con el propósito de maximizar su renta, reducir las presiones negativas sobre sus recursos hídricos y sobre el aire así como minimizar el déficit alimentario. Tras de varias ejecuciones de ajuste del algoritmo de optimización, se fijaron los parámetros del modelo (por ejemplo el número de iteraciones) como se

explica a continuación. La ejecución del modelo se realiza a partir de una población inicial de 150 individuos durante 150 generaciones; el tiempo de ejecución tomó 12 horas en una PC estándar (core i5, a 3.1 Ghz).

4.4.1.1. Parámetros del modelo

En la aplicación de MAUSS se asumieron algunas restricciones espaciales complementarias dadas las condiciones locales del área de estudio: 1) las áreas con asentamientos humanos consolidados (urbanos o rurales) así como los cuerpos de agua (pequeñas lagunas intermitentes) no se consideraron susceptibles de cambio de uso de suelo; 2) se preservaron sin cambio de uso de suelo los bosques con pendientes del terreno muy pronunciadas (de más del 15%); y 3) se preservó sin cambios de área y localización el uso agrícola de regadío por los siguientes motivos: al tratarse de una zona actualmente con superávit en la producción de alimentos, no se priorizó el incremento de su superficie en esta fase del modelo, ni tampoco su disminución por la importancia del uso en la satisfacción de las futuras necesidades alimentarias de una población creciente; por otra parte, a pesar de que el modelo es capaz de mejorar las localizaciones del suelo de regadío, se optó por mantener las actuales dada la inviabilidad económica que representaría el cambio de ubicación de una infraestructura ya implantada.

El área preestablecida por uso de suelo tiene una variabilidad de $\pm 3.0\%$, quedando fijados en ese porcentaje los límites superior e inferior de la superficie por tipo de uso. Todas estas restricciones específicas se tomaron en cuenta en el proceso de inicialización afectando al 18.6% de la superficie total del área de estudio.

Los parámetros del modelo se calibraron de la siguiente manera: el parámetro de aleatorización se estableció en 3% tanto en la inicialización como en el cruzamiento (etapa de llenado). Los factores de aptitud territorial que afectan a todas las funciones objetivo fueron obtenidas de la fuente cartográfica disponible (INEGI-UNAM, 2000) (Anexo A.4. Tabla A.4.1.) en términos cualitativos (clasificados en 4 categorías; muy alta, alta, media y baja capacidad agrícola y pecuaria) y se convirtieron en valores cuantitativos (de 0,5 a 1) atendiendo a los valores promedio de estadísticas agropecuarias oficiales para el área de estudio extraídas de un período de 10 años (SAGARPA-SIAP, 2015) (Anexo A.10.).

Los valores de las emisiones de CO₂ por uso de suelo (INEEC, 2013; AUDI, 2014) en cada celda fueron ponderadas por el índice de accesibilidad que depende de la jerarquía vial (0,25 camino municipal pavimentado, 0,5 carretera estatal pavimentada, 0,75, carretera federal, y 1 carretera de cuota o autopista) y de la distancia a la que se encuentre la celda de la vía de comunicación más cercana, (las distancias a las vías de comunicación se determinaron de acuerdo a sus zonas de influencia o buffer a cada kilómetro) (Anexo A.5.). La demanda de agua en los Llanos de San Juan se satisface sólo con extracción de agua subterránea, por lo tanto, el potencial de riesgo de contaminación de agua se evaluó solamente para el agua del subsuelo (Anexo A.6.) Los valores por unidad de superficie (ha) de WF, P, CO₂ e para el cálculo de la función O2

se puntualizan en el Anexo A.7. El factor de conversión de cultivos a unidades alimentarias (calorías) se calculó para cada uno de los 23 cultivos relevantes con base en los datos oficiales online del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2016) (Anexo A.3.). Se ha considerado como dieta saludable 2.500 calorías por persona al día de acuerdo a los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014).

La extensión y distribución espacial de los subconjuntos idóneos se deriva de las aptitudes territoriales de la región para cada uso de acuerdo con la clasificación oficial (INEGI-UNAM, 2000) y puede conservarse gráficamente en el Anexo A.8. (Figuras A.8.1. a A.8.4.)

4.4.1.2. Rendimiento del proceso evolutivo

- Mejoras globales

La evolución de los resultados de cada una de las funciones objetivo (en unidades adimensionales) a lo largo de las generaciones se observa en la Figura 4.5. Las mejoras sustanciales tuvieron lugar en las quince primeras generaciones para cada función. El proceso de evolución mejoró todos los valores de la población inicial de cromosomas en cada una de las funciones objetivo.

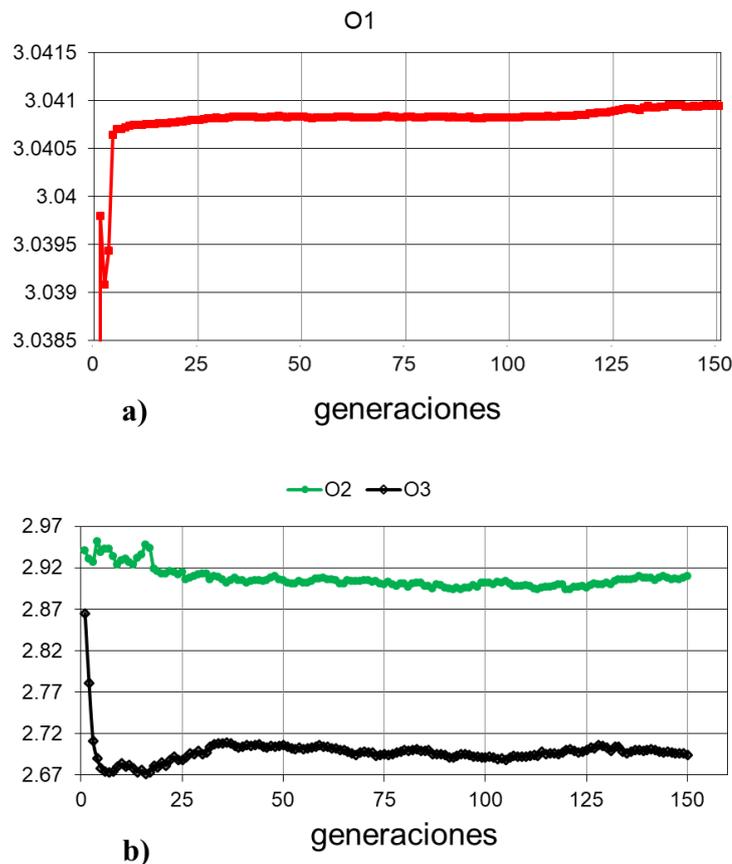


Figura 4.5. Evolución de las funciones objetivo a lo largo de las generaciones (valores medios por iteración) en unidades adimensionales: a) Maximización de la renta, O1; b) Minimización de la presión negativa en el medio ambiente O2 y Minimización del déficit alimentario O3

La figura 4.6 muestra el conjunto de soluciones no-dominadas en el espacio de solución tridimensional obtenidos después de 150 generaciones, donde están contenidos los mapas seleccionados, que se explican más adelante.

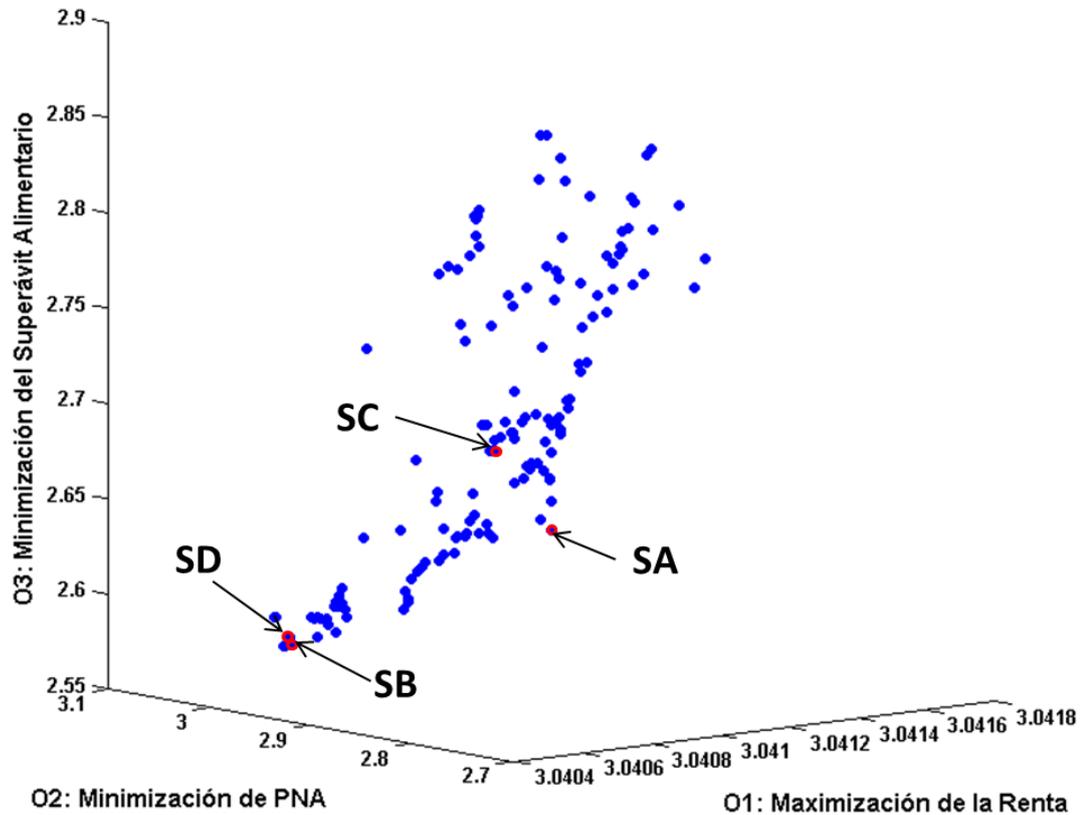


Figura 4.6. Representación tridimensional del frente de Pareto después de 150 generaciones de MAUSS en unidades adimensionalizadas

- Mejoras por tipo de uso de suelo

Los resultados se presentan clasificados en varios escenarios para clarificar las enormes transformaciones territoriales que están teniendo lugar en la zona de estudio y las mejoras que se logran en la asignación de los usos de suelo a través del modelo MAUSS: Escenario 00 (S00), distribución de usos de suelo antes de la expansión industrial del sector automotriz (Anexo A.9); Escenario 01 (S01), usos de suelo actuales (propuesta oficial); y Escenarios Óptimos (A, B, C, y D) que son soluciones no-dominadas elegidas después del proceso evolutivo. La definición de los escenarios óptimos se basa en la mayor idoneidad espacial de las aglomeraciones por uso de suelo y en el nivel de cumplimiento de las funciones objetivo. La mejor solución respecto a la función O1 es el Escenario A (SA), respecto a O2 es el Escenario B (SB), para la O3 es el Escenario C (SC), mientras que la solución que más compensa los tres objetivos corresponde al Escenario D (SD). Los valores constantes de los usos de aquellas celdas no tomadas en cuenta en el proceso evolutivo debido a las restricciones ya descritas, se han incluido en todas las soluciones con el propósito de facilitar la comparación entre

todos los escenarios. Debido a la naturaleza del problema espacial, se ha considerado un criterio simple de selección de los escenarios en lugar de procedimientos más sofisticados como el método de la rodilla (Nandi, *et al.* 2015; Branke, *et al.* 2004). El propósito de MAUSS es proporcionar soluciones de referencia a la región en estudio dentro del conjunto de soluciones no dominadas, como ayuda a los planificadores espaciales en el proceso de toma de decisiones, ya que estas soluciones van a estar muy condicionadas por otros factores (por ejemplo los límites catastrales o la cambiante propiedad de la tierra) cuya incorporación en el planteamiento matemático del problema tiene una considerable complejidad.

En la figura 4.6 se han marcado los escenarios de análisis, concentrados en la región con la mayor densidad de puntos.

a) Maximización de la renta

La renta anual promedio de los usos de suelo se estimó a partir de los datos oficiales nacionales y municipales (INEGI, 2004, 2009, 2014, SAGARPA-SIAP 2015) para todos los escenarios. Como lo muestra la Tabla 4.1, la renta inicial de la subregión en S00 se incrementa en más de 22 veces con el nuevo asentamiento urbano-industrial, de 5.174,93 millones de pesos (mdp) a 118.837,27 mdp alcanzados en el S01. En todos los escenarios óptimos los ingresos fueron mayores que en S01. Para SA (mejor individuo respecto a O1), la renta es 607,3 mdp más alto que en S01 (119.444,6 mdp). Los resultados de renta por tipo de uso de suelo mostraron que los incrementos monetarios más significativos entre S01 y los escenarios óptimos (SB, SC, y SD) provienen en todos los casos del uso pecuario, mientras que para SA provinieron del uso industrial. El área de pastizales es, en los escenarios óptimos, ligeramente más grande (Figura 4.7.) que en S01 pero menor a S00, no obstante, el ingreso en los escenarios óptimos es 63% y 54% más alto que para S01 y S00 respectivamente. Para el caso de la agricultura de riego, los escenarios óptimos mantuvieron la misma renta anual debido a que su superficie y ubicación permanecieron iguales a S00, de acuerdo a las restricciones antes especificadas.

Tabla 4.1. O1: Renta Anual en millones de pesos

uso de suelo	Renta anual por hectárea	Escenario S00	Escenario S01	Escenarios óptimos			
				SA	SB	SC	SD
forestal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
pastizal	0,03	217,68	205,60	332,43	338,83	338,15	338,73
agrícola de secano	0,01	147,67	143,24	128,14	127,67	124,22	127,06
agrícola de regadío	0,02	41,03	37,23	41,19	41,19	41,19	41,19
industrial	70,82	4.545,27	117.962,90	118.516,26	117.962,90	117.962,90	117.962,90
urbano	0,29	223,27	488,30	426,58	384,83	384,25	384,83
total		5.174,93	118.837,27	119.444,60	118.855,42	118.850,71	118.854,71

b) Minimización de las presiones negativas en el medio ambiente

La Tabla 4.2. muestra las presiones negativas, PNA, que cada uso de suelo ejerce sobre el medio ambiente (en agua y aire), expresadas en unidades adimensionales conforme a lo indicado en la sección 2.1. La expansión urbana e industrial incrementa considerablemente las PNA en el área de estudio (de 3,151 en S00 a más de 3,4 en todos los demás escenarios). Los escenarios óptimos seleccionados SA, SB, SC, y SD ejercen en todos los casos una menor presión negativa (9% menor) que la actual distribución espacial (S01). El mejor individuo respecto a O2 (SB) arroja un valor mínimo de 3,482 unidades de PNA, alcanzando presiones menores precisamente en los usos urbano e industrial, y también en el uso pastizal. Los valores en sus unidades originales para el cálculo de WF, P y CO₂ e por unidad de superficie mediante los cuales se realizó el cálculo de O2 se detallan en el anexo 1 (Tabla A.1.6.)

Tabla 4.2. O2: Valores anuales de presión negativa en el medio ambiente en unidades adimensionales

uso de suelo	Escenario S00	Escenario S01	Escenarios óptimos			
			SA	SB	SC	SD
forestal	0,0884	0,0884	0,0898	0,0876	0,0877	0,0876
pastizal	0,6572	0,6075	0,5032	0,5094	0,5102	0,5095
agrícola de secano	1,1049	1,0664	1,0585	1,0724	1,0836	1,0743
agrícola de regadío	0,0781	0,0707	0,0781	0,0781	0,0781	0,0781
industrial	0,7940	1,0354	0,9985	0,9982	1,0039	0,9985
urbano	0,4282	0,9782	0,9057	0,7364	0,8255	0,7369
total	3,151	3,847	3,634	3,482	3,589	3,485

c) Minimización del déficit alimentario

Como se muestra en la Tabla 4.3., actualmente el área de estudio es excedentaria en la producción de alimentos (déficit negativo), no obstante, la pérdida de usos de suelo productivos ha conducido a una reducción de ese superávit a escala regional; de 193,64 unidades alimentarias, en Gigacalorías (Gcal) en S00 a 182,67 en S01. El escenario SC arrojó el superávit más bajo, 173,19 Gcal, que es un 5,2% y 10,6% menor que en S01 y S00 respectivamente. El análisis de los resultados por uso de suelo muestran que aunque en los escenarios óptimos el área de pastizal decreció respecto de S00 y es ligeramente mayor que en S01 (ver figura 4.7.), sus unidades alimentarias se incrementaron a 2,96 Gcal en SC, es decir, un 53% y un 64% más alto que para S01 y S00 respectivamente, debido a la mejor ubicación de los pastizales en zonas de mayor aptitud que no representó incrementos significativos en la producción global de calorías de la subregión. Las principales reducciones alimentarias provienen de la reducción de la superficie de suelo de agricultura de secano.

Tabla 4.3. O3: Superávit alimentario de los usos agrícolas en Gigacalorías (Gcal)

uso de suelo	Escenario S00	Escenario S01	Escenarios óptimos			
			SA	SB	SC	SD
pastizal	1,93	1,80	2,92	2,98	2,96	2,97
agrícola de secano	120,88	115,75	103,76	103,35	100,34	102,82
agrícola de regadío	70,04	65,12	70,04	70,04	70,04	70,04
total	193,64	182,67	176,74	176,37	173,19	175,81

- Mejores mapas-solución

En la Figura 4.7 se muestra la representación geográfica de los individuos seleccionados de acuerdo con cada una de las funciones-objetivo evaluadas. El efecto de los operadores geométricos puede observarse en las diferentes configuraciones espaciales obtenidas, donde las aglomeraciones por uso son compactas y respetan las áreas preestablecidas. Las expansiones de usos urbano e industrial además de explorar nuevas localizaciones óptimas en todos los casos, también se aglomeraron en las manchas existentes formando continuidades espaciales muy apegadas a la realidad.

En términos generales, todas las restricciones espaciales encontraron cumplimiento en los mapas solución; para el caso del mapa con mejor resultado en O1 (Figura 4.7. a), las distribuciones industriales siguieron, en tres aglomeraciones, un patrón lineal adherido a las principales vías de comunicación. Para el caso del mejor mapa en términos de O2 (Figura 4.7. b) se logró una sola aglomeración industrial al norponiente con gran accesibilidad y se identificó un área compacta para nuevos asentamientos urbanos al centro-sur. El mapa con mejores valores en la O3 (Figura 4.7.c) logra en dos manchas, una al norte y otra al suroeste, una distribución compacta de los crecimientos industriales que responden fundamentalmente a los criterios de aptitud territorial y de accesibilidad.

El escenario D (SD) es el mapa-solución que más equilibra el cumplimiento de las tres funciones objetivo. Su distribución espacial es muy similar a SB y por lo tanto sus valores muy parecidos; sin embargo, su menor déficit alimentario hace que el equilibrio entre las tres funciones obtenga una mejor ponderación por el algoritmo en términos de su ranking y distancia de hacinamiento en el espacio de solución (Deb *et al.* 2002). Comparado con S01, su renta es 17,4 mdp más alto (1,5%), su PNA global es 9,4% más baja y su superávit alimentario es 6,9 Gcal menor (una reducción del 3,76%). Los usos de suelo urbano, pecuario e industrial alcanzan en este escenario óptimo una reducción importante de PNA respecto de S01 (de 24,7%, 16,7% y 3,5% respectivamente).

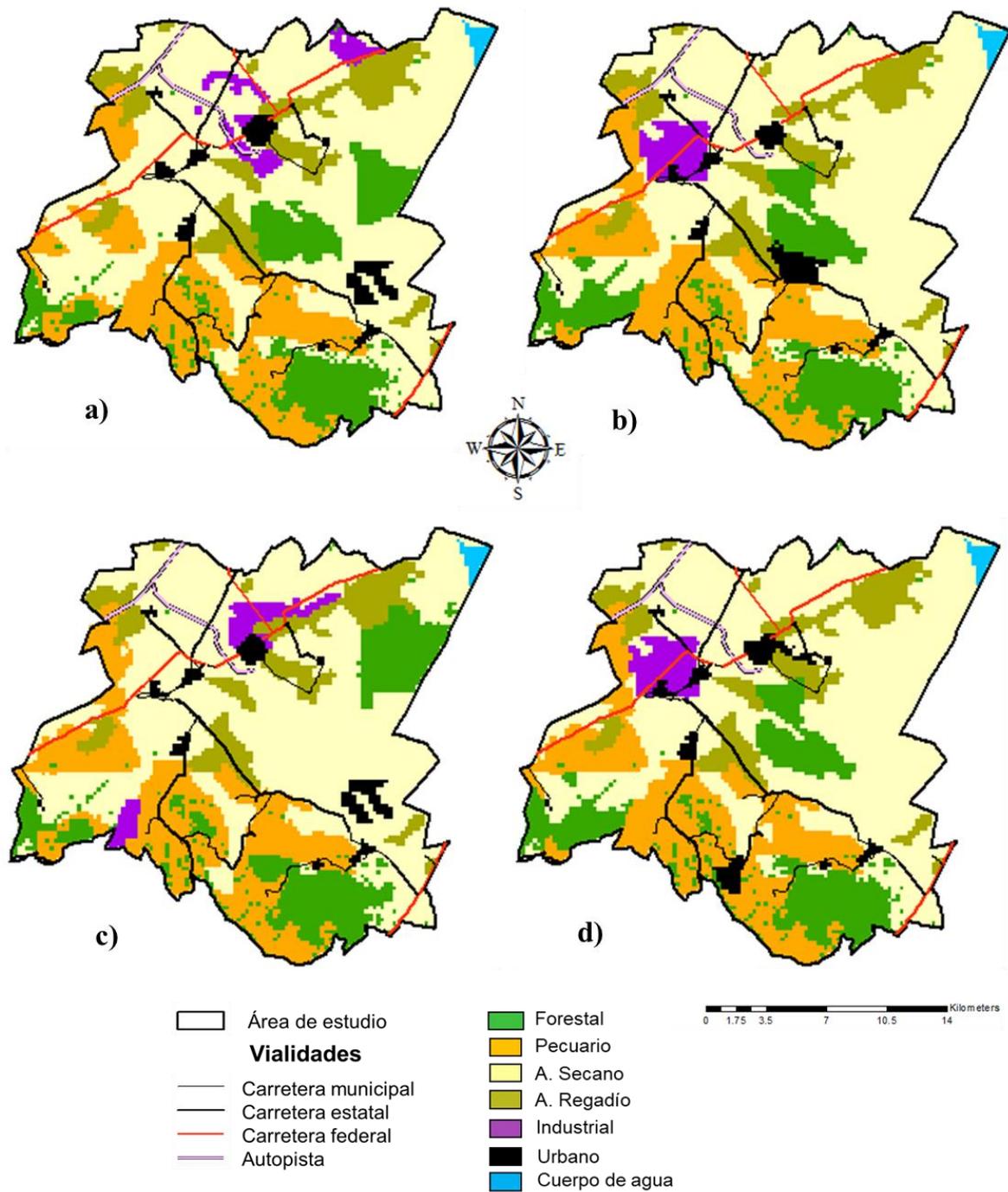


Figura 4.7. Mejores mapas-solución por escenario, a) Maximización de la renta (SA), b) Minimización de la presión negativa en el medio ambiente (SB), c) Minimización del superávit alimentario (SC), d) Compensación de los tres objetivos (SD)

4.4.2. Discusión

Para mostrar la efectividad de MAUSS, los escenarios óptimos (SA, SB, SC, y SD) y la propuesta oficial (S01) se analizan en espacios de solución bidimensionales (Figura 4.8). Como se puede observar, los mejores individuos extraídos del frente Pareto obtuvieron mejores evaluaciones en cada una de las tres funciones objetivo ya descritas.

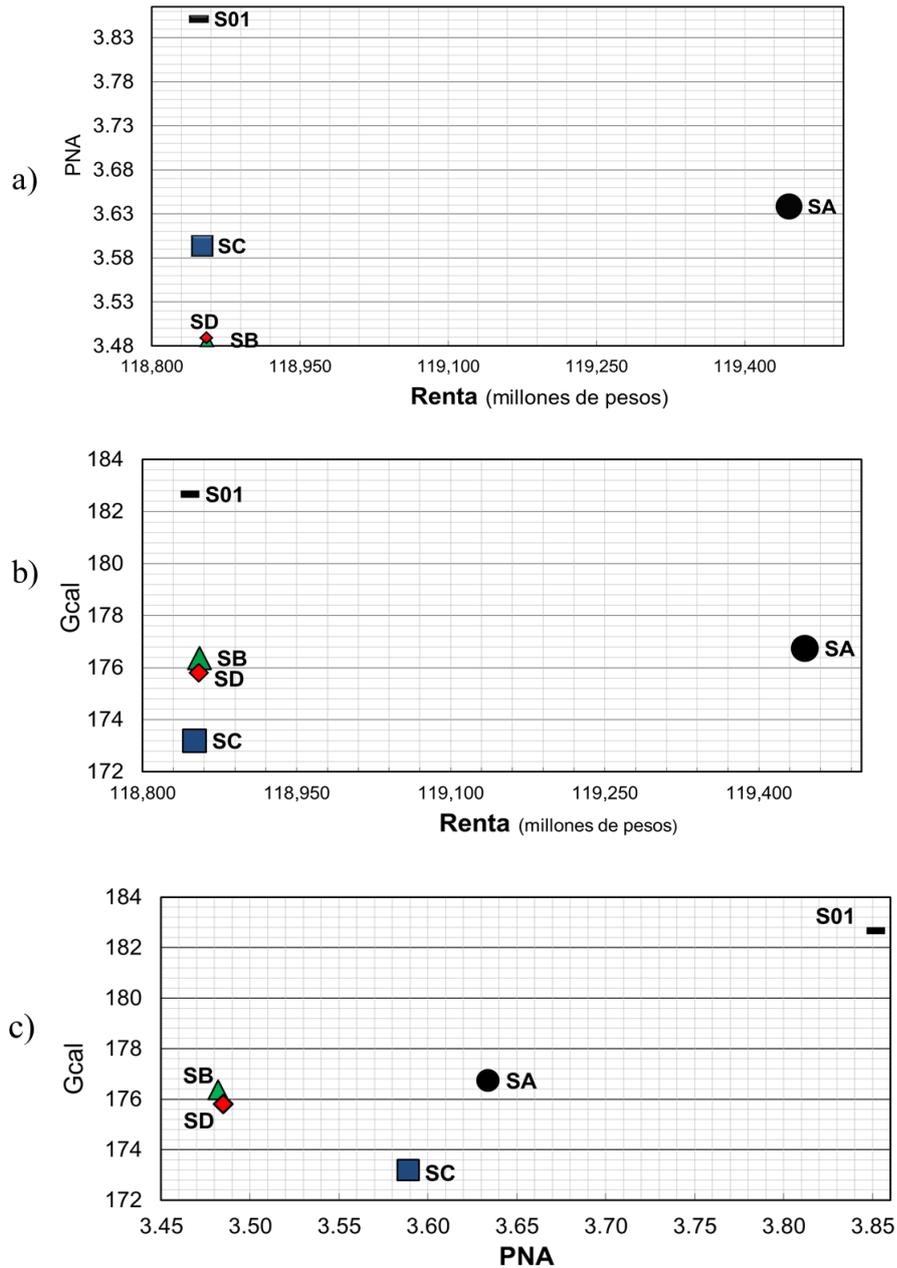


Figura 4.8. Valores de las funciones objetivo de los escenarios óptimos SA, SB, SC, y SD (soluciones no dominadas) vs S01 (propuesta oficial): a) ingreso versus presiones negativas en el medio ambiente (PNA en unidades adimensionales), b) ingreso versus superávit alimentario en Gigacalorías (Gcal); y c) presiones negativas en el medio ambiente (PNA) versus superávit alimentario

La efectividad de MAUSS puede observarse en la forma en la que aborda el problema multiobjetivo. Por ejemplo para incrementar la renta, el modelo incrementa ligeramente el tamaño de ciertos usos (como el uso industrial y el urbano en SA) tomando en consideración las restricciones establecidas. Esas pequeñas variaciones de tamaño conllevan grandes incrementos de la renta. En la figura 4.9 se presenta una comparación de las localizaciones del uso industrial en los diferentes escenarios, de acuerdo a ellas, las presiones negativas sobre el medio ambiente de los escenarios óptimos es menor que

la generada por la propuesta oficial (S01). El modelo también ha ubicado los pastizales en zonas con mayor aptitud, cuyas importantes mejoras en la renta no han incrementado significativamente la producción de alimentos ni a la presión negativa al medio ambiente (Figura 4.10.). Para minimizar las PNA, los usos urbano e industrial se han ubicado en las cercanías de las principales vías de comunicación (para disminuir las emisiones de CO₂) y en las zonas con menor potencial contaminante de las aguas subterráneas; adicionalmente MAUSS no sólo ha preservado sino también incrementado el área de bosques (Figura 4.11.).

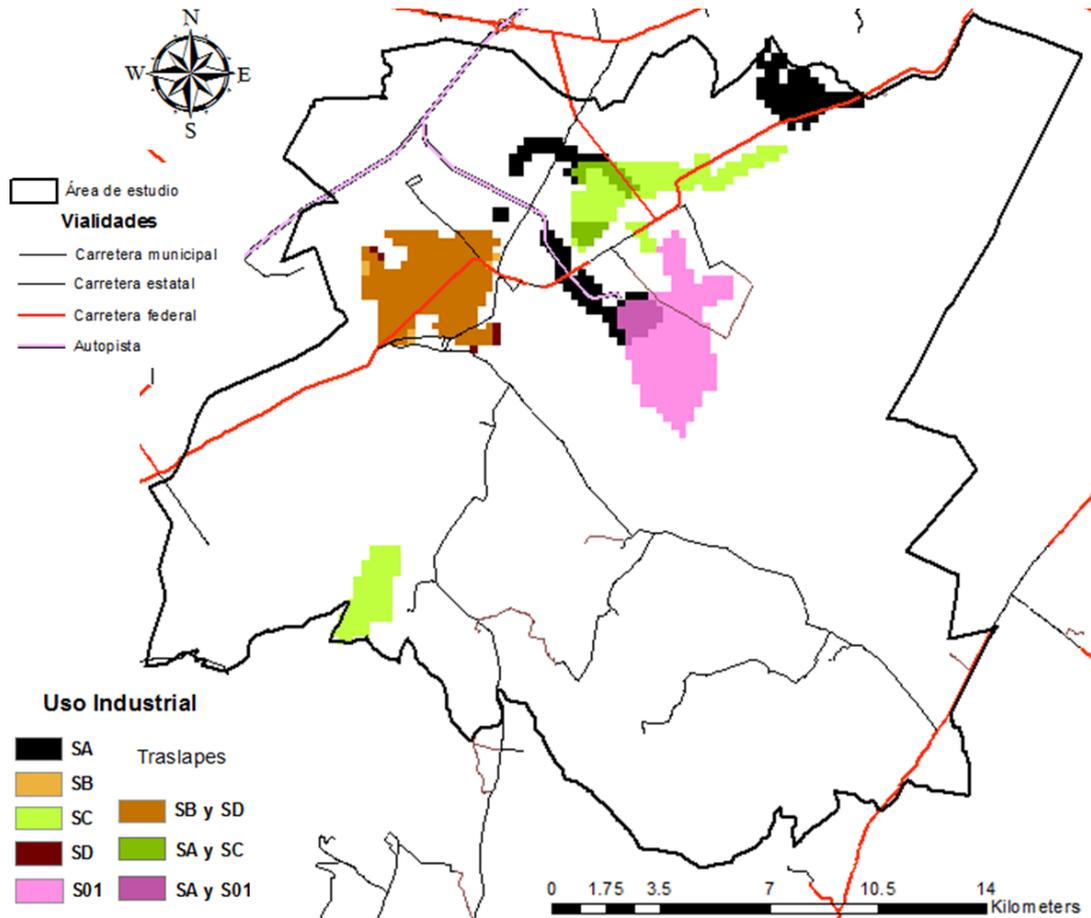


Figura 4.9. Comparación de localizaciones de uso industrial según escenario

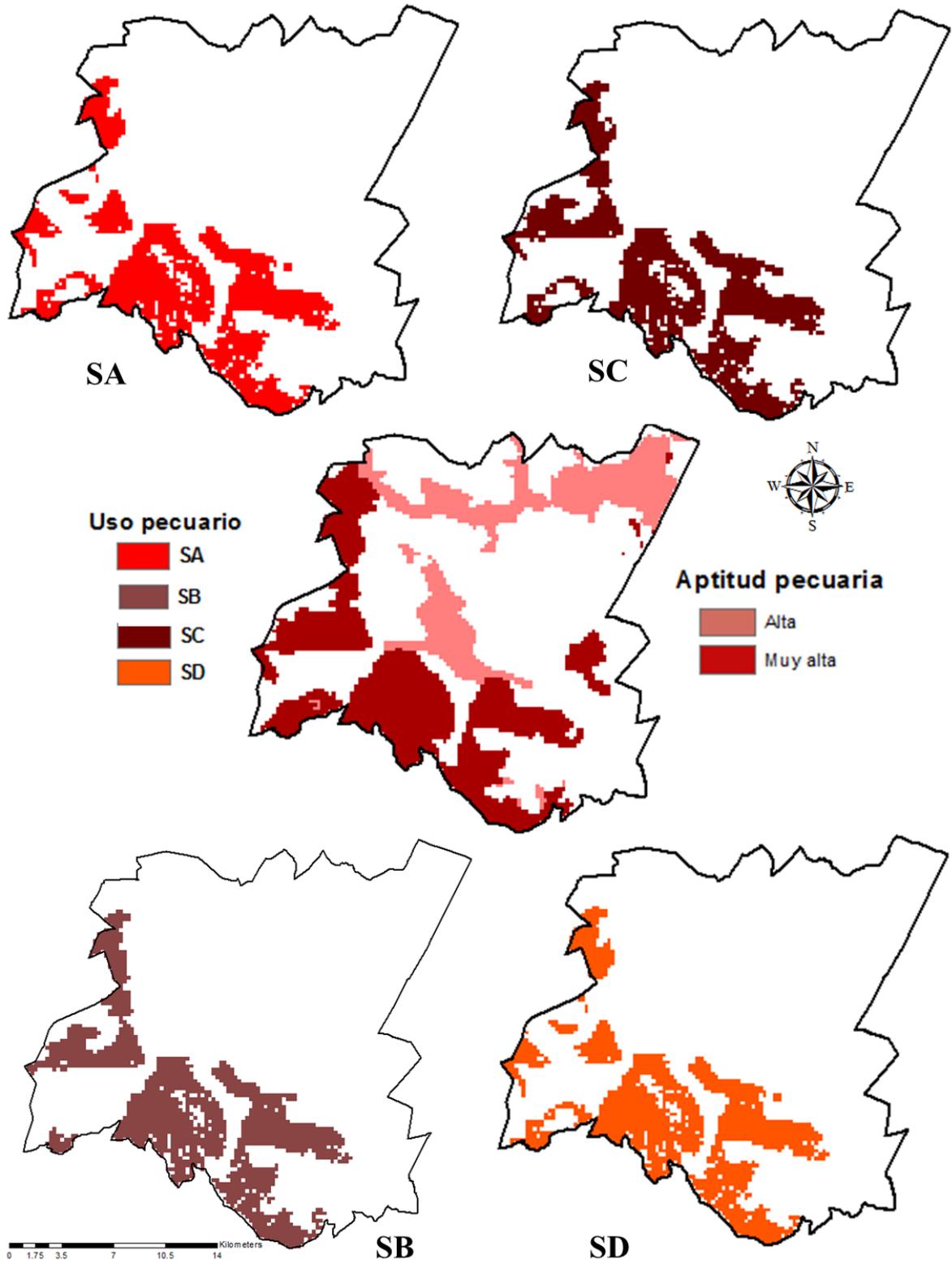


Figura 4.10. Correspondencia de ubicación de acuerdo a su aptitud territorial del uso pecuario en escenarios óptimos SA, SB, SC y SD

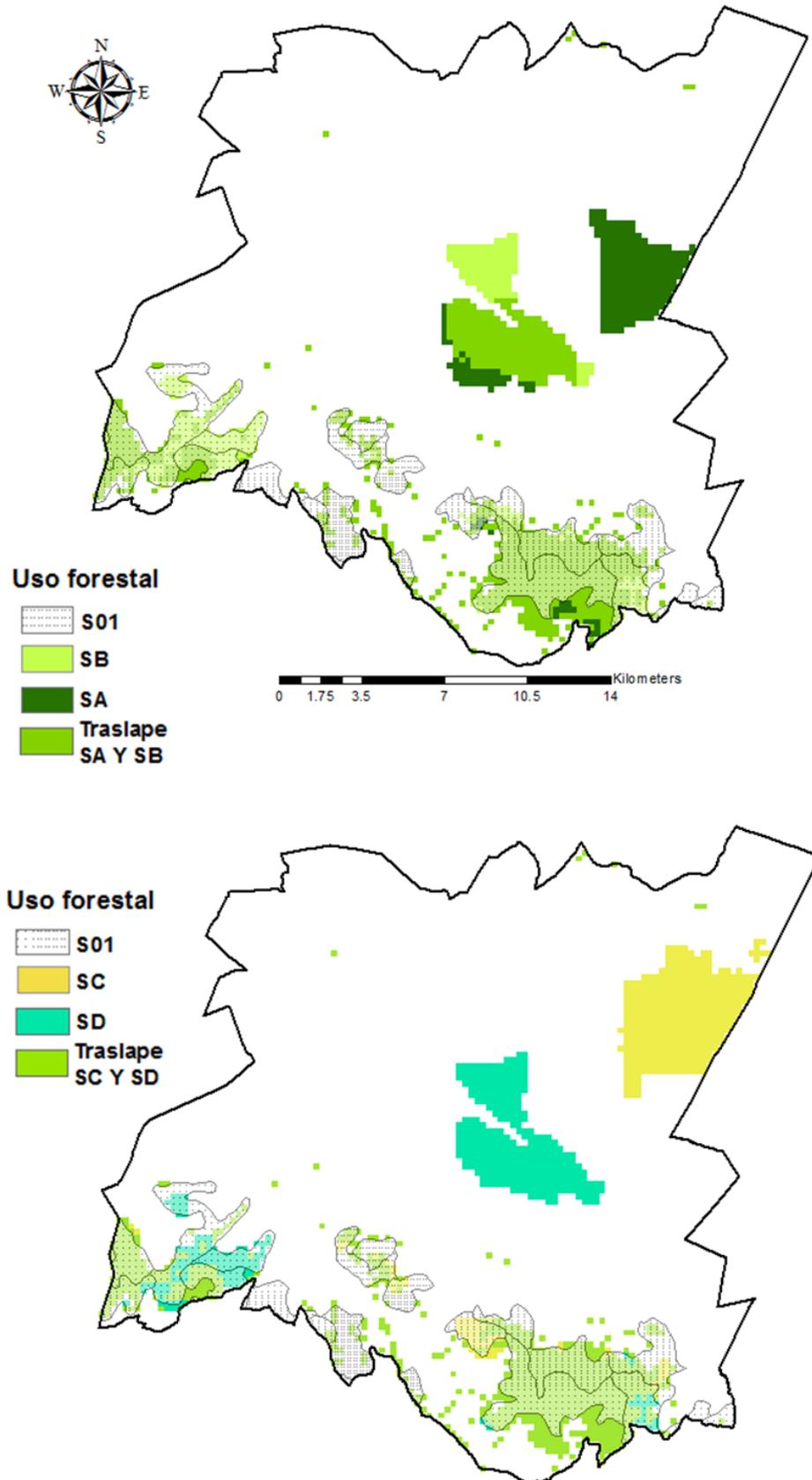


Figura 4.11. Comparación de localizaciones de uso forestal según escenario

Para la minimización del déficit/superávit alimentario, MAUSS ha actuado en dos sentidos (Figura 4.12.): (a) preferencia de la superficie de secano para satisfacer los

nuevos requerimientos de los usos urbano e industrial; y (b) priorización de los pastizales sobre el suelo de secano previniendo incrementos significativos de la producción de cultivos.

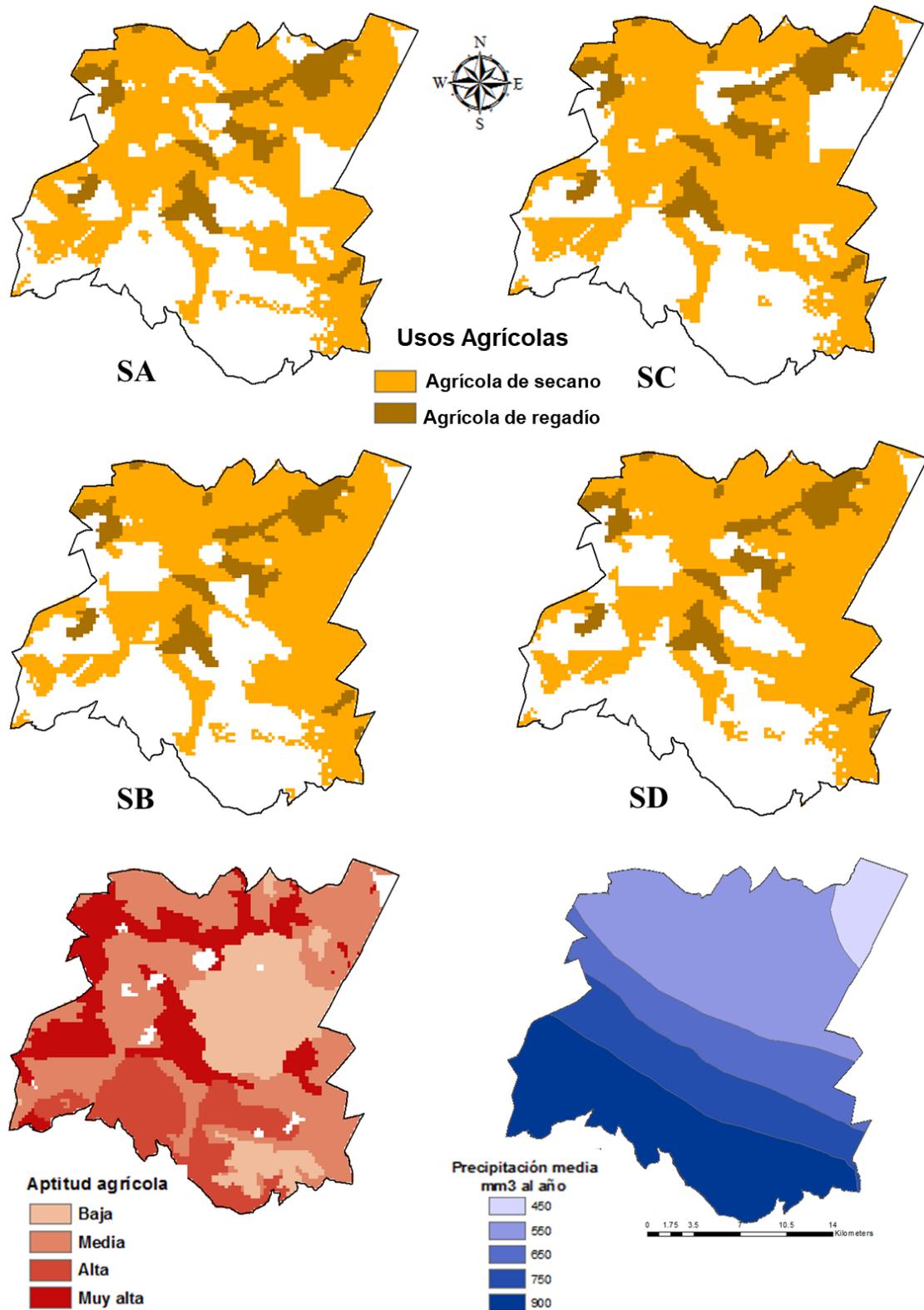


Figura 4. 12. Correspondencia de ubicación de los usos agrícolas conforme aptitud territorial y la distribución de la precipitación anual en escenarios óptimos SA, SB, SC y SD

En el escenario S01, la superficie de suelo para uso industrial y urbano en el área de estudio fue de alrededor de 2.200 ha, satisfechas con la ocupación de suelo agrícola de regadío, pastizales y suelo agrícola de secano, cuya pérdida de superficie respecto al escenario S00 fue del 9,6%, 7,0%, y 3,0% respectivamente. En los escenarios óptimos las transformaciones de uso de suelo se establecieron en 1.850 ha provenientes de pastizales y de secano (que sufrieron una menor pérdida de 5,0% y 8,0% respectivamente). Como se ha comentado anteriormente, la superficie de riego no ha sufrido modificaciones por las razones expuestas en la sección 4.3.1.1, no obstante su localización podría haberse mejorado a través del modelo, si se hubiese eliminado la restricción de reubicación manteniendo la misma superficie. Para una población esperada cercana a los 250.000 habitantes en el año 2030 y de acuerdo a la superficie destinada para crecimientos urbanos de la propuesta oficial, el escenario S01 considera una densidad poblacional de 150 hab/ha (que representa 67 m² por persona) mientras que en los escenarios óptimos ésta ha alcanzado 200 hab/ha (50 m² por persona), superficie que si bien no se aleja mucho del patrón extendido de expansión urbano tradicional, logra disminuir las presiones negativas al medio ambiente. Las distribuciones de uso urbano por escenario pueden observarse en la Figura 4.13.

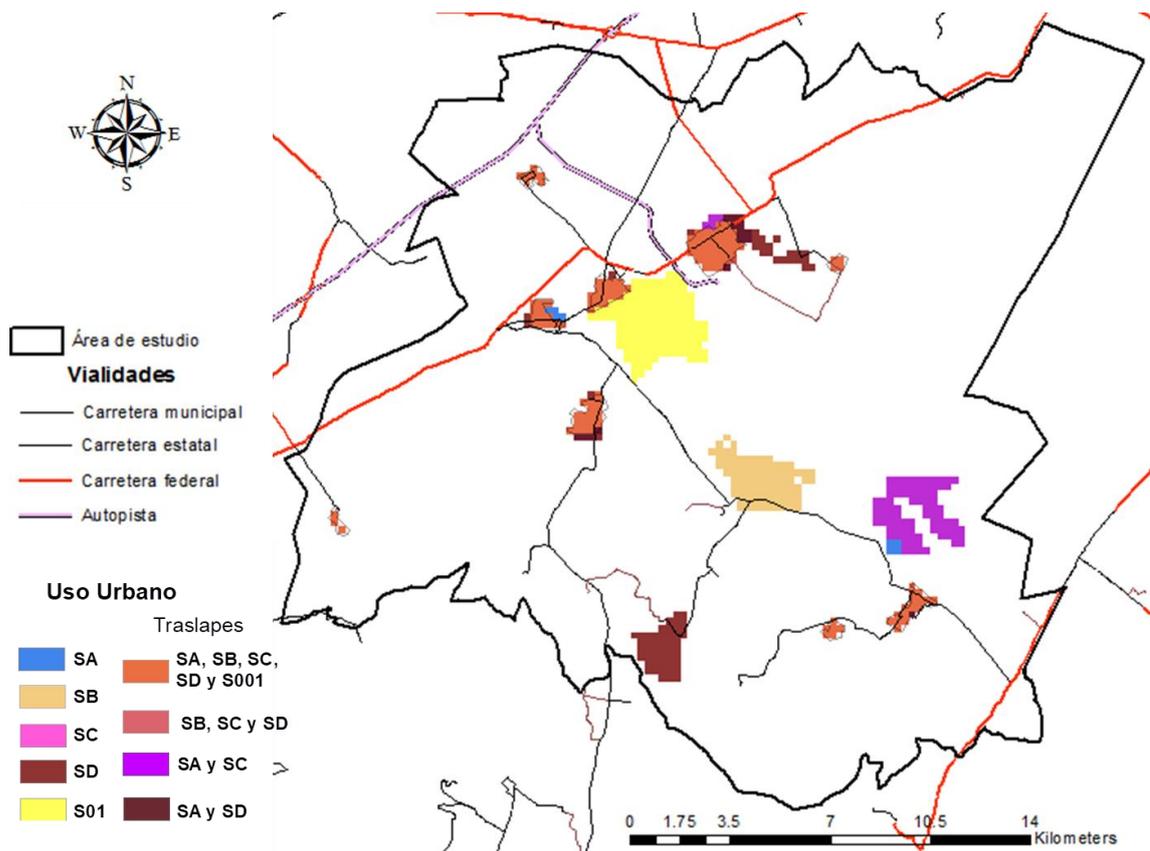


Figura 4.13. Comparación de localizaciones de uso urbano según escenario

4.3. Conclusiones

MAUSS incorpora el concepto de sostenibilidad a la planeación espacial mediante

evaluaciones cuantitativas de tres funciones objetivo (maximización de la renta, minimización de las presiones negativas en el medio ambiente y minimización del déficit/superávit alimentario) a escala subregional. La inclusión de objetivos alimentarios dentro de la planeación es fundamental no sólo para los lugares donde se padece hambre, sino para cualquier territorio, atendiendo a las necesidades nutricionales de una población regional para disminuir las importaciones y las afecciones al medioambiente así como poder dedicar el territorio a usos más rentables. Aunque fuera del ámbito de la presente investigación, este enfoque de producción y satisfacción de las necesidades alimentarias puede eventualmente disminuir la huella ecológica por persona, mejorando la sostenibilidad regional como contribución a la sostenibilidad global.

El modelo explota las capacidades del algoritmo evolutivo multiobjetivo para realizar evaluaciones más detalladas de aspectos territoriales importantes, usando varias funciones objetivo en lugar de simplificar el análisis espacial a una sola función de aptitud o idoneidad. MAUSS introduce nuevos operadores geométricos así como un nuevo procedimiento de inicialización para preservar la racionalidad espacial del territorio. Estas características facilitan la solución del problema de la planeación espacial sostenible, planteado en este trabajo.

El modelo ha sido aplicado exitosamente a la región de los Llanos de San Juan en Puebla, México. Los distintos mapas de distribución territorial de usos del suelos que proporciona MAUSS, extraídos del frente de Pareto, promueven un pequeño incremento de la renta del 1% si se compara con la renta del escenario de referencia S01, pero reduciendo en un 9% las presiones negativas sobre medio ambiente valoradas en términos de HH, potencial de contaminación del agua y del aire (emisiones de CO₂ equivalente), aspectos que tradicionalmente se abordan de forma separada a la planeación espacial. MAUSS reduce las emisiones de CO₂ al mejorar la accesibilidad y la compactación de los usos urbanos e industriales y desalentar los cambios de uso de suelo para disminuir el uso de combustibles fósiles. Así mismo con la inclusión del objetivo de disminución del déficit/superávit alimentario en la subregión, MAUSS reduce el superávit en 5,2%, al ubicar los usos agropecuarios en zonas más aptas y rentables mientras mantiene la seguridad alimentaria de la región.



Capítulo 5.

Evolución temporal de la distribución de usos en un territorio

5.1. Introducción

El presente capítulo describe la segunda etapa de la construcción de un modelo integral de distribución espacial óptima de usos del suelo; en ella se incorpora la dimensión temporal de la dinámica territorial, que provocará cambios en la distribución de usos del suelo.

El algoritmo MAUSS, desarrollado en el capítulo 4, permite obtener un conjunto de mapas de asignación de usos sostenibles (frente de Pareto) en un territorio bajo determinadas condiciones y para un cierto momento. Sin embargo, tanto la extensión territorial de los usos del suelo como su localización son variables dinámicas porque están estrechamente ligadas a cambios temporales de las variables socioeconómicas y medioambientales a escala local y global.

Por ello es necesario utilizar metodologías que incorporen la variable tiempo al problema de planeación territorial. La dinámica de sistemas, DS, es una técnica de simulación de sistemas complejos (Forrester, 1969) que permitirá incorporar la variabilidad temporal a la capacidad de ubicación territorial óptima de usos del suelo del modelo MAUSS, bajo una perspectiva de explotación sostenible del territorio.

La utilización de la DS es amplia en múltiples áreas del conocimiento. Actualmente se está aplicando en modelos en los que se incorporan los funcionamientos interrelacionados de sistemas socioeconómicos, socioecológicos y dinámicas poblacionales, entre otros, tales como la restauración de criaderos de peces (Cordier, *et al.* 2017), etc., mostrando una gran efectividad como instrumento de simulación en ámbitos directamente relacionados con el territorio y el medio ambiente a escala regional.

5.1.1. Fundamentos de la Dinámica de Sistemas

Se define como Dinámica de Sistemas a la técnica de simulación que modela sistemas complejos de gran escala usando existencias (almacenamiento) y flujos y en la mayoría de los casos incluye explícitamente ciclos de realimentación (Stermán, 2000). Se atribuye su creación a Forrester (1961) quien además traslada su aplicación del ámbito industrial al análisis de otros sistemas complejos como el urbano (Forrester, 1969).

El propósito de la DS es prever el comportamiento y la interrelación de las variables de interés a lo largo del tiempo. En otras palabras, permite simular, por ejemplo, los efectos de una nueva política o forma organizativa sobre el sistema real a bajo coste, reduciendo el riesgo de adopción de políticas inadecuadas y con ahorro de tiempo. Sus fundamentos se encuentran en la cibernética, la teoría de sistemas y en la informática (González-Busto, 1998).

En su definición de funcionamiento más general, los modelos de DS pueden operar en sistemas clasificados como de primer o segundo orden, dependiendo de si tienen un único nivel en su estructura o más niveles; a mayor cantidad de niveles mayor complejidad del sistema. Los de primer orden pueden estar formados por bucles de

realimentación positiva y/o negativa; el comportamiento de los sistemas de realimentación negativa está determinado por la consecución de cierto objetivo, por lo que también se denominan “autorreguladores” (Figura 5.1a) y su crecimiento o decrecimiento es asintótico. En los sistemas de primer orden con bucle de realimentación positiva tienen lugar procesos de crecimiento o decrecimiento exponencial y no existe un objetivo a mantener o alcanzar. (Figura 5.1b)

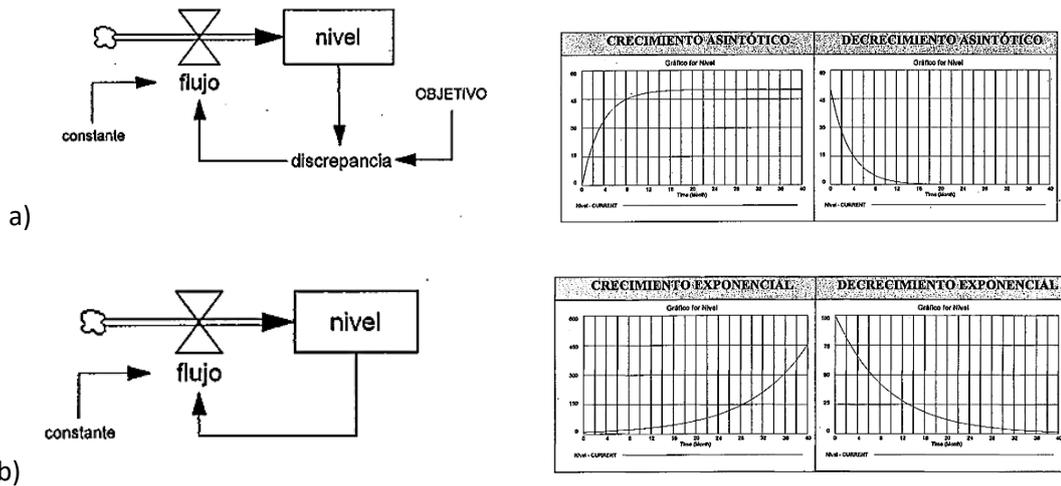


Figura 5.1. Diagrama básico de funcionamiento de la dinámica de un sistema de primer orden: a) con realimentación negativa o autorregulador, y b) con realimentación positiva. (Fuente: González-Busto, 1999)

Los sistemas de segundo orden son los que presentan dos niveles en su estructura (es decir hasta tres bucles de realimentación), uno de ellos el principal y los demás secundarios, los cuales en la realidad pueden estar interconectados no sólo por el bucle principal, sino también entre ellos y presentan oscilaciones en sus comportamientos (Figura 5.2). La interconexión de bucles de realimentación da lugar a sistemas complejos con sus correspondientes pautas, en muchos casos contraintuitivas, de comportamiento.

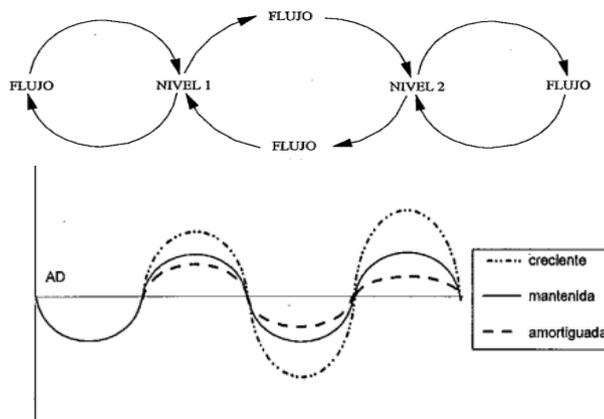


Figura 5.2. Diagrama causal de un sistema de segundo orden y sus tipos de oscilaciones (Fuente: González-Busto, 1999)

De acuerdo con la Figura 5.1, las *constantes* que se inducen al sistema en cada iteración son los motores de las variaciones y se denominan factores de cambio. Dichos factores se expresan a través de un conjunto de parámetros previamente definidos cuya tasa de variación determina los resultados o *nivel* de la simulación en cada intervalo de análisis o período. La realimentación permite que la *discrepancia* sea identificada y active mecanismos de corrección que se incorporan al *flujo* para mantener el equilibrio del sistema. El *flujo* es entonces el conjunto de operaciones que se llevan a cabo para obtener resultados, y cuando se trate de una realimentación negativa, sin apartarse de los objetivos. De forma generalizada: $\text{flujo}(t) = \text{discrepancia} \times \text{constante}$ (González-Busto, 1999). Las simulaciones pueden realizarse otorgando valores diferentes a los parámetros, pudiendo con ello analizar los cambios en el sistema ante diferentes condiciones o escenarios.

5.1.2. La Dinámica de Sistemas aplicada a problemas territoriales

En las aplicaciones que abordan explícitamente aspectos geográficos, se han identificado algunas carencias en el análisis espacial, fundamentalmente por la falta de un enfoque territorial del problema, (Sanders & Sanders, 2004) es decir, por la falta de inclusión de aspectos biofísicos que se encuentran indisolublemente ligados a las relaciones socio-económicas en una región.

Una forma de trascender las limitaciones en la evaluación de los cambios espacio-temporales de los usos de suelo ha sido a través de la combinación de la DS o realimentación dinámica con los modelos de simulación territorial denominados autómatas celulares, AC, cuyo carácter predictivo ha sido explotado para anticipar la expansión o decrecimiento de los usos de suelo (p.e. crecimientos urbanos, zonas sujetas a inundación, avance de la frontera agrícola, deforestación de selvas y bosques, etc.) (Han *et al.*, 2009; Pérez-Molina *et al.*, 2017), validando su eficacia predictiva cuando al aplicarse para períodos anteriores, sus resultados han sido suficientemente coincidentes con las variaciones reales de usos de suelo experimentadas en un área geográfica. Esta técnica de simulación “bottom-up”, combinada con DS, considerada como modelo “top-down” (Han, J., *et al.* 2009) ha mejorado la *predicción* de los cambios espacio-temporales de los crecimientos urbanos al integrar los aspectos socioeconómicos que los modulan. Desde otra perspectiva, la integración de la DS con los AC hace posible la evaluación conjunta de factores regionales y patrones locales (Lauf *et al.*, 2012) involucrados en la dinámica de los usos del suelo dando como resultado herramientas informáticas útiles para la planeación espacial. Sin embargo estas aplicaciones integradas de DS y AC se han centrado principalmente en la previsión de los crecimientos poblacionales (Sanders y Sanders, 2004) como detonadores de la expansión urbana mediante dinámicas residenciales en contextos físicos y socioeconómicos regionales (Han *et al.* 2009), sin considerar ni impactos ambientales ni las necesidades nutricionales de estas poblaciones crecientes.

Los algoritmos evolutivos multiobjetivo apenas se han utilizado en la simulación de los cambios temporales de los usos de suelo, por lo que su gran potencial de optimización

de soluciones ante cambios espaciales a lo largo del tiempo está aún por aplicar. Datta *et al.* (2006) incorporaron variaciones económicas temporales a nivel de celda en un problema de optimización de la distribución de usos agrícolas para maximizar la rentabilidad de los cultivos en un período determinado. Liu *et al.* (2013) combinan explícitamente la DS con un algoritmo híbrido de nube de partículas para la optimización de la asignación de usos de suelo obteniendo las variaciones de superficie de cada uso período a período, dependiendo de los factores de cambio establecidos, que son los motores de los incrementos de las superficies industrial, residencial y comercial, y en consecuencia la disminución del suelo “sin desarrollo” (ligados a las actividades agropecuarias). Además, los aspectos ambientales se reducen a una simple función de idoneidad territorial.

En el presente trabajo, el territorio (la región, subregión, ciudad, etc.) es visto como un sistema sostenible también desde la perspectiva espacio-temporal para que, de acuerdo con Kates (2011), las interacciones naturales y sociales (incluidas las económicas) que tienen lugar en el territorio, no afecten negativamente a su explotación sostenible: satisfaciendo las necesidades de las generaciones presentes y futuras, reduciendo la pobreza y conservando los sistemas de soporte vital. Por lo tanto, para lograr una verdadera planeación sostenible, el uso de la dinámica de sistemas incorpora la esfera temporal a las esferas social, natural, económica y espacial (Nyerges *et al.* 2014) propias del problema de la planeación territorial contenido en MAUSS.

Así, en este capítulo se desarrolla el modelo MAUSS-DS que permite conocer la evolución temporal de los mapas óptimos de asignación de usos al suelo, generados previamente por el algoritmo MAUSS, bajo diversos escenarios de tendencia de las variables que controlan la explotación, uso y conservación del entorno y se aplicará a la zona de los Llanos de San Juan (México) para proponer las posibles distribuciones de usos del suelo en el año 2050.

5.2 Formulación del problema

El acoplamiento de la DS en el modelo MAUSS se formuló como un sistema de segundo orden en el que tiene lugar la interconexión de tres bucles. El bucle principal lo constituye la obtención de la variación de superficies por tipo de uso de suelo en cada intervalo de análisis. Como los cambios de extensión de los usos modificarán los valores de las funciones objetivo en los mapas en cada intervalo temporal, esos valores podrán conllevar discrepancias respecto de los objetivos de una planeación sostenible; por lo tanto, los siguientes dos bucles se definen como de realimentación negativa para mantener la consecución de las funciones objetivo de MAUSS; específicamente, las funciones O2 (ecuación 4.2) (minimización de las presiones negativas sobre el medio ambiente) y O3 (ecuación 4.3) (minimización del déficit alimentario) actuarán como mecanismos autorreguladores a partir de los cuales el sistema puede alcanzar el equilibrio. La función O1 (ecuación 4.1) como objetivo de maximización (renta), es un bucle de realimentación positiva que queda inscrito en el bucle principal; no está limitado por ninguna restricción y puede llegar a presentar variaciones de tipo

exponencial; por lo tanto su labor no es autorreguladora.

La unidad temporal de variación, definida como período, es anual; desde el período 0 (por ejemplo el año 2018) hasta el período T (por ejemplo el año 2050). Como se ha anticipado, las alternativas de distribución espacial (mapas) iniciales sobre las que simulará el proceso de evolución temporal son, en general, el conjunto de soluciones no dominadas obtenidas mediante modelo MAUSS, aunque podría aplicarse a otro conjunto de distribuciones de usos del suelo generadas por otros procedimientos.

Las variaciones de superficie por uso de suelo para cada mapa son impulsadas por los parámetros (o variables de interés) de los factores de cambio. Los valores que asumen dichos parámetros responden a diversos escenarios de cambio preestablecidos en el modelo y encuentran fundamento en comportamientos regionales o nacionales.

Los horizontes temporales de planeación para la ordenación del territorio son generalmente a plazo corto (entre 1 y 3 años), mediano (entre 3 y 15 años) y largo (entre 15 y 30 años), siendo este último el que ofrece una perspectiva más amplia en términos de la utilización de los recursos. MAUSS-DS, con un intervalo de análisis anual puede arrojar simulaciones de distribución espacial de un conjunto de mapas para cualquiera de éstos plazos convencionales.

El acoplamiento de la dinámica de sistemas con MAUSS da paso al modelo integrado MAUSS-DS, que actúa para contextos regionales y subregionales. En este modelo integrado, la gestión de las distribuciones espaciales y su optimización se realizan mediante MAUSS, mientras que la determinación de los parámetros de los factores de cambios y sus consecuencias se realiza mediante el módulo de DS incorporado, que afectan a: a) las variaciones de las superficies por uso del suelo y b) los mecanismos de autorregulación del sistema a partir de los resultados de las evaluaciones de las funciones objetivo en cada período.

Los factores de cambio considerados por el modelo MAUSS-DS y las variables de referencia para cada factor de cambio, como constantes periódicas del sistema se detallan a continuación.

5.2.1. Factores de cambio de la extensión de usos del suelo: ciclo principal del flujo del módulo de DS.

Los factores de cambio en los usos del suelo de un territorio son de carácter económico, sociodemográfico y biofísico. El conocimiento de la evolución temporal de las variables que determinan los factores de cambio permite simular el comportamiento integral del sistema territorial durante un cierto horizonte temporal. Las variables que intervienen en los distintos tipos de cambio se recogen en la Tabla 5.1 y en la Figura 5.3 se muestra el ciclo principal del módulo de DS, con las variables que promueven los cambios en la distribución de las superficies por tipo de uso de suelo en cada intervalo de análisis t . Las operaciones que se realizan entre las constantes definidas, como flujo del ciclo principal, se detallan en las Ecuaciones 5.1 a 5.3b.

Tabla 5.1 Factores de cambio y variables del sistema

factor de cambio	parámetro	
Económico	Tasa de crecimiento del PIB (%)	<i>IncPIB</i>
	Tasa de formación bruta de capital fijo (%)	<i>FBKF</i>
	Tasa de inversión en el sector industrial (%)	<i>InvI</i>
Socio-demográfico	Tasa de crecimiento de la población (%)	<i>TC</i>
Bio-físico	Área Necesaria por persona (m ²)	<i>ANp</i>
	Necesidades alimentarias por persona al día	<i>AUp</i>
	Rendimientos iniciales usos agropecuarios	<i>Yu*</i>

desde uso u^* hasta uso U^*

El factor de cambio económico impone las tasas de variación de la renta de un territorio en cada intervalo de análisis. Este factor afecta principalmente a los términos de la ecuación 4.1 (O1 de MAUSS): superficies y rentabilidad de los usos de suelo. En este trabajo se ha considerado la variación de superficie dedicada a los distintos usos como el elemento clave de cambio económico, mientras que las variaciones de rentabilidad que se explicarán más adelante, se van a considerar elementos de autorregulación. Las variables económicas que influyen en el cambio de la extensión de las superficies dedicadas a cada uso son: a) la tasa anual de incremento del PIB, b) la tasa de formación bruta de capital fijo o inversión total (estimada como % del PIB) y c) la proporción de dicha inversión destinada al sector industrial. De acuerdo con esto, las variaciones de la superficie industrial son, en un primer momento, asumidas como el motor de las variaciones territoriales; no obstante, como se explicará más adelante, se detallan las condiciones en las que otros usos pueden actuar como motores de las transformaciones en una región.

El valor de la superficie dedicada a uso industrial en cada intervalo temporal de análisis ($t+1$), expresada en número de celdas, depende de los valores de las variables económicas de referencia y se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$P_{ind\ t+1} = \left(\sum_{iju}^{RCU} \sum_{s=1}^S in_{ij\ us\ t} / S_t \right) \cdot Incin \cdot FBKF \cdot InvI / in_{ij\ ind\ t} \quad (5.1)$$

Donde P es la superficie de uso de suelo industrial ind , expresada en número de celdas; $Incin$ es el la tasa de incremento anual del PIB (%); $FBKF$ es la tasa de inversión anual total respecto de la renta o ingreso (%); $InvI$ la proporción de inversión destinada al sector industrial (%); in es la renta o ingreso (en unidades monetarias) por cada celda de la fila i (desde i hasta R) y la columna j (desde j hasta C) dependiendo su uso u , de u hasta U ; t es el período o intervalo temporal de simulación en años, desde t hasta T

períodos; S es el número de mapas-solución sometidos a la simulación temporal, desde s hasta S . La sumatoria de la renta de las celdas de cada solución es por tanto el PIB de cada mapa; $in_{ij\ ind\ t}$ es el valor de la cada celda de uso industrial (unidades monetarias) en el intervalo t .

Generalmente se asume que las variaciones de la extensión de los distintos usos de suelo se derivan de la expansión de las superficies urbana y/o industrial (Lauf *et al.*, 2012) en una región, sin embargo, como a nivel global se ha demostrado (UNEP, 2014) los mayores cambios de uso de suelo se originan por la expansión de los usos agrícolas. Por ello, de forma novedosa para la ordenación del territorio, el presente modelo contempla que las variaciones de superficie en la dinámica territorial pueden provenir de incrementos/decrementos de todos los usos existentes en el territorio en función del escenario de cambio considerado y las propias condiciones socioeconómicas locales (Figura 5.3). La ecuación (5.1) podría arrojar decrecimientos o crecimientos nulos de superficie industrial si las tasas de variación fueran cero o negativas.

El factor de cambio sociodemográfico identifica las variaciones en la población, dependiendo por tanto de la tasa de crecimiento poblacional, TC . En este trabajo se simplifica la dinámica poblacional futura al considerar el método geométrico (con variaciones constantes por unidad de tiempo) para la proyección de población ya que asume una única tasa de cambio en la que se incluyen las variaciones sociales impulsadas fundamentalmente por factores económicos (procesos migratorios) y las variaciones naturales de la población (tasas de natalidad y mortalidad). Las variaciones de la población afectan directamente a la extensión de los usos urbanos (Figura 5.3) obteniendo directamente los incrementos o decrementos de superficie urbana a partir de las variaciones demográficas (Ecuación 5.2).

$$P_{urb\ t+1} = (pop_t * TC * ANp) / ACelda \quad (5.2)$$

Donde $P_{urb\ t+1}$ es la superficie urbana (celdas) para el período $t+1$; pop es la población total en el período t ; TC es la tasa de crecimiento poblacional definida (%); ANp es el área necesaria por persona (m^2); $ACelda$ es el área de cada unidad de superficie o celda del mapa (m^2); la definición de la superficie por celda o unidad territorial de análisis se establece, como se ha explicado en el capítulo 4, dependiendo de la escala de planeación elegida, la disponibilidad y nivel de detalle de la cartografía del área de estudio y los objetivos específicos de la planeación.

El tercer factor de cambio es el relacionado con los elementos biofísicos, que para los propósitos de este trabajo dependen de: a) la política de suelo, en términos de área necesaria por persona (ANp) y b) la política alimentaria, para cubrir las necesidades de determinada población en cada período. En MAUSS-DS, el ANp se define como la suma del área habitable por persona², establecida por la ONU (UN, 1998) en un

² Área habitable por persona (*Floor area per person*): de acuerdo con la ONU (División de Población) se define como la superficie promedio (en metros cuadrados) de una vivienda dividida entre el número de habitantes. Este indicador mide la suficiencia del espacio habitable en las viviendas. Un valor bajo para el indicador es signo de hacinamiento.

mínimo de 20m²; más el área verde requerida por habitante, que conforme a la OMS (Sorensen *et al.* 1998) se establece en 15m² mínimo por persona. Debido a que el uso de suelo urbano definido en MAUSS no sólo se refiere al uso habitacional sino a un conjunto de actividades humanas realizadas al interior de las zonas urbanas (uso habitacional, uso comercial y de servicios), las áreas verdes deben estar incluidas dentro del uso urbano y conforman, en este trabajo, el área necesaria por persona (*ANp*).

En este trabajo no se considera determinante la tasa de inversión en el sector agropecuario para el cálculo de las superficies de los usos productores de alimentos; su variación depende fundamentalmente de la satisfacción de las necesidades alimentarias de la población. Y se asume que dentro de la inversión anual del PIB existe un porcentaje que se destina al sector primario para alcanzar los volúmenes de producción adecuados para la población. De acuerdo con ello, las variaciones de superficie por uso agropecuario u^* (pastizal, agrícolas de secano y riego) (figura 5.3) pueden ser: decrecimientos de su área como resultado de los aumentos de las superficies de los usos industriales y/o urbanos (ecuación 5.3a), o incrementos de superficie cuando los requerimientos alimentarios así lo demanden, es decir para satisfacer el objetivo O3 de MAUSS (ecuación 5.3b). La formulación de los decrecimientos de las superficies agropecuarias se describe a continuación:

$$P_{u^*t+1} = P_{u^*t} - ((P_{ind\ t+1} + P_{urb\ t+1}) \cdot \tau_{u^*t}) \leftrightarrow P_{ind\ t+1} > 0 \text{ y } P_{urb\ t+1} \geq 0$$

$$\text{o } P_{ind\ t+1} \geq 0 \text{ y } P_{urb\ t+1} > 0 \quad (5.3a)$$

Donde P_{u^*} es la superficie (celdas) del uso de suelo u^* (sólo usos agropecuarios), para el período $t+1$. τ_{u^*} es la proporción (%) que ocupa el uso agropecuario u^* en proceso en el período t . Las pérdidas de suelo agropecuario se aplican de forma proporcional a la superficie que cada uso agropecuario ocupa en el mapa.

Dependiendo de las condiciones específicas de cada área de estudio, los usos agropecuarios susceptibles de incrementar su superficie pueden variar así como su prioridad de cambio. Los cálculos para los incrementos de superficie agropecuaria por tipo de uso se calculan utilizando como segundo sumando a la función O3 (Ecuación 4.5), pero a diferencia de ella, se busca obtener el valor relativo (y no el absoluto) de la diferencia entre los requerimientos y la producción de alimentos en unidades alimentarias, transformándolas en unidades de superficie al dividir las por la cantidad máxima de calorías que puede producir una celda, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$P_{u^*t+1} = P_{u^*t} + \left(\frac{AU_p \cdot pop - (\sum_{u^*ij=1}^{URC} X_{u^*ij} \cdot HL_{u^*} \cdot Y_{u^*} \cdot \alpha_{u^*ij} \cdot \delta_{u^*})}{maxAU_{u^*ij}} \right) \quad (5.3b)$$

Donde, igual que en la ecuación (4.5) del modelo MAUSS, AU_p son los requerimientos nutricionales por habitante, expresados en unidades alimentarias (AU o calorías), basados en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014) adaptada a los cultivos locales; pop la población total del área de estudio, u^* el índice para los usos de suelo ligados a la producción de alimentos (agrícolas de riego y secano

y pastizal), X_{u*ij} es una variable binaria (con valores entre 1 ó 0) que identifica la celda ij con el uso agropecuario u^* , HL la superficie cosechada (%) del uso u^* (t), Y_{u^*} los rendimientos promedio del uso u^* , α_{u*ij} el índice de potencial agrícola (factor de aptitud territorial) de la celda ij con el uso u^* , δ_{u^*} el factor de conversión de los alimentos producidos en el uso u^* a unidades alimentarias (cal), que depende del cultivo y su producción (t) según su porcentaje de ocupación en la celda ij , y $\max AUu^*_{ij}$ el máximo posible de calorías que se pueden producir en la celda ij con el uso u^* .

Esta ecuación tiene una doble función en el sistema; por una parte es el procedimiento de obtención de superficies de usos agropecuarios por período; y por otra contiene el primer objetivo a cumplir o primera restricción del modelo integrado sirviendo de vínculo entre el bucle principal y un primer bucle secundario o de realimentación negativa mediante el cual se asegurará el equilibrio alimentario de los habitantes de la región.

Las fórmulas 5.1 a 5.3b conforman el bucle principal de la DS en MAUSS-DS, el cual puede apreciarse gráficamente en la figura 5.3.

Los bucles secundarios de realimentación son los mecanismos autorreguladores del sistema. Si bien pueden caracterizarse por separado, su funcionamiento está muy interrelacionado, como se explica a continuación.

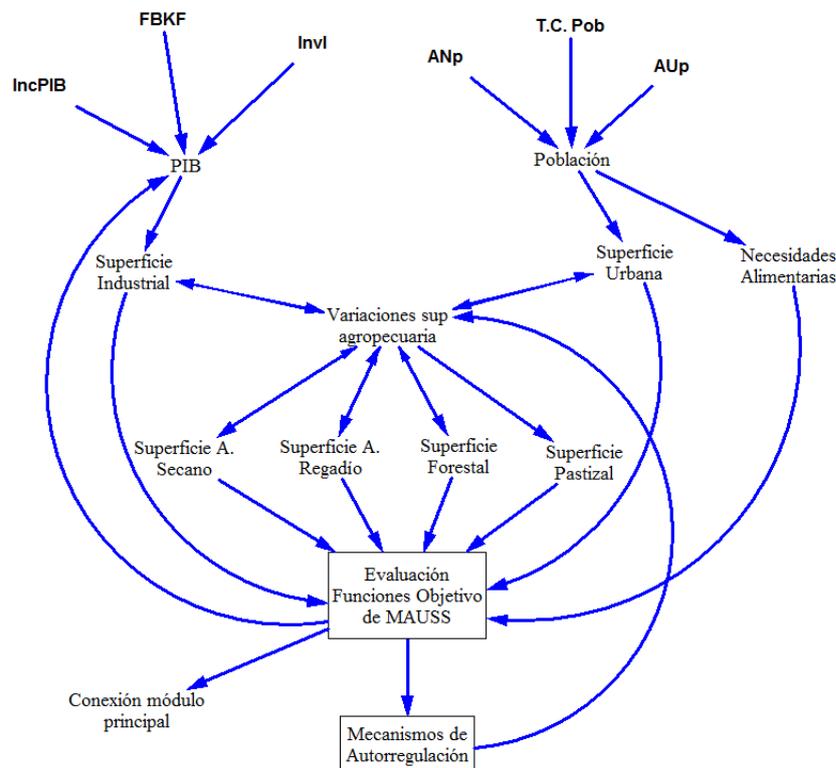


Figura 5.3. Bucle principal del módulo de Dinámica de Sistemas de MAUSS-DS

5.2.2. Mecanismos de autorregulación: Ciclos de realimentación secundarios del módulo de DS

En la búsqueda del equilibrio territorial a lo largo del tiempo, las metas de la planeación espacial definidas en MAUSS a través de sus tres funciones objetivo actúan dentro del módulo de DS como las restricciones a cumplir y/o mantener ante discrepancias generadas por la interrelación de las variables en el proceso de simulación temporal. Como se ha descrito al inicio de la formulación del problema, la función O1 de MAUSS (maximización de la renta) no se considera un bucle de autorregulación puesto que es de realimentación positiva, sin restricción directa. Los objetivos que funcionan como restricciones de la DS, se reformulan de la siguiente manera:

Objetivo de minimización del déficit/superávit alimentario:

$$(AU_p \cdot pop) = \left(\sum_{u*ij=1}^{URC} \cdot X_{u*ij} \cdot HL_{u*} \cdot Y_{u*} \cdot \alpha_{u*ij} \cdot \delta_{u*} \right) \quad (5.4)$$

Que consiste en igualar los requerimientos alimentarios de un territorio con su producción agropecuaria.

Objetivo de minimización de las presiones negativas en el medio ambiente (específicamente en el uso de los recursos hídricos):

$$\frac{\sum_{uij}^{URC} (WF_{uij} / \alpha_{uij})}{\sum_{ij}^{RC} WA_{ij}} \leq 1 \quad (5.5)$$

Donde WA_{ij} es la disponibilidad de agua ($m^3/celda \cdot año$) en la celda ij . WF_{uij} es la Huella Hídrica ($m^3/celda \cdot año$) para el uso u en la celda ij ; y α_{uij} es el factor de aptitud territorial previamente definido de la celda ij para el uso u que solamente afecta las tierras de cultivo y el pastizal de acuerdo a la aptitud territorial. Este término conforma el primer sumando de la función O2 de MAUSS (Ecuación 4.3); no obstante en MAUSS, la optimización consiste en orientar dentro de un mismo mapa los usos más demandantes de agua a zonas donde exista una mayor disponibilidad del recurso dentro del mapa; mientras que el módulo de DS establece los límites de esa utilización.

Cada objetivo involucra su propio ciclo regulatorio, por lo que en este trabajo se definieron dos mecanismos de autocorrección (bucles de realimentación negativa) que fomentan la conformación de regiones autosuficientes en alimentos en las que se evita la sobreexplotación de sus recursos. Dichos procedimientos se activan dependiendo de la situación alimentaria del área de estudio (excedentaria o deficitaria), de sus variaciones demográficas (crecientes o decrecientes) y de su disponibilidad de agua.

5.2.2.1. Autorregulación del déficit/superávit alimentario

El primer mecanismo de regulación está diseñado para satisfacer las necesidades

alimentarias de poblaciones regionales, que como problema global, es uno de los principales retos a todas las escalas territoriales. Para alcanzar la autosuficiencia alimentaria, el sistema puede conducir a los usos agropecuarios desde el incremento de sus rendimientos hasta la expansión de sus superficies. La forma en la que regula los flujos depende de la zona específica que se trate, de acuerdo con los siguientes criterios:

A) Incremento de los rendimientos

- Si se trata de regiones excedentarias en la producción de cultivos pero con importantes crecimientos urbanos e industriales, la búsqueda del equilibrio consiste simplemente en la no disminución del ingreso inicial generado por los usos agropecuarios debido a dos razones: primero a que la bonanza de una actividad económica no se puede dar indiscriminadamente a costa de la eliminación de otra, y segundo debido a que la situación de la mayoría de los agricultores a nivel mundial es precaria a pesar de la trascendencia de su labor de alimentación de la mayor parte de la población del planeta y la protección de la diversidad genética de los cultivos (FAO, 2013 y 2008). Esta es una de las restricciones generales del modelo, cuya formulación matemática se detalla más adelante (ver ecuación 5.10). Para mantener la renta agropecuaria a pesar del decrecimiento de su extensión, se promueve el incremento de los rendimientos por unidad de superficie de forma proporcional a la disminución de su área de acuerdo con las ecuaciones (5.6 a 5.8). El incremento de rendimientos resultante es sólo de carácter indicativo o prescriptivo propio de un instrumento de planeación regional, aunque la forma específica de conseguirlo queda fuera del alcance de este trabajo.

$$in_{iju^* t+1} = \frac{P_{u^* t} * in_{iju^* t}}{P_{u^* t+1}} \quad (5.6)$$

$$Y_{u^* t+1} = \frac{\sum_{s=1}^S in_{iju^* s t} / S_t}{PM_{iju^*}} \cdot Y_{u^* t} \quad \leftrightarrow \quad Y_{u^* t} \leq Y_{u^* max} \quad (5.7)$$

$$PM_{iju^*} = in_{iju^* t0} / Y_{u^* t0} \quad (5.8)$$

Donde in es la renta (unidades monetarias) de la celda ij en el período $t+1$ para el uso de suelo agropecuario u^* ; P_{u^*} es la superficie, expresada en número de celdas, del uso agropecuario decreciente en el período $t+1$, obtenida mediante la ecuación (5.3). $Y_{u^* t+1}$ es el rendimiento en toneladas (t) del período $t+1$ del uso agropecuario corriente u^* , S_t es el conjunto de soluciones en el período t ; PM_{u^*} que es el precio medio de la producción del uso u^* expresado en unidades monetarias por unidad de superficie (celda ij); este valor no cambia en este trabajo ya que los precios se consideran constantes a lo largo de la simulación.

- Para el caso de contextos regionales con crecimientos poblacionales nulos o negativos el modelo asume como restricción que los rendimientos de los usos

agropecuarios no sufrirán variaciones manteniendo la renta del sector primario. Como resultado de ello, las variaciones de superficies de estos usos serán nulas, aunque gracias a MAUSS su localización seguirá siendo óptima.

- En el caso de regiones deficitarias en la producción de alimentos y con crecimientos demográficos, los rendimientos se incrementan también de forma proporcional a los nuevos requerimientos de la población por período (Ecuación 5.9.). Este incremento quedará registrado en la evolución del sistema, al igual que los crecimientos que con ello se generan en la renta por cada uso productor de alimentos (Ecuación 5.10.).

$$Y_{u*t+1} = \frac{AUp \cdot pop_{t+1}}{\sum_{1=s}^S (\sum_{u*ij=1}^{URC} \cdot X_{u*ij} \cdot HL_{u*} \cdot Y_{u*} \cdot \alpha_{u*ij} \cdot \delta_{u*}) / S_{t+1}} * Y_{u*t} \quad \Leftrightarrow Y_{u*t} \leq Y_{u*max} \quad (5.9)$$

$$in_{iju*t+1} = in_{iju*t} * \frac{Y_{u*t+1}}{Y_{u*t}} \quad (5.10)$$

B) Incremento de la superficie de usos agropecuarios:

Como el incremento de los rendimientos puede resultar insuficiente aun alcanzando el máximo valor teórico (sin límite de recursos tecnológicos, hídricos, económicos, etc.), el mecanismo de autorregulación consiste en la variación de las superficies de los usos destinados a la producción de alimentos. Cada contexto regional impondrá la priorización del tipo de uso agropecuario a expandir, dependiendo de las políticas y regulaciones en vigor. La formulación de los incrementos de superficie por tipo de uso agropecuario corresponde a la ecuación (5.3b).

La aplicación del modelo alcanza, mediante este bucle, el objetivo de la minimización de déficit/superávit alimentario para regiones en las que exista sobreproducción o gran dependencia de alimentos. Y además es capaz de regular los usos del suelo en regiones que a lo largo del tiempo transiten de una condición alimentaria a otra. En la Figura 5.4 se observan las interrelaciones del módulo de autorregulación de MAUSS-DS.

5.2.2.2. Autorregulación de las presiones negativas en el medio ambiente

Este ciclo hace que la utilización de los recursos hídricos de los usos de suelo en su conjunto no exceda la disponibilidad de agua del territorio mediante dos procedimientos.

- A. Inicialmente disminuye la WF de cada uso de suelo de forma proporcional a lo que se haya excedido la disponibilidad de agua del territorio; hasta un mínimo establecido para hacer viable su funcionamiento (Ecuación 5.11). Al igual que en el caso de los incrementos en los rendimientos, los procedimientos de reducción de la WF (que implicarían cambios tecnológicos, de gestión, entre otros) quedan fuera del alcance de este trabajo, su carácter sólo es indicativo.

$$WF_{iju\ t+1} = WF_{iju\ t} \frac{\sum_{ij}^{RC} WA_{ij}}{\sum_{uij}^{URC} (WF_{uij} / \alpha_{uij})} \quad \forall u = 1, \dots, U$$

$$\Leftrightarrow WF_{uij\ t+1} \leq WF_{u\ min} \quad (5.11)$$

B. Si el procedimiento anterior no fuera suficiente, se procede a la limitación del crecimiento de los usos de suelo más demandantes de agua (regadío, industrial etc.) según sea el caso de la zona de estudio, sin afectar la satisfacción de las necesidades alimentarias de la población:

$$P_{u\ t+1} \leq P_{u\ t} \quad (5.12)$$

Este mecanismo constituye el segundo bucle de realimentación para equilibrar el sistema, interrelacionado con el principal. Así mismo este ciclo está estrechamente ligado con la minimización del déficit alimentario. En la figura 5.4 se observan de forma más detallada las interrelaciones de las variables de los mecanismos de autorregulación.

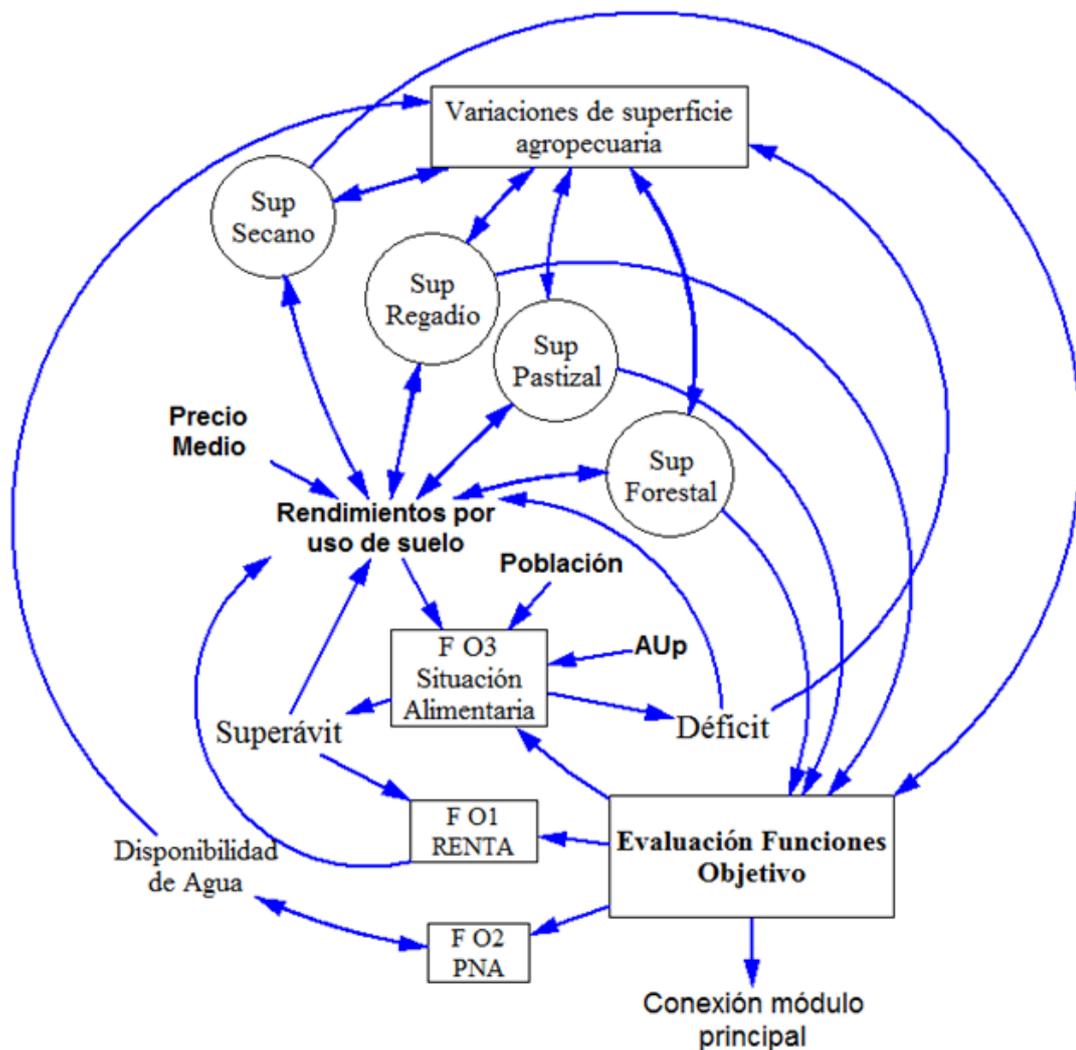


Figura 5.4. Bucle de autorregulación de MAUSS-DS

5.2.3. Combinación de la Dinámica de Sistemas con MAUSS: Algoritmo MAUSS-DS

El módulo de DS, que controla la variación de superficies de los distintos usos y los mecanismos de autorregulación, se integra en la estructura de MAUSS tal como se describe en la Figura 5.5 para ejecutarse en cada iteración del nuevo algoritmo MAUSS-DS. Cada iteración representa un intervalo de análisis temporal o periodo, definido en escala anual. Sin embargo, como la localización óptima de los usos de suelo –objetivo general de MAUSS- no se obtiene directamente de las nuevas extensiones de los mismos, dado que éstas cambian en cada período de acuerdo a las tasas de variación de los parámetros del módulo DS, se ha incluido en el algoritmo un procedimiento intermedio de optimización que itera “ n ” generaciones por cada cambio anual de superficies. Este procedimiento (bucle anidado) es el que controla la ubicación espacial óptima de usos en el territorio, mientras que el bucle externo controla la variación temporal del sistema (Figura 5.5).

Con esta estructura el modelo logra optimizar la distribución de usos de suelo en contextos temporalmente (anualmente) cambiantes, desde el período t hasta T . Al igual que MAUSS, MAUSS-DS está programado en lenguaje MATLAB.

La población inicial puede estar constituida bien por el conjunto de mapas del frente Pareto que proporciona MAUSS o bien un conjunto de mapas (al menos 2) definidos por el planificador.

Después de inicializado el proceso, se ejecuta el módulo de DS en el que se obtienen los valores de superficie por tipo de uso de suelo para cada período para distintos escenarios de cambio que a continuación se describen.

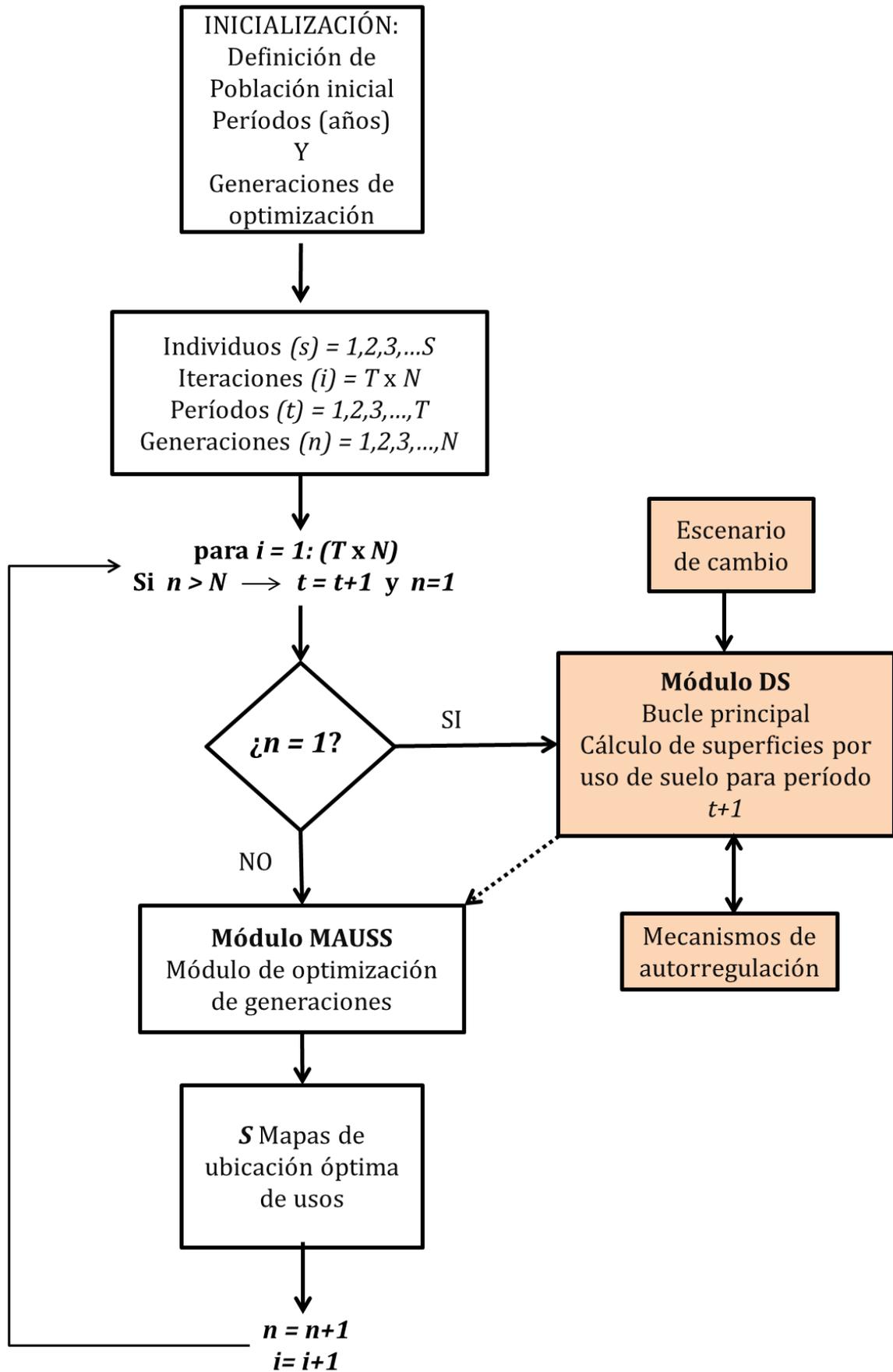


Figura 5.5. Diagrama general de MAUSS-DS

5.2.3.1. Escenarios de simulación

La estimación de la posible evolución de los usos de suelo puede basarse en la repetición de los comportamientos pasados de los factores de cambio, es decir de las políticas económicas, sociales y ambientales aplicadas a un territorio combinadas con la dinámica poblacional. Así mismo pueden analizarse escenarios hipotéticos de variación de los factores de cambio considerados que no sigan la tendencia registrada hasta el momento. La simulación de los cambios de usos de suelo permite analizar, para diversos horizontes temporales y escenarios de variación de los factores de cambio, ordenamientos territoriales dinámicos, facilitando el diseño de políticas de planeación territorial adecuadas.

Como herramienta de ayuda a la toma de decisiones en la planeación territorial MAUSS-SD simula la evolución espacial de un territorio en un horizonte temporal T ante tres posibles escenarios:

1. Escenario de variación tendencial histórica (ETH)

En este escenario, los factores de cambio se proyectan a futuro asumiendo la tendencia histórica de las variables de referencia, de acuerdo con las estadísticas nacionales y regionales sin introducir cambios en sus comportamientos. En este escenario no se consideran mecanismos de autocorrección con el propósito de obtener una proyección de la situación territorial si se siguen las mismas políticas económicas, sociales y ambientales en un período determinado.

2. Escenario de gran crecimiento urbano-industrial (EUI)

En este escenario los factores de cambio impulsarían un rápido crecimiento urbano e industrial a partir de altas tasas (respecto de las tasas promedio del área de estudio) de crecimiento del PIB, de la población y de la inversión en el sector industrial. En EUI se introducen los mecanismos de autorregulación puesto que la expectativa de crecimiento urbano e industrial es alta y por lo tanto su influencia en la extensión del suelo dedicado a usos agropecuario. Los variables biofísicas (ANp y AUp) se modifican respecto de los valores actuales o tendenciales para permitir desarrollos urbanos-industriales acelerados que maximicen la renta territorial pero minimizando las presiones negativas sobre el entorno y garantizando la seguridad alimentaria de su población, tal y como se ha descrito en el apartado 5.2.2.

3. Escenario de desarrollo sostenible (ES)

Este escenario potencia un equilibrio sostenible de utilización del suelo en una región en el horizonte temporal considerado. Las variables de referencia económicas, poblacionales y biofísicas tienen valores intermedios para permitir un desarrollo territorial sostenible. Los mecanismos de autorregulación también se habilitan en este escenario para facilitar el equilibrio entre las esferas económica, social y ambiental de la región en cada período.

5.2.3.2. Restricciones de MAUSS-DS

1. La renta de los usos agropecuarios u^* en el período $t+1$ no debe ser menor a su renta inicial t_0

$$\sum_{u^*j=1}^{URC} in_{iju^* t+1} \geq \sum_{u^*j=1}^{URC} in_{iju^* t_0} \quad (5.13)$$

2. Ante crecimientos poblacionales nulos o negativos el modelo asume que los rendimientos de los usos agropecuarios no sufrirán variaciones manteniendo la renta del sector primario:

$$Y_{u^*t+1} \geq Y_{u^*0} \quad (5.14)$$

Con el propósito de no perder diversidad de los individuos a evolucionar y dar mayor coherencia a los cambios espacio-temporales de los usos de suelo, cuando se ejecuta MAUSS-DS el tamaño de la población que desempeña el rol de padre es del 100%, es decir, todos los individuos o mapas del período t pueden ser progenitores de la descendencia (en MAUSS se consideraba sólo el 50%). La tasa de cruzamiento y mutación permanecen sin cambio: 90% y 10%, respectivamente (sección 4.2.3)

Una vez optimizados los mapas del período t , regresan al módulo de la DS para que se establezcan las variaciones de superficie del período $t+1$ conforme a los parámetros y objetivos del sistema.

5.3. Resultados

MAUSS-DS se ha aplicado a los Llanos de San Juan (México), utilizando como población inicial las soluciones del frente de Pareto generado tras la aplicación de MAUSS en este territorio (sección 4.3). Se pretende estimar, a partir de estos mapas óptimos, la dinámica territorial y sus consecuencias en el entorno. Se trata de prever hacia dónde se dirige la expansión de los sectores industrial y urbano y cómo se relocalizan actividades agropecuarias.

El caso de estudio consiste en una subregión con superávit alimentario en la que, *a priori*, se esperan importantes crecimientos demográficos. El año 2050 es el horizonte temporal de evolución de los 150 mapas de usos de suelo que componen el frente de Pareto, para lo que MAUSS-DS realizará 33 iteraciones (años).

Las condiciones locales propiciaron la consideración de ciertas restricciones específicas: a) la superficie forestal permanece sin variaciones (no es susceptible de incrementos) y b) la superficie agrícola de regadío puede incrementarse pero no disminuir.

Los valores que asumieron los parámetros o variables de los factores de cambio en cada uno de los escenarios de simulación descritos anteriormente se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de los parámetros en cada escenario de cambio

variable		Escenarios		
		ETH	EUI	ES
Tasa de crecimiento del PIB (%)	<i>Incin</i>	2	8	5
Tasa de formación bruta de capital fijo (%)	<i>FBKF</i>	22	35	30
Tasa de inversión en el sector industrial (%)	<i>InvI</i>	40	60	45
Tasa de crecimiento de la población (%)	<i>TC</i>	2	4	2.5
Área Necesaria por persona (m2)	<i>ANp</i>	67	50	40
Necesidades alimentarias por persona al día (kcal)	<i>AUp</i>	3159	2500	2500
Rendimientos iniciales uso agrícola secano (t·ha ⁻¹)*	<i>Y sec</i>	2.47	2.47	2.47
Rendimientos iniciales uso agrícola regadío (t·ha ⁻¹)*	<i>Y reg</i>	8.24	8.24	8.24
Rendimientos iniciales uso pecuario (t·ha ⁻¹)*	<i>Y pec</i>	2.82	2.82	2.82

* Todos los rendimientos incorporan los piensos en su peso ya transformado a materia seca en cada modalidad o uso.

5.3.1. Variación temporal del territorio por escenario de cambio.

Las variables que dominan la dinámica territorial son el PIB y la población; sus valores iniciales son de 114.035 millones de pesos y 80.000 habitantes, respectivamente. De acuerdo con los valores establecidos para cada una de las variables de referencia, los escenarios de cambio presentan la siguiente evolución (Figura 5.6.):

1. Escenario de variación tendencial histórica (ETH)

Las tasas de cambio y valores iniciales establecidas en la tabla 5.2 para este escenario corresponden con valores promedio de un período de 10 años registrados en las estadísticas oficiales (Anexo A.10.). En el caso de las variables de los factores de cambio económico y demográfico se refiere a los promedios nacionales. De acuerdo con ello, los crecimientos de la renta y de la población fueron los más bajos al compararlos con los otros escenarios, mostrando una lenta dinámica de cambio a lo largo de los períodos analizados en la que el PIB inicial alcanzó un crecimiento de 15,6% en el año 2050 (a precios constantes) (Figura 5.6a), y la población llegó a 153.779 habitantes con un incremento del 92%.

2. Escenario de gran crecimiento urbano-industrial (EUI)

En este escenario se determinaron tasas de cambio de los parámetros económicos que podrían considerarse como altas en el contexto internacional. La TC poblacional responde a los crecimientos registrados en zonas (dentro del país del área de estudio) con una gran dinámica económica y demográfica. Derivado de estos valores, el incremento del PIB fue de 39,6% para un total de 159.187 (millones de pesos), mientras que la población se incrementó 2.6 veces al final de los períodos (205.951 habitantes).

3. Escenario de desarrollo sostenible (ES)

Mediante este escenario se pretende hacer una utilización más racional de los recursos del territorio a largo plazo; la prioridad no es el incremento de la renta, aunque se

buscan tasas de crecimiento económico intermedias que permita mejorar las condiciones de vida de la población. Los valores que alcanzaron la renta y el PIB fueron intermedios en relación a los demás escenarios de simulación, incrementando los valores iniciales de cada una en 23% (PIB con 140.252 millones de pesos) y una población de 180.708 habitantes para el año 2050 (Figura 5.6b).

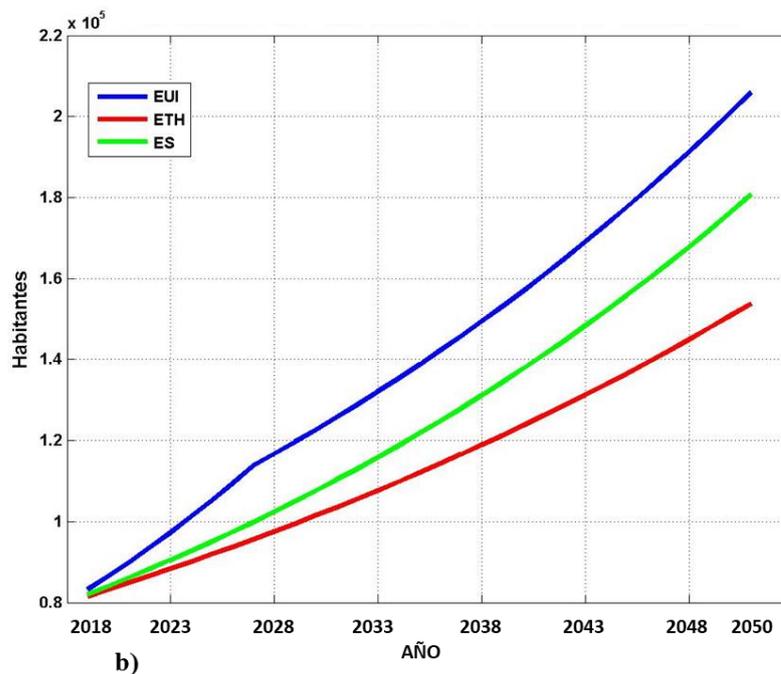
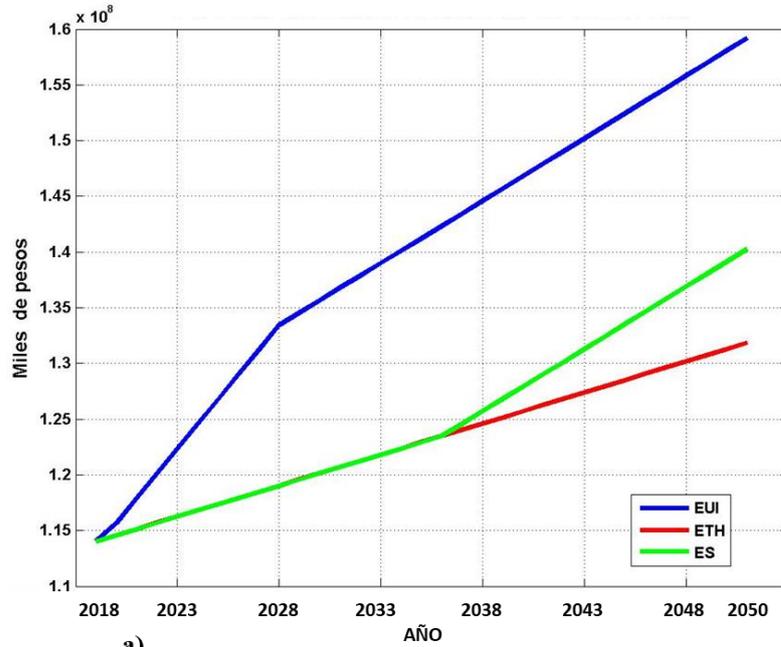


Figura 5.6. Evolución del PIB (a) y de la población (b) a lo largo de los períodos por escenario de cambio

El cambio de pendiente observado en el PIB tuvo que ver en el escenario EUI con un ligero decrecimiento en los rendimientos agrícolas y pecuarios en el período 10 (año

2028), que se mantiene con oscilaciones de positivas a negativas que duraron hasta el período 17 (año 2035) (Figura 5.7). Ello genera una renta global ligeramente inferior de los mapas que se traduce en crecimientos más pequeños de la superficie industrial y en consecuencia se reduce la tasa de crecimiento del PIB, que posteriormente se mantuvo constante hasta el año 2050, puesto que ya no se presentaron decrecimientos de los rendimientos.

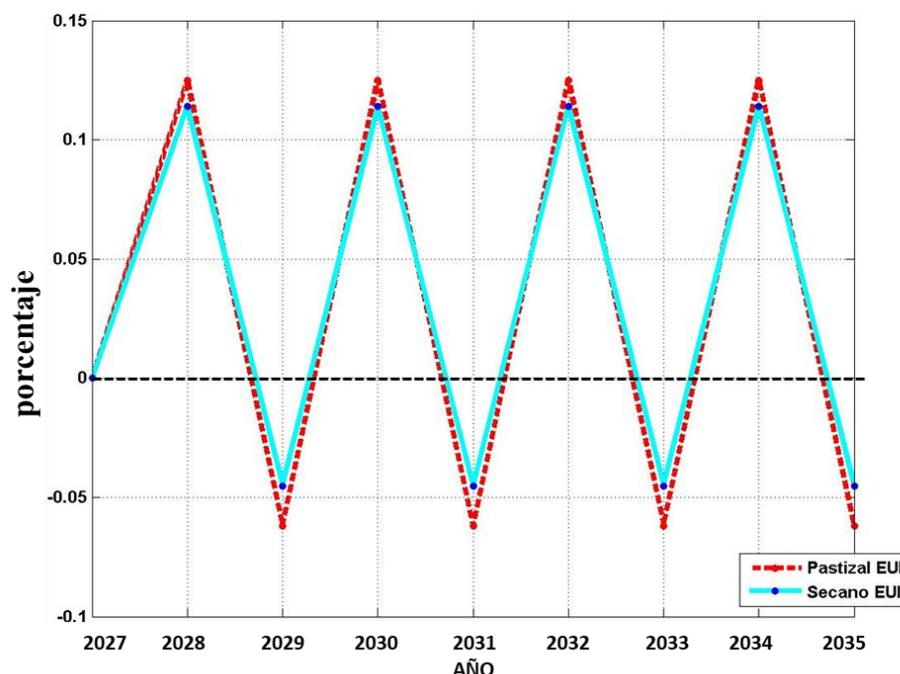


Figura 5.7. Variaciones porcentuales del escenario EUI en los rendimientos de los usos agrícola seco y pastizal; en los años 2027 a 2035

5.3.2. Variación de las superficies por tipo de uso de suelo en cada escenario de cambio

Como resultado de la interacción de las variables de referencia y de sus tasas de cambio, la distribución superficial de los usos de suelo en cada escenario de MAUSS-DS ha evolucionado en el tiempo tal como se observa en la Figura 5.8. Sólo 82% de la superficie total del área de estudio es susceptible de cambios en la asignación de usos del suelo de acuerdo con las restricciones impuestas.

Un aspecto importante de la aplicación de MAUSS-DS en los Llanos de San Juan es que no ha habido incremento de la superficie dedicada a los usos agropecuarios en ningún período para ningún escenario de cambio. Las necesidades alimentarias de la población creciente quedaron satisfechas con los incrementos de los rendimientos de dos usos productores de alimentos (agrícola de seco y pastizal). Las variaciones territoriales consistieron, de forma general, en el incremento de los usos urbano e industrial en todos los casos y en la disminución de los usos agropecuarios mencionados. La superficie forestal se mantuvo sin cambios y la superficie de riego no requirió incrementos de área.

A continuación se presentan los resultados de MAUSS-DS por escenario de cambio, como media de los valores alcanzados por los 150 mapas procesados.

1. Variaciones de superficie en ETH

Este escenario experimentó incrementos de 490,8 ha en la superficie urbana y de 214,4 ha en la industrial (con un total de 1,047 ha y 1,478 ha respectivamente), que representaron decrecimientos de 1,8% de suelo agrícola de secano (487,3 ha) y de 2,2% (217,9 ha) de pastizal. Con las tasas de variación económica y demográfica de este escenario se provocaron los menores cambios de uso de suelo en la subregión; a pesar de su mayor *AHp* y su alta ingesta de unidades alimentarias por persona al día (de 3.159 kcal) que rebasa las necesidades alimentarias por habitante, aunque corresponde con el promedio nacional por persona. La densidad urbana es de 150 hab/ha, de acuerdo al patrón local.

2. Variaciones de superficie en EUI

En EUI, las variaciones económicas, de la mano de los aspectos biofísicos *AUp* y *ANp* (definidos en 2500 kcal por persona al día y 50m² respectivamente) generaron un incremento de suelo urbano de 555,8 ha (para un total de 1.112 ha) ha y de 516,4 ha para expansión manufacturera, sumando un total de 1,800 ha de uso industrial (Figuras 5.8 a y b) al final de los 33 períodos, que representó una pérdida de 2,9% y 2,7% de suelo en los usos secano y pastizal, correspondiente a 798 ha y 274 ha respectivamente. (Figuras 5.8.c y d).

Con esos valores de los parámetros de cambio se buscó provocar una menor explotación de los recursos naturales (en comparación con ETH), pero satisfaciendo plenamente las necesidades de los habitantes de la zona de estudio. Como resultado, los rendimientos de los usos alimentariamente productivos se incrementaron de 2,47 t·ha⁻¹ a 3,68 t/ha el agrícola de secano y de 2,82 a 4,2 t·ha⁻¹ el pastizal (una producción mayor en 49% en ambos usos). Los aumentos de la productividad podrían ser satisfechos mediante el agua de lluvia en ambos casos (de acuerdo al régimen de precipitación promedio registrado) a través de una mejora de las variedades y de las técnicas de cultivo puesto que los incrementos de los rendimientos no son altos.

La menor tasa de crecimiento de la superficie industrial que se observa en la figura 5.7 desde el año 2027 en adelante está relacionada con el comportamiento del PIB (Figura 5.6a.). Al disminuir el crecimiento del PIB en ese año, la cantidad de celdas para uso industrial del siguiente período (2028) se incrementó en menor proporción, continuando con ese ritmo de crecimiento hasta el final de la simulación. A diferencia del escenario ETH, en EUI se promovió una mayor densidad urbana (de 200 hab/ha) para favorecer la compactación del uso urbano y disminuir la demanda de suelo y los cambios de uso en la región, con lo que se supone una menor presión sobre el recurso suelo.

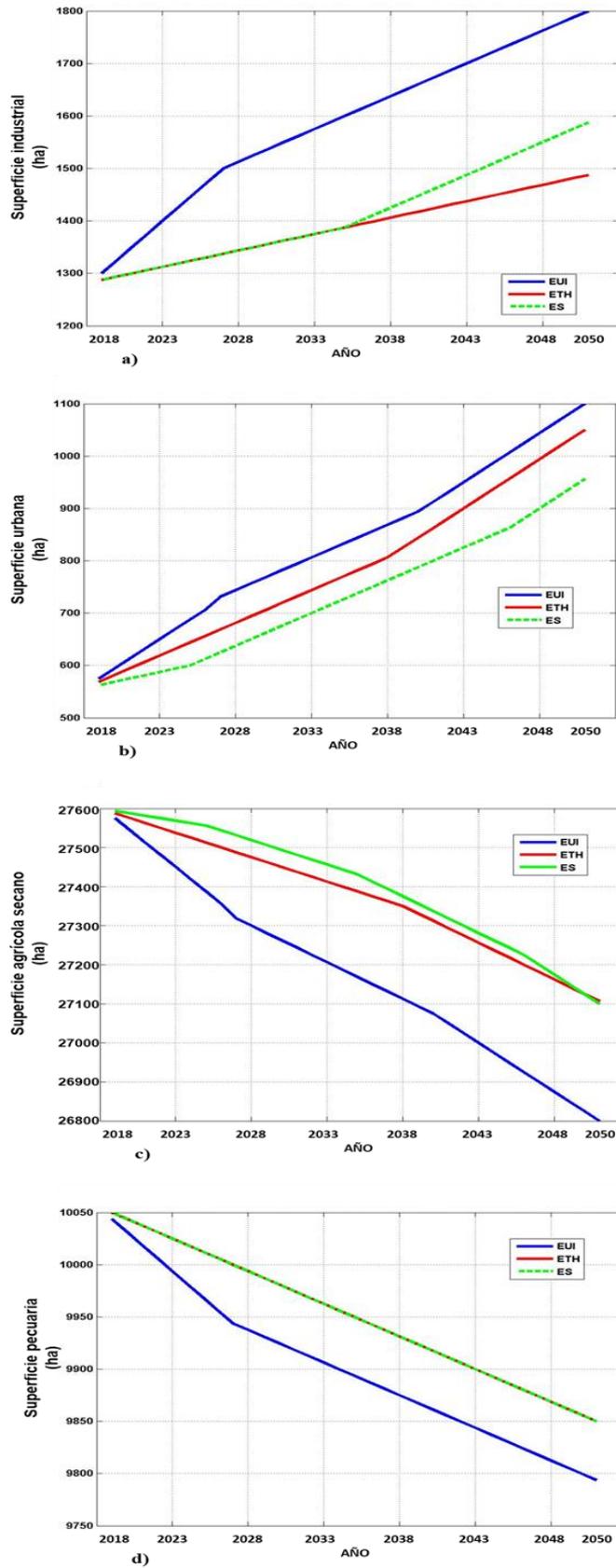


Figura 5.8. Variaciones de superficie por tipo de uso de suelo y escenario a lo largo de los períodos: a) superficie industrial, b) superficie urbana, c) superficie de secano, d) superficie de pastizal

3. Variaciones de superficie en ES

Concebido como un entorno de ocupación territorial sostenible; las variables biofísicas en ES se restringen a mínimos aceptables para *AUp* y *ANp* (de 2500kcal/hab/día y 40m² respectivamente) mediante los que se encuentran satisfechas las necesidades humanas sin desaprovechar recursos. Estos valores, aunados al comportamiento económico y demográfico preestablecido produjeron los menores requerimientos de área urbana (400,8 ha) a lo largo de los años; sin embargo los incrementos de superficie para la expansión industrial de (315 ha) fueron más importantes que para ETH dadas sus tasas medias de crecimiento económico. La pérdida de suelo agropecuario bajo este escenario fue de 1,8%, (497,9 ha de secano y 218,2 ha de pastizal) ligeramente mayor que la provocada por ETH.

En este escenario, el ajuste de los rendimientos de los suelos secano y pastizal para satisfacer las necesidades alimentarias de la población se dio con aumentos ligeros. A partir el período 23 los incrementos fueron más significativos hasta llegar a 3,2 y 3,6 t/ha en los usos secano y pastizal respectivamente, que representaron incrementos de la productividad agropecuaria de alrededor de 33%. (Figura 5.9).

La densidad poblacional es la más alta de todos los escenarios (250 hab/ha), promoviendo una utilización aún más sostenible del suelo para el uso urbano.

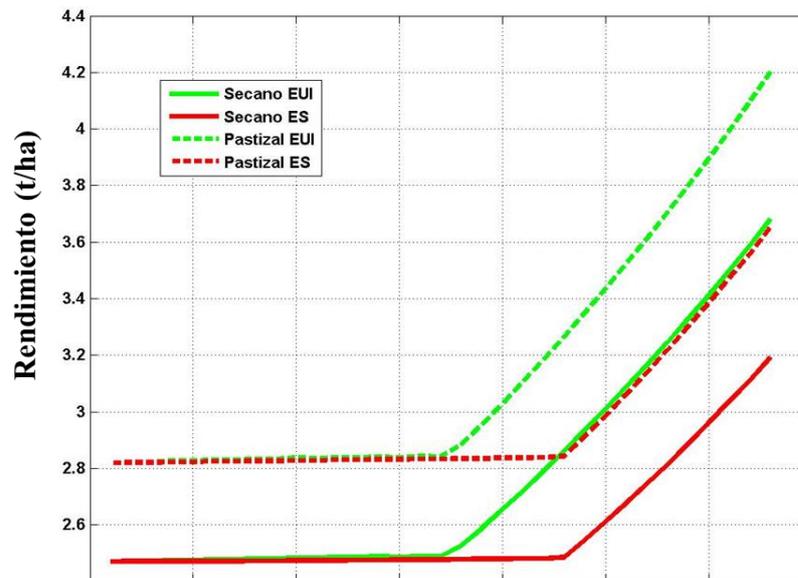


Figura 5.9. Variaciones de los rendimientos agropecuarios para los escenarios EUI y ES: a) rendimiento en secano (t·ha⁻¹); b) rendimiento en pastizal (t·ha⁻¹)

5.3.3. Mapas de usos de suelo óptimos para 2050 por escenario de cambio.

Al tratarse de un algoritmo que evalúa funciones para elegir las configuraciones de uso de suelo en las que mejor se cumplan y compensen los objetivos, la variabilidad de superficies por escenario de cambio y uso muestran diferencias en la intensidad de la explotación de los recursos del territorio y del beneficio económico obtenido.

Con la finalidad de establecer la comparación temporal entre la evolución de las soluciones óptimas y la posible evolución de la distribución de usos existente (S01) (definida en el capítulo 4), se realizó una simulación por cada escenario de cambio para S01 de acuerdo a los valores de los parámetros que asume en cada uno y bajo las mismas condiciones de optimización. La población inicial de estas simulaciones constó de diez individuos S01, es decir diez mapas iguales (para ello se realizó un ajuste en el operador de cruzamiento); que gracias a las variaciones de superficie por uso y su alojamiento en celdas elegidas aleatoriamente se fueron diferenciando y optimizando período a período.

La evolución temporal de los valores promedio de las funciones objetivo adimensionalizadas se observa en la figura 5.10 (frente de Pareto para 2050) por escenario de cambio.

En el escenario tendencial (ETH), el promedio de los valores de renta de las soluciones óptimas superaron ligeramente (1,3%) los obtenidos por la evolución tendencial que sufrió S01. La presión negativa al medio ambiente (PNA) al final de la simulación fue 6,4% menor para las soluciones óptimas que para S01, con valores de 3,840 y 4,102 respectivamente. El déficit alimentario es, sin embargo significativamente menor en el caso de S01 (42%), el cual, gracias al mayor excedente de unidades alimentarias con el que inicia la simulación (de acuerdo con los resultados del capítulo 4 tabla 4.3) evita el incremento acelerado del déficit al año 2050 (Figura 5.10a).

El escenario más dinámico económica y demográficamente (EUI) presentó valores promedio en renta 6,7% más altos para S01 en relación a las soluciones óptimas al final de la evolución (con valores adimensionales de 4,671 y 4,375 respectivamente). Por otro lado, los valores de las funciones O2 y O3 fueron mejores para las soluciones óptimas en este escenario: las PNA registraron 4,351 unidades adimensionales en el S01 y 3,997 en las soluciones óptimas (con una mejora de 8,9% en el conjunto óptimo), mientras que el déficit alimentario logró ser menor en 1,3% con 0,09024 unidades adimensionales para las soluciones óptimas y 0,09138 para S01 (Figura 5.10b).

El escenario ES arrojó los siguientes resultados; en la renta (O1) las soluciones óptimas fueron 7,9% más altas que el valor obtenido por S01 (3,899 vs 3,615 respectivamente) hacia el año 2050. Así mismo, el valor obtenido en O2 (PNA) es 6,1% menor en las soluciones óptimas con un valor de 3,807 y de 4,052 para S01 al final de la simulación. En la O3 (Déficit alimentario) hubo una gran similitud de los resultados siendo un 0,4% menor el obtenido por S01 con un valor de 0,0907 y de 0,911 el arrojado por las soluciones óptimas en el año 2050 (Figura 5.10c).

La producción de alimentos iniciales (en el período $t=0$) es la misma en cada escenario de simulación para las soluciones óptimas obtenidas con MAUSS (2.6939 unidades adimensionales), sin embargo el superávit de alimentos disminuye más drásticamente desde el período $t=1$ en el escenario ETH, puesto que sus necesidades alimentarias por persona son mayores (de 3.159 kcal) a comparación de los demás escenarios (2.500 kcal) ya que corresponde a la ingesta promedio (tendencial) de los mexicanos (ver tabla

5.3). En el caso del S01 sus unidades alimentarias de partida son mayores (3,202 kcal), de acuerdo con los resultados del capítulo 4.

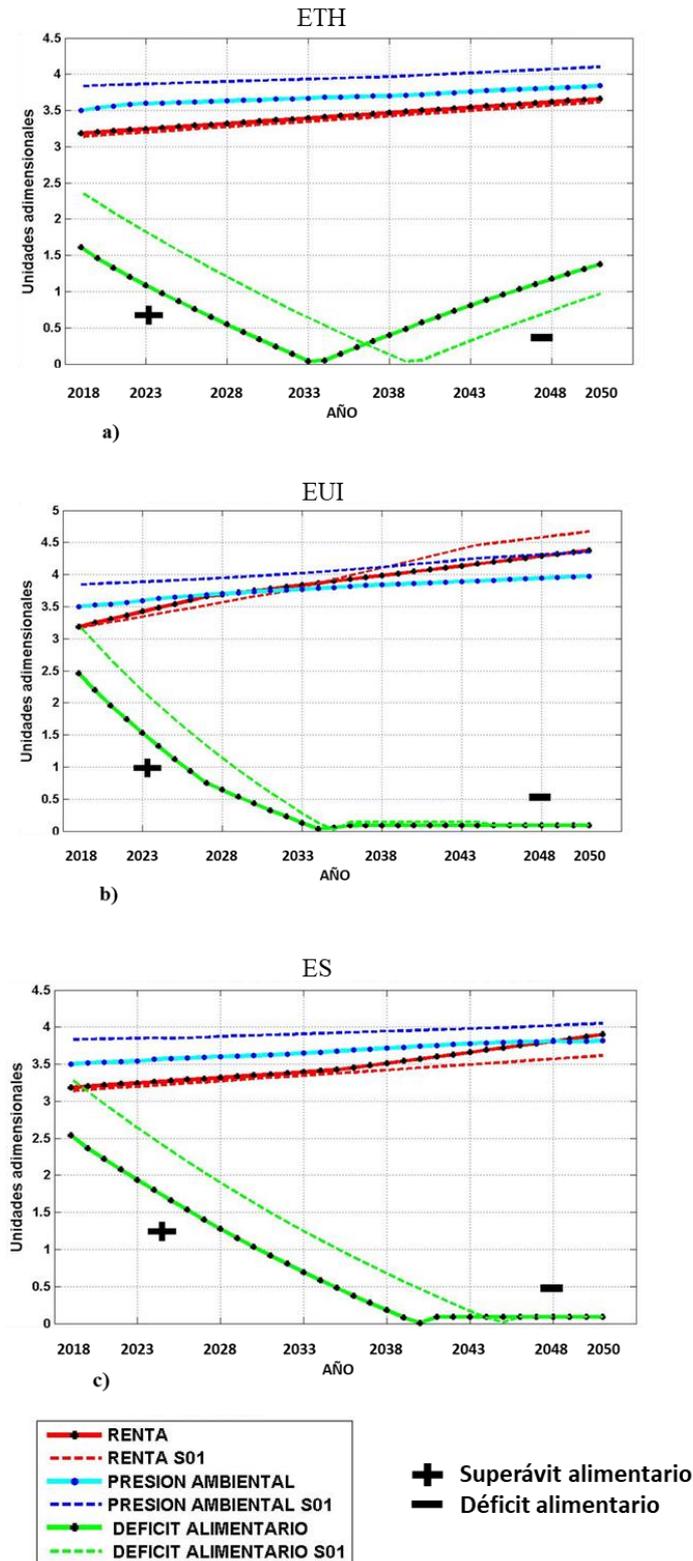


Figura 5.10. Desempeño de las funciones O 1, O 2 y O 3 y su comparación con la evolución de S01 en cada uno de los escenarios de cambio: a) ETH, b) EUI, c) ES

5.3.4. Mapas seleccionados de los frentes de Pareto de cada escenario de cambio

En esta sección se muestran los mapas-resultado seleccionados del frente Pareto de cada escenario de simulación (Figuras 5.11 a 5.13). Se eligieron, por una parte, aquellos mapas que obtuvieron los mejores valores en cada una de las funciones objetivo, y por otra, el mapa con mayor compensación de los objetivos o más equilibrado, conforme a los criterios originales de NSGA-II; es decir los individuos con el menor ranking y la mayor distancia de hacinamiento en el espacio de solución tridimensional, siguiendo el criterio de selección de soluciones del capítulo 4. La expresión espacial de las distribuciones de usos de suelo en el tiempo mostró una marcada tendencia a localizaciones industriales fundamentalmente al norte y sureste de la zona de estudio en todos los escenarios de cambio.

Los mejores mapas-resultado del frente Pareto en cada una de las funciones objetivo del escenario ETH, se muestran en la Figura 5.11.

Para el caso del escenario de gran crecimiento urbano e industrial EUI en la (Figura 5.12) se muestra el mapa óptimo más equilibrado y los óptimos para renta, presión ambiental y seguridad alimentaria.

El escenario de crecimiento sostenible ES mostró distribuciones espaciales de usos de suelo muy similares. En este escenario, el mapa con mejor puntuación en la función O3 (déficit alimentario) fue el que además compensó mejor los valores de las tres funciones en competencia (Figura 5.13).

La distribución espacial de usos de suelo para 2050 del escenario S01 en los mapas más equilibrados en cada uno de los escenarios de cambio se presenta en la Figura 5.14, mostrando claras diferencias en la ubicación de los usos industriales y urbanos respecto a los mapas de las figuras 5.11 a 5.13.

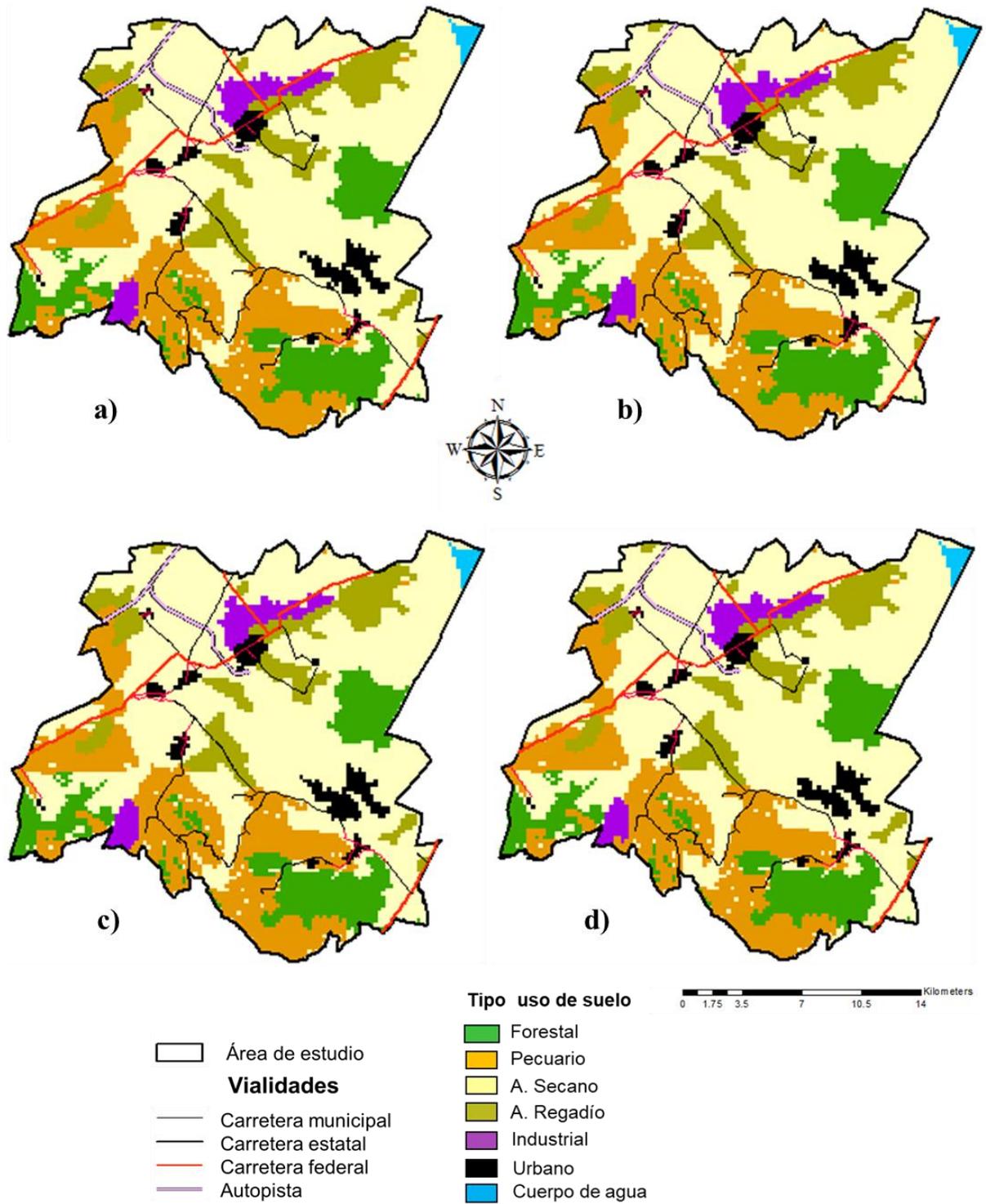


Figura 5.11. Distribuciones espaciales escenario de cambio ETH. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario; d) Equilibrado

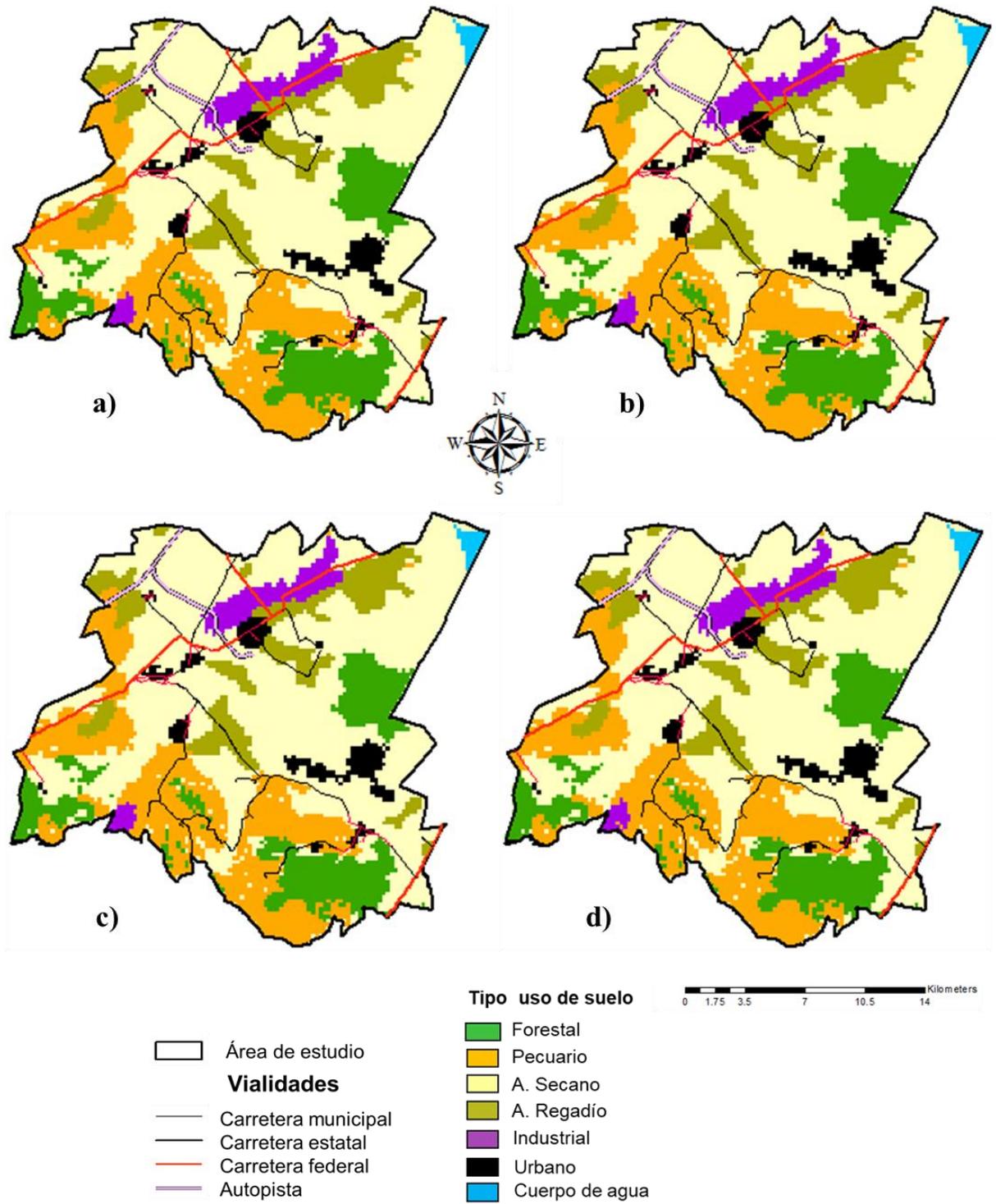


Figura 5.12. Distribuciones espaciales escenario de cambio EUI. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario; d) Equilibrado

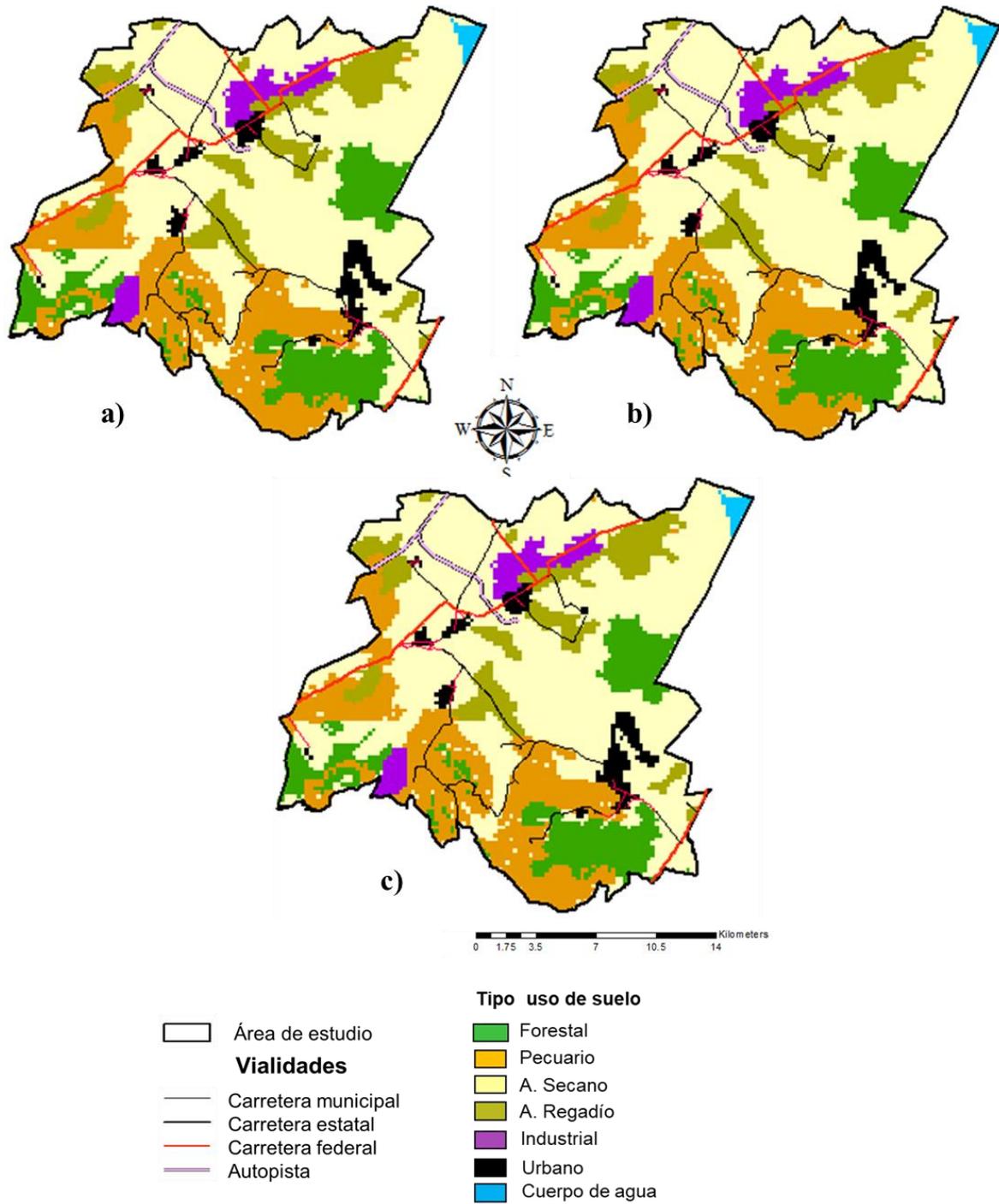


Figura 5.13. Distribuciones espaciales escenario de cambio ES. a) Renta óptima; b) Menor presión ambiental; c) Menor déficit alimentario = mapa equilibrado

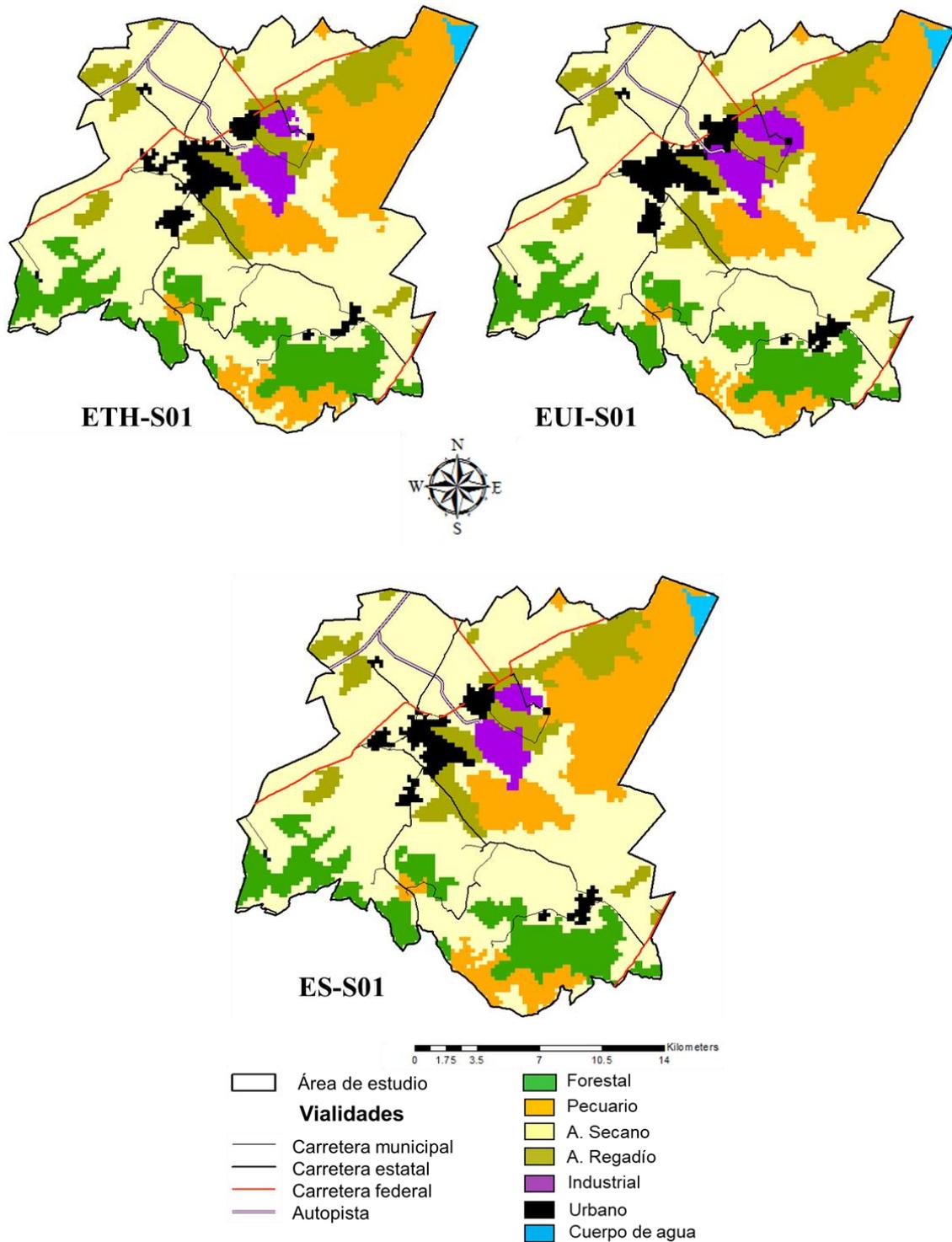


Figura 5.14. Evolución temporal del escenario S01 en cada uno de los escenarios de cambio al año 2050

A modo de ejemplo, en la Figura 5.15 se muestra la situación en el año 2017 ($t=0$) de la solución SC (mapa con menor superávit alimentario) extraída del frente de Pareto obtenido mediante MAUSS y la situación en el año 2050 para los tres escenarios de cambio de los mapas- solución en los que se compensan las objetivos; estos últimos seleccionados de los correspondientes frentes de Pareto generados por MAUSS-DS. Se toma como referencia la solución SC puesto que, a pesar de la diversidad de

distribuciones óptimas ofrecidas por MAUSS (Figura 4.7.), ésta es la que prevalece en la evolución temporal de los usos de la región.

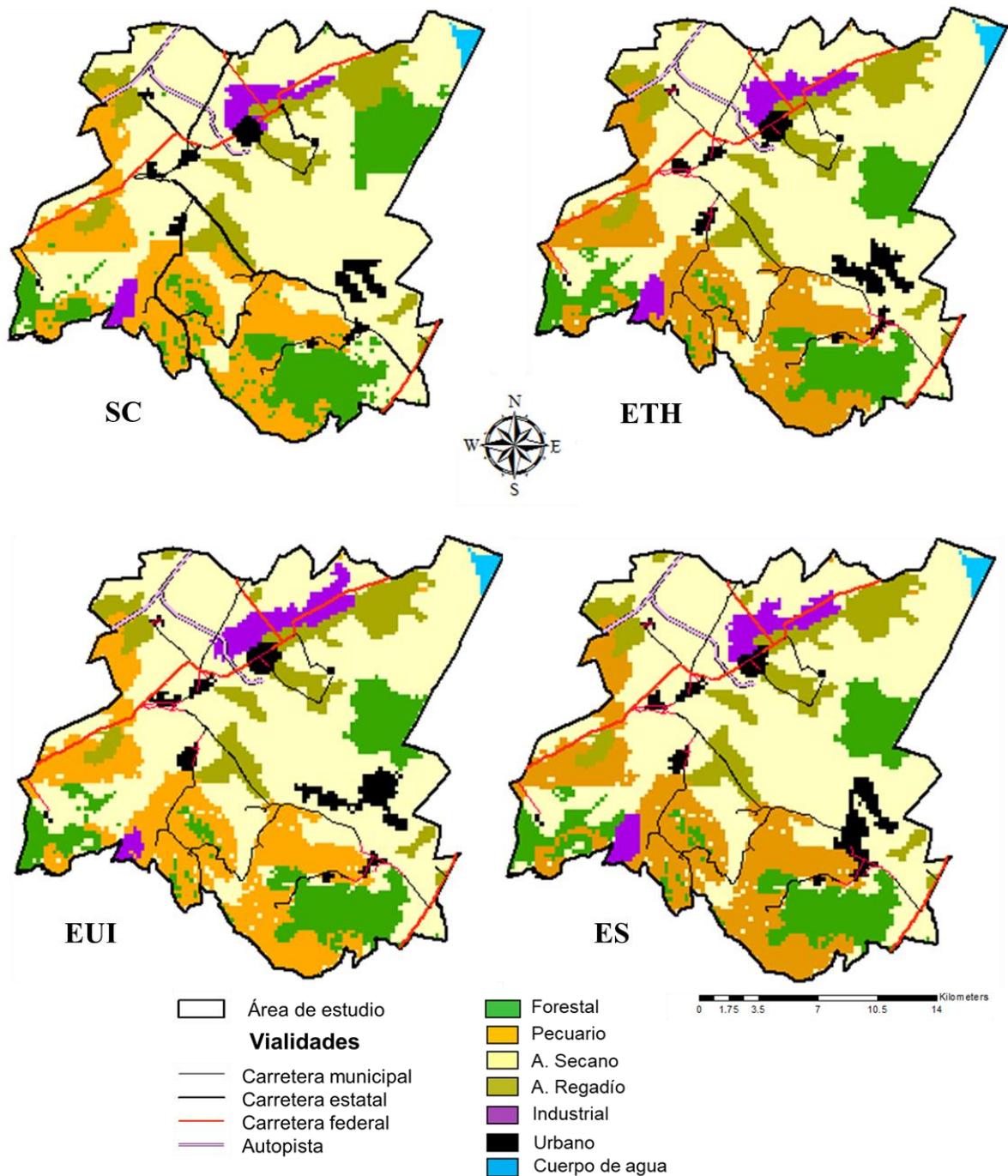


Figura 5.15. Evolución temporal de la solución SC. a) Mapa-solución SC (2018); b) Mapa-solución SD-ETH (2050); c) Mapa-solución SD-EUI (2050); d) Mapa-solución SD-ES (2050)

5.4. Discusión de resultados

Los comportamientos de la renta, resultaron crecientes en todos los escenarios de cambio propuestos. El escenario EUI simulado para el conjunto de mapas óptimos, por sus altas tasas de crecimiento económico y demográfico presentó, como era de esperarse, la renta más alta (de 4,375 unidades adimensionales) con incrementos de

37,6% respecto de su renta inicial; el escenario ES obtuvo la segunda renta de mayor importancia (3,899 unidades adimensionales) incrementándose un 22,4%, mientras que el ETH alcanzó un incremento de 14,9% en relación a su renta inicial. En todos los casos, excepto en EUI, la renta promedio alcanzada por el conjunto óptimo fue mayor que la que alcanzó S01 al final de los períodos de simulación.

Las variaciones de las curvas de la renta presentaron comportamientos no lineales en los escenarios EUI y ES; las inflexiones de sus pendientes estuvieron directamente condicionadas por las variaciones de los rendimientos, cuyas oscilaciones se pueden explicar por las siguientes causas: primero a ajustes propios de la DS para lograr la minimización del déficit alimentario en los momentos de transición de la condición excedentaria a deficitaria, y segundo a localizaciones de usos agropecuarios en zonas de menor aptitud ante incrementos de las superficies urbanas e industriales, posteriormente corregidos u optimizados para seguir manteniendo el equilibrio territorial global. Con lo que se observa una fuerte condicionante territorial en las variaciones temporales del sistema gracias a optimización de las ubicaciones de los distintos usos, puesto que los valores se ajustan con mayor objetividad a la situación real de la región en estudio período a período.

La Presión negativa en el medio ambiente, fue también creciente puesto que los incrementos poblacionales y económicos impactaron más los recursos naturales. Con un valor inicial promedio de 3,5 para la función O2, en EUI se produce el mayor valor de presión negativa en el medio ambiente con un incremento del 14% mientras que el escenario ETH (con 3,840), a pesar de sus menores tasas de crecimiento socioeconómico superó en presión negativa las 3,807 unidades adimensionales de ES (con incrementos de 9,7% y 8,7% respectivamente). Los valores para O2 de S01 fue mayor en todos los escenarios, puesto que arrojó valores de 4,351, 4,102 y 4,052 en EUI, ETH y ES respectivamente al final de los períodos de simulación.

En el análisis de los componentes de la función O2, se observó que los incrementos de las PNA tuvieron lugar por aumentos en las emisiones de GEI derivados de los crecimientos de los usos urbano e industrial, así como por el incremento en el riesgo a la contaminación del recurso hídrico. Por su parte, la HH total disminuyó en todos los escenarios debido a la disminución de superficie agrícola y pecuaria (como usos mayormente demandantes), eso implica no obstante, que la HH azul sufre más presiones para abastecer la demanda creciente del desarrollo industrial y los crecimientos demográficos en una región considerada actualmente en veda por sobreexplotación.

El comportamiento tendencial de los requerimientos alimentarios fue el que presentó la mayor variabilidad; en ETH (Figura 5.8a) se propició que el superávit inicial de la región se transformara en déficit en el período 16 (año 2033), dicho déficit se incrementó prácticamente al mismo nivel del excedente en $t=1$ (año 2019) (con 1.376 unidades adimensionalizadas) al final de los 33 años de análisis. La evolución de S01 fue mejor en este escenario al alcanzar un déficit 42% menor (de 0,9642), ello debido a que parte, como se explicó anteriormente, con un mayor superávit. En el escenario EUI

el superávit se volvió mínimo desde el período 17 (año 2033) puesto que la población tiene mayores tasas de crecimiento (Figura 5.8b); después de ligeras oscilaciones, se establece un comportamiento asintótico que registró un valor adimensional de 0,09024 unidades, 1,3% menores que las alcanzadas por S01 al año 2050. Para satisfacer el déficit alimentario, los rendimientos por uso productivo de alimentos (ver Figura 5.7) crecieron en 49%. El escenario ES alcanzó un superávit mínimo a partir del período 22 que finalizó en 0.0911 unidades después de 33 períodos de simulación (Figura 5.8c). Los requerimientos alimentarios del crecimiento sostenible sufrieron ligeros incrementos de 33%.

Respecto a la ubicación espacial de los distintos usos en las soluciones analizadas, a pesar de su variabilidad, existe una marcada tendencia a la localización de las zonas industriales al norte y suroeste, mientras que los usos urbanos prevalecieron alrededor de los asentamientos existentes y al sureste del área de estudio en todos los escenarios de cambio de acuerdo a las superficies resultantes en cada uno, a diferencia de lo que ocurre con la evolución del escenario S01 (Figura 5.14), que concentra mayoritariamente el uso urbano en el norte y ubica el terreno de uso industrial en el lado opuesto de la carretera federal (dirección NE-SO), internándose más en la llanura y en la zona de descarga de la región.

En la evolución de los mapas óptimos provenientes de MAUSS se observan ligeros cambios en la ubicación de los distintos usos en el periodo 2018-2050 (Figura 5.15); como se ha descrito, a pesar de la nutrida diversidad de soluciones óptimas que arrojó MAUSS, la solución SC fue la que prevaleció como mejor distribución espacial a lo largo del tiempo, confirmando la importancia de la satisfacción de las necesidades alimentarias regionales dentro del sistema. La variación espacio-temporal más importante es el desplazamiento hacia el sur de la aglomeración forestal noreste de SC. El resto de los usos mantuvo -con pequeñas diferencias y las variaciones de superficie propiciadas por los factores de cambio- las distribuciones espaciales de SC en el año 2018.

Entre las principales diferencias respecto de la localización industrial de la propuesta oficial se encuentran las siguientes: las soluciones óptimas se mantienen en zonas de media a muy alta aptitud para dicho uso, mientras que S01 de origen se encuentra en las zonas de menor aptitud (en el llano), impactando de forma más negativa los recursos hídricos subterráneos, asimismo las zonas industriales provenientes de MAUSS se mantienen ligadas en un corredor norte con acceso directo a las autopistas y carreteras federales, en una zona de gran accesibilidad a las vías de transporte.

5.5. Conclusiones

El modelo MAUSS-DS permite analizar la evolución espacio-temporal de las asignaciones de usos de suelo en un territorio bajo una perspectiva sostenible.

MAUSS-DS combina la capacidad de ubicación territorial óptima de usos del suelo del modelo MAUSS con la variabilidad temporal de los factores de cambio (económicos,

sociales y biofísicos) que modifican la extensión de las superficies dedicadas a los distintos usos de suelo en un territorio. La evolución temporal de dichos factores de cambio se simula mediante técnicas de dinámica de sistemas, para diferentes escenarios tendenciales y horizontes temporales.

MAUSS-DS se ha aplicado a la subregión de Los Llanos de San Juan Puebla (México) para un periodo de simulación de 33 años (desde 2018 a 2050) bajo tres escenarios de cambio (ETH (tendencia histórica), EUI (gran desarrollo urbano e industrial) y ES (sostenible)) que permiten simular las variaciones de superficies de los usos de suelo en función de la evolución de los factores de cambio en cada uno de ellos y su distribución territorial, cumpliendo simultáneamente los objetivos de maximización de la renta, minimización de las presiones negativas en el medio ambiente y minimización del déficit/superávit alimentario en la subregión de estudio. El cumplimiento de los dos objetivos últimos se logra mediante mecanismos autocorrectivos de dinámica de sistemas.

Los comportamientos en los escenarios de cambio diseñados dan cuenta de la eficiencia en la utilización del territorio. El escenario ETH evidencia que de no implementarse ninguna modificación en las políticas y formas convencionales de ocupación y apropiación del territorio, la región está sujeta a una mayor presión negativa sobre sus recursos sin lograr incrementar significativamente la renta y perdiendo su capacidad agrícola al punto de la dependencia alimentaria del exterior, con lo que también se pierden ingresos del sector primario, que son los mejor distribuidos entre la población. Los escenarios EUI y ES, en los que se corrige el déficit alimentario, muestran los plazos de actuación para satisfacer las necesidades nutricionales de los habitantes de la zona de estudio, ante grandes crecimientos demográficos y económicos, en el caso de EUI, o ante crecimientos intermedios y con una perspectiva de mayor sostenibilidad, como en el caso de ES. Las presiones negativas sobre el entorno más bajas corresponden al escenario ES, confirmando que se pueden satisfacer de forma más racional y equilibrada las necesidades de la población a largo plazo minimizando la presión sobre el entorno.

Los usos que incrementaron superficie fueron el urbano y el industrial en todos los escenarios de cambio, de acuerdo a los valores asignados a las variables de referencia, cuyas expansiones tuvieron lugar en las áreas de secano y pastizal; las necesidades alimentarias de la región y su dinámica demográfica no produjeron incrementos de las superficies agropecuarias en ninguno de los casos, puesto que quedaron satisfechas mediante los incrementos de los rendimientos de dichos usos.

Con ligeras diferencias entre escenarios de cambio, las ubicaciones espaciales del uso industrial confluyeron a lo largo de los períodos de simulación en localizaciones al norte y suroeste. Los crecimientos urbanos prevalecieron alrededor de los asentamientos actuales, pero fundamentalmente en una localización centro sureste de la región, con pequeñas diferencias entre escenarios. Las disposiciones geográficas de los pastizales permanecieron en las zonas de mayor aptitud, al poniente y sur del área de estudio,

mientras el uso de regadío permaneció en las mismas localizaciones iniciales. El suelo forestal se mantuvo constante al sur y oriente de la subregión, y el agrícola de secano distribuido en todo el territorio. Esta persistencia de ubicaciones geográficas resultado del proceso de simulación y optimización periódica da muestra de la eficiencia del algoritmo MAUSS-DS en la búsqueda de las mejores localizaciones espaciales por uso a lo largo del tiempo puesto que los mapas provenientes del conjunto óptimo arrojaron en términos generales mejores valores promedio de sus funciones objetivo que aquellos obtenidos por la propuesta oficial (S01) a pesar de ser optimizados en su posible evolución temporal.

La comparación de las soluciones elegidas de los frentes de Pareto generado por MAUSS y por MAUSS-DS, permite visualizar los cambios estimados en el territorio desde el año 2018 a 2050. Los cambios afectan mayoritariamente a la ubicación de los usos industriales y urbanos. Esta información debe ser la base del desarrollo de planes territoriales con una sólida base racional.

El diseño de los escenarios de cambio es muy flexible; para la zona de estudio se definieron los anteriormente expuestos, sin embargo el modelo puede funcionar ante diversos contextos de los factores de cambio y valores de sus parámetros, por ejemplo crecimientos económicos o poblacionales nulos o negativos; o para regiones en transición (de crecimientos a decrecimientos o viceversa) de cualquier variable de referencia, pudiendo proponer soluciones espaciales a largo plazo ante diferentes realidades posibles en múltiples regiones del planeta. Se destaca que el diseño de escenarios sostenibles de utilización y explotación del territorio permite atender y resolver las necesidades de la población de una forma más racional preservando el equilibrio medioambiental y mejorando las condiciones de vida de los habitantes. Por lo anteriormente expuesto MAUSS-DS, como modelo dinámico integrado, es una herramienta idónea para la ayuda a la toma de decisiones en la planeación espacial a diversas escalas geográficas y horizontes temporales.



Capítulo 6.

Conclusiones Generales

1. Las herramientas actuales de asignación de usos al suelo no contemplan de forma conjunta el cumplimiento de objetivos económicos y ambientales. Así mismo no tienen en cuenta objetivos alimentarios dentro del proceso de planeación territorial. Este aspecto es fundamental no sólo para los lugares donde se padece hambre, sino para cualquier territorio, incluyendo las zonas excedentarias en producción de alimentos, para disminuir las importaciones y/o las afecciones al medioambiente, pudiendo dedicar el territorio a usos más rentables.
2. Se incorpora el concepto de sostenibilidad en el proceso de distribución espacial de usos de suelo en un territorio de forma efectiva y eficiente, gracias a las modificaciones introducidas en el procedimiento de optimización, que permiten obtener mapas de distribución óptimos en los que se maximiza la renta del territorio, se minimizan las presiones negativas sobre el entorno (agua y aire) y el déficit/superávit alimentario atendiendo a las necesidades nutricionales de la población local, manteniendo la coherencia en la distribución espacial de los distintos usos al evitar distribuciones atomizadas de los mismos.
3. Las distribuciones espaciales óptimas de usos de suelo obtenidas muestran una mayor sostenibilidad que la distribución existente en la actualidad en la zona de estudio. Si bien el incremento de renta es pequeño (1%), se ha reducido en un 9% las presiones negativas sobre medio ambiente valoradas en términos de HH, potencial de contaminación del agua y del aire (emisiones de CO₂ equivalente). Concretamente, la reducción de emisiones de CO₂ se consigue al mejorar la accesibilidad y la compactación de los usos urbanos e industriales y minimizando los cambios de uso de suelo. El objetivo de disminución del déficit/superávit alimentario, permite satisfacer las necesidades de la población local y, en zonas con superávit, rentabilizar al máximo la explotación del territorio. Así se ha reducido en un 5,2%, el superávit de producción de alimentos al ubicar los usos agropecuarios en zonas más aptas y rentables mientras mantiene la seguridad alimentaria de la región.
4. Se ha incluido de forma efectiva y eficiente el análisis temporal, bajo diversos escenarios de cambio que afectan a la ocupación del territorio por los distintos usos, en el proceso de ubicación espacial óptima de usos de suelo bajo una perspectiva sostenible. Se obtienen series temporales de evolución de la distribución espacial de usos de suelo para los escenarios propuestos por el planificador.
5. El análisis temporal horizonte 2050 en la zona de estudio para diversos escenarios de evolución muestra un incremento de superficie en los usos urbano e industrial, a costa de los usos agropecuarios. Con ligeras diferencias entre escenarios de cambio, las ubicaciones espaciales de los usos de suelo, mantienen

6. un patrón parecido, lo que muestra la capacidad de identificación de las mejores ubicaciones para los distintos usos de suelo de la metodología desarrollada en esta tesis, cuando se compara con la posible evolución de la situación actual bajo los mismos escenarios de cambio.
7. La comparación de los mapas de distribución espacial óptima en las condiciones actuales de un territorio con su posible evolución en el horizonte temporal considerado bajo diversos escenarios de tendencia es la base racional para la toma de decisiones en el proceso de planeación espacial.

6.2. Nuevas líneas de investigación derivadas de esta tesis

Tras la investigación realizada en esta tesis, las posibles líneas de investigación a seguir se presentan a continuación:

Ampliar el alcance del análisis de las repercusiones de los usos del suelo sobre el entorno incluyendo las presiones positivas de los mismos, de modo que los mapas de distribución espacial óptima que se obtengan, ubiquen los usos en localizaciones tales que el balance de presiones sobre el entorno resulte nulo o positivo.

Considerar escenarios de cambio climático en la evolución de las distribuciones de usos óptimos de suelo, para poder analizar la influencia de estos cambios (inundaciones y/o sequías frecuentes, entre otros) en la ordenación territorial.

Mejorar la definición de los escenarios de cambio introduciendo modelos de comportamiento sofisticado de los parámetros motores del cambio, para obtener proyecciones cada vez más realistas de la evolución de los usos en un territorio.



Capítulo 7.

Bibliografía

- Aerts J C J H, Eisinger E, Heuvelink G B M, & Stewart, T J (2003). Using linear integer programming for multi site land use allocation. *Geographical Analysis*, 35, 148–169.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements*—FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (Spanish Version); FAO: Rome, Italy, 2006.
- Aller L, Bennet T, Lehr J, Petty R, Hackett G. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrological Settings*; Research Report EPA/600/2-87/035; Environmental Protection Agency (EPA) Research Laboratory: Ada, OK, USA, 1987. Disponible en línea: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20007KU4.PDF?Dockey=20007KU4.PDF> (Consultado el 17 de Octubre de 2015).
- Arthur J L y Nalle D J. (1997). Clarification on the use of linear programming and GIS for land-use modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 11 (4): 397-402.
- Audi *Corporate Responsibility Report 2014*; Audi AG: Ingolstadt, Germany, 2014; Disponible en línea: http://www.audi.com/content/dam/com/EN/corporate-responsibility/audi_cr_report_2014_en.pdf (Consultado el 20 de Mayo de 2016).
- Balling RJ, Brown MR. y Day K. (1999). Multiobjective urban planning using genetic algorithm. *Journal of Urban Planning and Development*, 125 (2): 86-99.
- Bammi D. and Bammi D. (1979). "Development of a Comprehensive Land Use Plan by Means of a Multiple Objective Mathematical Programming Model." *Interfaces* 9(2), Part 2 (February).
- Briassoulis H. (2000). Analysis of Land Use Change: *Theoretical and Modeling Approaches*. In *The Web Book of Regional Science* (www.rri.wvu.edu/web_book). ed. Scott Loveridge. Morgantown, WV: Regional Research Institute, West Virginia University.
- Buchan G. *La sanidad en Inglaterra y sus tendencias actuales*. En Inglaterra. pp. 699-705. Oficina Sanitaria Panamericana.1932.
- Buzai GD. (2010). Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica: sus cinco conceptos fundamentales. (Capítulo 7) Buzai, G.D (Ed) *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*. Universidad Nacional de Luján – GESIG. Luján. Pp. 163-195.
- Buzai G y Robinson D. (2010). *Sistemas de Información Geográfica en América Latina (1987-2010). Un análisis de su evolución académica basado en la CONFIBSIG*. Conferencia magistral en la XII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Heredia 2009. Costa Rica.
- Canales E. (1993). Industrialización y condiciones de vida en Inglaterra: Notas sobre una larga polémica. En *industrialización y condiciones de vida en Inglaterra*. Universidad de Barcelona.
- Cao K, Huang B, Wang S, Lin H. (2012). Sustainable land use optimization Boundary-

- based Fast Genetic Algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36: 257- 269.
- Cao K, Batty M, Huang B, Liu Y, Yu Ly Chen J. (2011). Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. *International Journal of Geographical Information Science*, 25, 1–21.
- Caparros-Midwood, S. Barr, R. Dawson (2015). Optimised spatial planning to meet long term sustainability objectives. *Computers, Environment and Urban – systems*, 54: 154-164.
- Chen Y, Li X, Liu X and Liu Y. (2010). An agent-based model for optimal land allocation (AgentLA) with contiguity constraint. *International Journal of Geographical Information Science*. 24 (8): 1269-1288.
- Chuvieco E. (1993) Integration of linear programming and GIS for land-use modelling. *International Journal of Geographical Information Science* 7 (1): 71-83
- CONAGUA (2012). *Censo de aprovechamientos del acuífero en la parte Libres-Oriental del Estado de Puebla*. 2012. Comité Técnico de Aguas Subterráneas Huamantla-Libres-Oriental-Perote. México.
- CONAGUA (2009). *Manejo integrado de las aguas subterráneas en el acuífero Huamantla-Libres Oriental-Perote, Puebla y Veracruz*. SGT-OCB-PUE-09-P-113-REF-I3. México.
- Cordier M, Uehara T, Weih J. y Hamaide B. (2017). An input-output economic model integrated within a system dynamics ecological model: feedback loop methodology applied to fish nursery restoration. *Ecological Economics*, 140, 46-57.
- Datta D, Deb K , Fonseca C, Lobo F, Condado P. (2006) Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Land-Use Management Problem. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (4): 1-24.
- Dávila R. *Desarrollo Sostenible de Usos de Suelo en Ciudades en Crecimiento, Aplicando Hidrogeología Urbana Como Parámetro de Planificación Territorial: Caso de Estudio Linares N.L.* México. Tesis doctoral, Fac. Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, Mexico, 2011.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 6 (2): 182-197.
- Delgado-Osuna, JA, Lozano M, García-Martínez C. (2016). An alternative artificial bee colony algorithm with destructive–constructive neighbourhood operator for the problem of composing medical crews. *Inf. Sci.*, 326, 215–226
- Dorigo M. and Blum C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 344:243-278.
- Durán A. (2014). Casi listos 7 de los 100 proveedores de Audi en México. Nota periodística del diario “*El Financiero*”. Fecha:14/05/2014. Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/> (Consultado el 24/05/16).

- EPA (2017) Green House Gas Emissions. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> (Consultado el: 12/04/2017).
- Espinel A. (2002). Ciudades y urbanismo en el Egipto antiguo 1. Stud. hist., Ha antig. 20, 2002, pp. 15-38. Ediciones Universidad de Salamanca.
- ETE (1999). Estrategia Territorial Europea. *Hacia un desarrollo equilibrado y sostenible del territorio de la UE*. Acordada en la reunión informal de Ministros responsables de la ordenación del territorio. Postdam. Mayo de 1999. Publicada por la Comisión Europea. Elaborada por el Comité de Desarrollo Territorial.
- FAO (2017). Centro de Noticias. Cambio climático, Hambre y seguridad alimentaria, Pobreza. 13 febrero 2017| Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/02/no-apoyar-a-los-agricultores-frente-al-cambio-climatico-pone-en-riesgo-la-produccion-futura-de-alimentos-fao/> (Consultado el 02/09/17).
- FAO (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención*. Roma. <http://www.fao.org/docrep/016/i2697s/i2697s.pdf>
- FAO (2008). Enduring farms: climate change, smallholders and traditional farming communities. Altieri M, y Koohafkan P. TWN Third World Network. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/docs/Enduring_Farms.pdf (Consultado el 08 de mayo de 2016).
- FAO (2005). *Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra. Conceptos de clasificación y manual para el usuario*. Di Gregorio A. y Jansen L. Roma 2005. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/008/y7220e/y7220e00.htm#Contents> (Consultado el 23 de abril de 2015).
- FAO (2003). *Perfiles nutricionales por países. MÉXICO*
- Feng C.M. and Lin J.J. (1999) Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 91-108.
- Fernández García I, Rodríguez Díaz JA, Camacho Poyato E, Montesinos P (2013). Optimal Operation of Pressurized Irrigation Networks with Several Supply Sources. *Water Resources Management* 27: 2855–2869.
- Fernández García I, Montesinos P, Camacho Poyato E, Rodríguez Díaz JA (2014). Methodology for detecting critical points in pressurized irrigation networks with multiple water supply points. *Water Resources Management* 28 (4): 1095-1109
- Forrester JW. (1969). *Urban Dynamics*. The MIT Press, Cambridge, MA
- Forrester JW. (1961). *Industrial Dynamics*. The MIT Press, Cambridge, MA
- García Morillo J. Rodríguez Díaz JA, Camacho Poyato E, Montesinos P. (2015). Linking water footprint with irrigation management in high value crops. Implications on sustainable irrigation agriculture in environmentally sensitive

areas. *Journal of Cleaner Production* 87:594-602.

- Gaucín D. (2016). Producción y consumo de legumbres. Diario “*El Economista*” México. Fecha: 16/06/2016. Disponible en: <http://eleconomista.com.mx/columnas/agro-negocios/2016/06/16/produccion-consumo-legumbres-ii> Consultado el 17/09/2016
- Global Footprint Network. *Ecological Footprint Atlas 2010*. <http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/publications/>
- Global carbon atlas (2015) <http://www.globalcarbonatlas.org/en/content/publications>
- Goldberg DE. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Boston, MA: Addison Wesley Longman.
- González-Busto B. (1998). *La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación*. Tesis Universidad de Oviedo., España.
- González Perea R, Camacho Poyato E., Montesinos P, García Morillo J., Rodríguez Díaz JA. (2016). Influence of spatio temporal scales in crop water footprinting and water use management: Evidences from sugar beet production in Northern Spain. *Journal of Cleaner Production* 139:1485-1495
- Google (2016). Google Earth. US Dept of State Geographer. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA. GEBCO.Image Landsat/Copernicus.
- Guo HC, Liu L, Huang GH, Fuller GA, Zou R, & Yin YY. (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management*, 61, 93–111.
- Gutiérrez Chaparro J. (2013) La obsolescencia del modelo de atención territorial. Contribuciones desde la teoría de planeación. En: *La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica*. Sánchez Salazar M, Bocco Verdinelli G, Casado Izquierdo J. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México D,F, 2013; pp. 501-520.
- Han. J., Hayashi Y., Cao X., & Imura H. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 133-141.
- Haque A, Asami Y. (2014). Optimizing urban land use allocation for planners and real estate developers. *Computers, Environment and Urban Systems*, 46: 57-69.
- Herbert JV. and Stevens B J. (1960). A model for the distribution of residential activities in urban areas. *Journal of Regional Sciences*. 2, 21-36.
- Hiernaux D. y Torres R E. (2008). “Desarrollo territorial en México: un balance general”, En: Delgadillo, J. (coord.) *Política territorial en México. Hacia un modelo de desarrollo basado en el territorio*, Sedesol/Instituto de Investigaciones Económicas-UNAM/Plaza y Valdés Editores, México, pp. 107-134.
- Hoekstra A Y, Chapagain A. K, Aldaya M M. and M. Mekonnen, M.M. (2011). *The*

Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan.

- Huang K, Liu X, Li X, Liang J, and He S. (2013). An improved artificial immune system for seeking the Pareto front of land-use allocation problem in large areas. *International journal of geographical information science*. 922-946.
- INECC (2013). Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Actualización 2013. México.
- INEGI (2014). Censos Económicos. México.
- INEGI-SFA (2014). Anuario Estadístico del Estado de Puebla. Años: 2012, 2013 y 2014
- INEGI, (2010). XII Censo de Población y Vivienda. México.
- INEGI (2009). Censos Económicos. México.
- INEGI (2004). Censos Económicos. México.
- INEGI (2000a). Cartografía vectorial escala 1:250000. México.
- INEGI (2000b). Base de datos geográficos. Diccionario de datos climáticos (vectorial). Escalas 1:250000 y 1:1000000. México.
- INEGI-UNAM (2000). Inventario Forestal Nacional. Escala 1:250000. México.
- INIFAP (2015) Red de estaciones del INIFAP. Disponible en <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/> (Consultado el 15 de noviembre de 2015)
- Jalem K. (2016). Development of water resources for micro watershed at Chinamushidiwada Village in Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India. *J. Civ. Environ. Eng.*
- Kates RW. (2011). What kind of a science is sustainability science? Proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (49), 19449–19450 [online]. Disponible en: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116097108> [Consultado el 10 de Octubre de 2014].
- Karakostas S. (2015) Multi-objective optimization in spatial planning: Improving the effectiveness of multi-objective evolutionary algorithms (non-dominated sorting genetic algorithm II). *Engineering Optimization*, 47, 601-621.
- Lauf S, Haase D, Kleinschmit. (2012). *Land-use scenario modelling based on human decisions – Combining system dynamics and cellular automata*. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.)
- Laurance W F. M A, Cochrane S, Bergen PM, Fearnside P, Delamônica C, Barber S D'Angelo and Fernandes T.. (2001). The Future of the Brazilian Amazon. *Science* 291: 438-

- Liu X, Ou J, Li X, Ai B. (2013) Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation. *Ecological Modelling*, 257, 11-24.
- Liu Y, Tang W, He J, Liu Y, Ai T, Liu D. (2015) A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory. *Computers, Environment and Urban Systems* 49: 1-14.
- López J E. (2003). *Teorías y enfoques de desarrollo territorial*. Serie Espacio Tiempo y Territorio. Escuela Superior de Administración Pública. Bogotá. Col.
- Ma X, and Zhao X., (2015) Land use allocation based on a multi-objective artificial immune optimization model: an application in Anlu County, China. *Sustainability*, 7: 15632-15651.
- Malczewski J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: Wiley
- Massiris Cabeza A. (2008). Cap. 2 Políticas latinoamericanas de ordenamiento territorial y sus perspectivas en un mundo globalizado. En *El ordenamiento territorial. Experiencias internacionales*. Salinas, E. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad de Guadalajara. México D.F. 2008; pp.53-82.
- Mathews KB, Sibald A, & Craw S. (1999). Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: Integrating geographic system and environmental models with search and optimization algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 23, 9-26.
- Menconi M, Stella G, Grohmann D. (2013). Revisiting the food component of ecological footprint indicator for autonomous rural settlement models in Central Italy. *Ecological Indicators*, 34: 580-589
- Monterrubio A. (2013). *Estado actual del régimen de planeación y ordenamiento territorial metropolitano en México*. Documento de trabajo núm. 151 del Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP). Cámara de Diputados. México D.F.
- Montesinos P, Camacho E, Campos B, Rodríguez JA. (2011). Analysis of virtual irrigation water. Application to water resources management in a Mediterranean river basin. *Water Resour. Manag.*, 25, 1635–1651
- Nyerges T, Roderick M, Prager S, Bennet D, and Lam N. (2014). Foundations of sustainability information representation theory: spatial–temporal dynamics of sustainable systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 28:5, 1165-1185.
- OMS (2014): *Estudio sobre la necesidad de una regulación económica más estricta para revertir la epidemia de la obesidad*. Boletín de la Organización Mundial de la Salud, febrero de 2014.
- ONU, (2017). Centro de noticias de la ONU. 11 abril 2017. *Hambre y seguridad alimentaria* <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/04/riesgo-de-muertes-masivas-por-hambruna-en-el-cuerno-de-africa-yemen-y-nigeria-esta-en-aumento/>

- ONU, (1992). Organización de las Naciones Unidas. Declaración de Río. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo. Río de Janeiro. Disponible en <http://www.wamani.apc.org/docs/dec-rio92.html> (Consultado el 20 oct 2016).
- PED (2011). *Plan Estatal de Desarrollo 2011-2017*. Gobierno del Estado de Puebla, México.
- Pérez-Molina E, Sliuzas R, Flacke J. y Jetten V. (2017). Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: a case study in Kampala, Uganda. 2017. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 53-65.
- OPD (2017) *Autorización de la conformación del Organismo Descentralizado Público (OPD) denominado Ciudad Modelo*. 19 de enero de 2017. Cámara de Diputados del estado de Puebla, México.
- Porta J, Parapar J, Doallo R, Rivera F, Santé I, Crecente R. (2013). High performance genetic algorithm for land use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 37: 45-58.
- PROFEPA (2016). Comunicado BP/1110-16 de la Procuraduría Federal del Protección al Ambiente. 08/12/2016. Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/prensa/ratifica-profepa-clausura-a-banco-de-materiales-petreeos-ojo-de-agua-en-san-jose-chiapa-puebla?idiom=es>
- Riffo L.(2013). *50 años del ILPES: evolución de los marcos conceptuales sobre desarrollo territorial*. Serie Desarrollo Territorial. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, ONU. Santiago de Chile.
- Rodríguez M J. (2000). *Modelos socio-demográficos. Atlas social de la Ciudad de Alicante*. Capítulo 2 Modelos Socio-espaciales. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Departamento de Sociología y Teoría de la Educación.
- Sadeghi SHR, Jalili Kh, Nikkami D. (2009). Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26, 186-193.
- Sanders P. y Sanders F. (2004). Spatial urban dynamics. A visión on the future of urban dynamics: Forrester revisited. Proceedings of the 22nd International of the System dynamics society for the model in Vensim format.
- SAGARPA-SIAP (2015). Sistema de Información Agrícola y Pecuaria. Estadísticas para los años 2004-2014. México. Disponible en: <http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119?idiom=es> (visto el 3 de marzo de 2015).
- SAGARPA-FAO (2012). Subíndice de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero- Metodología de Cálculo. Línea base del programa de sustentabilidad de los recursos naturales. México.
- Sánchez M T, Bocco G., Casado J. 2013. *La política de Ordenamiento Territorial en México: de la teoría a la práctica*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía (IGg) Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental

- (CIGA) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). S y G editores, México.
- SDROT (2016). Secretaría de Desarrollo Rural y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla. Plan Subregional de Desarrollo Urbano Sustentable. Municipios San José Chiapa, Rafael Lara Grajales, Nopalucan, Soltepec y Mazapiltepec. Estado de Puebla, México.
- SEMARNAT (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*.
- SMN (2017). Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA. Base de datos por estación meteorológica. Disponible en: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=178:puebla&catid=14:normales-por-estacion (Consultado el 15 abril de 2017).
- SSAOT-SEMARNAT (2012). Programa de Gestión de Calidad del Aire 2012-2020 del Estado de Puebla. Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento del Territorio, Puebla. México.
- Schlager KJ. (1965). A land use plan design model. *Journal of the American Planning Association*, 31(2), 103–111.
- SMN (2017). Sistema Meteorológico Nacional. Base de datos por estación meteorológica. Disponible en: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=178:puebla&catid=14:normales-por-estacion (Consultado el 15 de abril de 2017)
- Song X, Ouyang Z, Li Y, y Li F. (2012). Cultivated land use in China, 199-2007: Policy development perspectives. *J. Geog. Sci.*, 22(6): 1061-1078.
- Sorensen M, Barzetti V, Keipi K y Williams J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Documento de buenas prácticas. División de Medio Ambiente. Departamento de Desarrollo Sostenible. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington D.C. No. ENV – 109.
- Sterman J D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Mc.Graw-Hill, Irwin, USA.
- Stewart T, Janssen R. y Herwijnen M. (2004). A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers and Operations Research*, 31: 2293-2313.
- Stewart T, Janssen R. (2014). A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems* 46: 25-34.
- Tiebaut Charles M. (1956). “*The Urban Economic Base Reconsidered.*” *Land Economics*, 95-99.
- Troitiño Vinuesa M. Cap.1 Ordenación del territorio y desarrollo territorial: la construcción de las geografías del futuro. En *El ordenamiento territorial. Experiencias internacionales*. Salinas, E. Secretaría de Medio Ambiente y

Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad de Guadalajara. México D.F. 2008; pp.27-52.

- Troncoso R, López J, Mediavilla A. (2012). *Inventario de modelos y modeladores en México relacionados al cambio climático y/o actividades económicas*. Mexico low emissions development program. United States Agency for International Development (USAID), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México (INECC).
- United Nations (1987), *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Document A/42/427-Development and International Co-operation: Environment, available at <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (Consultado el 4 de julio de 2012).
- UN (1998). Population Division. Charting the progress of populations: *Floor Area per Person*.
- UNEP (2014) *Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply*. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. Bringezu S., Schütz H., Pengue W., O'Brien M., Garcia F., Sims R., Howarth R., Kauppi L., Swilling M., and Herrick J.
- UNEP (2002). United Nations Environmental Programme. Online Version of the Article. The Disappearance of the Aral Sea. Vital Water Graphics, an Overview' of the State of the World's Fresh and Marine Waters, 2nd ed. 2002. Available online: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/20624> (Consultado el 9 May 2017).
- USDA (2016). National Nutrient Database for Standard Reference. Available online: <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/beltsville-md/beltsville-human-nutrition-research-center/nutrient-data-laboratory/docs/usda-national-nutrient-database-for-standard-reference/> (Consultado el 10 de Febrero de 2016).
- Zhang H, Zeng H, Jin X, Shu B, Zhou Y. (2016) Simulating multi-objective land use optimization allocation using Multi-agent system- A case study in Changsha, China. *Ecological Modelling*, 320, 334-347.



Anexos

INDICE DE ANEXOS

A.1. Artículo científico publicado en Sustainability.....	114
A.2. Comparativo de renta, HH, CO ₂ equivalente y unidades alimentarias (Gcal) antes y después de la instalación industrial automotriz en el área de estudio.....	115
A.2.1. Modificaciones del ingreso por tipo de uso de suelo; a) Variaciones porcentuales del PIB con la instalación automotriz, b) Proporción de renta antes de la instalación de la industria automotriz, y c) Proporción esperada de renta con la industria automotriz.....	115
A.2.2. Huella Hídrica (HH) en millones de metros cúbicos al año por tipo de uso de a) HH verde y HH azul de cada uso antes de la instalación industrial automotriz, b) Comparación de la HH total con y sin la industria automotriz, y c) Incremento de la HH Azul con la industria automotriz.....	116
A.2.3. Comparativa de Emisiones de CO ₂ equivalente (en miles de toneladas) antes y después de la instalación de la industria automotriz.....	117
A.2.4. Requerimientos alimentarios (en Gigacalorías al año) para la población actual y futura, de acuerdo al consumo calórico por día (promedio nacional de 3.159 kcal y dieta mínima saludable de 2.500 kcal al día por habitante).....	117
A.3. Aporte de calorías (Gcal) de los cultivos en la zona de estudio.....	118
A.4. Factores de aptitud territorial por uso de suelo.....	119
A.5. Índice de accesibilidad.....	120
A.6. Cartografía intermedia para cálculo de la Vulnerabilidad hídrica (DRASTIC)...	121
A.6.1. Profundidad del agua subterránea (D) y Precipitación media (R) en la zona de estudio.....	122
A.6.2. Medio acuífero (A).....	123
A.6.3. Suelos (S) y Topografía (T) del área de estudio.....	124
A.6.4. Zona de saturación intermedia (I) y Conductividad hidráulica (C) del área de estudio.....	125
A.7. Valores de WF, Potencial contaminante y CO ₂ e por unidad de superficie (ha) para el cálculo de la función O ₂	126
A.8. Mapas de los subconjuntos idóneos por tipo de uso de suelo.....	128
A.8.1. Subconjunto idóneo para el uso forestal.....	129

Modelo Multiobjetivo de Asignación Sostenible de Usos del Suelo

A.8.2.	Subconjunto idóneo para el uso pecuario.....	130
A.8.3.	Subconjunto idóneo para el uso agrícola de secano.....	131
A.8.4.	Subconjunto idóneo para los usos urbano e industrial.....	132
A.9.	Mapa de usos de suelo antes de la implantación industrial (Escenario S00).....	133
A.10.	Resumen estadísticas agrícolas de la zona de estudio 2005-2014.....	134
A.10.1.	Resumen secano.....	134
A.10.2.	Resumen regadío.....	135

Anexo A.1.

Artículo científico publicado en *Sustainability*



Article

Multi-Objective Spatial Optimization: Sustainable Land Use Allocation at Sub-Regional Scale

Guadalupe Azuara García ^{1,*}, Efrén Palacios Rosas ², Alfonso García-Ferrer ³ and Pilar Montesinos Barrios ¹

¹ Department of Agronomy, University of Cordoba, Rabanales Campus. Ed. 14071 Córdoba, Spain; pmontesinos@uco.es

² Freelance consultant in computing languages, Cordillera Central 2428, Fraccionamiento Maravillas Puebla Pue Z.C. 72220, Mexico; claepr@hotmail.com

³ Department of Graphic and Geomatic Engineering, University of Cordoba, Rabanales Campus. Ed. Gregor Mendel, Z.C. 14071 Córdoba, Spain; ir1gapoa@uco.es

* Correspondence: es2azgag@uco.es; Tel.: +52-1-276-109-2657 or +34-957-218-514; Fax: +34-957-212-097

Academic Editor: Vincenzo Torretta

Received: 16 February 2017; Accepted: 25 May 2017; Published: 1 June 2017

Abstract: The rational use of territorial resources is a key factor in achieving sustainability. Spatial planning is an important tool that helps decision makers to achieve sustainability in the long term. This work proposes a multi-objective model for sustainable land use allocation known as MAUSS (Spanish acronym for “Modelo de Asignación de Uso Sostenible de Suelo”) The model was applied to the Plains of San Juan, Puebla, Mexico, which is currently undergoing a rapid industrialization process. The main objective of the model is to generate land use allocations that lead to a territorial balance within regions in three main ways by maximizing income, minimizing negative environmental pressure on water and air through specific evaluations of water use and CO₂ emissions, and minimizing food deficit. The non-sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is the evolutionary optimization algorithm of MAUSS. NSGA-II has been widely modified through a novel and efficient random initializing operator that enables spatial rationale from the initial solutions, a crossover operator designed to streamline the best genetic information transmission as well as diversity, and two geometric operators, geographic dispersion (GDO) and the proportion (PO), which strengthen spatial rationality. MAUSS provided a more sustainable land use allocation compared to the current land use distribution in terms of higher income, 9% lower global negative pressure on the environment and 5.2% lower food deficit simultaneously.

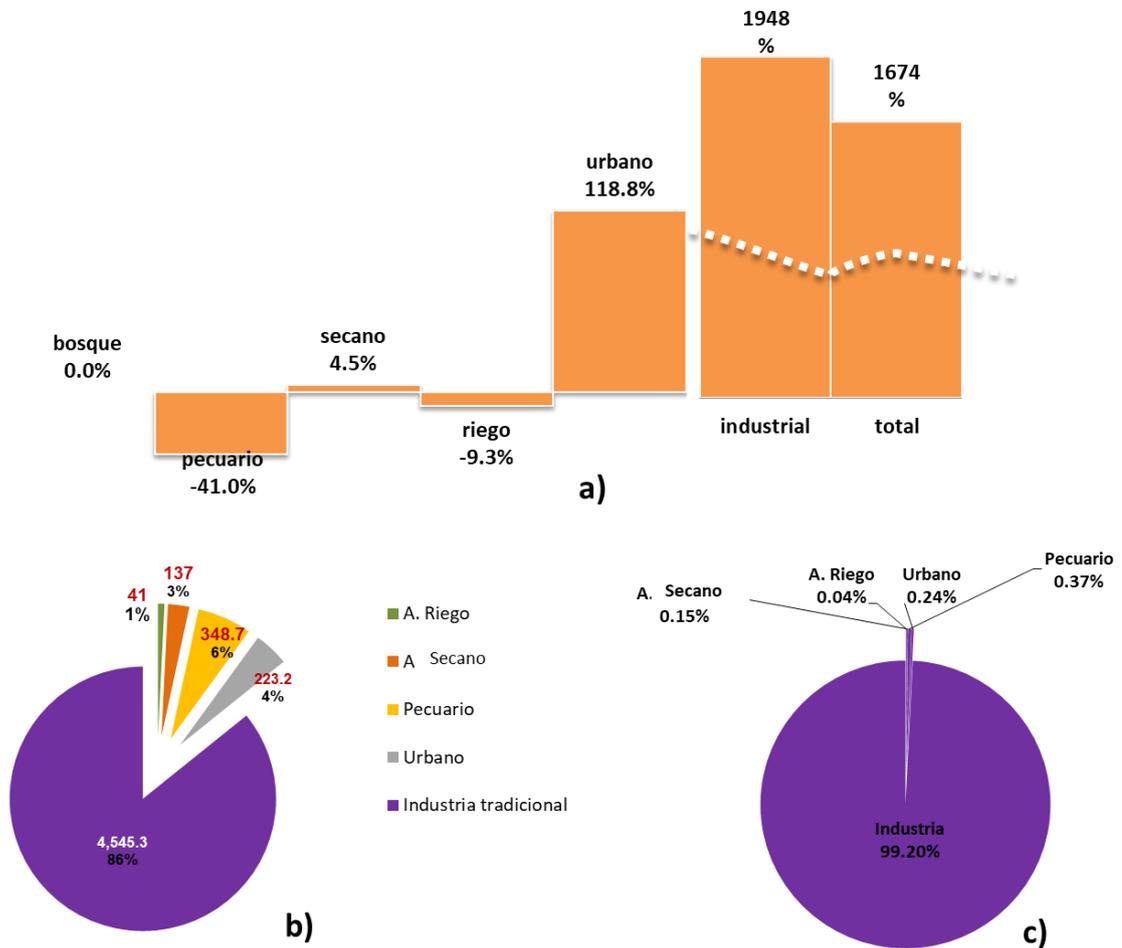
Keywords: evolutionary algorithm; food deficit; MAUSS model; negative pressure on the environment (NPE); sustainable land uses

1. Introduction

Land use allocation has been an inherent practice for developing human productive activities throughout the world. However, the main issue currently faced by spatial planners and society as a whole is that such allocations must be profitable, but preserve life on earth, that is, promote an environmental, social and economic equilibrium. Land use assignments must be sustainable. Thus far, few works have included sustainability criteria and they are practically non-existent in poor and developing countries. Nevertheless, sustainable land use allocations are critical for averting irreversible environmental disasters related to the use and exploitation of territories, as has already occurred in Amazon forest devastation [1] or the disappearance of the Aral Sea [2], and may happen in territories with a strong potential for land use change.

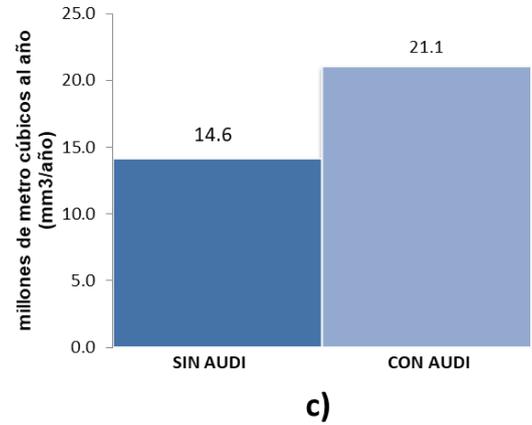
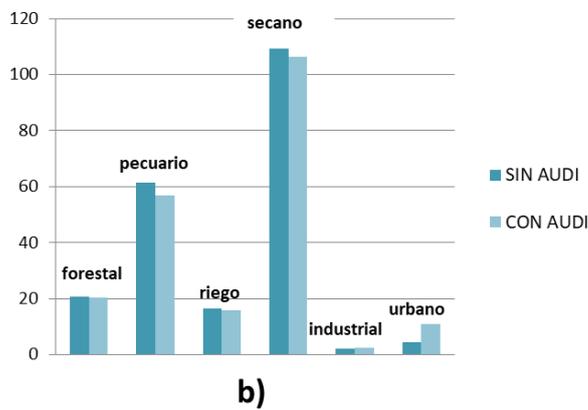
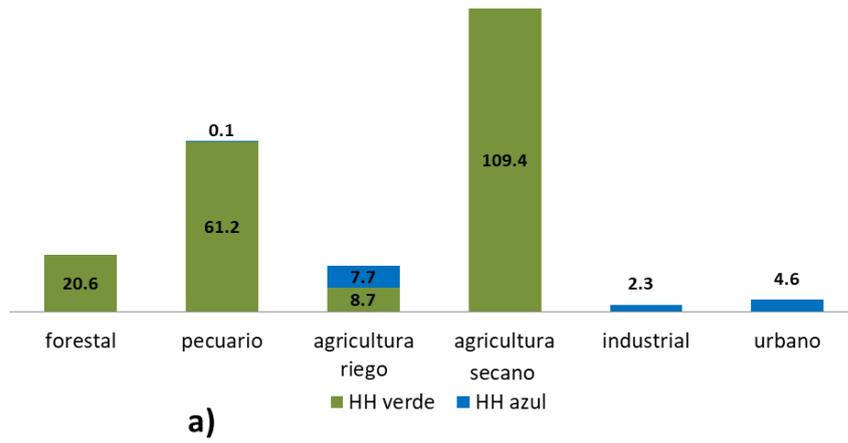
Anexo A.2.

Comparativo de renta, huella hídrica, CO2 equivalente y Gigacalorías antes y después de la instalación industrial automotriz en el área de estudio

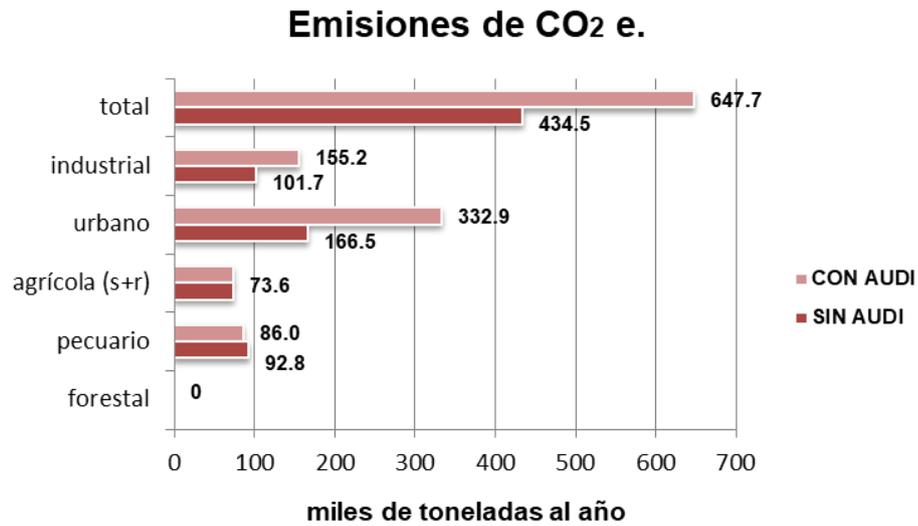


A.2.1. Modificaciones del ingreso por tipo de uso de suelo; a) Variaciones porcentuales del PIB con la instalación automotriz, b) Proporción de renta antes de la instalación de la industria automotriz, y c) Proporción esperada de renta con la industria automotriz.

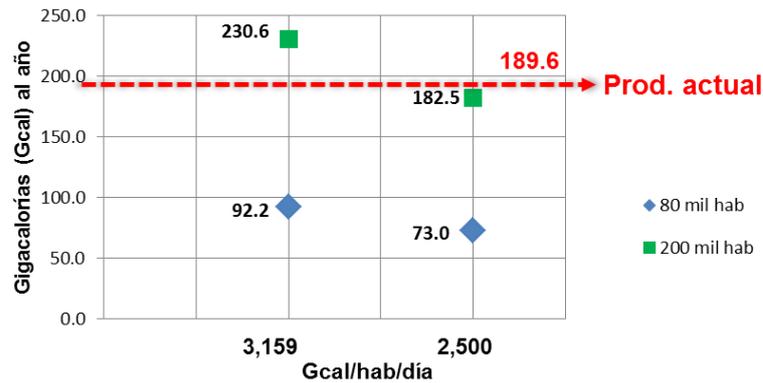
Modelo Multiobjetivo de Asignación Sostenible de Usos del Suelo



A.2.2. Huella Hídrica (HH) en millones de metros cúbicos al año por tipo de uso de: a) HH verde y HH azul de cada uso antes de la instalación industrial automotriz, b) Comparación de la HH total con y sin la industria automotriz, y c) Incremento de la HH Azul con la industria automotriz



A.2.3. Comparativa de Emisiones de CO₂ equivalente (en miles de toneladas) antes y después de la instalación de la industria automotriz.



A.2.4. Requerimientos alimentarios (en Gigacalorías al año) para la población actual y futura, de acuerdo al consumo calórico por día (promedio nacional de 3.159 kcal y dieta mínima saludable de 2.500 kcal al día por habitante)

Anexo A.3.

A.3. Aporte de calorías (Gcal) de los cultivos en la zona de estudio

	cultivo	kilocalorías por 100gr	Producción media anual (%)	Gcal	Contribucion por cultivo (%)
1	amaranto	371	70,0	0,26	0,169%
2	cebada grano	352	3.172,1	11,17	7,274%
3	maíz grano	365	35.110,2	128,15	83,485%
4	trigo grano	340	745,6	2,53	1,651%
5	ciruela	91	65,4	0,06	0,039%
6	durazno	39	129,6	0,05	0,033%
7	manzana	52	2.109,8	1,10	0,715%
8	pera	57	260,8	0,15	0,097%
9	tejocote	87	313,9	0,27	0,178%
10	arvejón	352	6,8	0,02	0,016%
11	calabaza semilla	574	141,7	0,81	0,530%
12	frijol	341	1.194,4	4,07	2,653%
13	haba grano	341	1.062,3	3,62	2,360%
14	brócoli	34	138,3	0,05	0,031%
15	haba verde	81	152,5	0,12	0,080%
16	nopalitos	16	34,3	0,01	0,004%
17	calabacita	17	1.051,8	0,18	0,116%
18	col	24	275,8	0,07	0,043%
19	tomate rojo	18	178,1	0,03	0,021%
20	tomate verde	23	895,1	0,21	0,134%
21	zanahoria	41	1.390,5	0,57	0,371%
	suma			153,50	100,00%

(fuente: elaboración propia con datos de USDA, 2016 y SAGARPA-SIAP 2015)

Anexo A.4.

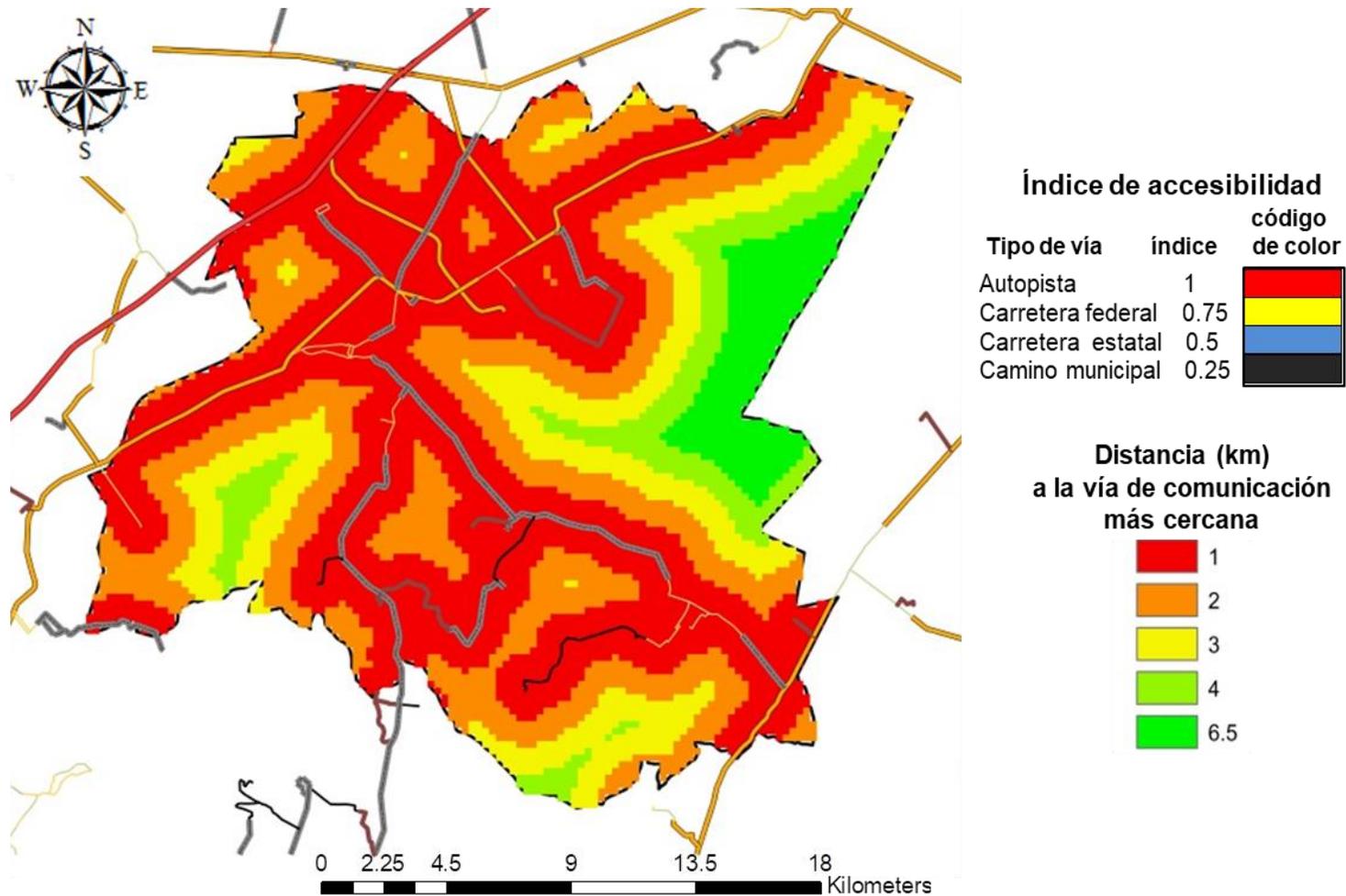
Aptitud Territorial

A.4.. Factores de aptitud territorial por uso de suelo*

	pastizal	secano/regadío
muy alto	1.00	1.00
alto	0.87	0.88
medio	0.70	0.76
bajo	0.50	0.55

*De acuerdo a rendimientos promedio registrados en el período 2004-2014 (SAGARPA-SIAP, 2015)

Anexo A.5. Índice de accesibilidad

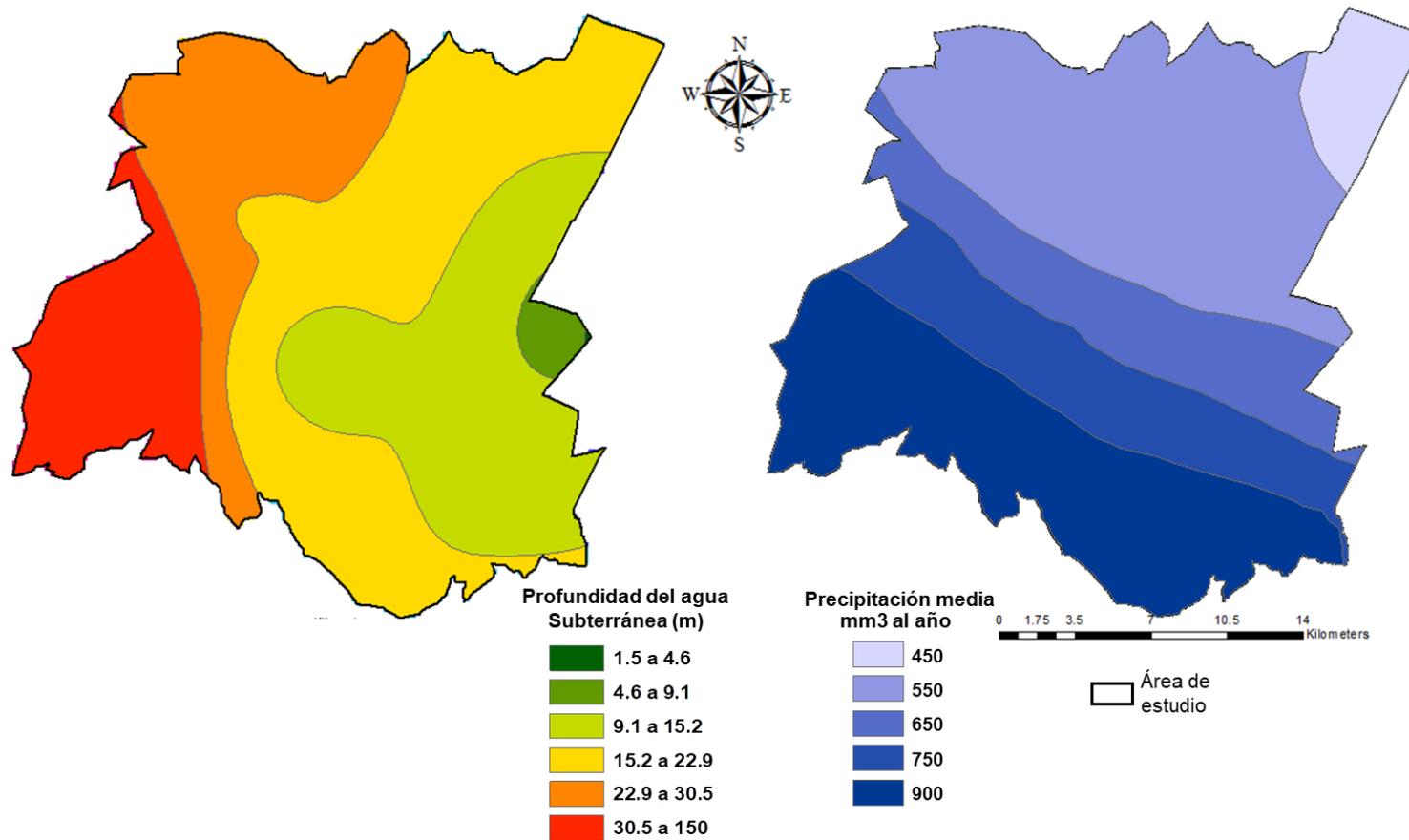


Fuente: elaboración propia con cartografía vectorial INEGI, 2000a

Anexo A.6.

Cartografía intermedia para el cálculo de la Vulnerabilidad hídrica (DRASTIC)

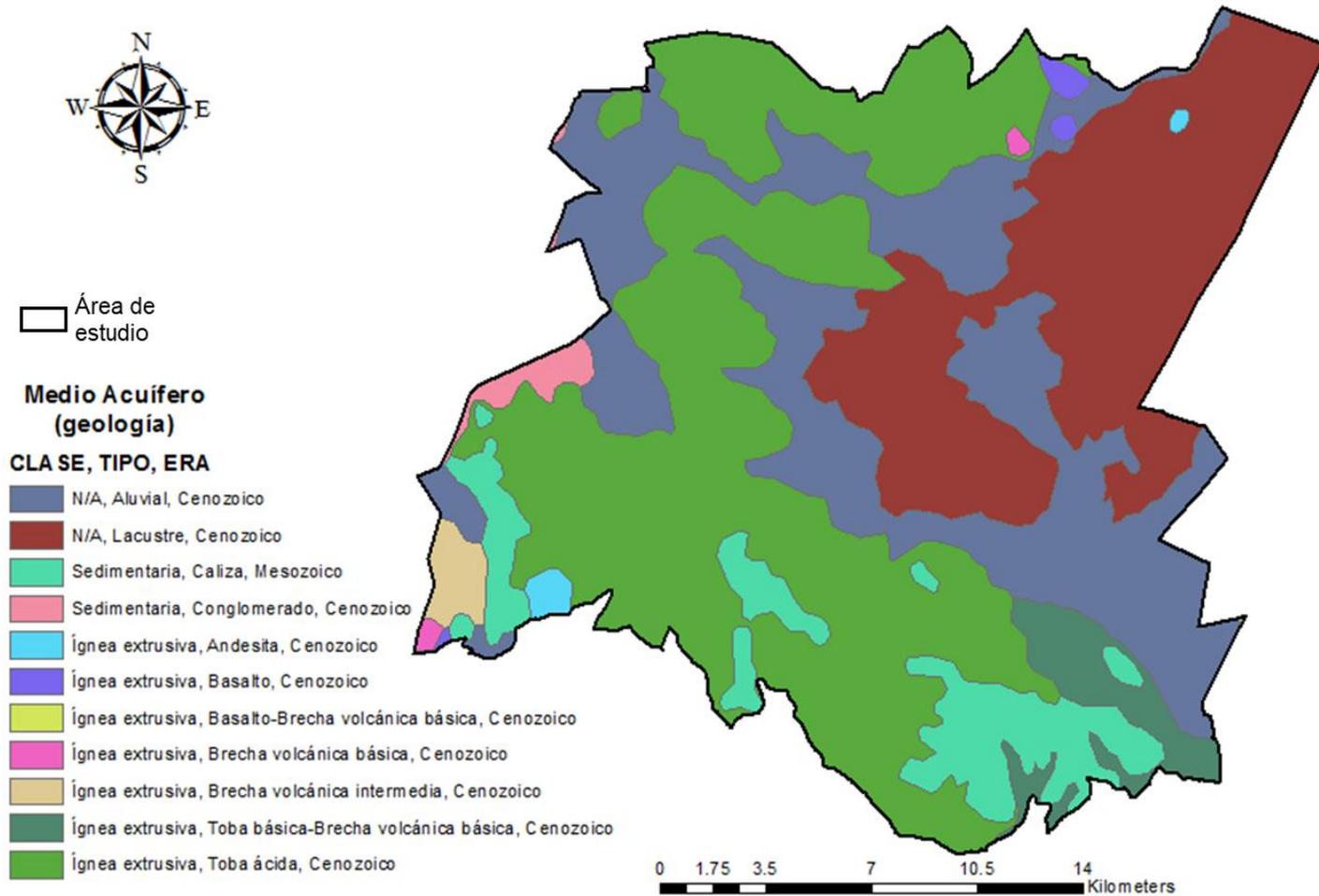
A.6.1. Profundidad del agua subterránea (D) y Precipitación media (R) en la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (2012) y cartografía de INEGI (2000a).

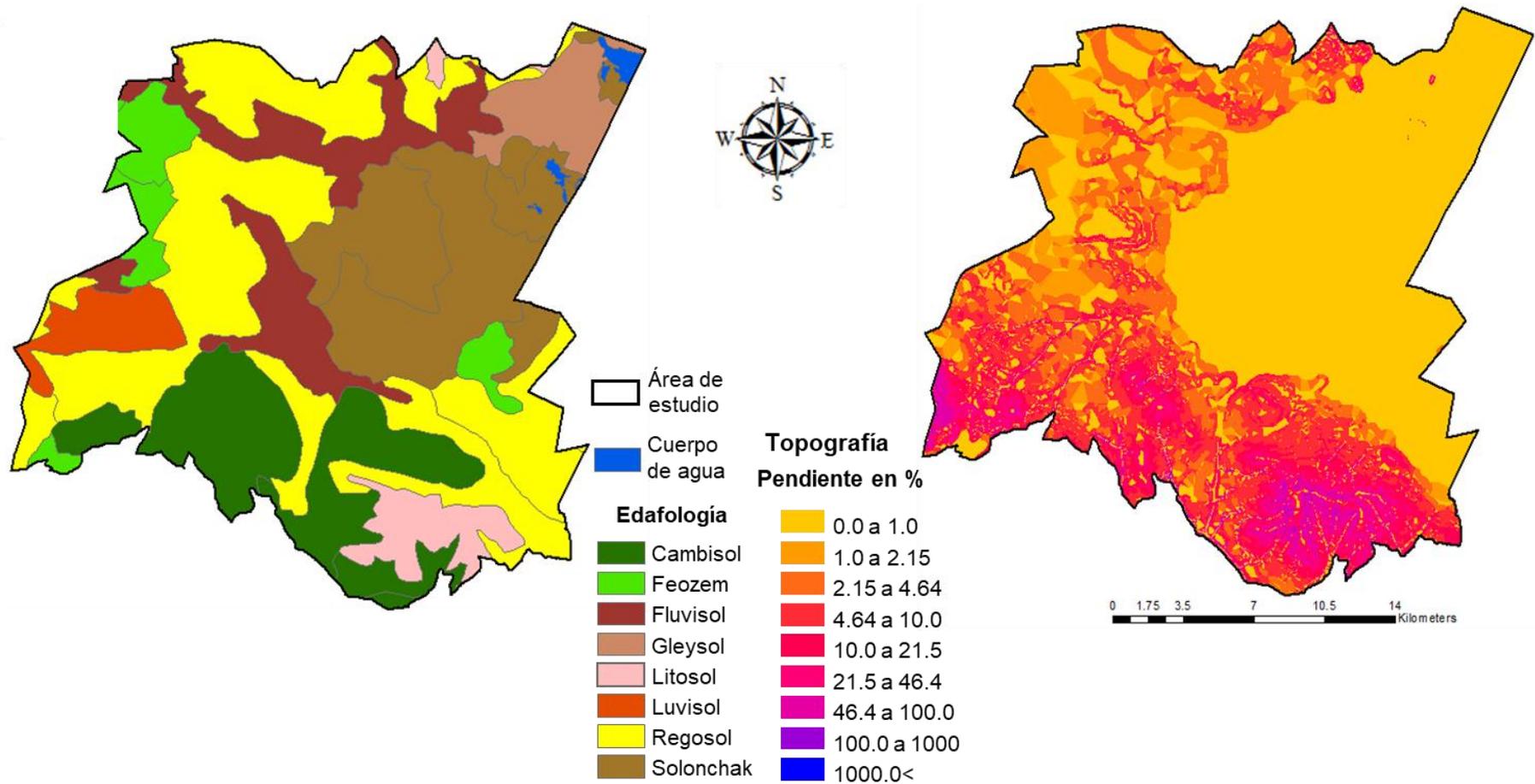
Procedimientos: Interpolación IDW (ArcGis) con niveles piezométricos de CONAGUA (2012)

A.6.2. Medio acuífero (A)



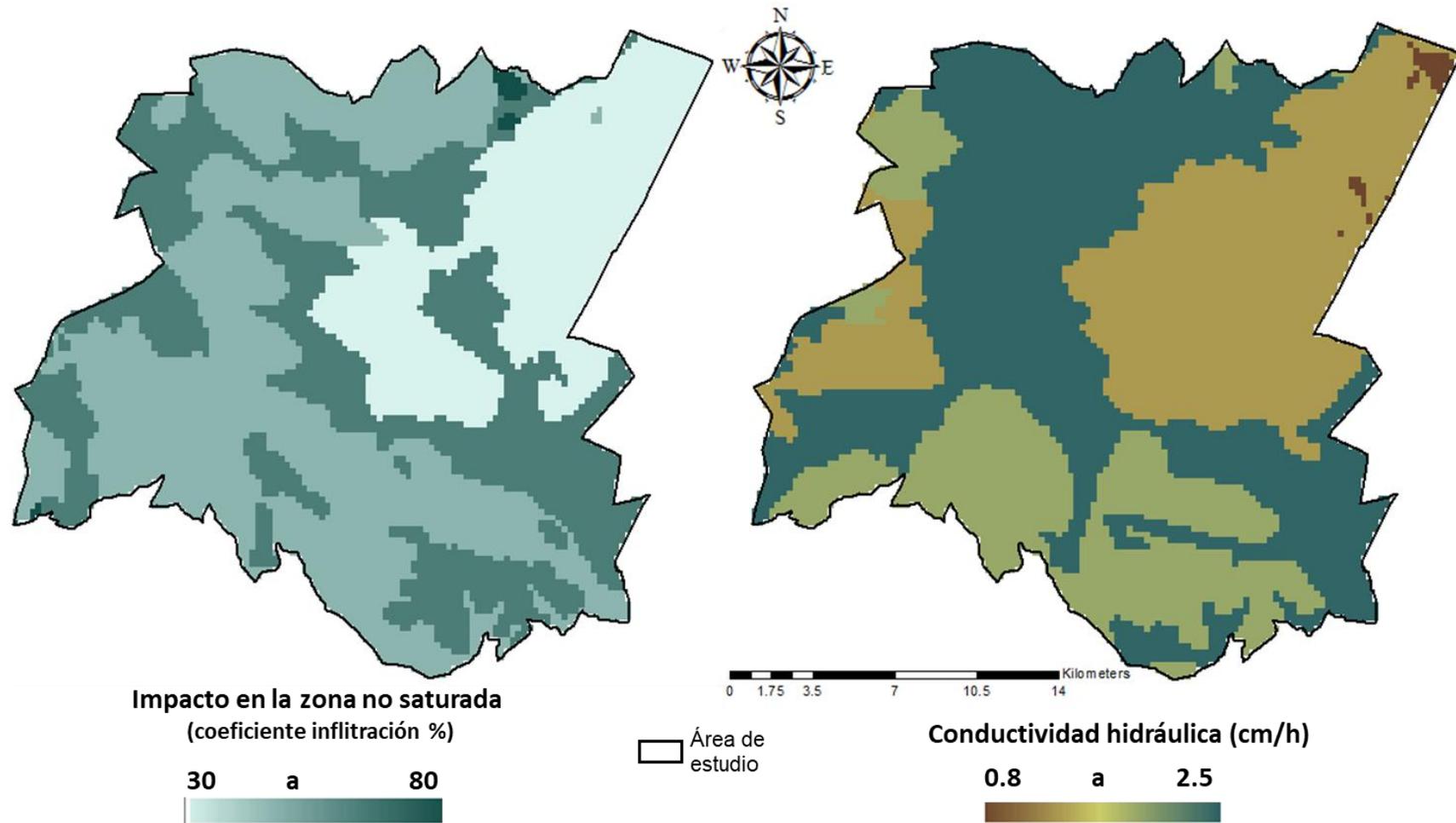
Fuente: Cartografía vectorial escala 1:250.000 del INEGI (2000a).

A.6.3. Suelos (S) y Topografía (T) del área de estudio



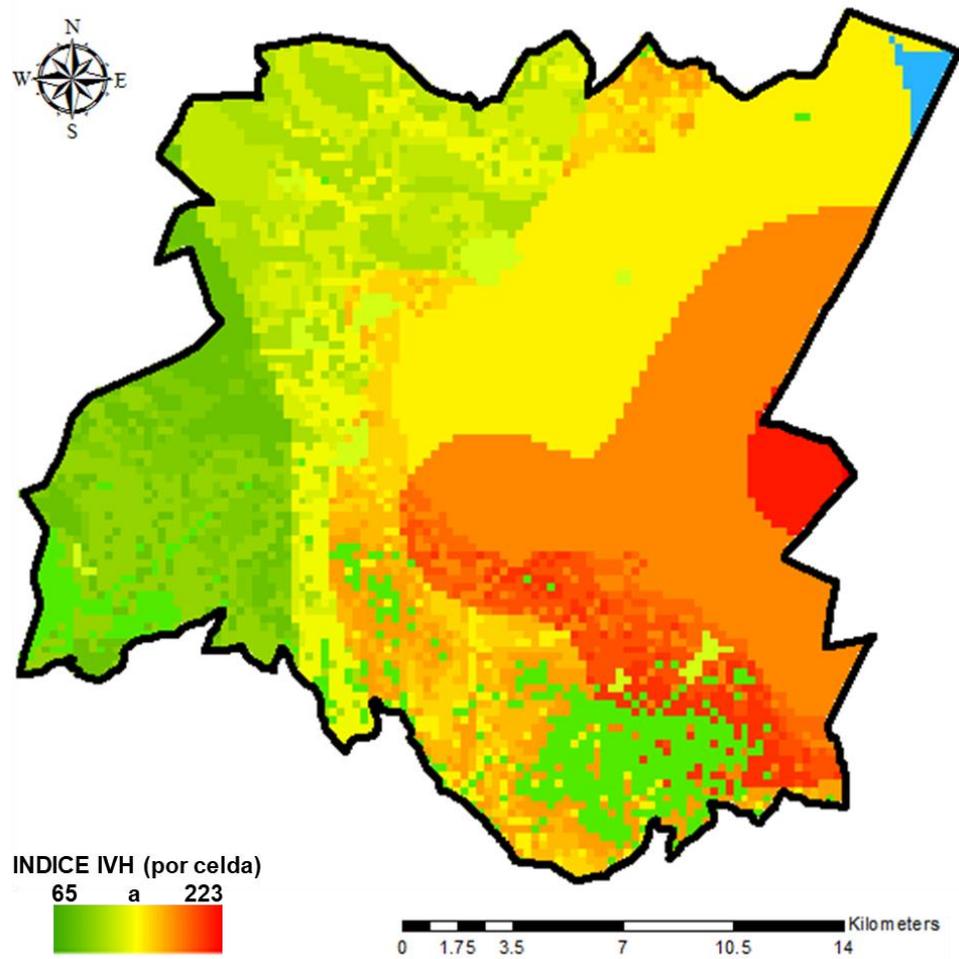
Fuente: Cartografía vectorial escala 1:250.000 del INEGI (2000a). Procedimientos: Construcción del TIN y cálculo de SLOPE (ArcGIS)

A.6.4. Zona de saturación intermedia (I) y Conductividad hidráulica (C) del área de estudio



Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (2012) e INEGI (2000a)

A.6.5. Mapa resultado de Vulnerabilidad hídrica



Fuente: Elaboración propia con información con cartografía INEGI (2000a)

Anexo A.7

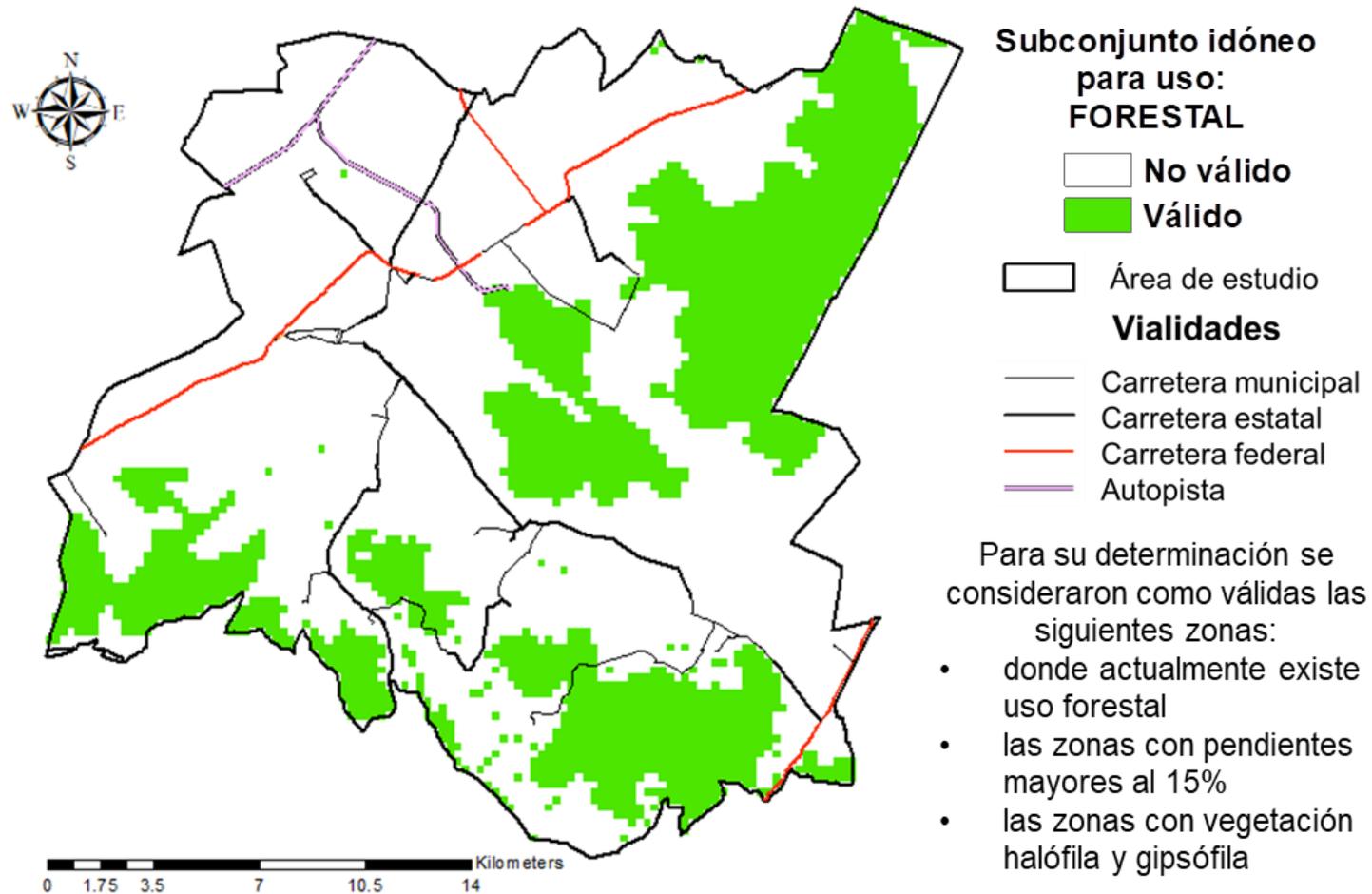
Valores de HH, Potencial contaminante y CO₂e por unidad de superficie (ha) para el cálculo de O2

uso de suelo	HH (m ³ ·ha ⁻¹)	Potencial contaminante (P)	CO ₂ e·ha ⁻¹ (t)
bosque	3424.80	10	0.00
pastizal	5756.77	15	8.72
a. seco	3424.76	50	2.99
a. regadío	6423.35	50	2.99
industrial (automotriz)	258.00	50	42.81
urbano	4392.67	50	197.08
cambio de uso de suelo (CUS)			252.20

Anexo A.8.

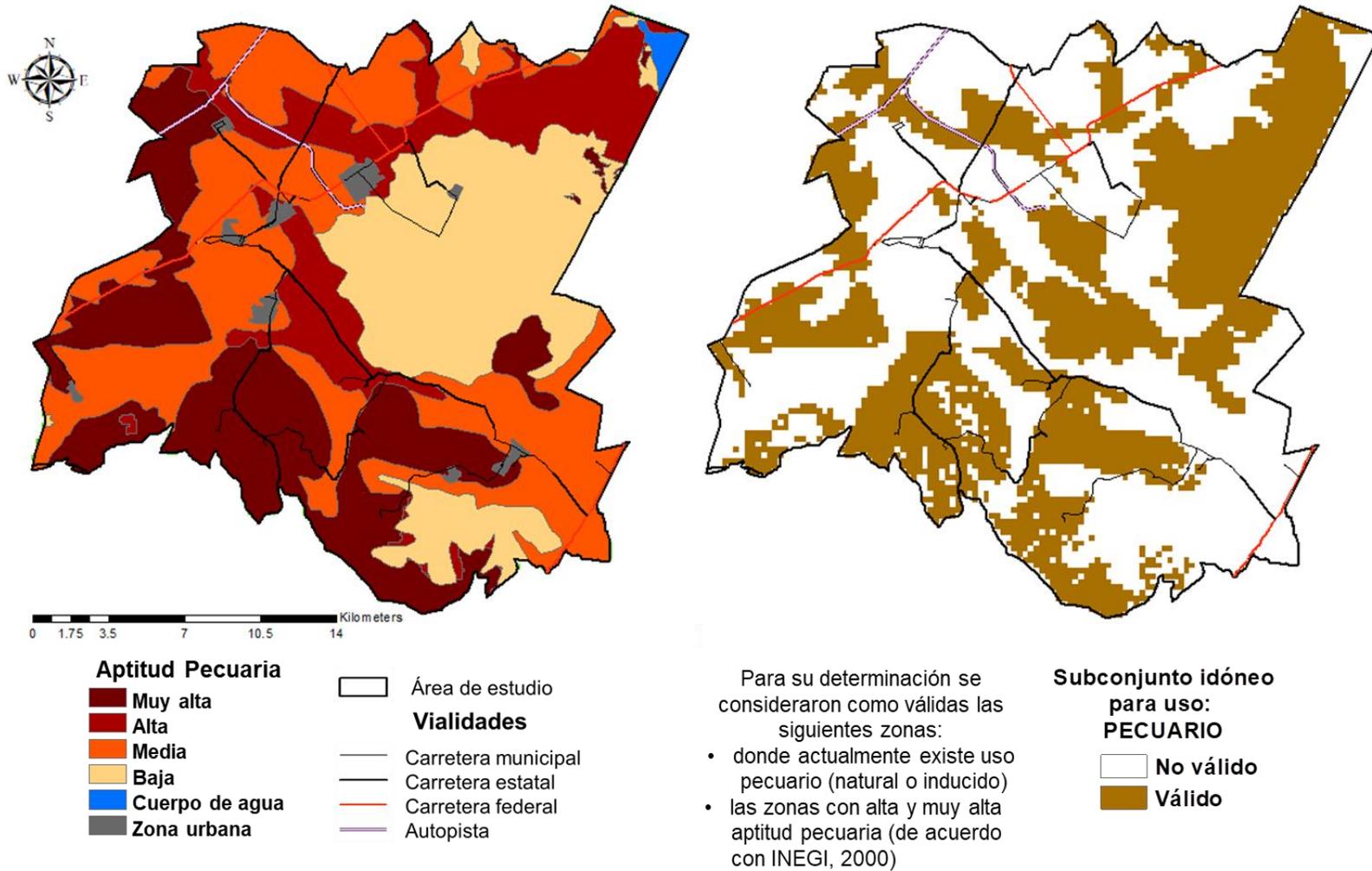
Mapas de los subconjuntos idóneos por tipo de uso de suelo

A.8.1. Subconjunto idóneo para el uso forestal



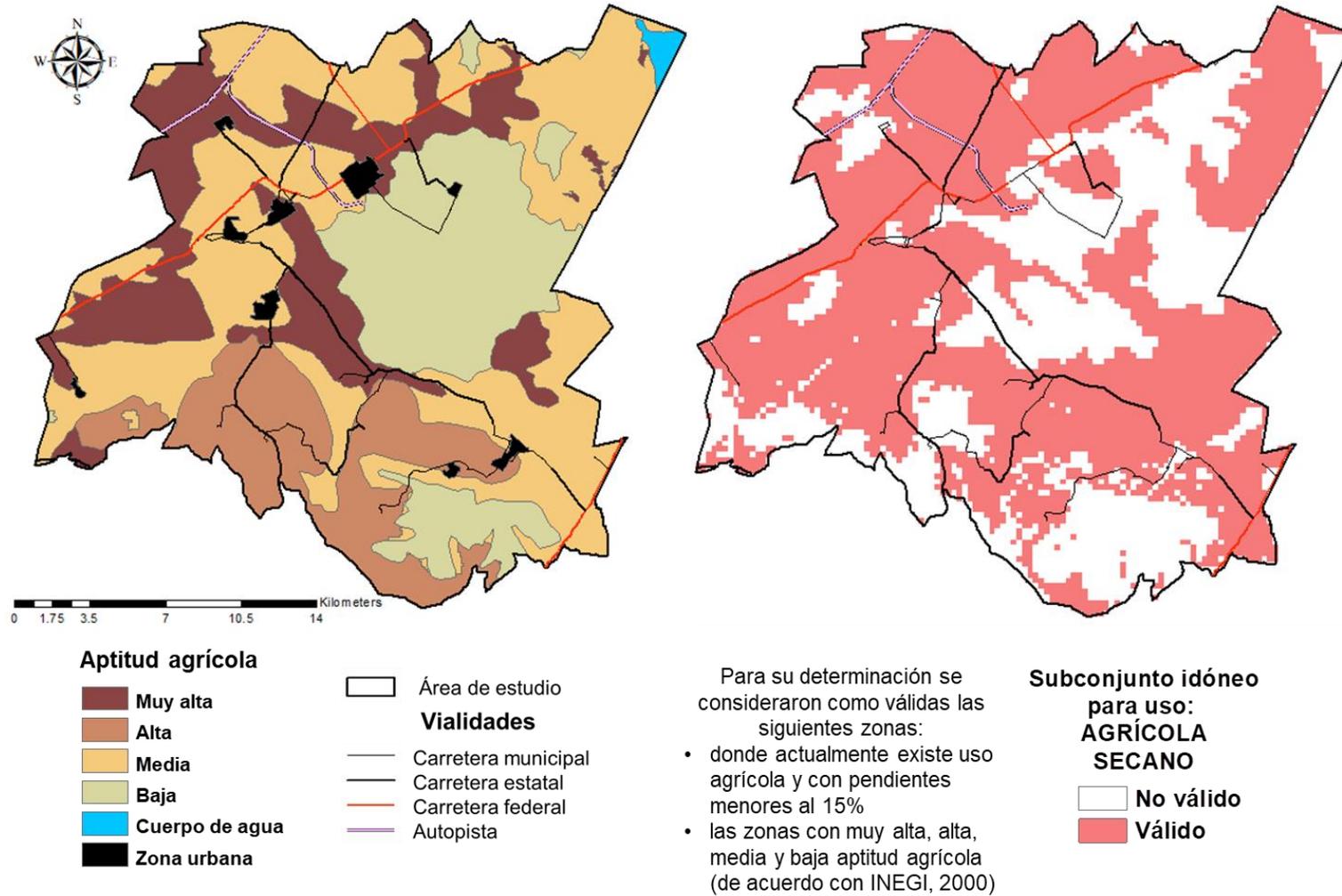
Fuente: Elaboración propia con cartografía INEGI (2000a)

A.8.2. Subconjunto idóneo para el uso pecuario



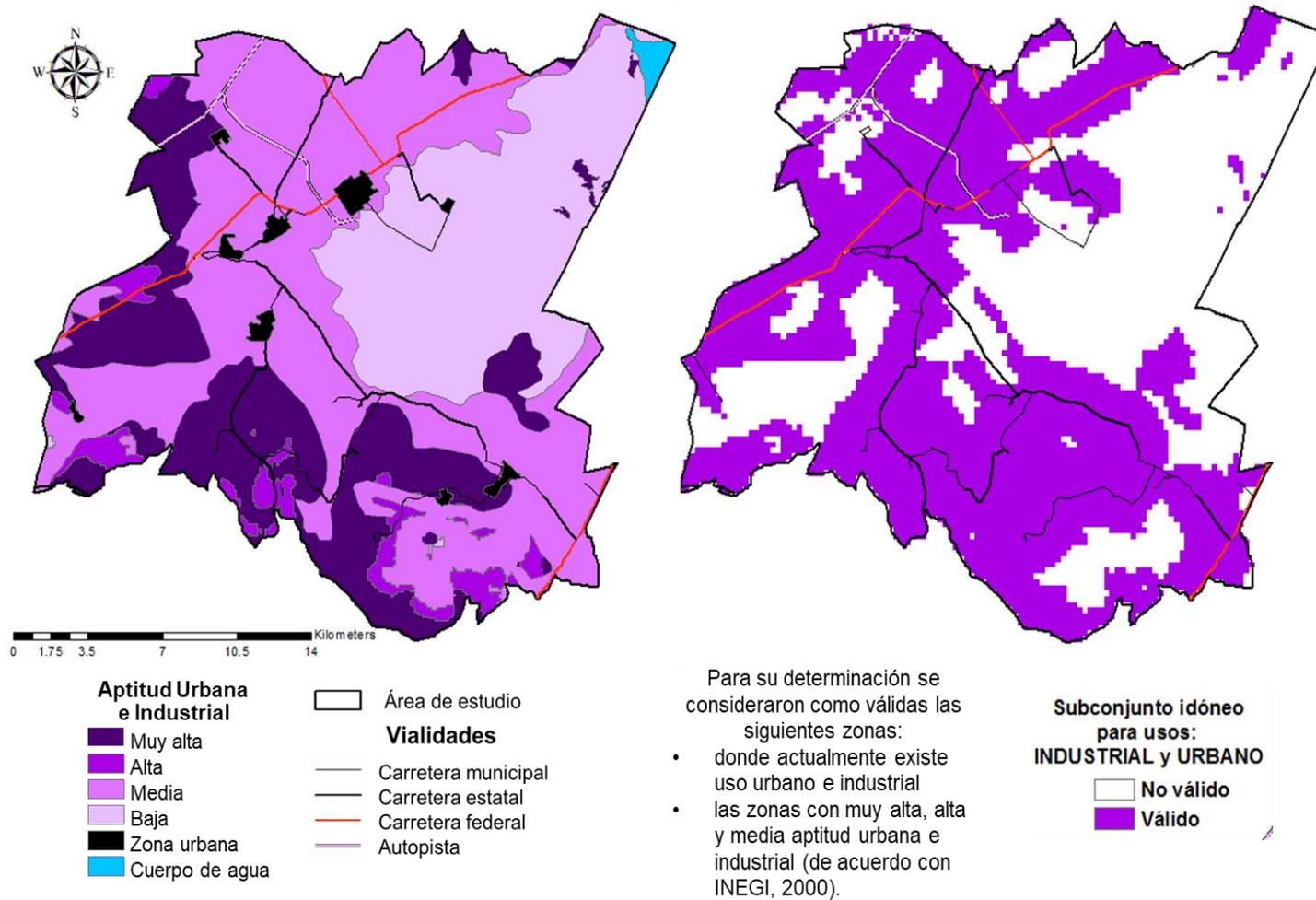
Fuente: Elaboración propia con cartografía INEGI (2000a)

A.8.3. Subconjunto idóneo para el uso agrícola de secano



Fuente: Elaboración propia con cartografía INEGI (2000a)

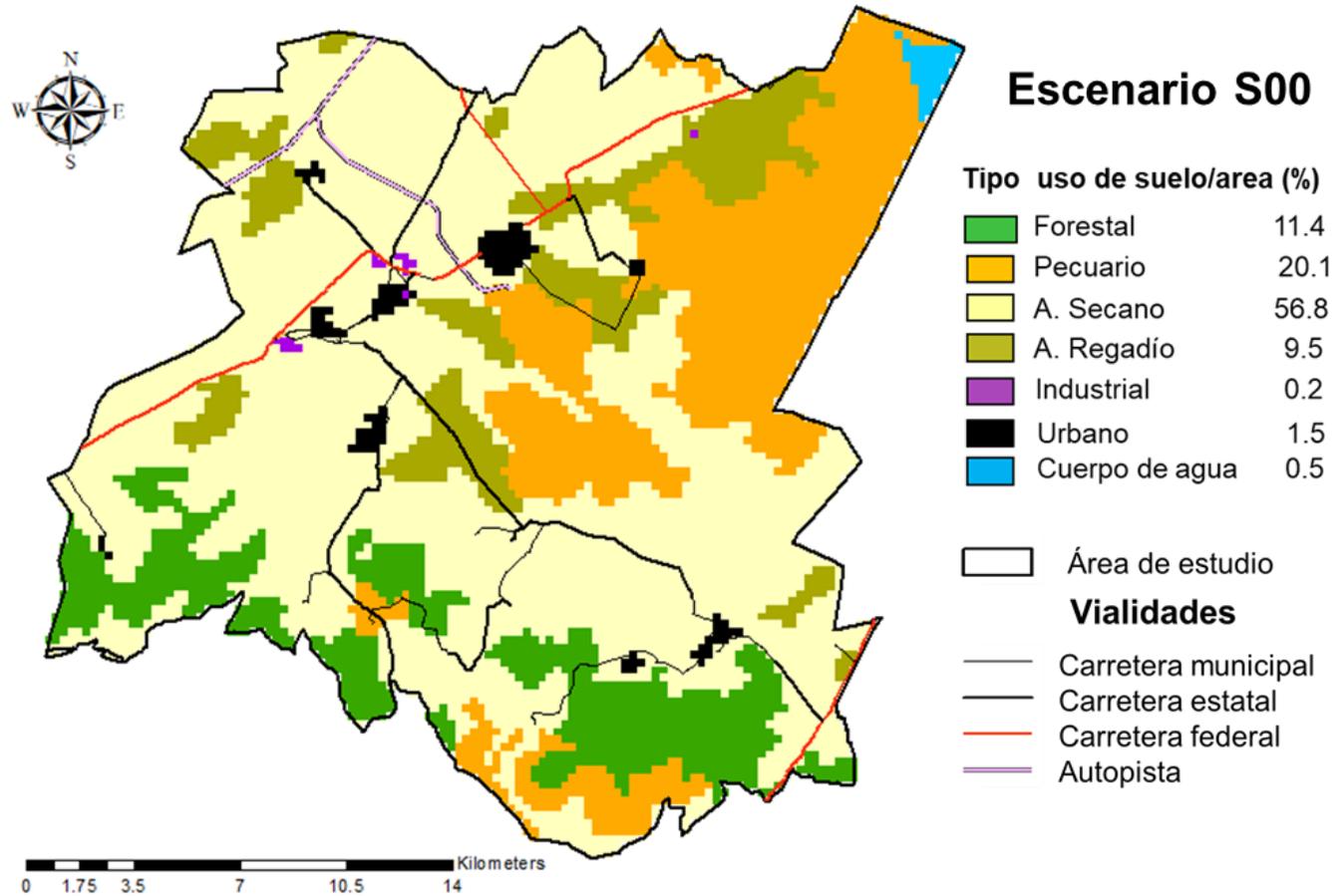
A.8.4. Subconjunto idóneo para los usos urbano e industrial



Fuente: Elaboración propia con cartografía INEGI (2000a)

Anexo A.9.

Mapa de usos de suelo antes de la implantación industrial (Escenario S00)



Fuente: Elaboración propia con cartografía INEGI (2000a)

Anexo A.10.

Resumen estadísticas agrícolas de la zona de estudio 2005-2014

A.10.1 Resumen seco

modalidad	año	Total sup agrícola (s+r)	Total sup agrícola según modalidad	% por modalidad	Sup. Sembrada (ha)	% del total sembrado	Sup. Cosechada (ha)	% del tot cosechado x cultivo	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Precio Medio (\$/t)	Valor Producción (miles de pesos)
secano	2005	21,475.00	19,781.00	92.11%	19,781.00	100.00%	11,715.00	59.22%	24,221.00	2.07	2,062.82	49,963.60
secano	2006	23,803.00	22,591.00	94.91%	22,591.00	100.00%	22,591.00	100.00%	61,367.50	2.72	2,275.67	139,652.20
secano	2007	22,929.00	21,566.00	94.06%	21,566.00	100.00%	21,700.00	100.62%	55,122.00	2.54	2,089.41	115,172.50
secano	2008	22,561.53	21,179.53	93.87%	21,179.53	100.00%	21,009.53	99.20%	68,951.09	3.28	2,347.77	161,881.49
secano	2009	26,478.90	23,920.90	90.34%	23,920.90	100.00%	20,622.85	86.21%	45,272.62	2.20	2,492.42	112,838.59
secano	2010	22,731.00	20,785.00	91.44%	20,785.00	100.00%	17,031.60	81.94%	33,494.74	1.97	3,012.35	100,897.82
secano	2011	26,929.00	24,872.52	92.36%	24,872.52	100.00%	14,944.07	60.08%	26,697.23	1.79	2,679.32	71,530.31
secano	2012	25,328.11	23,074.49	91.10%	23,074.49	100.00%	22,813.74	98.79%	69,758.31	3.06	3,329.28	232,245.14
secano	2013	22,836.25	22,167.25	97.07%	22,167.25	100.00%	21,976.75	99.14%	52,156.56	2.37	3,281.31	171,141.84
secano	2014	30,649.21	28,328.21	92.43%	28,328.21	100.00%	28,087.75	99.15%	64,150.13	2.28	3,350.10	214,909.45
promedio seco		24,572.10	22,826.59	92.90%	22,826.59	100.00%	20,249.23	88.44%	50,119.12	2.48	2,692.05	137,023.29

Fuente: elaboración propia con datos de SAGARPA-SIAP (2015)

Modelo Multiobjetivo de Asignación Sostenible de Usos del Suelo

A.10.2. Resumen regadío

modalidad	año	Total sup agrícola (s+r)	Total sup agrícola según modalidad	% por modalidad	Sup. Sembrada (ha)	% del total sembrado	Sup. Cosechada (ha)	% del tot cosechado x cultivo	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Precio Medio (\$/t)	Valor Producción (miles de pesos)
promedio secano		24,572.10	22,826.59	92.90%	22,826.59	100.00%	20,249.23	88.44%	50,119.12	2.48	2,692.05	137,023.29
regadío	2005	21,475.00	1,694.00	7.89%	1,694.00	100.00%	1,694.00	100.00%	47,325.00	27.94	729.13	34,506.00
regadío	2006	23,803.00	1,212.00	5.09%	1,212.00	100.00%	1,212.00	100.00%	45,493.50	37.54	539.19	24,529.60
regadío	2007	22,929.00	1,363.00	5.94%	1,363.00	100.00%	1,363.00	100.00%	36,330.50	26.65	902.01	32,770.30
regadío	2008	22,561.53	1,382.00	6.13%	1,382.00	100.00%	1,382.00	100.00%	35,706.50	25.84	812.70	29,018.80
regadío	2009	26,478.90	2,558.00	9.66%	2,558.00	100.00%	2,558.00	100.00%	47,077.00	18.40	1,268.68	59,725.50
regadío	2010	22,731.00	1,946.30	8.56%	1,946.30	100.00%	1,946.30	100.00%	45,067.58	23.16	886.07	39,933.15
regadío	2011	26,929.00	2,056.52	7.64%	2,056.52	100.00%	1,974.52	96.01%	42,185.60	21.36	1,396.16	58,898.05
regadío	2012	25,328.11	2,253.62	8.90%	2,253.62	100.00%	2,203.62	97.78%	51,268.80	23.27	1,130.48	57,958.50
regadío	2013	22,836.25	669.00	2.93%	669.00	100.00%	669.00	100.00%	32,587.00	48.71	450.55	14,681.98
regadío	2014	30,649.21	2,321.00	7.57%	2,341.00	100.00%	2,341.00	100.00%	51,956.51	22.19	1,122.14	58,302.50
promedio regadío		24,572.10	1,745.54	7.10%	1,747.54	100.00%	1,734.34	99.38%	43,499.80	25.08	923.71	41,032.44

Fuente: elaboración propia con datos de SAGARPA-SIAP (2015)