

Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México

Environmental Degradation from Land-Cover and Use Change Processes from a Spatial Perspective in the State of Guanajuato, Mexico

Azucena Pérez-Vega,* Héctor Hugo Regil García** y Jean François Mas***

Recibido: 19/03/2019. Aprobado: 18/05/2020. Publicado en línea: 00/00/2020.

Resumen. Se analizaron los cambios de cubierta/uso del suelo en el estado de Guanajuato y se identificaron los procesos de transformación y degradación ambiental. El análisis consideró tres periodos de tiempo: 2002-2007, 2007-2011 y 2011-2014, basados en la cartografía de uso del suelo y vegetación del Inegi. Se utilizaron métodos de evaluación de tasas de cambio, intensidad de cambio y secuencias temporales de las cubiertas del suelo.

Los ecosistemas de ambientes áridos y caducifolios como mezquite (-3.6%), selva baja caducifolia (-2.1%) y bosque de encino (-1.4%) presentaron los mayores porcentajes de intensidad de cambio. La deforestación se redujo a la mitad entre el primer y el último periodo, y afectó los piedemontes y lomeríos. Los procesos de degradación también se redujeron, sin embargo, constituyeron mucho más de la mitad entre el primer y el último periodo.

La mayor intensidad ocurrió durante 2002-2007, seguida de una fuerte reducción en 2007-2011 y, finalmente, en 2011-2014 se presentó un incremento importante de la dinámica, sin alcanzar la intensidad del primer periodo. Las trayectorias de cambio no fueron uniformes en el tiempo, ni entre categorías.

Las cubiertas antrópicas de mayor tasa anual relativa de ganancia fueron los asentamientos humanos establecidos sobre suelos fértiles, así como los pastizales inducidos. Las agriculturas de temporal y riego mostraron muy bajas tasas de cambio relativo pero muy altas tasas de cambio absoluto, entre ellas mantienen secuencias circulares íntimamente ligadas a la disponibilidad de agua subterránea. El aumento de la agricultura de riego se distribuyó espacialmente al noreste del municipio de Dolores Hidalgo y suroeste de San Luis de la Paz durante el periodo 2002-2007, y constituyó el nuevo frente de expansión de ésta en la porción norte del estado. En dicha área la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato reportó un abatimiento del agua subterránea en el acuífero de la cuenca alta del río Laja de hasta 152 m, precisamente para 2002, año de mayor déficit de agua durante el periodo 2000-2016 en este acuífero. El mismo fenómeno se presenta en la porción al sureste del estado, en los municipios de Acámbaro y Santiago Maravatío, en el acuífero de Valle de Acámbaro, donde los niveles de abatimiento al norte del municipio de Acámbaro alcanzaron hasta 90 m. Existe una estrecha relación entre el abatimiento de los acuíferos y el

* Autor de correspondencia. Universidad de Guanajuato, sede Belén, Departamento de Geomática e Hidráulica. Av. Juárez 77, col. Centro, C.P. 36000, Guanajuato, Guanajuato, México. <https://orcid.org/0000-0002-9683-4207>. Email: azup_pvega@hotmail.com

** Universidad de Guanajuato, sede Belén, Departamento de Geomática e Hidráulica. Av. Juárez 77, col. Centro, C.P. 36000, Guanajuato, Guanajuato, México. <https://orcid.org/0000-0002-6960-2718>. Email: hh.regil@ugto.mx

*** Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Exhacienda San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México. <https://orcid.org/0000-0002-6138-9879>. Email: jfmas@ciga.unam.mx

incremento de la superficie de agricultura de riego, la cual ocupa 80% del agua subterránea extraída en Guanajuato.

La entidad es reconocida por contar con una economía pujante, ubicada como la séptima a nivel nacional; sin embargo, el costo ambiental ha sido alto porque es uno de los estados con mayor cubierta natural transformada. Si se consideran los resultados del presente estudio, al parecer la tendencia continúa, lo cual constituye una amenaza para los remanentes de los ecosistemas actuales, en los que, además, serán mermados los servicios ambientales que proveen ante la creciente demanda de la población local, nacional e incluso internacional.

Palabras clave: Intensidad de cambio, secuencias de cambio, abatimientos acuíferos.

Abstract. The present study analyzed land cover/use changes in the state of Guanajuato by identifying transformation and environmental degradation processes since it is one of the states with the largest transformed area since colonial times. It has an extensive plain in the southern portion of vertisols soils, considered the most productive soils in the country. The present work addressed the transformations of land cover in the state of Guanajuato, analyzing three time periods of INEGI land-use and vegetation mapping; 2002-2007, 2007-2011, and 2011-2014. We used methods to assess rates of change, intensity of change, and the trajectories of the change sequences of land covers. The highest annual rates of relative loss and percent intensity of change occurred in arid and deciduous ecosystems such as Mezq -3.6%, VSA SBC -2.1%, BQ -1.4, VSA Mezq -1.3% and Pz nat -1.0% in the first and -1.1% in the third periods, with a sequence of change toward Agri t and Pz ind established on foothills and hills.

INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental es el deterioro del medio ambiente reflejado por el agotamiento de recursos naturales como el aire, el agua, el suelo y la cubierta del suelo, el cual conlleva a la destrucción de ecosistemas y la extinción de la vida silvestre (Semarnat, 2016). Los procesos de degradación ambiental pueden tener un origen natural o ser causados por las actividades humanas (Amestoy, 2001).

Hoy en día, organizaciones internacionales reconocen la degradación ambiental como una de las principales amenazas que afectan el planeta y comprometen la existencia de miles de especies, incluyendo la humana. La actual tendencia hacia al deterioro ambiental obliga a contar con un monitoreo de los recursos naturales para identificar las

The main intensities of change at the interval level occurred during 2002-2007. The anthropic covers with the highest relative annual rate of profit were AH and Pz ind with 1.5%; AH showed very high values of 5.4%, 4.9%, and 11.2% for each period, replacing considerable areas of Agri r on fertile plains land. Agri t and Agri r showed very low percentages of relative rates of change but very high absolute rates of change during the period 2002-2007. A new area of Agri r was developed during this period to the northeast of the municipality of Dolores Hidalgo and southwest of San Luis de la Paz, coinciding with a high subterranean water reduction of up to 152 m. The sequences of change between Agri t to Agri r, later returning to Agri t in some cases, are intimately linked to the availability of groundwater that supplies up to 80% water for irrigation agriculture in the state of Guanajuato. Agri r decreased in area for the last two periods and Agri t loss area in the last period.

Deforestation processes take place on foothills and hills; these have not decreased considerably, as still represent less than half between the first and last periods. Degradation represents more than half of the area in the same periods.

Unfortunately, vegetation recovery processes were reduced three-fold between the last and first periods; these processes developed in foothills and hills, as well as in plains with smaller surfaces.

The state of Guanajuato is acknowledged for having a healthy economy, ranked seventh at the national level; however, the environmental cost has been high, as it is one of the states with the largest transformed cover. The results of this study suggest that this trend will continue, posing a threat to the remnants of current ecosystems given the demand for environmental services to produce supplies for the growing local, national, and even international populations.

Keywords: environmental degradation, change sequence, Guanajuato.

áreas con condiciones críticas de deterioro. El monitoreo y análisis geoespacial de las condiciones de degradación ambiental representa la mejor opción para conocer dichas tendencias en el tiempo y en el espacio, así como establecer estrategias y acciones para mitigarla y revertirla.

La degradación ambiental está ligada a los cambios de uso y cubierta del suelo (CUCS), resultado de las actividades antropogénicas y naturales, las cuales imposibilitan la adecuada utilización o manejo de los recursos naturales (Inegi, 1980). Las principales actividades humanas modernas que modifican las cubiertas naturales son la agricultura y la ganadería (Noble y Dirzo, 1997; Coomes *et al.*, 2008). Estas transformaciones se asocian a procesos de deforestación y fragmentación, lo cual, invariablemente, se traslada en un empobrecimien-

to de los recursos naturales y culturales, con un enorme costo social y económico (Lambin, Turner y Helmut, 2001).

El abordaje y análisis de la degradación ambiental ligada a los CUCS, desde un enfoque geoespacial en tiempo y espacio, permite la comprensión holística del problema para generar estrategias más idóneas, con el fin de mitigar la problemática ambiental que, en el caso de Guanajuato, son apremiantes por los importantes CUCS en la entidad.

El estado de Guanajuato se ubica exactamente en el centro de la República Mexicana; su superficie lo posiciona en el vigésimo segundo lugar en relación con el resto de los estados, sin embargo, ocupa el sexto lugar en cuanto a densidad de población, y constituye un nodo económico que conecta las ciudades más importantes del país: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey.

Las cubiertas originales en Guanajuato han sido transformadas de forma importante desde tiempos coloniales (Pérez-Vega, 2011). Es uno de los estados con mayor proporción territorial con cubiertas antrópicas (57%) representada por agricultura de riego (21.5%), agricultura de temporal (25.7%) y pastizales inducidos (9.7%) (Palacio-Prieto *et al.*, 2000). Tal transformación es consecuencia de un importante desarrollo de la actividad minera durante y después de la Colonia, del desarrollo de la agricultura en suelos con alta fertilidad en la región del Bajío (granero de México) y del despegue estrepitoso del corredor agroindustrial a partir de la década de los treinta.

En la entidad los remanentes de cubiertas de vegetación natural ocupan 39.6% del territorio y son representados por matorrales (14%), pastizales naturales (11.1%), bosques de encinos (9.3%), bosques de pino-encino (2.9%) y bosques de pino (1.9%) (Palacio-Prieto *et al.*, 2000).

Esparza (2012) evalúa los procesos de CUCS en Guanajuato para el periodo de 1979 a 2004 y menciona que los mayores cambios de uso del suelo se presentan en la porción norte del estado. Determina las tasas de cambio más altas para el matorral cracicaule (+21.04%), la agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes (+11.53%), el pastizal cultivado (-10.04%) y los asentamientos humanos (+9.89%).

Por lo expuesto, la intensa transformación de las cubiertas originales, resultado de las actividades humanas, crea una imperiosa necesidad de conservar los remanentes de las cubiertas originales, pues constituyen la única fuente para proveer servicios ambientales en la entidad.

El presente artículo pretende evaluar y analizar la degradación ambiental en el estado de Guanajuato, enfocado en los procesos de cambios de uso y cubierta del suelo, desde una perspectiva espacial, y busca determinar la intensidad y la trayectoria de las secuencias de transformación en los diferentes periodos de tiempo.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Guanajuato se ubica en el centro de la República Mexicana, en la divisoria de dos grandes regiones biogeográficas: Neártica y Neotropical, lo cual significa que presentan ecosistemas con especies de origen evolutivo de ambientes templados y tropicales (Soberón, Halfter y Llorente-Bousquets, 2008)(Figura 1).

Desde el punto de vista fisiográfico, la entidad está conformada por tres provincias:

1. La Mesa Central es una zona serrana al norte que cuenta con 47.6% de la superficie estatal; mantiene una cantidad de lluvia escasa con clima semiárido. La presencia de cubiertas de vegetación original es significativa (IEE, 1999).
2. La Sierra Madre Oriental en la porción noreste representa 8.9% del estado. Esta provincia alberga el capital natural y cultural más importante de la entidad y fue decretada en 2007 como Reserva de la Biosfera de Sierra Gorda de Guanajuato.
3. El sistema Neovolcánico Transmexicano ocupa la porción sur, donde predomina un relieve plano, y abarca 43.4 % del territorio estatal (IEE, 1999). Presenta la mayor precipitación del estado, lo que permite un importante desarrollo agrícola. La porción sur posee una planicie fértil de suelos Vertisoles, considerados los más productivos del país (Torres *et al.*,

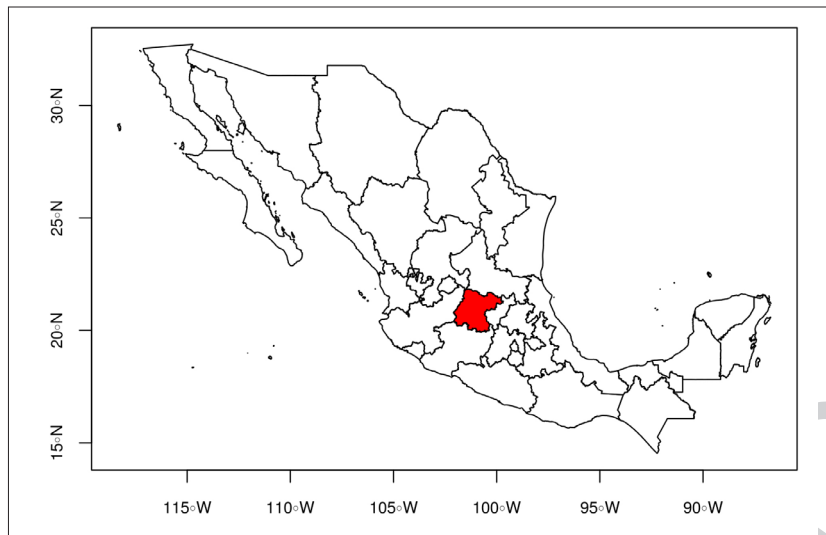


Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Guanajuato. Fuente: Elaboración propia.

2016). Esta fertilidad ha generado las mayores modificaciones en la cubierta del suelo, y paralelamente se han establecido los mayores asentamientos humanos con una densidad de población urbana de 70% (Inegi, 2010).

Guanajuato conforma 43.7% de la superficie de la cuenca Lerma-Chapala, una de las más grandes en dimensión, pero también una de las más deterioradas ambientalmente. Esta cuenca fluye de oriente a poniente y recibe las aguas residuales, domésticas e industriales de las ciudades de Salamanca, Irapuato, Silao y León, así como las tratadas de la refinería de PEMEX de Salamanca.

En lo referente a las actividades primarias, durante las décadas de 1980 a 1990 y de 1990 a 2000 los cultivos, por orden de importancia considerando la superficie sembrada, fueron maíz, sorgo, frijol y trigo. Sin embargo, las superficies sembradas se han reducido considerablemente y después de 2000 comenzó el cultivo del sorgo como el dominante hasta 2013, según reporta el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). De acuerdo con el informe ambiental de Guanajuato en 2008, el sorgo representaba 23% de la producción; en segundo lugar, la alfalfa, con 21%, y el maíz, con 19%, con lo que se pierde la autosuficiencia alimentaria del maíz y se atiende la producción de cultivos de exportación y la demanda del mercado externo.

El sorgo, la alfalfa y el maíz representaron las dos terceras partes de la producción agrícola estatal con casi 6 000 millones de pesos (2001-2002), y ocuparon una superficie de 68% del territorio agrícola en la planicie sur del estado, con poco más de 1.2 millones de ha, con diversos métodos de cultivo, lo que derivó en un crecimiento de la frontera agrícola de poco más de 3 000 ha por año (IEE, 2008).

En lo referente a la actividad ganadera, el coeficiente de agostadero estimado para 2000 fue de 0.58 cabezas/ha, uno de los más altos del país. Esta actividad se desarrolla sin control alguno tanto en áreas de pastizal como en bosques y matorrales (IEE, 2008).

Respecto al manejo de los recursos hídricos, las aguas subterráneas abastecen con 70% las necesidades humanas, sin embargo, 18 de los 20 acuíferos registran una sobreexplotación. La mayor parte del agua es destinada a la actividad agrícola. La disponibilidad de este recurso en el estado está por debajo de la escasez, con 845 m³/hab/año, frente a la media nacional de 3 705 m³/hab/año (IEE, 2008).

El crecimiento económico de la entidad ha generado “estabilidad” en rubros macroeconómicos; sin embargo, sus beneficios no se han reflejado en la disminución de los índices de pobreza y marginación. Por el contrario, el incremento de los

cinturones de marginación caracteriza a las grandes ciudades del estado y el abandono de la población rural se refleja en un incremento de los índices de migración estatal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los insumos utilizados en este estudio fueron los mapas de uso del suelo y vegetación del Inegi, escala 250 000 (Tabla 1). El Inegi actualiza esta cartografía de forma regular, por lo cual las diferentes series son compatibles en escala y en el sistema clasificatorio. Esta misma información se utiliza para los reportes oficiales de México, como las comunicaciones nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Análisis y adecuación de insumos cartográficos

Se revisó la consistencia geométrica de los mapas de las Series V y VI para realizar el procesamiento de intersección. Posteriormente se hizo una revisión contextual en tabla y se encontraron dos tipos de inconsistencias: la primera, la presencia de registros que reportaban transiciones en polígonos menores a una hectárea, lo cual hace suponer que son residuales inherentes al proceso independiente de la generación cartográfica, y la segunda, la presencia de registros que reportaban transiciones que, por contexto, no tienen la posibilidad de presentarse en

los periodos de tiempo estudiados (por ejemplo, un bosque de pino no puede tener una transición hacia un bosque de encino, o un área urbana no puede tener una transición hacia una cobertura de pastizal).

Para el primer caso se seleccionaron todos los polígonos menores a 1 ha, se reetiquetaron y se reportaron como áreas en las cuales no existía transición; para el segundo caso, el contexto marcó el criterio de reetiquetamiento; cuando se reportaba una transición no probable, había dos opciones de etiquetamiento: se reportaba como no transición y se designaba la etiqueta de la fecha más reciente teniendo en cuenta el mejoramiento de procesos e insumos de creación que ésta tendría, o el motivo de la inconsistencia se verificaba espaciotemporalmente por medio de las imágenes multitemporales de alta resolución de Google Earth, además del conocimiento experto en campo.

Las categorías originales del Inegi fueron agrupadas en 31, las cuales permiten obtener la transformación de cubiertas primarias a secundarias en tres niveles de conservación de la vegetación: cubiertas primarias, vegetación secundaria arbórea, arbustiva y herbácea y/o usos antrópicos (Tabla 2).

Cálculo de las tasas de cambio

La tasa absoluta de cambio anual es la diferencia de área entre dos fechas dividida por el número de años entre las dos fechas, se expresa en ha/año. La tasa relativa de cambio fue estimada de acuerdo

Tabla 1. Insumos y programas de computación utilizados en el estudio.

Materiales	Fuente y año	Proceso
Series de Uso del Suelo y Vegetación III, IV, V y VI.*	Inegi (2002; 2007; 2011; 2015).	Mapas de procesos degradación forestal y/o deforestación; decremento e incremento de áreas agrícolas y crecimiento urbano, áreas sin vegetación y recuperación de la cubierta vegetal.
DINAMICA EGO Versión 3.0.17.0	Soares-Filho, Coutinho-Cerqueira y Lopes-Pennachin (2002) (http://www.csr.ufmg.br/dinamica/)	Matrices de cambios y análisis de intensidad de cambios para los tres periodos.
R y TraMiner	Gabadinho et al. (2011)	Cálculos de las tasas y los procesos de cambio, análisis de secuencias y elaboración de gráficas.

*No se consideraron las Series I y II por tener notorios errores geométricos con respecto a las series más recientes.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Agrupación de las categorías originales del Inegi en 2002, 2007, 2011 y 2014.

Tipo de vegetación o uso del suelo	Clave	Abreviatura
Agricultura de humedad anual		
Agricultura de riego anual	1	Agr r
Agricultura de riego anual y permanente		
Agricultura de riego anual y semipermanente		
Agricultura de temporal anual	2	Agri t
Agricultura de temporal anual y permanente		
Agricultura de temporal plantación agrícola permanente		
Bosque cultivado plantación forestal permanente	3	BQ
Bosque de encino		
Bosque de encino-pino (bosque mixto)	4	B mix
Bosque de mezquite	5	Mezq
Bosque de oyamel (bosque coníferas)	6	B Con
Bosque de pino (bosque coníferas)		BP
Bosque de pino-encino (bosque mixto)	4	B mix
Bosque de táscate (bosque coníferas)	6	B Con
Cuerpo de agua	7	CA
Matorral crasicaule	8	Mat crac
Matorral desértico micrófilo		
Matorral submontano	9	Mat subm
Mezquital desértico	5	Mezq
Pastizal halófilo	10	Pz ind
Pastizal inducido		
Pastizal natural	11	Pz nat
Selva baja caducifolia	12	SBC
Sin vegetación aparente	13	SVA
Tular	7	CA
Vegetación halófila xerófila	14	VH
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	15	VSA BQ
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	16	VSA B mix
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino		
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	17	VSA SBC
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	18	VSa BQ
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	19	VSa B mix
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	20	VSa BP
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	19	VSa B mix
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	20	VSa BC

Tabla 2. Continuación.

Tipo de vegetación o uso del suelo	Clave	Abreviatura
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	21	VSa Mat cra
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano	22	VSa Mat Sub
Vegetación secundaria arbustiva de mezquital desértico	23	VSa Mezq
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	24	VSa Pz nat
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	25	VSa SBC
Zona urbana	26	AH
Asentamientos humanos	26	
Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino	27	VSh BQ
Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino-pino	28	VSh B mix
Vegetación secundaria herbácea de selva baja caducifolia	29	VSh SBC
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	30	VSh BP
Vegetación secundaria arbórea de bosque de mezquite	31	VSh Mezq

Fuente: Elaboración propia.

con la ecuación propuesta por la FAO (1996) para calcular tasas de deforestación:

$$t = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde: t es la tasa de cambio, S_1 es la superficie de la cubierta de interés en la primera fecha, S_2 es la superficie en la segunda fecha y n el número de años entre las dos fechas. Esta tasa expresa la proporción de la superficie de la cubierta al inicio del año que cambia durante el éste. Se puede expresar en porcentaje, multiplicando el valor de t por 100. Para ambas tasas, absolutas y relativas, los valores negativos representan una disminución del área de la cubierta, y los valores positivos, un incremento.

Análisis de intensidad de cambio

Aldwaik y Pontius Jr. (2012) proponen un método cuantitativo para evaluar la intensidad de patrones de cambio en tres niveles de análisis: intervalo de tiempo, categoría y transición. En este estudio se utilizó hasta el segundo nivel (categoría); cada uno expone diferentes tipos de información dado el nivel previo de análisis. La intensidad de cambio para cada nivel es comparada con una intensidad

de cambio uniforme, que supone que todos los cambios son estacionarios, y permite determinar si tal intensidad de cambio varía en comparación con la intensidad estacionaria. El nivel de intervalo de tiempo permite identificar qué intervalos son relativamente rápidos o lentos, en términos de cambio, en comparación con el cambio promedio sobre la totalidad del periodo observado. En el nivel de categoría este método permite identificar cuáles categorías son activas o inactivas, es decir, las que presentan más o menos cambios de los que se podrían esperar si éstos fueron distribuidos entre categorías de acuerdo con la superficie de cada una de ellas (Aldwaik y Pontius Jr., 2012).

En el presente estudio este análisis se llevó a cabo con el programa DINAMICA EGO (Soares-Filho, Coutinho-Cerqueira y Lopes-Pennachin, 2002), con base en tres periodos de tiempo: 2002-2007 (Serie 3-4), 2007-2011 (Serie 4-5) y 2011-2014 (Serie 5-6), y las categorías de cubierta más dinámicas.

Procesos de Cambio de Uso y Cubierta del Suelo

Posteriormente, con base en la trayectoria de las transiciones, se determinaron nueve procesos de

cambio o transformación: crecimiento urbano, deforestación, degradación forestal, incremento de áreas sin vegetación, incremento y decremento de agricultura de riego/temporal (cuatro procesos) y recuperación, determinados por las condiciones descritas en la Tabla 3.

Análisis de las trayectorias de los Cambios de Uso y Cubierta del Suelo

Las trayectorias de CUCS se basan en las secuencias de las categorías desde 2002 hasta 2014 y consideran los nueve procesos del punto 4. Se analizaron las secuencias de cubiertas del suelo mediante métodos de análisis de las trayectorias de vida en las ciencias sociales (Abbot, 1983; Mas, Nogueira de Vasconcelos y Franca-Rocha, 2019).

RESULTADOS

Tasas de cambio

Las categorías de uso agropecuario presentaron las tasas absolutas más altas, así como el BQ, el Mat crac y los AH. Las categorías de cubierta natural que obtuvieron mayor tasa anual relativa de pérdi-

da fueron Mat Subm, Mezq, VSA SBC, BQ, VSa Mezq y Pz nat, las de cubierta antrópica Paz ind y AH (Tabla 4).

Análisis de intensidad de cambio nivel intervalo

La intensidad a nivel intervalo de CUCS indica una dinámica muy diferente entre los tres periodos. En el primero (2002-2007) se observan valores altos de intensidad de cambio: el cambio total afecta a más de 8% del área, con un cambio anual de 1.8%, muy por arriba de la tasa de cambio uniforme (línea roja en la Figura 2), por lo cual se determina como una intensidad de cambio rápida. El periodo 2007-2011 mostró valores muy bajos de intensidad (0.2% anual), con intensidad de cambio muy lenta. Finalmente, en el último periodo los cambios no alcanzan la intensidad del primero pero son considerablemente mayores que en el segundo al rebasar la tasa de cambio uniforme (Figura 2).

Análisis de intensidad de cambio a nivel categoría

La Figura 3 representa la intensidad de cambio para las 20 categorías más importantes (por su área total o por porcentaje de cambio) durante los

Tabla 3. Criterios para la determinación de los nueve procesos de CUCS.

Tipos de categoría	Proceso
Cubiertas vegetales primarias o secundarias transformadas en algún uso antrópico.	Deforestación
Cubiertas, de vegetación primaria a cubiertas de vegetación secundaria, o estas últimas a un nivel de degradación mayor; ejemplo de vegetación secundaria arbórea convertida a vegetación secundaria arbustiva.	Degradación
Cualquier tipo de cubierta convertida a actividad agrícola de riego o agricultura de temporal.	Incremento agricultura de riego Incremento agricultura de temporal
Cubiertas de agricultura de riego o temporal convertidas en cualquier otro tipo de cubierta del suelo.	Decremento de agricultura de riego Decremento de agricultura de temporal
Cualquier tipo de cubierta convertida a asentamientos humanos.	Crecimiento asentamientos humanos
Cualquier tipo de cubierta convertida a áreas sin vegetación.	Incremento de áreas sin vegetación
Cualquier tipo de cubierta de vegetación secundaria convertida a cubierta primaria.	Recuperación
Cubiertas de uso antrópico, como agricultura o pastizales, convertidas en cubiertas de vegetación secundaria.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Tasas de cambio absoluta y anual relativa en Guanajuato para los tres periodos. Los valores con negritas representan las tasas anuales relativas de pérdida más altas y los valores con asterisco (*) presentan tasas muy altas debido a que constituyen superficies muy reducidas.

Categoría	Área (miles de ha)				Tasa anual absoluta (ha/año)				Tasa anual relativa (%/año)			
	2002	2007	2011	2014	2002-2007	2007-2011	2011-2014	2002-2014	2002-2007	2007-2011	2011-2014	2002-2014
Agr r	626.3	645.0	642.5	634.2	3 732	-625	-2 759	657	0.6	-0.1	-0.4	0.1
Agri t	826.2	828.6	829.5	814.7	482	225	-4 932	-957	0.1	0.0	-0.6	-0.1
BQ	143.7	140.6	140.4	134.5	-617	-32	-1 993	-766	-0.4	0.0	-1.4	-0.6
B mix	55.7	55.9	55.7	54.4	46	-66	-417	-107	0.1	-0.1	-0.8	-0.2
Mezq	4.0	3.9	3.9	3.5	-21	0	-135	-42	-0.5	0.0	-3.6	-1.1
B con	44.6	43.8	43.8	43.5	-167	0	-83	-90	-0.4	0.0	-0.2	-0.2
Agua	29.7	29.3	29.3	29.3	-70	0	0	-29	-0.2	0.0	0.0	-0.1
Mat crac	167.9	162.5	161.3	158.5	-1 071	-294	-944	-780	-0.7	-0.2	-0.6	-0.5
Mat subm	1.1	0.5	0.6	0.6	-111	24	7	-36	-13.4*	4.3	1.1	-4.2
Pz ind	225.7	213.4	210.0	219.3	-2 455	-860	3 125	-528	-1.1	-0.4	1.5	-0.2
Pz nat	190.8	181.5	181.5	175.4	-1 857	-9	-2 037	-1 286	-1.0	0.0	-1.1	-0.7
SBC	3.6	3.6	3.6	3.6	7	0	0	3	0.2	0.0	0.0	0.1
Sin veg	0.5	0.5	0.5	3.0	1	2	841	211	0.2	0.5	81.8*	16.4*
VSA BQ	3.7	4.1	4.1	5.2	82	0	373	127	2.1	0.0	8.3	2.9
VSA B mix	19.7	3.4	3.4	3.6	-3 259	0	96	-1 334	-29.8*	0.0	2.8	-13.1
VSA SBC	85.1	76.6	76.5	77.4	-1 702	-20	303	-640	-2.1	0.0	0.4	-0.8
VSa BQ	167.5	170.8	168.9	169.9	665	-481	339	202	0.4	-0.3	0.2	0.1
VSa B mix	21.5	37.1	37.3	36.8	3 118	47	-139	1 280	11.5	0.1	-0.4	4.6
VSa B con	23.4	25.8	25.8	26.5	482	0	230	258	2.0	0.0	0.9	1.0
VSa Mat cra	36.8	35.7	36.3	37.8	-219	138	520	85	-0.6	0.4	1.4	0.2
VSa Mat subm	2.0	2.0	2.0	2.1	8	0	32	11	0.4	0.0	1.6	0.6
VSa Mezq	0.4	8.2	8.0	7.7	1 555	-52	-106	604	81.3	-0.6	-1.3	27.4
VSa Pz nat	152.3	148.8	146.6	149.2	-696	-550	860	-258	-0.5	-0.4	0.6	-0.2
VSa SBC	163.8	162.9	162.9	160.6	-176	0	-754	-262	-0.1	0.0	-0.5	-0.2
AH	36.9	48.1	58.3	80.2	2 242	2 552	7 293	3 608	5.4	4.9	11.2	6.7

Fuente: Elaboración propia.

tres periodos observados. Las barras de la porción izquierda representan los cambios absolutos en hectáreas, las barras rojas representan pérdida y las azules, ganancia. Las barras de la derecha indican el porcentaje de cambio anual con respecto a la superficie de la categoría. La línea punteada roja

representa el porcentaje de cambio uniforme. Por ello es posible que altos valores de superficies de pérdidas o ganancias absolutas no correspondan a valores altos de pérdida o ganancia relativa, que se expresan en porcentaje anual.

Se puede observar que los cambios no fueron

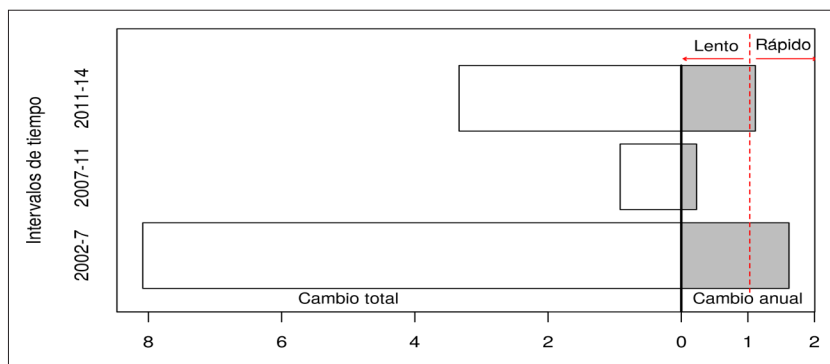


Figura 2. Intensidad de cambio por intervalo de tiempo. La línea roja indica la tasa de cambio uniforme que se hubiera observado si la tasa promedio del periodo 2002-2014 se hubiera mantenido constante a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

uniformes en el tiempo (periodos con más cambio, y en otros, prácticamente inexistentes), ni entre categorías (categorías más dinámicas que otras), y algunas se activaron solamente en un periodo específico (Figura 3). También hay que notar que cambios netos pequeños, por ejemplo, el incremento del área de agricultura de temporal en el primer periodo, es resultado de importantes procesos de ganancia y pérdida. Esta alta dinámica de pérdida y ganancia concierne a la mayoría de las categorías con excepción de los AH.

Con respecto a las áreas de cambios, destacan las mismas cubiertas antrópicas para los tres periodos (Agri t, Agri r y Pz Ind). Para los dos tipos de agricultura las ganancias dominan en el primer periodo, y las pérdidas, en el último, mientras ocurre lo opuesto para el Pz Ind. La intensidad de cambio de la agricultura es cercana al cambio uniforme. En contraparte, el Pz ind es más dinámico de lo que se podría esperar en un escenario de cambio uniforme.

Las intensidades de cambio para las categorías de cubiertas naturales fueron muy diferentes en comparación con las cubiertas antrópicas, ya que presentan menores superficies pero mayores porcentajes de intensidad de cambio.

Las mayores transformaciones para las categorías naturales están representadas por VSa Mezq, VSA B mix, VSa B mix y Mat subm. Estas categorías presentan importantes variaciones en sus tasas de ganancias y pérdidas de un periodo para el otro.

Procesos de Cambio de Uso y Cubierta del Suelo

Entre los nueve procesos de CUCS destaca el crecimiento de los AH. El aumento de las áreas urba-

nas en el último periodo fue el doble del primero (21 951 ha con respecto a 10 435 ha). El segundo proceso que mostró un aumento entre el primer y último periodo fue la pérdida de la agricultura de riego, con 12 116 ha respecto a 13 190 ha del último periodo.

Todos los procesos siguientes representaron disminución de superficie entre el primer y último periodo, como los de deforestación, los cuales se redujeron considerablemente pero todavía constituyen menos de la mitad del primer periodo (20 889 ha con respecto a 53 577 ha del primer periodo). Por su parte, las superficies de los procesos de degradación también se redujeron, sin embargo, constituyeron mucho más de la mitad entre el primer y último periodo (18 506 ha respecto a 27 225 ha).

El incremento de la agricultura de riego fue sustancialmente menor entre el primer periodo y el último, hasta seis veces (4 825 ha respecto a 29 529 ha del primer periodo). Lo mismo sucedió con el incremento de agricultura de temporal, la cual se redujo cinco veces (9 234 ha con respecto a 46 102 ha). Durante el periodo 2002-2007 es evidente una explosión del crecimiento agrícola, tanto de superficies de temporal como de riego.

La pérdida de las superficies de agricultura de temporal presentó una disminución de casi la mitad entre el último y el primer periodo (33 356 ha con respecto a 62 866 ha).

Por último, el único proceso de restablecimiento del medio ambiente que corresponde a los procesos de recuperación de la cubierta vegetal se redujo tres veces entre el último y el primer periodo (20 778 ha

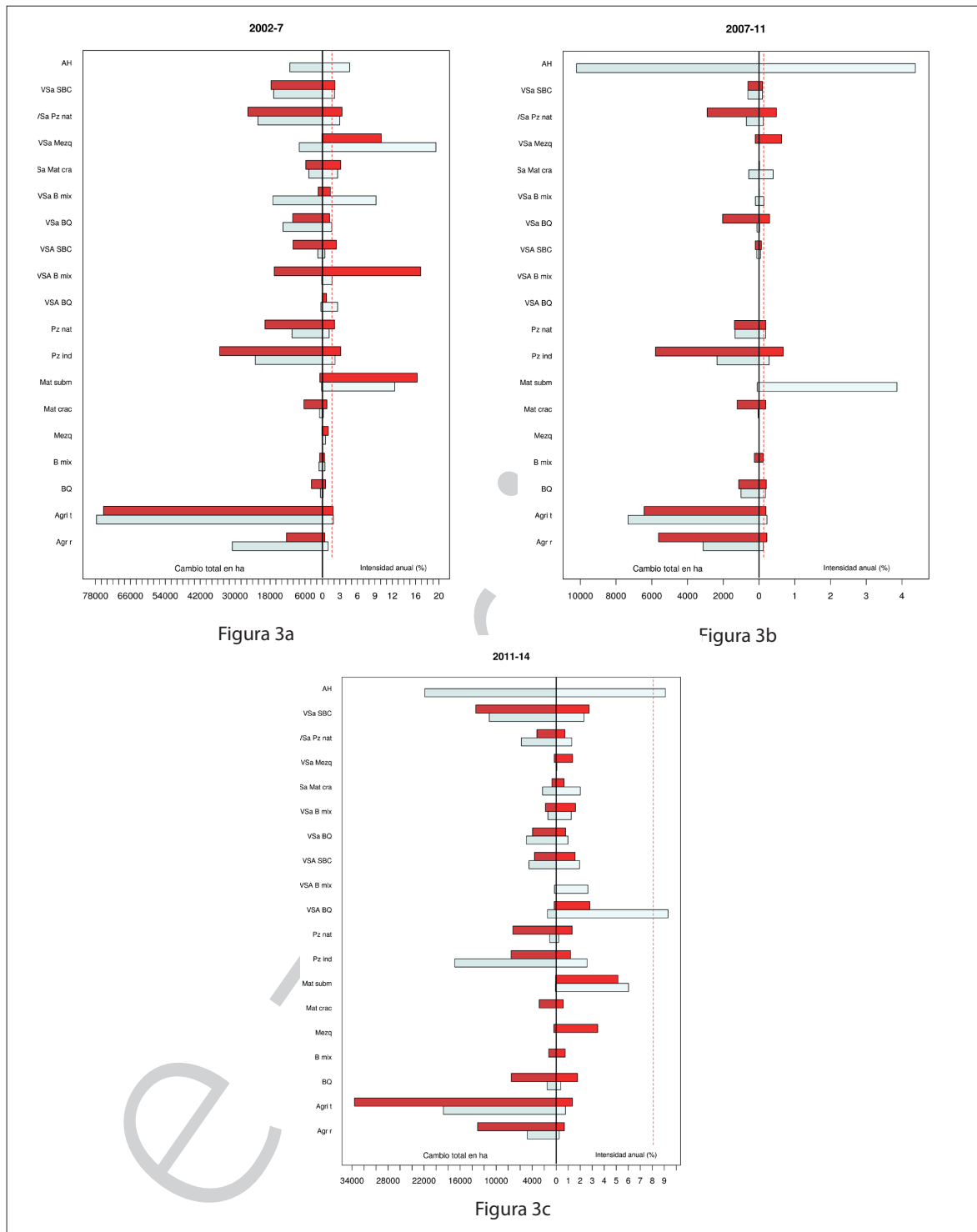


Figura 3. Área y porcentaje de intensidad de cambio por categoría para los tres periodos. La línea roja indica la tasa de cambio uniforme que se hubiera observado si los cambios se hubieran distribuido entre las diferentes categorías de acuerdo con su área. Fuente: Elaboración propia.

respecto al último periodo, con 62 349 ha). Cabe destacar que la superficie de los procesos de recuperación en el primer periodo supera cualquier otro proceso de deterioro ambiental, lamentablemente no se continuó para el segundo y el tercero.

La Figura 4 muestra las secuencias de cambio más frecuentes e indica, de izquierda a derecha, la sucesión de las categorías de cubierta del suelo en las cuatro fechas de observación. La altura de los rectángulos es proporcional al área representada por cada secuencia, las cuales están ordenadas de la más frecuente (abajo) a la menos frecuente. Esta gráfica muestra que cerca de 60% de los cambios están representados por 19 secuencias; en 14 de ellas éstos ocurrieron entre 2002 y 2007, y 5 en el último periodo. La primera secuencia y el cambio más importante es de Agri t a Agri r, la segunda es un proceso de recuperación de Agri t a VSa Pz nat, la tercera es una transformación entre usos antrópicos de Pz ind a Agri t y la cuarta indica un proceso de secundarización (conversión de vegetación secundaria arbórea a arbustiva del B mix). Los cambios de las secuencias 5 (VSa Pz nat), 6 (VSa SBC) y 7 (Pz nat) son procesos de deforestación a Agri t. Esta última es la categoría más activa y no sólo hacia procesos de deforestación, sino también de recuperación de Agri t a VSa SBC y Pz nat. Se presenta este mismo análisis para los procesos de cambios de mayor importancia (Figuras 5 a 11).

DISCUSIÓN

El análisis de los procesos de transformación del uso/cubierta del suelo en el estado se basó en la cartografía de uso del suelo y vegetación del Inegi; cabe mencionar que los datos de este instituto no fueron validados en campo, ni tampoco los resultados de los cambios. Sin embargo, la cartografía fue revisada por expertos de las cubiertas del suelo estatal, y cuando había errores de atributo y geometría, fueron corregidos. No obstante, persiste una cierta cantidad de errores que, sin duda, afectan en cierta medida las estimaciones de cambio, sobre todo a escalas detalladas. A pesar de estas limitaciones, estimamos que las bases de datos de las series del

Tabla 5. Áreas involucradas en los procesos de Cambio de Uso y Cubierta del Suelo.

Proceso	Superficies (ha)		
	2002-2007	2007-2011	2011-2014
Recuperación	62 348	3 007	20 778
Crecimiento urbano	10 435	10 003	21 951
Deforestación	53 577	5 476	20 889
Degradación forestal	27 225	2 634	18 506
Incremento de áreas sin vegetación	0	8	2 436
Incremento de agricultura de temporal	46 102	5 148	9 234
Pérdida de agricultura de temporal	62 866	6 147	33 356
Incremento de agricultura de riego	29 529	3 137	4 825
Pérdida de agricultura de riego	12 116	5 626	13 190

Fuente: Elaboración propia.

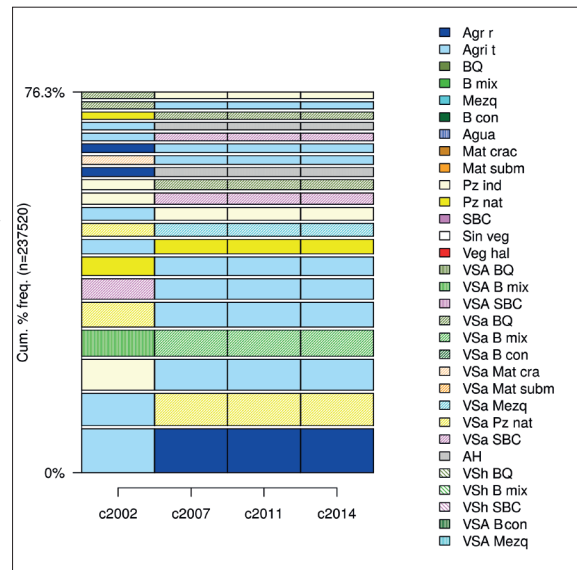


Figura 4. Secuencias de cambio más frecuentes en Guanajuato (2002-2014). Fuente: Elaboración propia.

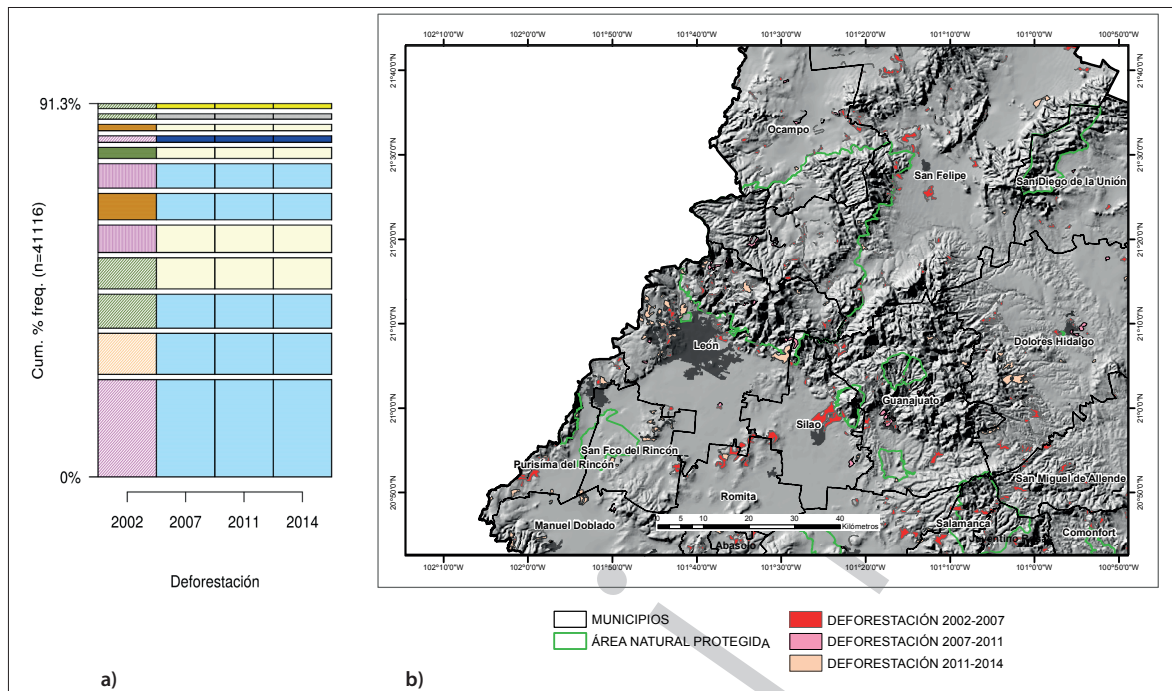


Figura 5. a) Secuencias de cambio de procesos de deforestación sobre las SBC, Mat cra, BQ primarios y secundarios hacia Agri t o Pz ind y, en menor medida, a AH y Agri r (5a), y b) su distribución espacial en el centro-occidente de Guanajuato, cercano a la ciudad de León. Fuente: Elaboración propia.

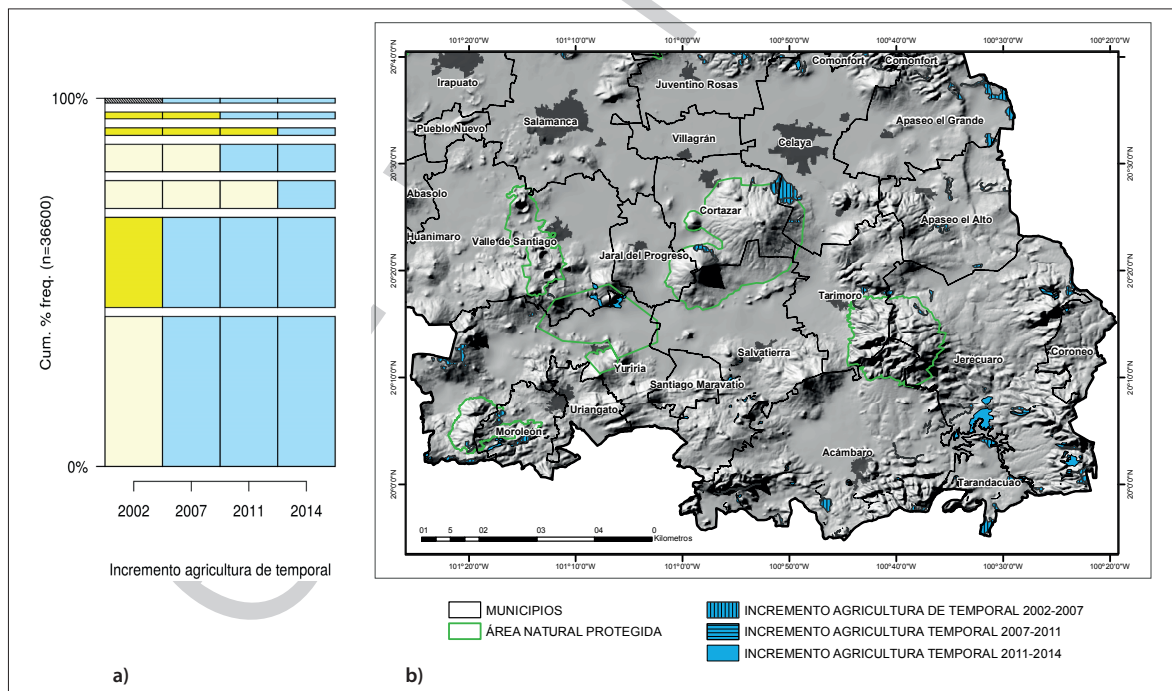


Figura 6. a) Secuencias de cambio en el incremento Agri t sobre el Pz ind y Pz nat, y b) su distribución espacial entre los cerros de El Culiacán-La Gavia y la ciudad de Celaya y la porción sureste del estado. Fuente: Elaboración propia.

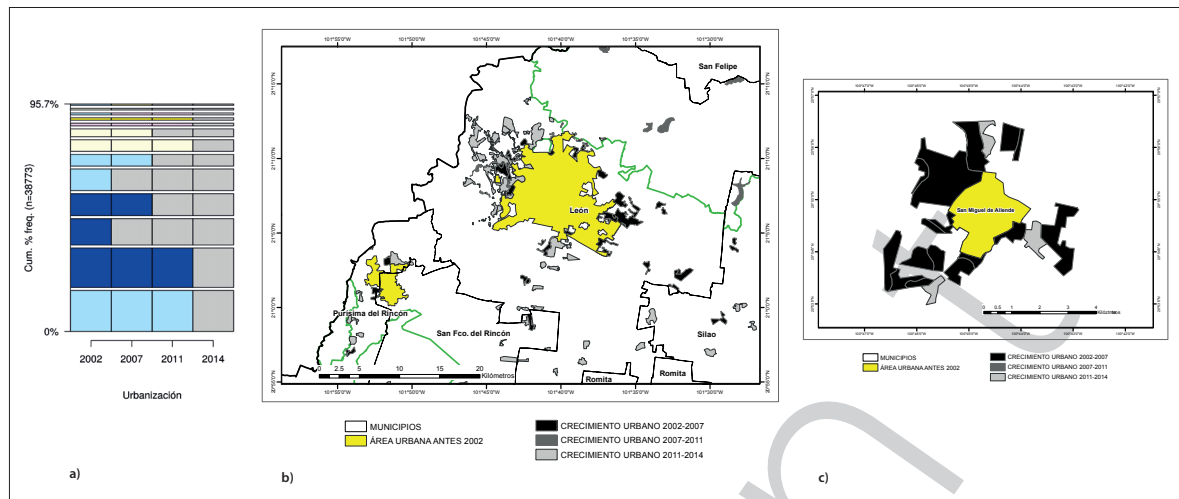


Figura 7. a) Secuencias de cambio de los procesos de urbanización sobre cubiertas de Agri r, Agri t y, en menor medida, en Pz ind, VSa SBC y Pz nat, así como b) su distribución espacial en las periferias de las ciudades de León, y c) San Miguel de Allende. Fuente: Elaboración propia.

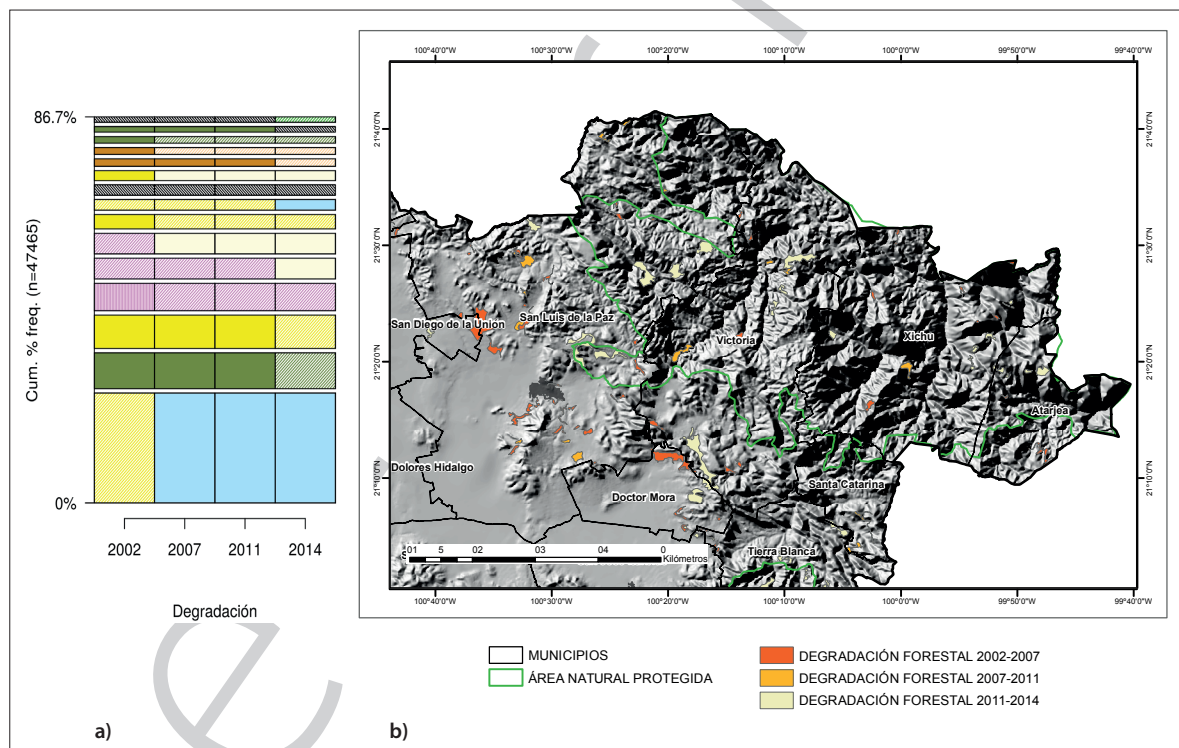


Figura 8. a) Secuencias de cambio de degradación de los VSa Pz nat, BQ, SBC y MC, convirtiéndose en áreas agrícolas o a una secundarización de las cubiertas primarias, y b) su distribución espacial en la porción este de la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda de Guanajuato. Fuente: Elaboración propia.

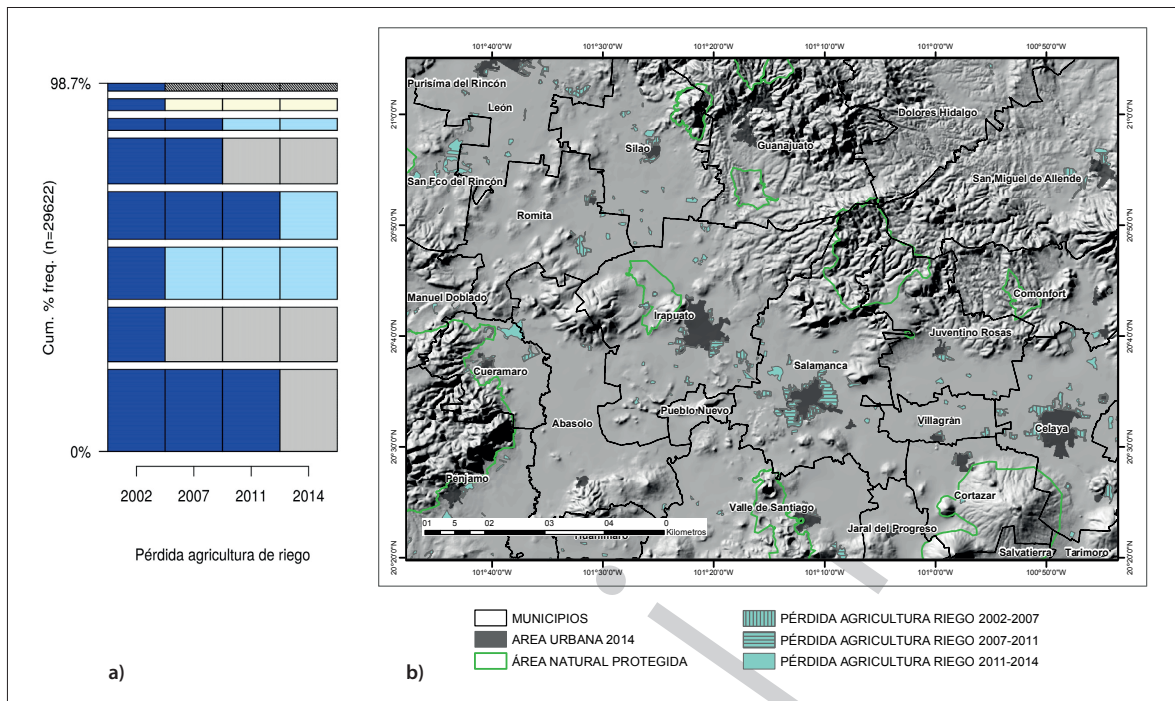


Figura 9. a) Secuencias de cambio de la pérdida de la agricultura de riego por AH, Agri t y Pz ind, y b) su distribución espacial en las ciudades de Irapuato, Salamanca y Celaya. Fuente: Elaboración propia.

Inegi permiten evaluar los principales procesos de cambios a nivel estatal o nacional.

El uso de índices y métodos de análisis novedosos (intensidad de cambio y análisis de secuencias) permitió caracterizar y analizar los procesos de cambio de forma más profunda en comparación con los análisis tradicionales (cálculo de tasas de cambio). Posibilitó observar secuencias muy específicas en las trayectorias de cada tipo de proceso de transformación; tales secuencias no fueron uniformes en el tiempo, ni entre categorías. Las secuencias de cambio de los CUCS en Guanajuato responden a intereses económicos del mercado para el uso del territorio.

Los procesos y las secuencias de CUCS están ligados en el tiempo y el espacio, ya que la presencia de algún proceso es consecuencia de una demanda humana, que en algunos casos forma procesos circulares.

Los procesos de deforestación constituyen los procesos iniciales de transformación de las cubiertas naturales primarias y/o secundarias; para el caso

Guanajuato, corresponde a ambientes áridos y caducifolios de Mezq, SBC, Mat crac y BQ. Durante 2002-2014 dichos ecosistemas fueron más vulnerables respecto a los de ambientes húmedos, ya que el prolongado periodo de estiaje deja un suelo reseco y agrietado más susceptible a procesos de erosión (Semarnat, 2012). Los ambientes áridos deben ser prioritarios, ya que albergan una importante biodiversidad y endemismos (Rzedowski, 1978 y Portillo-Quintero *et al.*, 2015).

El caso del bosque Mezq presentó un porcentaje muy alto de tasa anual relativa de pérdida (Tabla 4); no aparece en la gráfica de secuencias de cambio porque mantiene superficies reducidas y con frecuencia de cambio muy baja. Sin embargo, los bosques de Mezq están en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 por constituir una especie en riesgo (Royo-Márquez, Melgoza-Castillo y Quintana-Martínez, 2013).

La deforestación en Guanajuato se presentó casi exclusivamente en los piedemontes y lomeríos adyacentes o inmersos en las planicies (Figura 6b);

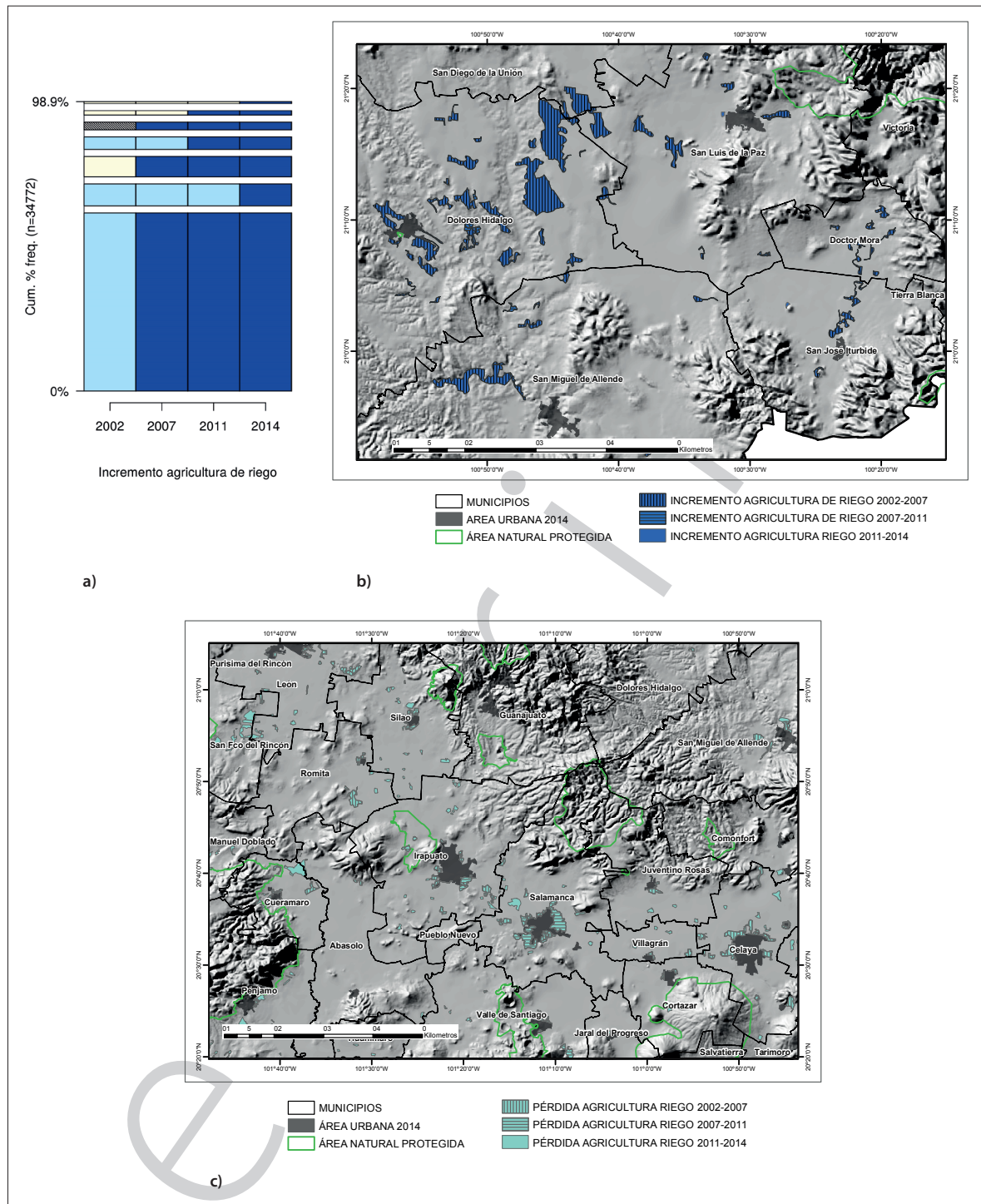


Figura 10. a) Secuencias de cambio en el incremento de Agricultura sobre áreas de Agricultura y Protección ambiental, b) su distribución espacial en los municipios de San Luis de la Paz y San Miguel de Allende y Dolores Hidalgo, y c) en la porción sureste del estado en el municipio de Acámbaro. Fuente: Elaboración propia.

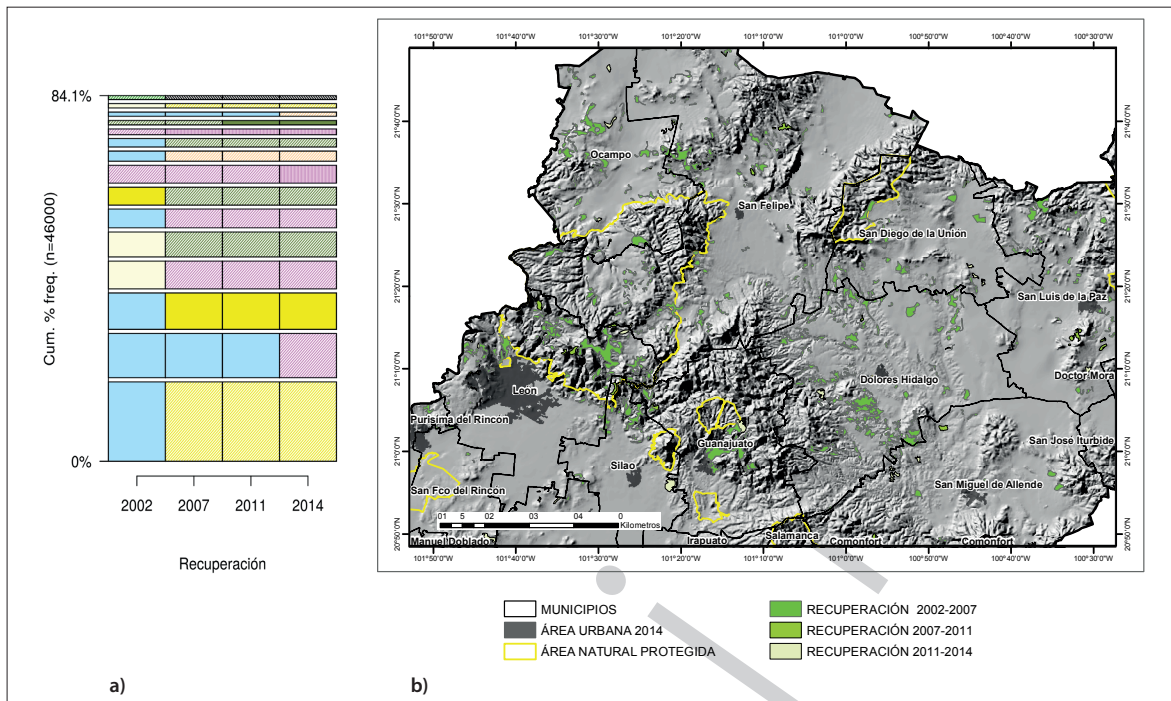


Figura 11. a) Secuencias de cambio en los procesos de recuperación desde cubiertas antrópicas como Agri t, Pz ind y SBC hacia Pz nat, SBC secundarios, BQ secundario y Mat cra secundario, y b) su distribución espacial en la porción centro occidente del estado de Guanajuato. Fuente: Elaboración propia.

ejemplo de ello es la zona norte de la ciudad de León, donde la demanda de mayores superficies de Agri t, Paz ind y AH impacta el área protegida de la Sierra de Lobos y la porción oeste de la zona urbana (Figura 5b). Esta condición se repitió en los piedemontes al norte de la ciudad de Silao, en los lomeríos internos y adyacentes de la cuenca del río Temascalí y al sur de la ciudad de Celaya, por mencionar algunos, ya que los procesos de deforestación se distribuyen en los piedemontes y lomeríos de todo el estado. La deforestación se redujo considerablemente pero todavía constituye casi la mitad de la superficie afectada en el primer periodo. Coll-Hurtado y Godínez (2003) mencionan que los estados de Tlaxcala, Guanajuato y Morelos presentan más de la mitad de su superficie con usos agrícolas.

El incremento de Agri r se presenta en la planicie sustituyendo a la Agri t y los Pz ind. Hay que recordar que el incremento de la Agri r presentó valores bajos en porcentaje de cambio relativo pero

muy altos en superficie absoluta durante el periodo 2002-2007 (Tabla 4).

El aumento de la Agri r se distribuyó al noreste del municipio de Dolores Hidalgo y suroeste de San Luis de la Paz durante el periodo 2002-2007 (Figura 10b), y constituyó el nuevo frente de expansión de la Agri r en la porción norte del estado. En esta área la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG, 2018) reportó un abatimiento del agua subterránea en el acuífero de la cuenca alta del río Laja de hasta 152 m precisamente para 2002, año de mayor déficit de agua durante el periodo 2000-2016 en este acuífero. Este mismo fenómeno se presenta en la porción sureste del estado en los municipios de Acámbaro y Santiago Maravatío, en el acuífero de Valle de Acámbaro (Figura 10c), donde los niveles de abatimiento al norte del municipio de Acámbaro alcanzaron hasta 90 m (CEAG, 2018). Al parecer, existe una estrecha relación entre el abatimiento de los acuíferos y el incremento de la superficie de Agri r. Esta problemática se incrementa

al desarrollar cultivos de hortalizas con mayor valor comercial (mercado internacional) pero que requieren mayor volumen de agua (Coll-Hurtado y Godínez, 2003).

El abatimiento de los acuíferos revierte el crecimiento de la Agricultura para regresar a la Agricultura, y muestra así una rotación entre las superficies de Agricultura y Agricultura.

Por su parte, el crecimiento de los AH expresa dos secuencias de cambio: 1) pérdida de Agricultura establecida en la planicie del corredor agroindustrial, donde han crecido ciudades como Irapuato, Silao, Salamanca y Celaya (Figura 9b), y 2) crecimiento de AH sobre Agricultura y Paz ind, que se presentaron en la zona de piedemonte y lomeríos al norte y oeste de la ciudad de León (Figura 7b), así como en la ciudad de San Miguel de Allende (Figura 7c). Guanajuato ocupa el sexto lugar de mayor densidad de población en el país; entre los municipios con las tasas medias más altas de crecimiento (TMC) de población anual destacan León (2.31%), Silao (2.48%), Guanajuato (1.91%), Irapuato (1.81%), Salamanca (1.37%) y Celaya (1.97%) durante 2000-2010 (Galindo y Zorrilla, 2012).

Los procesos de degradación se establecen también en los piedemontes y lomeríos pero principalmente en la porción norte del estado. Se visualizan tres porciones de importante degradación: 1) al noreste del estado, entre los municipios San Diego de la Unión, San Felipe, Ocampo y la porción norte de León; 2) en los municipios de San Miguel de Allende, Comonfort, Juventino Rosas y Guanajuato, y 3) en la porción noroeste en la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda de Guanajuato (Figura 8b), donde, según un estudio detallado de Pérez-Vega, Rocha y Regil (2017), los niveles de degradación forestal alcanzan hasta 61% en la reserva. También en numerosas ocasiones se ha denunciado el saqueo de especies de cactáceas en el municipio de Victoria por parte de una asociación civil, la cual ha cortado entre 15 000 y 20 000 cactáceas (*Sin Embargo*, 2016). Sólo dos categorías mantuvieron ganancias en los tres periodos: los AH y los Paz ind, estos últimos destinados a actividades pecuarias.

Por último, los procesos de recuperación de la cubierta vegetal se manifestaron principalmente

en tres porciones del estado: 1) la porción centro-norte en los municipios de San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo y Guanajuato; 2) al norte de la ciudad de León durante el periodo 2002-2007 (Figura 11b), y 3) la porción sureste del estado en los municipios de Jerécuaro, Acámbaro, Salvatierra, Yuriria, Maravatío, Uriangato y Moroleón, principalmente en el periodo 2011-2014. Es posible que la recuperación de la cubierta vegetal en esta última zona se haya relacionado con el abatimiento de los acuíferos mencionado anteriormente. Además, estos municipios registran altos índices de migración poblacional, lo que favorece el abandono de las actividades agrícolas y la recuperación de las cubiertas naturales (López *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

La cartografía del Inegi sobre USV permitió describir y analizar los procesos de CUCS y las trayectorias de las secuencias de cambio en Guanajuato durante tres periodos: 2002-2007, 2007-2011 y 2011-2014. Los cambios no fueron estacionarios y presentan grandes variaciones. Se observaron tres pulsaciones en la intensidad de cambio: la mayor intensidad se presentó en el periodo 2002-2007, posteriormente se registró una importante reducción en 2007-2011 y, finalmente, de 2011-2014 hubo un incremento importante de la dinámica, sin alcanzar la intensidad del primer periodo.

Durante el primer periodo las categorías con mayor tasa anual relativa de pérdida fueron Mezq, Mat crac, VSA SBC, BQ, VSa Mezq y Pz nat; predominaron las pérdidas en ecosistemas de ambientes áridos y caducifolios.

Las cubiertas antrópicas con mayor ganancia fueron los Paz ind y AH, esta última presentó valores altos en porcentajes para todos los periodos. El crecimiento de los AH se duplicó entre el primer y el último periodo. Las categorías de Agricultura y Agricultura mantuvieron muy bajos valores en porcentaje de tasa anual relativas pero valores muy altos en la tasa anual absoluta.

La deforestación todavía es importante, ya que representa poco menos de la mitad entre el primer y el último periodo. La degradación representa más

de la mitad de la superficie en los mismos periodos de tiempo; estos dos procesos se circunscriben a formas del relieve de piedemontes y lomeríos.

La recuperación se redujo tres veces entre el último y primer periodo, y se estableció en los piedemontes y lomeríos pero también en la planicie con menor superficie.

Las categorías antrópicas fueron las más dinámicas representadas por los AH, Agri temporal y riego; las agriculturas mantienen intercambios entre ellas debido a la disponibilidad del agua subterránea.

El estado de Guanajuato es reconocido por contar con una economía pujante, ubicada como la séptima a nivel nacional (Galindo, 2012); sin embargo, el costo ambiental ha sido alto porque es uno de los estados con mayor cubierta natural transformada. Si se consideran los resultados del presente estudio, al parecer, la tendencia continúa, lo cual constituye una amenaza para los remanentes de los ecosistemas actuales, en los que, además, serán mermados los servicios ambientales que proveen ante la creciente demanda de la población local, nacional e incluso internacional.

REFERENCIAS

- Abbot, A. (2013). Sequences of Social Events: Concepts and Methods for the Analysis of Order in Social Processes. *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, (16), 129-147. DOI: doi.org/10.1080/01615440.1983.10594107
- Aldwaik, S. Z. y Pontius Jr., R.G. (2012). Intensity Analysis to Unify Measurements of Size and Stationarity of Land Changes by Interval, Category, and Transition. *Landscape and Urban Planning*, 106, 103-114. DOI: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010
- Amestoy, J. (2001). Aspectos de la degradación del medio ambiente: Su influencia en el clima. *Papeles de Geografía*, 34, 17-49. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/25650622.pdf>
- CEAG (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato) (2018). *Compendio del agua subterránea en Guanajuato*. Guanajuato: Dirección General de Planeación-Dirección de Estudios y Monitoreo-Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Coll-Hurtado, A. y Godínez, M. L. (2003). *La agricultura en México: un atlas en blanco y negro*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Coomes, O. T., Grimard, F., Potvin, C. y Sima, P. (2008). The Fate of the Tropical Forest: Carbono or Cattle? *Ecological Economics*, 65 (2), 207-12. DOI: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.028
- Esparza, C. (2012). Cambio en el uso del suelo y degradación ambiental. En *La biodiversidad en Guanajuato. Estudio de Estado* (vol. I) (pp. 327-331). México: Conabio.
- FAO (1996). Forest Resources Assessment 1990. *Survey of Tropical Forest Cover and Study of Change Processes*, 130, 152.
- Gabadinho, A., Ritschard, G., Müller, N. y Studer, M. (2011). Analyzing and Visualizing State Sequences in R with TraMineR. *Journal of Statistical Software*, (40), 1-37. DOI: 10.18637/jss.v040.i04
- Galindo, C. (2012). Economía y sustentabilidad. En *La biodiversidad en Guanajuato. Estudio de Estado* (vol. I) (pp. 105-115). México: Conabio.
- Galindo, C. y Zorrilla, M. (2012). Población y localidades. En *La biodiversidad en Guanajuato. Estudio de Estado* (vol. I) (pp. 105-115). México: Conabio.
- IEE (Instituto de Ecología del Estado) (1999). Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de Guanajuato. Guanajuato: Gobierno de Guanajuato.
- IEE (Instituto de Ecología del Estado) (2008). Informe Ambiental del Estado de Guanajuato. Guanajuato: Gobierno de Guanajuato.
- INEGI (1980). Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Serie II, escala 1:250 000.
- INEGI (2010). Resultados del Censo de Población y Vivienda 2010.
- Lambin, E. F., Turner, B. L. y Helmut, J. (2001). The Causes of Land-Use and Land-Cover Change: Moving beyond the Myths. *Global Environmental Change*, 11, 261-269. DOI: doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3
- Lopez, E., Bocco, G., Mendoza, M., Velazquez, A. y Aguirre-Rivera, J. R. (2006). Peasant Emigration and Land-Use Change at the Watershed Level: A GIS-Based Approach in Central México. *Agricultural Systems*, 90, 62-78. DOI: doi.org/10.1016/j.agry.2005.11.001
- Mas, J. F., Nogueira de Vasconcelos, R. y Franca-Rocha, W. (2019). Analysis of High Temporal Resolution Land Use/Land Cover Trajectories. *Land*, 8(30), 1-19. DOI: doi.org/10.3390/land8020030
- Noble, I. R. y Dirzo, R. (1997). Forest as Human Dominated Ecosystem. *Science*, 277, 522-525.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V. y Woodcock, C. E. (2013). Making Better Use of Accuracy Data in Land Change Studies: Estimating Accuracy and Area and Quantifying Uncertainty Using Stratified Estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122-131. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.031

- Organización tala 20 mil cactáceas en Victoria, Guanajuato; aseguran que Semarnat les otorgó permiso (28 de abril de 2016). *Sin Embargo*. Recuperado de <https://www.sinembargo.mx/28-04-2016/1654373> el 12 de junio de 2020.
- Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J. F., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna L. y Gómez-Rodríguez G. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 43, 183-203.
- Pérez-Vega, A. (2011). Primer Foro Internacional Interdisciplina y Espacios Sustentables. En *Contexto mundial, nacional y estatal de los cambios de uso y cubierta del suelo y escenarios a futuro* (pp. 481-484). México: Universidad de Guanajuato.
- Pérez-Vega, A., Rocha, F. y Regil, H. H. (2017). Distribución espacial del uso/cubierta del suelo y degradación forestal en la Reserva de Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato. *Acta Universitaria. Multidisciplinary Scientific Journal* (26), 33-44. DOI: 10.15174/au.2016.1500
- Portillo-Quintero, C., Sanchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Quesada, M. y M do Espirito Santo, M. (2015). The Role of Tropical Dry Forests for Biodiversity, Carbon and Water Conservation in the Neotropics: Lessons Learned and Opportunities for its Sustainable Management. *Regional Environmental Change*, 15(6), 1039-1049. DOI: 10.1007/s10113-014-0689-6
- Royo-Márquez, M. H., Melgoza-Castillo, A. y Quintana-Martínez, G. (2014). Especies vegetales en peligro, su distribución y estatus de conservación de los ecosistemas donde se presentan. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 22(5).
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México: Editorial Limusa.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. En *Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental*. Ciudad de México.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. En *Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Ciudad de México.
- SIAP (2013). *Atlas Agroalimentario*. México.
- Soares-Filho, B. S., Coutinho-Cerqueira, G. y Lopes-Pennachin, C. (2002). A Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *Ecological Modelling*, 3(154), 217-235. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Soberón, J. Halfter, G. y Llorente-Bousquets, J. (Comps.; 2008). *Conocimiento actual de la biodiversidad*, vol. I de *Capital natural de México*. México: Conabio.
- Torres, C. A., Gutiérrez, M. C., Ortiz, C. A. y Gutiérrez, E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34, 457-466. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n4/2395-8030-tl-34-04-00457.pdf>