



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN TERRENOS DEL PARQUE NACIONAL “LA MALINCHE” DEL MUNICIPIO DE PUEBLA, PUEBLA

MISAEEL GARCÍA HERNÁNDEZ

TESINA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRÍA TECNOLÓGICA
EN MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES**

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

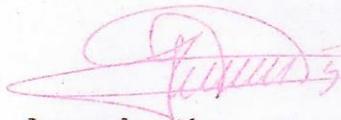
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Misael García Hernández, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Armando Gómez Guerrero, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN TERRENOS DEL PARQUE NACIONAL "LA MALINCHE" DEL MUNICIPIO DE PUEBLA, PUEBLA

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 06 de junio de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dr. Armando Gómez Guerrero
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN TERRENOS DEL PARQUE NACIONAL "LA MALINCHE" DEL MUNICIPIO DE PUEBLA, PUEBLA. realizada por el alumno: Misael García Hernández, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN
"MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES"

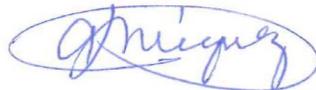
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR



Dr. Alejandro Velázquez Martínez

ASESORA



Dra. Patricia Hernández de la Rosa

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2019

CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN TERRENOS DEL PARQUE NACIONAL “LA MALINCHE” DEL MUNICIPIO DE PUEBLA, PUEBLA.

Misael García Hernández, M. T
Colegio de Posgraduados, 2019

RESUMEN

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son importantes para determinar los procesos relacionados con la degradación del suelo y la pérdida de la biodiversidad, entre otros. El objetivo del presente estudio fue analizar el cambio del uso del suelo, para el periodo 1984-2018 y los posibles factores socioeconómicos que influyen en el proceso de conversión de la cobertura vegetal de áreas forestales a terrenos agrícolas, urbanos u otros usos de suelo de terrenos que se encuentran dentro del Parque Nacional La Malinche del municipio de Puebla, Puebla. Para ello, se procesaron imágenes de satélite Landsat TM y TM+ en el software ArcMap 10.2 para generar los mapas temáticos de uso del suelo y vegetación para cada año, los cuales se sobrepusieron para obtener la matriz de transición que determina la probabilidad de pasar de un uso de suelo a otro en un periodo de tiempo. Con la información generada se calcularon las tasas de cambio de uso de suelo y la matriz de probabilidades, con la cual se generó un modelo descriptivo y prospectivo conocido como cadenas de Markov para analizar los cambios en el uso del suelo y la distribución de los mismos. Como resultado se observó que la dinámica del cambio del uso del suelo está relacionada principalmente con la disminución y la pérdida de las áreas boscosas, destacando la pérdida del bosque de pino y oyamel, con una tasa de cambio de -1.78 % y -1.54 %, respectivamente. Además, el incremento de la superficie destinada a las actividades agrícolas fue de 66%, lo cual ejerce una presión fuerte sobre los recursos bióticos y abióticos de la región. Es necesario contar con este análisis para identificar las áreas que tienen mayor degradación ambiental, y como base para la planificación del uso y manejo de los recursos naturales.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, imágenes de satélite, SIG, superficie forestal, actividades antropogénicas.

CHANGE OF THE USE OF THE SOIL IN LAND OF THE PARK NATIONAL "LA
MALINCHE" OF THE MUNICIPALITY OF PUEBLA, PUEBLA.

Misael García Hernández, M. T
Colegio de Posgraduados, 2019

ABSTRACT

Studies about land use change and vegetation are important to determine processes related to soil degradation and biodiversity loss, among others. The objective of this study was to analyze the change of land use, for the period 1984-2018 and the possible socioeconomic factors that influence the process of conversion from forest areas to agricultural, urban or other uses of lands that are within the La Malinche National Park of the municipality of Puebla, Puebla. To do this, Landsat TM and TM + satellite images were processed in ArcMap 10.2 software to generate thematic maps of land use and vegetation over a period of 34 years, which were superimposed to obtain the transition matrix that determines the probability of passing from one land use to another in a period of time. The information generated was useful to estimate rates of change and the probability matrix for land use change, and to generate a descriptive and prospective model known as Markov. Results showed that the dynamics of land use change is mainly related to the decrease and loss of forested areas, highlighting the loss of the pine and fir forest, with rates of -1.78 % and -1.54 %, respectively. In addition, the increase in the area destined to agricultural activities was 66 %, which cause a high pressure on biotic and abiotic resources of the region. It is necessary to have this analysis to identify the areas that have the greatest environmental degradation, and for management and planning purposes of the natural resources.

Key words: change of land use, satellite images, SIG, forest area, anthropogenic activities.

DEDICATORIA

A mi esposa Liliana por todo su amor, apoyo, paciencia y comprensión durante el tiempo dedicado a esta maestría.

A mis hijos Gerardo y Maximiliano, que son los pilares que me sostienen y me dan fuerzas para prepararme y mejorar cada día más.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, por haberme abierto sus puertas para concretar uno de mis proyectos personales.

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), por el gran apoyo para poder concretar este proyecto.

A los Doctores y Doctoras, miembros de mi Consejo Particular por su decidido y generoso apoyo para la realización de este trabajo.

Al Dr. Armando Gómez Guerrero, por su apoyo incondicional y seguimiento de este trabajo de investigación, así como por compartir su experiencia profesional y consejos para que esta fuera concretada.

A la Dra. Patricia Hernández de la Rosa, por la oportunidad de formar parte de este proyecto de investigación con sus valiosos aportes.

Al Dr. Alejandro Velázquez Martínez, por el apoyo para la elaboración de este trabajo y sus valiosas observaciones y aportes al presente trabajo de investigación.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1	Marco Teórico	5
2.1.1	Uso del suelo.....	5
2.1.2	Cambio de uso del suelo	5
2.1.3	Causas y consecuencias del cambio de uso del suelo.....	8
2.1.4	Estudios sobre cambio de uso del suelo en México: una breve revisión .	9
2.1.5	Tasa de cambio de uso de suelo	10
2.1.6	Sistemas de Información Geográfica.....	10
2.2	Marco Conceptual	12
2.2.1	Tipo de investigación	12
2.2.2	Paradigma que sustenta la investigación	13
2.2.3	Enfoque epistemológico	13
2.2.4	Teorías que soportan la investigación	14
2.2.1	Conceptos utilizados.....	15
2.3	Marco Legal	17
2.3.1	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).....	17
2.3.2	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS).....	17
2.3.3	Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano.....	18
III.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	19
3.1	Objetivo general	19
3.1.1.1	Objetivos específicos.....	19
3.2	Hipótesis	19
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	20
4.1	Localización	20
4.1.1	Clima	21
4.1.2	Fisiografía y geología	21
4.1.3	Edafología	23
4.1.4	Hidrografía.....	24

4.1.5	Flora	24
4.1.6	Fauna	27
4.1.7	Factores sociodemográficos	27
4.1.8	Servicios e infraestructura	28
4.1.9	Actividades socioeconómicas	29
4.2	Elaboración de mapas temáticos	30
4.3	Primera fase de campo	30
4.3.1	Categorías de análisis	30
4.4	Fase de gabinete y segunda fase de campo.....	30
4.4.1	Mapas de Uso de Suelo y Vegetación.....	30
4.5	Variables respuestas.....	32
4.5.1	Matriz de transición.....	32
4.5.2	Cadenas de Markov.....	33
4.5.3	Tasas de cambio de uso de suelo	35
4.5.4	Ganancias, pérdidas e intercambio entre categorías.....	36
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1	Matriz de Cambio	38
5.2	Cadenas de Markov	43
5.3	Tasas de cambio de uso de suelo.....	44
5.4	Ganancias, pérdidas e intercambio entre categorías.	45
VI.	CONCLUSIONES.....	46
VII.	LITERATURA CITADA	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa conceptual del cambio de uso de suelo.	16
Figura 2. Localización del área de estudio.	21
Figura 3. Usos de suelo y vegetación de San Miguel Canoa, Puebla, Puebla.	38
Figura 4. Mapas temáticos de uso de suelo y vegetación.	42
Figura 5. Cadena de Markov, la cuales indican la probabilidad de cambio, aplicada al cambio de uso de suelo y vegetación en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla, Puebla.	43
Figura 6. Tasas de cambio de uso de suelo para las categorías que ganan y.....	45

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de uso de suelo y vegetación.	6
Cuadro 2. Clasificación edafológica del Parque Nacional Malinche.....	23
Cuadro 3. Características de las imágenes de satélite Landsat.....	31
Cuadro 4. Matriz de cambios.....	32
Cuadro 5. Balance de cambios, años 1984 y 2018.	39
Cuadro 6. Matriz de cambio de uso de suelo.	40
Cuadro 7. Matriz de probabilidades.....	40
Cuadro 8. Tasas de cambio, pérdidas y ganancias del uso de suelo y vegetación de terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla.	44

ABREVIATURAS

SEMARNAT Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

INEGI Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística.

CONANP Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

SIG Sistemas de Información Geográfica.

LGEEPA Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

LGDFS Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.

ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus.

UPAEP Universidad Popular Autónoma de Puebla.

I. INTRODUCCIÓN

Las actividades económicas y sociales de la humanidad han contribuido a la modificación del entorno donde se establece, principalmente para satisfacer sus necesidades básicas de alimentación, vivienda e infraestructura; provocando cambios en el ambiente y alterando las características físicas, químicas y biológicas del suelo, cobertura vegetal y hábitat de la fauna silvestre. Por tal motivo es muy importante conocer la dinámica y magnitud del cambio del uso del suelo en los ecosistemas terrestres, razón principal de la pérdida de vegetación natural (Lambin, 1997).

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son de gran importancia para determinar cuáles son los procesos que contribuyen a la deforestación, erosión, desertificación y en general de cualquier proceso de degradación que conlleven a la perturbación de los ecosistemas y pérdida de la biodiversidad (Camacho *et al.*, 2015).

El cambio de uso de suelo se refiere al cambio en el uso o manejo del suelo por los seres humanos, que puede inducir un cambio en la cubierta terrestre (IPCC, 2012). En México la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable define al cambio de uso del suelo bajo un enfoque forestal como la remoción total o parcial de la vegetación de los terrenos forestales para destinarlos a actividades no forestales (LGDFS, 2015).

A nivel mundial el cambio de uso de suelo que propicia la deforestación ha aumentado en las últimas décadas. La conversión de zonas forestales para agricultura ha llegado a una pérdida de 4.8 millones de hectáreas, entre el periodo 2000-2005 (tasa de 0.12% anual) y para 2005-2010 se elevó a 5.6 millones (tasa de 0.14% anual) (SEMARNAT, 2014).

En México, la deforestación y el incremento poblacional son de los principales factores que influyen en los procesos de cambio de uso de suelo (Mas *et al.*, 2009). Por ejemplo, para el periodo 1993 y 2002 se registró un cambio de uso de suelo en vegetación natural en poco más de 3 millones de hectáreas, lo que equivale a una

pérdida cercana a las 336 mil hectáreas anuales. Entre 2002 y 2007 se perdieron 1.9 millones de hectáreas de vegetación natural, a un ritmo poco más de 382 mil hectáreas anuales, principalmente debido a la deforestación. En relación a las actividades agropecuarias, las áreas dedicadas a la agricultura y pastizales se incrementaron en 1.5 millones de hectáreas para este último periodo con una extensión total de 51.1 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2014).

De acuerdo a información plasmada en el informe de la situación del medio ambiente en México emitido en el año 2015 por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno Federal, entre el año 2002 y 2011 el estado de Puebla recupero 0.24% de su cubierta natural. Por otro lado, este mismo informe menciona que el estado de Puebla presenta daño por erosión hídrica en 76.6 % de su territorio.

Entre los principales factores ligados al cambio de uso de suelo en el estado de Puebla, podemos mencionar: 1) la conversión de terrenos forestales para la agricultura, 2) prácticas ganaderas, 3) crecimiento urbano, 4) desarrollo de infraestructura vial (CONABIO, 2013).

El análisis de cambio de uso de suelo de un determinado espacio geográfico y en una dimensión temporal, se ha realizado principalmente haciendo uso y manipulación de distintos insumos cartográficos, como mapas de uso de suelo y vegetación, pues es a partir de estos que los especialistas en el área, así como las autoridades responsables del uso y manejo de los recursos naturales, establecen e implementan políticas orientadas al aprovechamiento y conservación de estos (Millington y Alexander, 2000).

Los insumos cartográficos impresos y digitales, aunque no dejan de ser importantes, actualmente se han sustituido por imágenes de satélite (por ejemplo, Landsat TM), las cuales presentan una resolución temporal, espacial y espectral que permite analizar los cambios de cobertura vegetal además de ser más accesibles que los insumos. Con la sobreposición de mapas de uso de suelo y vegetación de diferentes años combinados con la aplicación de métodos y técnicas estadísticas es posible estimar

los cambios espacio temporales de coberturas. Estos análisis están basados en mayor medida en propiedades del espectro electromagnético de las imágenes, lo que permite diferenciar entre tipos de cubiertas vegetales de acuerdo a su reflectancia (i.e. firmas espectrales). Así el sensor del satélite Landsat TM 5 tiene 7 bandas, cada banda capta una determinada porción del espectro con diferente longitud de onda y aplicación diferente. Por ejemplo, la banda 2 es utilizada para evaluar el estatus la vegetación, la banda 3 para la clasificación de coberturas vegetales y estudios de clorofila y finalmente la banda 7 para estudios de fisiografía del terreno (Soria *et al.*, 1998).

Utilizando la ventaja que brindan los insumos satelitales varios autores han realizado estudios para analizar la dinámica del cambio del uso del suelo, algunos ejemplos: Buendía *et al.* (2002) en su estudio de la aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México; el estudio de Camacho *et al.* (2015), evaluando los cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña; finalmente el estudio de Gordillo y Castillo (2017) en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México donde se analizó la relación entre mapas de cambio en la cobertura del suelo con imágenes de satélite de alta resolución y estadísticas socioeconómicas.

Es importante conocer la dinámica del cambio del uso del suelo para comprender el sistema tan complejo al que nos enfrentamos dentro del campo de las ciencias sociales y ambientales, ligado directamente con la degradación de los recursos naturales presentes en un territorio. Esta degradación genera cambios en la estructura y productividad de los suelos, modificación de los hábitats de la fauna y cambio en la cobertura forestal y agrícola, influyendo no solo en la pérdida de la biodiversidad de los ecosistemas sino también en la producción de bienes y servicios ambientales. Lo cual todo en conjunto deteriora el medio físico, económico y social de las poblaciones involucradas en el entorno.

Conocer la dinámica espacio-temporal de cambio de uso del suelo permite plantear estrategias de planeación para el uso y manejo de los recursos naturales y tener una

fuentes de información sobre el uso actual del suelo, disponible para plantear estudios de ordenamiento territorial.

Como lo han manifestado organizaciones como Greenpeace, reforestemos México, red para el desarrollo sostenible de México A.C. y medios de comunicación local y nacional, la tala ilegal, los incendios forestales y la agricultura han ido reduciendo de manera paulatina las zonas forestales del Parque Nacional La Malinche del estado de Puebla. Esta evidente degradación del ecosistema forestal en la zona hizo relevante desarrollar esta investigación.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco Teórico

Los estudios sobre la dinámica del cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal son trascendentales y necesarios, ya que son considerados en muchos países como una de las principales causas que coadyuvan a revertir el deterioro ambiental (Ibarra *et al.*, 2011). Por ello pueden ser la base para conocer las tendencias de procesos de degradación y desertificación de los suelos y pérdida de la biodiversidad de los ecosistemas asociados a una región, así como la identificación y análisis de los factores e impactos socioeconómicos que inciden en el cambio del uso del suelo (Camacho *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015). Para entender el cambio del uso del suelo se debe tener en claro los diferentes conceptos que aplican para su análisis.

2.1.1 *Uso del suelo*

El uso del suelo se define como el proceso de producción de bienes materiales para satisfacer necesidades para el ser humano, algunos ejemplos son; producción de alimentos, instrumentos y herramientas de trabajo y construcción, vivienda y todos los que permiten mantener la subsistencia y supervivencia de las poblaciones humanas (Ramos *et al.*, 2004). Otra forma de definir el uso del suelo es como las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal, los tipos de uso de suelo y su grado de aprovechamiento conforman el paisaje, el cual al transformarse o modificarse hace un cambio en el uso del suelo (López *et al.*, 2015).

2.1.2 *Cambio de uso del suelo*

Las interacciones de las actividades humanas con el medio físico traen como consecuencia el cambio de uso del suelo y vegetación, lo anterior se ve reflejado por el impacto de las actividades económicas y de desarrollo de la sociedad sobre el territorio y el uso que les dan a los recursos naturales (Palacios *et al.*, 2004). Por tanto, el cambio en el uso del suelo puede definirse como los cambios que se dan

continuamente sobre la superficie terrestre, lo que se debe principalmente a la deforestación, la agricultura, ganadería, industria, aumento demográfico y/o urbanización (Ramos *et al.*, 2004).

López *et al.* (2015) reportan que los principales procesos de cambio antropogénicos en la región mazahua del altiplano mexicano son: de uso del suelo del bosque a pastizales, de pastizal a agricultura de riego o de temporal, estas últimas actividades por asentamientos urbanos. Como ya se menciona estos cambios son consecuencia directa de la interacción de las actividades humanas con el medio biótico y abiótico de los ecosistemas, por tanto, la identificación espacial y temporal de los cambios pueden ser la base para aplicar políticas correctivas y/o planes de acción que mejoren el manejo de los recursos naturales de una región (Palacio *et al.*, 2004).

En México una forma para realizar estudios de cambio de uso de suelo puede ser la comparación de dos bases de datos de uso de suelo generadas por INEGI (serie I y II) y el Inventario Forestal Nacional del año 2000, para monitorear los cambios de los tipos de vegetación y uso del suelo (Palacio *et al.*, 2004).

Existen diversas formas de clasificar los usos del suelo utilizando clases de usos y coberturas. Para esta investigación se utilizó como referencia la clasificación que se puede apreciar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de uso de suelo y vegetación.

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
I. Cultivos	1. Agricultura (riego y humedad) 2. Agricultura de temporal 3. Plantación forestal	Agricultura de riego (incluye riego eventual) Agricultura de humedad Riego suspendido Pastizal cultivado Agricultura de temporal ¹ Plantación forestal
II. Bosques	4. Coníferas	Bosque de táscate ^{2, 3}

	5. Coníferas-latifoliadas 6. Latifoliadas 7. Mesófilo de Montaña	Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro) ^{2, 3} Bosque de pino ^{2, 3} Matorral de coníferas ^{2, 3} Bosque bajo-abierto ^{2, 3} Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) ^{2, 3} Bosque de encino ^{2, 3} Bosque mesófilo de montaña ^{2, 3}
III. Selvas	8. Perennifolia y subperennifolia 9. Caducifolia y subcaducifolia	Selva alta y mediana perennifolia ^{2, 3} Selva baja perennifolia ^{2, 3} Selva alta y mediana subperennifolia ^{2, 3} Selva baja subperennifolia ^{2, 3} Selva mediana caducifolia y subcaducifolia ^{2, 3} Selva baja caducifolia y subcaducifolia ^{2, 3} Matorral subtropical ^{2, 3} Selva baja espinosa ^{2, 3}
IV. Matorral	10. Mezquital 11. Matorral xerófilo	Mezquital (incluye huizachal) ^{2, 3} Matorral crasicaule ^{4, 5} Matorral sarcocrasicaule ^{4, 5} Matorral sarcocaule ^{4, 5} Matorral sarcocrasicaule de neblina ^{4, 5} Matorral desértico micrófilo ^{4, 5} Matorral desértico rosetófilo ^{4, 5} Matorral rosetófilo costero ^{4, 5} Vegetación de desiertos arenosos Matorral espinoso tamaulipeco ^{4, 5} Matorral submontano ^{4, 5} Chaparral ^{4, 5}
V. Pastizal	12. Pastizal	Pradera de alta montaña Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal) Pastizal inducido Sabana

VI. Vegetación hidrófila	13. Vegetación hidrófila	Manglar Popal-tular Vegetación de galería (incluye bosque y selva)
VII. Otros tipos de vegetación	14. Otros tipos de vegetación 15. Área sin vegetación aparente	Palmar Vegetación halófila y gipsófila Vegetación de dunas costeras Área sin vegetación aparente
VIII. Otras coberturas	16. Asentamiento humano 17. Cuerpo de agua	Asentamiento humano Cuerpo de agua

Fuente: (Palacio *et al.*, 2004).

¹ Incluye dos categorías: con cultivos anuales, o con cultivos permanentes y semipermanentes.

² Incluye la vegetación primaria y la vegetación secundaria arbórea en una sola categoría.

³ Incluye a las comunidades con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

⁴ Se refiere a las comunidades de matorrales con vegetación primaria.

⁵ Incluye la vegetación secundaria derivada de la alteración de los matorrales.

2.1.3 Causas y consecuencias del cambio de uso del suelo

Dentro de las principales causas que influyen en el proceso del cambio de uso del suelo destacan el aumento demográfico, la deforestación (incluye tala clandestina y extracción de productos maderables, apertura para establecimiento de cultivos), la agricultura que se destaca por técnicas y prácticas mal aplicadas, por ejemplo, la roza, tumba y quema, cultivos en laderas sin prácticas de conservación de suelos, entre otras (Camacho *et al.*, 2015).

Las investigaciones sobre la dinámica del cambio del uso del suelo también pueden incluir la identificación y análisis de los factores que tienen impacto sobre el ambiente. Por ejemplo, con la reducción de la superficie forestal se disminuye también la capacidad de captación de agua. Además, la construcción de carreteras, pavimentación de caminos de terracería y parques industriales, son factores que contribuyen al proceso de cambio. Otros, no menos importantes son; los incendios forestales, el sobrepastoreo, abandono de terrenos agrícolas y construcción de fraccionamientos o viviendas (López *et al.*, 2015).

2.1.4 Estudios sobre cambio de uso del suelo en México: una breve revisión

En la actualidad los estudios sobre el cambio del uso del suelo están basados en la utilización de imágenes satelitales, provenientes de sensores remotos para el análisis de la cobertura vegetal espacial y temporal. Con esto se puede obtener el porcentaje de diferentes coberturas vegetales y a partir de la comparación entre dos tiempos, la tasa de cambio del uso actual del suelo. Con ello se pueden obtener los factores que servirán de referencia para la determinación del impacto causado por las actividades antropogénicas, al mismo tiempo proponer alternativas de manejo y conservación para preservar las zonas que aún no han sido degradadas y aprovecharlas de manera sustentable (Millington y Alexander, 2000).

La investigación realizada por Gordillo y Castillo (2017) en la Cuenca del Río Sabinal, Chiapas aborda mediante el análisis de los mapas de cambio de uso del suelo, el papel que desempeña la población humana en la configuración del ambiente biofísico y la incidencia de diferentes actividades socioeconómicas en los procesos de cambio. Dentro de sus resultados destaca que el 72 % de la cuenca mantuvo el mismo tipo de cobertura de suelo, mientras que el restante presentó algún tipo de cambio, principalmente por el incremento de la superficie utilizada para ganadería.

Otro estudio basado en el análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo ocurridos en un periodo de tiempo es el de Camacho *et al.* (2015) en el sur poniente del estado de México, donde se ubica la Zona de Transición Mexicana de Montaña, donde a través de la interpretación de imágenes de satélite, los autores construyeron los mapas temáticos que permitieron elaborar una matriz de cambio de la superficie estudiada, determinar las tasas de cambio así como inferir en los procesos antropogénicos que tienen influencia sobre los cambios del uso del suelo. Por ejemplo la cobertura forestal y la extensión de los cuerpos de agua disminuyeron notablemente en esta área para el periodo estudiado, además se probó el efecto de actividades agropecuarias y urbanas en la deforestación de la región.

Los estudios de cambio de uso del suelo también han sido aplicados para proponer nuevos modelos de producción agrícola como el realizado por Ramos *et al.*, (2004) donde mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera se determinó el potencial para el cultivo del cacao con base a características del terreno. Con ello se demuestra que los métodos de análisis de insumos cartográficos y/o satelitales pueden aplicarse a diferentes propósitos según el área de estudio de los especialistas.

2.1.5 Tasa de cambio de uso de suelo

La vegetación es un indicador importante para conocer las condiciones naturales de un territorio, el análisis de los cambios producidos en la vegetación considera, básicamente, componentes tales como: el porcentaje de vegetación conservada, superficies deforestadas, superficie revegetada (cultivos o pastizales), superficie degradada, cambio de actividad productiva de una superficie y las áreas sin cambio (Palacio *et al.*, 2004)

Las tasas de cambio de la cobertura y uso del suelo para algún periodo de tiempo indica si hubo incremento o decremento en su superficie, se puede determinar con la siguiente formula:

$$t=1-(S_2/S_1)^{1/n}$$

Donde: t corresponde a la tasa de cambio; S_1 es la superficie cubierta por un tipo dado de uso/cobertura del suelo en la fecha 1; S_2 es la superficie del mismo uso/cobertura del suelo en la fecha 2 y; n es el número de años transcurridos entre las dos fechas (Camacho *et al.*, 2015).

2.1.6 Sistemas de Información Geográfica

El Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística (INEGI), (2014) define que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas

diseñadas para conseguir, recopilar, recuperar, desarrollar y analizar datos espaciales del mundo real. Con los SIG se puede manipular datos espaciales referenciados y vincular bases de datos asociados, resultando información de fácil acceso a los usuarios.

Olaya (2014) define un SIG como “un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados”, por tanto, resultan ser integradores de información geográfica susceptible de ser analizada. Los componentes de un SIG son; los datos, métodos que se aplican a los datos, software, hardware y personas encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

Las ventajas de usar un SIG son múltiples, por ejemplo, capacidad de almacenamiento, múltiples niveles de datos, capacidad de manejo para editar y actualizar información, rapidez en la operación, asociación de datos espaciales con propiedades y capacidad para análisis de datos mediante la ejecución de modelos de aplicación.

La aplicación de los SIG es importante en los análisis espaciales, diagnósticos y comparaciones temporales, debido a que es una herramienta fundamental para evaluar, predecir y simular procesos como cambios de uso de suelo, erosión, planificación urbana, planeación y gestión de recursos naturales y servicio, rutas de transporte, cartografía, planificación ambiental, evaluación de riesgos y emergencias, impacto ambiental, estudios demográficos, entre muchos otros (García, 2012; INEGI, 2014).

La manipulación de las imágenes de satélite se realiza mediante programas de sistemas de información geográfica (SIG) (Palacios *et al.*, 2004). Existen diferentes softwares para análisis de imágenes de satélite e insumos cartográficos impresos, tales como: ILWIS, ArcMap, QGIS, ERDAS, entre muchos otros.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Tipo de investigación

Según Hernández *et al.*, (2014) es importante definir el alcance de la investigación ya sea cualitativa o cuantitativa. Las investigaciones cuantitativas se dividen en: exploratorias, descriptivas, correlacionales y explicativas. Las de tipo exploratorias estudian objetos o fenómenos poco estudiados, generando nuevos conocimientos que ayudan a identificar conceptos importantes y a preparar el terreno para nuevas investigaciones. Las investigaciones descriptivas, en tanto, como su nombre lo indica describen al objeto de investigación en cuestión para comprender sus componentes y variables especificando las propiedades, características, los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis.

El objeto de estudio de la presente investigación se encuentra dentro de la investigación cuantitativa de tipo correlacional y explicativa. En este estudio se aborda la influencia que tiene la deforestación, el aumento demográfico y urbano y las actividades agropecuarias, sobre la dinámica del proceso del cambio del uso del suelo para asociar, predecir y cuantificar las relaciones entre conceptos y variables, por lo tanto, la investigación se torna del tipo correlacional donde conoceremos el comportamiento y respuesta de las variables asociadas al cambio del uso del suelo.

Las investigaciones correlacionales aportan cierta información explicativa con la que se puede determinar la causa de los procesos o fenómenos físicos o sociales ligados al cambio del uso del suelo, por tanto, también podemos asociar el tipo de investigación explicativa a la presente investigación, con el objetivo de generar un entendimiento estructurado del cambio del uso del suelo en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al municipio de Puebla, Puebla (Hernández *et al.*, 2014).

2.2.2 *Paradigma que sustenta la investigación*

Los problemas ambientales como el cambio de uso del suelo tienen una gran complejidad ya que los múltiples factores que influyen en la dinámica del cambio están determinados principalmente por la problemática social, económica y política de cada entorno. Por tanto, la construcción de la investigación debe estar basada en la visión de la realidad de los múltiples actores involucrados con el objeto de estudio. Lo anterior permite considerar el paradigma constructivista para sustentar la presente investigación.

El constructivismo se caracteriza por tener una ontología relativista, es decir, la realidad que se contempla va a depender de los sujetos y/o personas implicadas y la visión o construcción mental que tengan sobre el objeto, proceso o fenómeno que se analizará. La naturaleza de la relación entre el sujeto-objeto o epistemología es subjetivista porque el investigador y lo investigado forman una entidad única que generan nuevos conocimientos. La metodología seguida considera a la hermenéutica y dialéctica (Moreno *et al.*, 2001).

2.2.3 *Enfoque epistemológico*

La importancia de tener un enfoque epistemológico en un trabajo de investigación radica en entender y manejar los debates entre, por ejemplo, las investigaciones “cualitativa” y “cuantitativa”, “empirismo” y “racionalismo” o “idealismo” y “realismo”, ya que se tiene que conocer la noción del conocimiento considerando la perspectiva desde la que se abordará un problema para este caso ambiental y tener una solución conceptual que explique la generación de teorías del conocimiento a partir de diferentes puntos de vista epistemológicos (Padrón, 2007).

De acuerdo a Padrón (2007) la presente investigación sigue el enfoque epistemológico racionalista-realista que permite obtener abstracciones, sistemas lógico-matemáticos y deducción controlada sobre el objeto de estudio, siendo un objeto real que tiene una

relación directa con las actividades económicas y sociales que desempeñan los pobladores en la región, por lo que es importante entender y razonar las causas y consecuencias que se derivan del problema de investigación.

2.2.4 Teorías que soportan la investigación

Los problemas ambientales se consideran como complejos, holísticos e interdisciplinarios, por lo que la investigación se apoya en la teoría de sistemas. Un sistema complejo considera la relación que existe entre el objeto de estudio y las disciplinas a partir de las cuales se puede abordar el estudio de investigación, por lo tanto, no se puede considerar aspectos particulares de un proceso, fenómeno o realidad. García (2006) define un sistema complejo como una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizado como una totalidad organizada (de ahí la denominación de sistema), en la cual los elementos no son "separables" y, por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente.

Un sistema complejo se estudia con la integración de expertos en diferentes disciplinas, para conformar un grupo de investigadores con distintas formas de ver el objeto de estudio, pero que al final tienen un común denominador, que es la solución de un problema, proceso o fenómeno de investigación. La dinámica del cambio en el uso del suelo es un problema ambiental complejo, que para ser estudiado se necesita ver como un sistema ordenado y con interrelaciones entre los elementos que lo integran tales como, sociales, ambientales, económicos y hasta del orden político (como se ilustra en la Figura 1), por ello se encauza en la teoría de sistemas.

Los sistemas funcionan como una totalidad, y tiene dos características principales: propiedades estructurales y evolución en sus componentes. Por ejemplo, en el sistema ambiente la propiedad de vulnerabilidad se da por el cambio constante en el uso del suelo que ocurre a una evolución espacio-temporal que dependerá del subsistema socio-económico, ya que cuando un terreno agrícola ya no produce, la necesidad por obtener alimento e ingresos para sostener a la familia llevará al agricultor a buscar otro

terreno con condiciones óptimas o mejores para la producción, deteriorando por lo regular, las zonas forestales de alguna región (repitiendo el ciclo cuando el terreno se vuelva improductivo, y dejando al abandono los terrenos que fueron agrícolas).

Un principio básico de la teoría de sistemas complejos afirma que toda alteración de alguna fracción del todo se generaliza de diferentes formas en el conjunto de relaciones de los elementos que forman la organización del sistema, lo que podría generar una reorganización total dentro de un sistema (García, 2006).

2.2.1 Conceptos utilizados

Suelo: Ente natural organizado e independiente, con unos constituyentes, propiedades y génesis que son el resultado de la actuación de una serie de factores activos (clima, organismos, relieve y tiempo) sobre un material pasivo (la roca madre) (Porta *et al.*, 2003)

Deforestación: La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) la define como la “Pérdida de la vegetación forestal, por causas inducidas o naturales, a cualquier otra condición” (LGDFS, 2017).

Antrópico: adjetivo que implica ser producido o modificado por la actividad humana (RAE, 2017).

Degradación: Proceso de disminución de la capacidad de los ecosistemas forestales para brindar servicios ambientales, así como capacidad productiva (LGDFS, 2017).

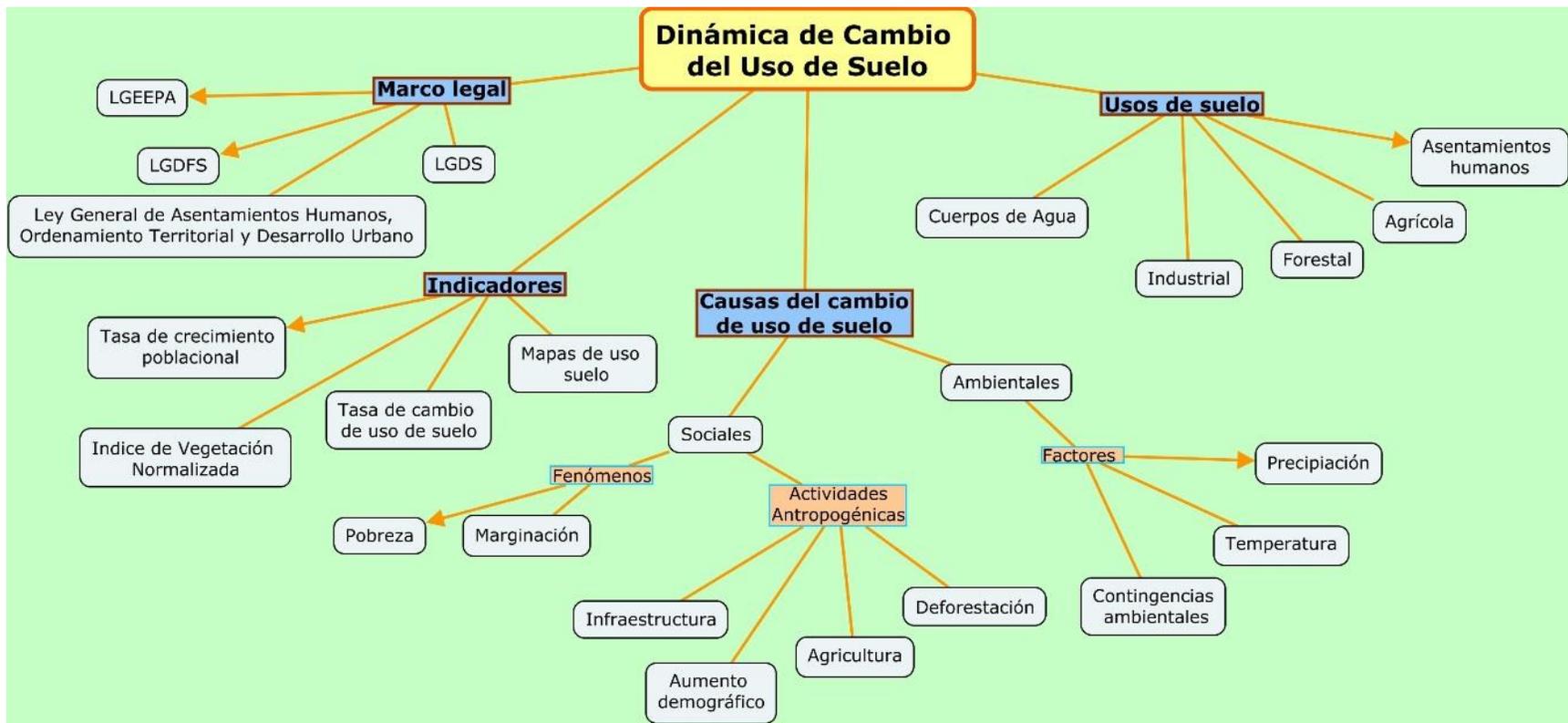


Figura 1. Mapa conceptual del cambio de uso de suelo.
Fuente: Elaboración propia

2.3 Marco Legal

2.3.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente señala que “el ordenamiento territorial es el instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos” (LGEEPA, 2017).

En esta ley de igual forma contribuye a la regulación ambiental de los asentamientos humanos para lograr una diversidad y eficiencia en el uso del suelo y disminuir las afectaciones ambientales provocadas por los cambios de uso del suelo.

La LGEEPA también considera algunos criterios para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo y sus recursos, como: el uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural para que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva, tomar las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, capacidad productiva, llevar a cabo medidas de restauración y conservación de suelo, entre otros.

2.3.2 Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable indica que el cambio de uso de suelo en terrenos forestales, para manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales es autorizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), siempre y cuando cumplan con las disposiciones descritas en la ley y su reglamento. Por ejemplo, disponer de un Programa de Manejo Forestal, reforestar, conservar y restaurar los suelos, aprovechar los recursos forestales de

acuerdo con la posibilidad y el plan de cortas establecidos en la autorización (LGDFS, 2017).

2.3.3 Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano

La Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano es un instrumento de regulación para el uso del territorio y de asentamientos humanos en el país. Tiene como objetivo principal propiciar los procesos de planeación y gestión para la creación de espacios (vivienda, infraestructura, equipamiento y servicios básicos) para la población con apego a la ordenación territorial.

También se encarga de regular el cambio de uso del suelo para asegurar la preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, así como la calidad formal e imagen urbana, conservación de los monumentos y mobiliario urbano (Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, 2016).

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

La pregunta central de este estudio es la siguiente:

¿Cuál es la dinámica espacio-temporal de cambio de uso de suelo en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla, Puebla, en el periodo 1984-2018?

3.1 Objetivo general

Cómo objetivo general se tiene el siguiente:

Analizar la dinámica espacio-temporal de cambio de uso de suelo en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al municipio de Puebla, Puebla., en el periodo 1984-2018, y así como evaluar las variables involucradas en el proceso.

3.1.1.1 Objetivos específicos

- Generar cartografía de uso de suelo y vegetación en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al municipio de Puebla, Puebla para los años 1984-2018.
- Elaborar los mapas de cambio de uso de suelo para el periodo 1984 - 2018.
- Calcular la tasa de cambio de uso de suelo en la zona de estudio para el periodo 1984 - 2018.
- Generar un modelo descriptivo y prospectivo para analizar los cambios en el uso del suelo y la distribución de los mismos por medio de Cadenas de Markov.

3.2 Hipótesis

Es posible evaluar y caracterizar el cambio de uso de suelo en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla, Puebla, mediante el uso de información de sensores remotos en combinación con información cartográfica existente.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

El Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl se ubica en la zona central oriente de México formando parte de la cordillera neovolcánica y se considera la montaña aislada más significativa del país, es la quinta montaña más alta de México. Respecto a la ubicación geopolítica, el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, queda comprendido en los territorios de los estados de Tlaxcala y Puebla, donde el número de municipios de ambas entidades muestran la siguiente distribución: en el estado de Tlaxcala, ejercen su jurisdicción un total de 12 municipios y para el estado de Puebla la poligonal del Área Natural Protegida abarca cuatro municipios (CONANP, 2013), dentro de los cuales se encuentra el municipio de Puebla, en el cual se desarrolló esta investigación.

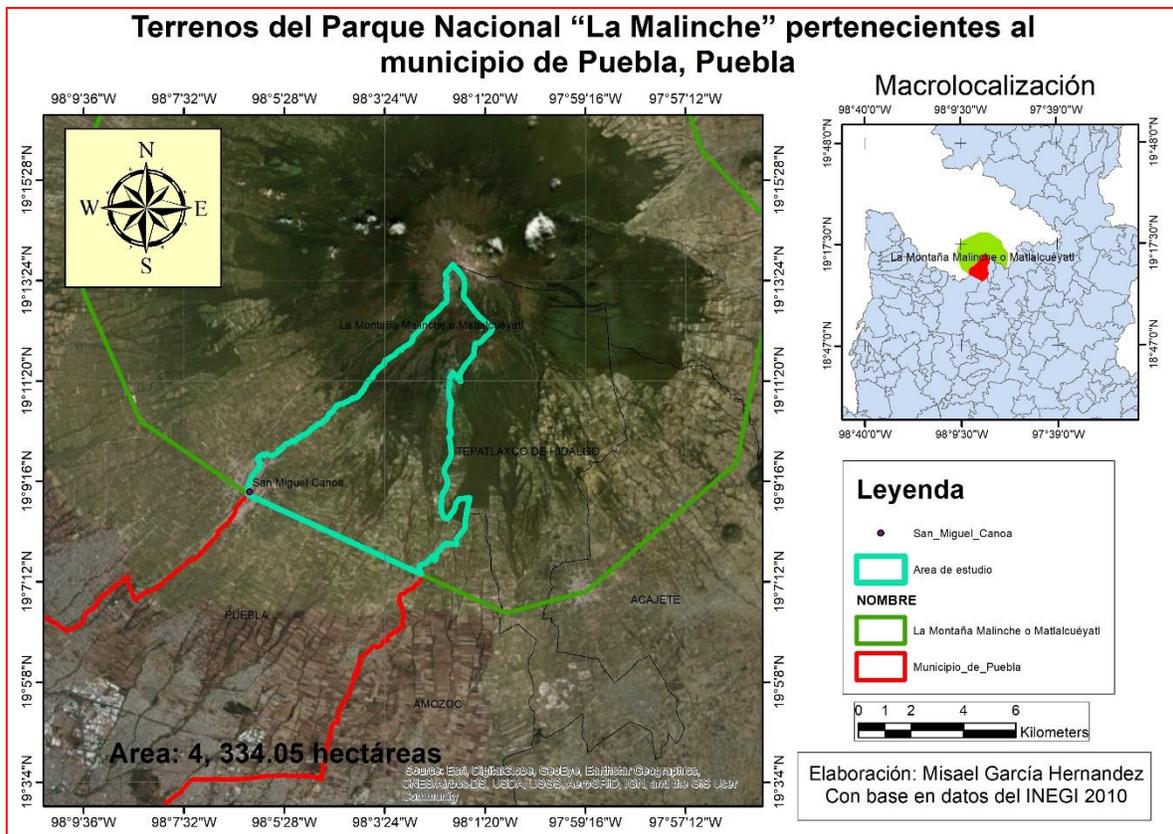


Figura 2. Localización del área de estudio.
Elaboración propia.

4.1.1 Clima

C(w1) (w): clima templado subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 11 y 17 °C; temperatura del mes más frío entre 3 y 18 °C, % de precipitación invernal con respecto a la anual menor de cinco. Se presenta en la parte meridional de la región. Dependiendo de la precipitación se subdivide en Cb(w1) (w)(i´) g, Cb(w1) (w)(i´) gw´ y Cb(w1) (w)(i) (CONANP, 2013).

4.1.2 Fisiografía y geología

Los estados de Tlaxcala y Puebla se ubican dentro de la provincia del Eje Neovolcánico y la subprovincia de los lagos y volcanes de Anáhuac. Esta última está integrada por grandes sierras volcánicas o volcanes individuales, de los cuales La Malinche es considerada como una ruina volcánica, el muñón erosionado de lo que

fuera en otros tiempos un gran volcán. Sus faldas inferiores se tienden radialmente con pendientes poco pronunciadas, en tanto sus laderas centrales, a partir de unos 3 mil 300 metros sobre el nivel del mar, son muy pronunciadas y se levantan hasta los 4 mil 461 metros de altitud. Entre las características más notables están: la presencia de una gran barranca localizada al oriente y que es conocida como Barranca Grande; un rasgo circular al este de la cima llamado Octlayo e identificado como antiguo cráter; huellas de acción glacial y rotura de roca por hielo y el Cerro Xalapazco, al pie del volcán (CONANP, 2013).

La Malinche, por el periodo de formación, es considerada como una de las principales montañas que conformaron la faja volcánica transmexicana. Los grandes volcanes del centro del país como La Malinche comenzaron a formarse a mediados del periodo Terciario, hace más o menos 35 millones de años.

Las formaciones del Mioceno son la base de los paisajes, la mayoría de estas, se calcula que sean originarias del Pleistoceno. Por lo general se trata de andesitas en la Sierra Nevada adicionalmente encontrándose dacitas en el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl.

El material eruptivo, consistente en carbonatos del cerro Xalapazco, se ha encontrado dentro del área abanicos de aluvión; esto indica que los mencionados sedimentos también se encuentran en las partes bajas de la montaña.

Mucho más recientes en contraposición son las capas siguientes de cenizas de pómez del Popocatepetl y de varios volcanes pequeños dentro del área de alcance del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl. Relativamente resistentes a la meteorización se muestran los sedimentos claros arenosos volcanoclásicos que se encuentran sobre las laderas superiores del volcán explicándose su existencia por una erupción del cráter del Octlayo, situado al oriente de la cima. En este último se trata también de tobas hornablenda; en los materiales del Tláloc se encuentran sustancias

de nubes ardientes de tipo dacítico riolítico para los cuales se presupone que su formación fue hace 40 mil años (CONANP, 2013).

4.1.3 Edafología

Los suelos existentes en el volcán se originaron a partir de las erupciones efectuadas por los cráteres satélites durante el Pleistoceno y Holoceno, que aportaron el material para la actual formación de la capa edáfica superior. Los suelos predominantes en el Parque Nacional La Malinche o Matlalcuéyatl en base a la carta edafológica 1: 1' 000,000 del INEGI, son los que se especifican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación edafológica del Parque Nacional Malinche.

UNIDAD DE SUELO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN DE FAO (1989) Y ADAPTADA POR INEGI PARA MÉXICO
I/2	Subunidad litosol de textura media	Litosol. - Suelo de distribución muy amplia, sin desarrollo, con profundidad menor de 10 cm. Tienen características muy variables, según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentren pudiendo ser desde moderada hasta alta.
(Th+Rd)/1	Asociación Andosol Húmico con Regosol Dístico de textura gruesa	Andosol. - Se ha formado a partir de cenizas volcánicas. En condiciones naturales tienen vegetación de pino, abeto, encino, etc. Muy susceptibles a la erosión. La subunidad Andosol Húmico (Th) tiene presencia de materia orgánica en fase de descomposición (humus), debido al tipo de vegetación que presenta el paisaje. Regosol. - Se caracteriza por no presentar capas distintas, son claros y se parecen a la roca que les dio origen, se pueden presentar en muy diferentes climas y con diversos tipos de vegetación. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentre. La subunidad Regosol Dístico (Rd) es de baja fertilidad (infértiles) debido a una baja saturación de bases.
(Je+Lo)/1	Asociación Fluvisol Eútrico con Luvisol Ortico de textura gruesa	Fluvisol. - El fluvisol se forma por materiales de depósito aluviales recientes, están constituidos por material suelto que no forma terrones y son poco desarrollados, cercanos a zonas de acarreo por agua. La subunidad Fluvisol Eútrico (Je) son suelos con una buena fertilidad debido a que presentan una alta saturación de bases. Luvisol. -El luvisol tiene acumulación de arcilla en el subsuelo, son rojos o claros, moderadamente ácidos. Son suelos de susceptibilidad alta a la erosión. La subunidad Luvisol Ortico (Lo) son suelos con presencia de un horizonte superficial pálido (claro).

Fuente: (INEGI, 2010).

4.1.4 *Hidrografía*

El Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl forma parte de la cuenca del Río Atoyac (región hidrológica del Río Balsas) y la cuenca cerrada Guadalupe (región hidrológica Río Papaloapan).

Las condiciones del suelo y subsuelo y las fuertes pendientes dan lugar a un drenaje muy rápido, no existen corrientes de agua permanente, únicamente se registran corrientes principalmente intermitentes de fuertes pendientes y corto recorrido. La mayoría de estos cauces han perdido la capacidad de conducción debido al arrastre de sedimentos que se originan en la parte alta del volcán y que se depositan a lo largo del cauce. Debido al fuerte escurrimiento son muy escasos los manantiales en esta región. El único recurso lacustre en esta zona lo constituye la laguna de Acuitlapilco, alimentada por escurrimientos provenientes de la montaña (CONANP, 2013).

El nivel freático de las aguas subterráneas es relativamente poco profundo, sobre todo a altitudes menores de 3 mil metros, pues el material consolidado de los suelos tiene un alto grado de permeabilidad; por el contrario, a altitudes mayores, el material consolidado tiene un bajo grado de permeabilidad. Además, por el régimen de lluvias que posee, es una zona muy húmeda. Así, el gradiente de humedad mayor es desde la cumbre de la montaña, tanto por la mayor precipitación como por las menores temperaturas reinantes, por lo cual se tiene un déficit mínimo de agua, o inexistente, permaneciendo húmedo el suelo al menos ocho ó 10 meses al año; y disminuye hacia la falda de la montaña, en donde se presenta déficit de unos 100 a 200 m³ anuales (CONANP, 2013).

4.1.5 *Flora*

Se considera que los tipos de vegetación localizados dentro de la poligonal y en el área de influencia de la montaña son: Bosque de pino (24.92 %), Bosque de oyamel-

pino (4.46 %), Bosque de encino (3.41 %) y las asociaciones de Bosque de pino-encino (1.36 %), Bosque encino-pino (0.17 %), Bosque pino-oyamel (5.38 %), así como pastizal natural (5.38 %), páramo de altura (1.66 %), y agricultura de temporal (53.27 %) (CONANP, 2013).

Bosque de Pino.- Esta vegetación se caracteriza por la dominancia de especies arbóreas pertenecientes al género *Pinus*, como: *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* y *P. hartwegii*. Los pinares, en general, son comunidades características de las montañas de México y se distribuyen también en varias partes de los estados de Tlaxcala y Puebla.

Bosque de oyamel.- Esta es una comunidad bien definida desde los puntos de vista fisonómico, ecológico y florístico (Rzedowski, 1978). Se presenta en altitudes que van desde los 2 mil 800 y 3 mil 500 metros a veces sobrepasando un poco estos límites, casi siempre sobre suelos derivados de sedimentos aluviales, poco desarrollados profundos y gravosos, localmente con bloque de roca. Esta comunidad se encuentra formando manchones representativos en las barrancas situadas alrededor del volcán, tales como: Cañada Grande, Barranca Nexa, Barranca Briones y Barranca Huetziatl entre otras. Esta comunidad se encuentra representada por la especie *Abies religiosa*.

Bosque de Encino.- Los encinares guardan relaciones estrechas con los pinares con los que comparten afinidades ecológicas, por lo que es común encontrar bosques formados por ambos elementos. Esta comunidad habita desde los 2 mil 200 metros, hasta los 2 mil 800 metros de altitud y no es del todo continua ya que en algunas partes dominan únicamente los pinares debido, por un lado, a las condiciones microclimáticas y edáficas, y por el otro, a la intervención del hombre. Las especies que se encuentran son *Quercus crassifolia*, *Q. crassipes* y *Q. laurina*.

Pastizal Natural (Zacatonal).- Bajo el nombre de pastizales se considera el tipo de vegetación en el que predominan las gramíneas. Indudablemente se trata de una comunidad secundaria favorecida por el disturbio, esta formación vegetal se presenta

en forma de manchones relativamente pequeños en altitudes de los 2 mil 600 a los 3 mil 800 metros sobre el nivel del mar, siendo más frecuente encontrar esta comunidad ocupando los claros en medio del bosque de pino y oyamel, en general tiende a ocupar suelos profundos y ricos en materia orgánica. Las especies más comunes son: *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia macroura* y *Stipa ichu*. Todos estos pastizales, durante la época seca del año, están sometidos a incendios, inducidos por los ganaderos con el propósito de estimular y acelerar el desarrollo de follaje nuevo, mismo que es más apetente y aprovechado por el ganado.

Chaparral.- Esta comunidad, se trata más bien de una agrupación densa de encinos bajos y delgados que brotaron a partir de tocones, siendo el más común *Quercus laurina*, así como otras especies arbustivas tales como: *Ceanothus coeruleus*, *Arctostaphylos discolor* y *Baccharis conferta*, sólo por citar algunos. Este chaparral sólo se encontró ocupando una pequeña porción al sur de la montaña a los 3 mil 300 metros sobre el nivel del mar, perteneciente al estado de Puebla. En general podemos decir que se trata de una comunidad secundaria que se formó después de una tala total y un incendio que dejó la superficie desprovista de vegetación y propició las condiciones para el establecimiento de dicha comunidad.

Asociaciones.- Existen en la montaña varias comunidades que resulta difícil agrupar en alguno de los tipos de vegetación antes descritos, debido a que son el resultado del traslape que se da entre dos o más elementos que caracterizan a una comunidad en particular, así como a las condiciones ecológicas imperantes, dando como resultado un ecotono más diverso en cuanto al número de especies arbóreas.

Por otra parte, resulta difícil poder describir las diferentes asociaciones vegetales que se reconocen para el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, siendo éstas: asociación de pino-aile-oyamel, asociación de encino-aile, asociación de encino-pino oyamel y asociación de pino-encino-aile. Dichas asociaciones se desarrollan entre los 2 mil 800 y 3 mil 600 metros sobre el nivel del mar, cuya superficie va a depender de la tolerancia de las especies a las condiciones ecológicas

imperantes, tales como temperatura, vientos, suelo, fisiografía y exposición, entre otros.

4.1.6 *Fauna*

La fauna del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, al igual que la flora, se inscribe dentro de las Provincias Bióticas Neotropical y del Eje Neovolcánico.

Gómez-Álvarez *et al.* (1993) en las memorias del 1er congreso sobre Parques Nacionales y Áreas Naturales Protegidas de México reportan para el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl un total de cinco especies de anfibios, 11 de reptiles; 27 de mamíferos y 77 especies de aves. De lo anterior se consideran de gran importancia 19 taxa endémicos del Eje Neovolcánico (CONANP, 2013).

4.1.7 *Factores sociodemográficos*

El Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, pertenece a 16 municipios, de los cuales, 12 son del estado de Tlaxcala, y cuatro de Puebla; con un total de 58 localidades y una población total de 43 mil 827 habitantes (CONANP, 2013).

La densidad poblacional para los municipios del estado de Puebla se caracteriza por encontrarse por debajo de la media para el área, sin embargo, aun así, la densidad para los municipios de Puebla y Acajete es alta, registrándose entre 363.6 y 418.7 habitantes por kilómetro cuadrado.

Las comunidades asentadas dentro del Área Natural Protegida, pertenecen a dos grupos étnicos: otomíes y nahuas. Para Puebla, la comunidad de San Miguel Canoa del municipio de Puebla, San Miguel Espejo y Capulac, que pertenecen al municipio de Amozoc de Mota y, por último, en el lado este del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, la comunidad de San Juan Tepulco, que corresponde al municipio de Acajete. En las comunidades mencionadas anteriormente, la mayoría de

la población es bilingüe (otomí-español y náhuatl-español), y menos del 4.5 % sólo es monolingüe (otomí o náhuatl).

4.1.8 Servicios e infraestructura

En lo que corresponde a las viviendas particulares habitadas en el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y su zona de influencia, podemos concluir que de las 58 mil 284 viviendas, el 5.8 % (3 mil 415) se encuentra dentro de la poligonal del Área Natural Protegida, y el 94.2 % (504 mil 869) restante se encuentra en la zona de influencia. Asimismo, se concluye que el 99.3 % de los habitantes que tiene su vivienda en estas áreas muestra un promedio de 5.8 habitantes por vivienda en el área del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y 5.2 habitantes por vivienda en la zona de influencia.

Con respecto a los servicios en las viviendas, se observa que éstas tienen condiciones similares al promedio estatal en el caso del servicio del agua potable; en el área del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, 76 % de las viviendas poseen este servicio y, de manera correspondiente, en el área de influencia el promedio es de 90 %; en el caso del servicio de drenaje el promedio por vivienda es menor, encontrándose valores de 61 y 82 % para el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y su área de influencia, respectivamente, mientras que respecto al servicio de energía eléctrica se tiene un valor promedio elevado por viviendas que fluctúa entre el 93 % en las más bajas y 96 % en las más alta (CONANP, 2013).

La comunidad de San Miguel Canoa, está dentro del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y es la única en el municipio de Puebla que cuenta con una población mayor a los 2500 habitantes.

4.1.9 Actividades socioeconómicas

En lo que respecta al estado de Puebla, el sector económico y tipo de actividad, la Población Económicamente Activa que vive en el Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y zona de influencia, es de 37 mil 451 personas. (CONANP, 2013).

Por sectores de actividad, la población se encuentra distribuida de la siguiente manera, en el sector primario, trabaja un total de 6 mil 529 personas que ocupan el 5.3 %, resaltando la población que habita en el Área Natural Protegida y representa la mayor proporción de trabajadores (as), mientras que para el sector secundario son 17 mil 456 habitantes, que representan el 14.4 %; en el sector terciario se encuentran ocupadas 12 mil 378 personas que equivalen al 10.2 % de la población ocupada, en el área de estudio.

La tendencia que refleja es que las personas ocupadas en los sectores secundario y terciario, generalmente de la industria manufacturera y de la construcción, se encuentran asentadas en las comunidades del área de influencia del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, debido a que sus servicios son requeridos en las grandes ciudades, así como en los diferentes corredores industriales de la región.

Con relación a lo anterior se encuentran los índices de población ocupada que no recibe ningún ingreso por su actividad en el que 4 mil 292 personas se encuentran en esta condición, mientras que la población que recibe hasta un salario mínimo es de 4 mil 344. La población que recibe de uno a dos salarios mínimos es de 13 mil 898 personas. De forma general se refleja la tendencia de mayor ingreso en la zona de influencia que está más cercana a las localidades más grandes.

Un aspecto importante dentro del análisis socioeconómico y que resulta de especial interés, es el relacionado con las viviendas que cocinan con leña y carbón en las localidades del Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl y su área de

influencia, por lo que representa un factor de presión para la conservación y manejo de los recursos naturales. Del análisis de los datos se observa que, en Puebla, 18 mil 353 viviendas usan leña y mil 430 usan carbón para cocinar (CONANP, 2013).

4.2 Elaboración de mapas temáticos

Para la realización de los mapas de uso de suelo y vegetación, así como el análisis de la dinámica del cambio de uso del suelo se utilizó la herramienta de Sistemas de Información Geográfica mediante el software ArcMap 10.2.2. El primer paso fue la obtención del satélite Landsat Thematic Mapper (TM) y TM+ del año 1984 y 2018. Así mismo se utilizó el Global Position System (GPS), para verificar y georreferenciar la información digital in situ.

4.3 Primera fase de campo

4.3.1 Categorías de análisis

Las categorías de análisis que fueron elegidas para su estudio con los sistemas de información geográfica a través de las imágenes de satélite fueron determinadas a partir de los siguientes criterios: 1) observación directa (recorridos en campo) y 2) los saberes de la población (Camacho *et al.*, 2015).

4.4 Fase de gabinete y segunda fase de campo.

4.4.1 Mapas de Uso de Suelo y Vegetación

Para generar los mapas de Uso de Suelo y Vegetación se buscaron y adquirieron imágenes de satélite Landsat de los años 1984 y 2018, las cuales no tuvieran problemas de visibilidad o nubosidad. Dichas imágenes de satélite contaron con las características que se observan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de las imágenes de satélite Landsat.

Año	Imagen de Satélite Landsat	Temporalidad (mes)	Número de bandas	Resolución espacial (tamaño de pixel)
1984	Landsat_5	enero	5	30 m
2018	Landsat_7	febrero	7	30 m

Fuente: elaboración propia. Basado en Metadata for LE05-07 de USGS.

Posteriormente se procedió a la digitalización de las categorías de análisis a partir de los pixeles representativos o prototipo de cada unidad de análisis, mediante clasificación supervisada. Posteriormente se aplicó el método conocido como Máxima Probabilidad o Verosimilitud para determinar los pixeles de la imagen en cada una de las categorías clasificadas de uso de suelo y vegetación para terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al municipio de Puebla y generar el mapa para cada año a analizar mediante el software ArcMap 10.2.2.

Los mapas de Uso de Suelo y Vegetación de cada año serán sometidos a un proceso de evaluación para conocer la certeza de los datos que representan, Camacho *et al.*, 2015 menciona las siguientes fases metodológicas:

1. Diseño del muestreo: para determinar las unidades de muestreo (pixeles) se utilizará el método aleatorio estratificado. El muestreo corresponderá solo al número de sitios por categorías y no será proporcional a la superficie de cada categoría de análisis. Con base en Congalton, (1988 y 1991) se recomienda verificar 50 puntos por categoría temática.
2. Evaluación de sitios de verificación: la validación de la información temática para cada año por medio de los puntos de muestreo será localizándolos *in situ* haciendo uso y manejo del GPS. Cada punto será caracterizado de acuerdo con la información visual de campo. Los puntos de muestreo se sobrepondrán en los mapas temáticos, para validar la información satelital.

3. Análisis de los datos: en esta fase se comparará la información de campo con la información digital (de los mapas temáticos de cada año).

Como el muestreo es aleatorio estratificado y no depende de la superficie que cubre cada categoría de análisis, es necesario realizar el ajuste de la matriz de confusión mediante un método propuesto por Card (1982), el cual consiste en ponderar el número de sitios de verificación en relación con la superficie de cada categoría representada en cada uno de los mapas temáticos, haciendo la matriz de confusión expresada en proporción.

Al aplicar las correcciones a las matrices de confusión se procedió a realizar el cálculo de cada área representada por las categorías de análisis.

4.5 Variables respuestas

4.5.1 Matriz de transición

La dinámica espacio-temporal del cambio del uso del suelo en el área de estudio se analizó en 34 años mediante la sobreposición de los mapas temáticos de uso de suelo y vegetación y la matriz de cambios (Cuadro 4), que muestra la superficie para cada año de uso de suelo. Con la información anterior se calcularon las ganancias, pérdidas, persistencia y porcentajes de las coberturas vegetales (Camacho *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015).

Cuadro 4. Matriz de cambios.

		Año t ₂				
		Categoría 1 (t ₂)	Categoría 2 (t ₂)	Categoría 3 (t ₂)	Categoría n (t ₂)	Total (t ₁)
Año t ₁	Categoría 1 (t ₁)	Categoría 1 (t ₁), categoría 1 (t ₂)	Categoría 2 (t ₁) categoría 1 (t ₂)	Categoría 3 (t ₁) categoría 1 (t ₂)	Categoría n (t ₁) categoría 1 (t ₂)	Total categoría 1 (t ₁)
	Categoría 2 (t ₁)	Categoría 1 (t ₁) categoría 2 (t ₂)	Categoría 2 (t ₁) categoría 2 (t ₂)	Categoría 3 (t ₁) categoría 2 (t ₂)	Categoría n (t ₁) categoría 2 (t ₂)	Total categoría 2 (t ₁)
	Categoría 3 (t ₁)	Categoría 1 (t ₁) categoría 3 (t ₂)	Categoría 2 (t ₁) categoría 3 (t ₂)	Categoría 3 (t ₁) categoría 3 (t ₂)	Categoría n (t ₁) categoría 3 (t ₂)	Total categoría 3 (t ₁)

Categoría n (t ₁)	Categoría 1 (t ₁) categoría n (t ₂)	Categoría 2 (t ₁) categoría n (t ₂)	Categoría 3 (t ₁) categoría n (t ₂)	Categoría n (t ₁) categoría n (t ₂)	Total categoría n (t ₁)
Total (t ₂)	Total categoría 1 (t ₂)	Total categoría 2 (t ₂)	Total categoría 3 (t ₂)	Total categoría n (t ₂)	Suma de totales

Fuente: Elaboración propia basada en Camacho *et al.*, 2015.

4.5.2 Cadenas de Markov

Los Procesos Estocásticos o Procesos Aleatorios son una herramienta probabilística, que surge ante la necesidad de modelar el comportamiento de experimentos aleatorios que varían en el tiempo o dependen de alguna otra variable no determinista. Usualmente se usan como modelos matemáticos de fenómenos aleatorios que evolucionan en el tiempo o el espacio (la dinámica del sistema). Y como la aleatoriedad está presente en una gran diversidad de situaciones, sus posibles aplicaciones son muy amplias: finanzas, seguros, telecomunicaciones, medicina, servicios y muchos más (Serfozo, 2009).

De acuerdo con Serfozo (2009) una cadena de Markov es un proceso estocástico con un número finito de estados con probabilidades de transición estacionarias, es decir, si se conoce la historia del sistema hasta su instante actual, su estado presente resume toda la información relevante para describir en probabilidad su estado futuro.

Un proceso estocástico $X = \{X_n: n \geq 0\}$ en un conjunto contable S es una cadena de Markov si, para cualquier $i, j \in S$ y $n \geq 0$,

$$P \{X_{n+1} = j \mid X_0, \dots, X_n\} = P \{X_{n+1} = j \mid X_n\}, \quad (1)$$

$$P \{X_{n+1} = j \mid X_n = i\} = p_{ij}. \quad (2)$$

El p_{ij} es la probabilidad de que la cadena de Markov salte del estado i al estado j . Estas probabilidades de transición satisfacen $\sum_{j \in S} p_{ij} = 1$, $i \in S$, y la matriz $P = (p_{ij})$ es la matriz de transición de la cadena.

La ecuación (1) llamada Propiedad de Markov, dice que, en cualquier momento de n , el siguiente estado X_{n+1} es condicionalmente independiente del pasado X_0, \dots, X_{n-1} dado el estado presente X_n . En otras palabras, el siguiente estado depende del pasado y el presente solo a través del estado presente. La propiedad de Markov es una condición elemental que se satisface por el estado de muchos fenómenos estocásticos. En consecuencia, las cadenas de Markov y los procesos relacionados de Markov en tiempo continuo son modelos naturales o bloques de construcción para las aplicaciones.

La ecuación (2) simplemente dice que las probabilidades de transición no dependen del parámetro de tiempo; la cadena de Markov es por lo tanto "homogénea en el tiempo". Si las probabilidades de transición fueran funciones del tiempo, el proceso X_n sería una cadena de Markov no homogénea en el tiempo. Estas cadenas son como cadenas homogéneas en el tiempo, pero la dependencia del tiempo introduce detalles contables adicionales que no se abordarán aquí.

En el estudio de Briceño (2005) se describe una cadena de Markov como una secuencia $X_1, X_2, X_3 \dots$ de variables aleatorias. El rango de estas variables, es llamado espacio estado, el valor de X_n es el estado del proceso en el tiempo n . Si la distribución de probabilidad condicional de X_{n+1} en estados pasados es una función de X_n por sí sola, entonces:

$$\text{Prob} \{X_{n+1}=j | X_0=k_0, X_1=k_1, \dots, X_{n-1}=k_{n-1}, X_n=i\} = \text{Prob}\{X_{n+1}=j | X_t=1\}$$

Donde X_i es el estado del proceso en el instante i . La identidad mostrada es la Propiedad de Markov.

Las cadenas de Markov, pueden usarse para estudiar la dinámica del uso del suelo y vegetación, ya que proporcionan un modelo descriptivo y prospectivo para analizar los cambios en el uso del suelo y la distribución de los mismos (Briceño, 2005). Por ejemplo, si en una superficie se tiene la probabilidad de que esté en uso (categoría 1)

en un tiempo (t), representado por la expresión categoría (1)(t) y la probabilidad de un cambio de uso de categoría (1) a categoría (2) o de categoría (i) a categoría (j), durante un intervalo de tiempo (t+1), la expresión es la siguiente:

$$\text{Categoría } j(t+1) = \sum_{i=1}^n \text{categoría } i(t) * \text{Categoría } (ij)(t, t + 1) \dots\dots\dots(3)$$

Donde (n) es el número total de categorías de uso.

Simplificando, se tiene que la distribución de probabilidades de las variables aleatorias de uso de la tierra en tiempo (t+1), será dada por la multiplicación matricial siguiente:

$$\text{Categoría } i(t+1) = \text{Categoría } i(t) * P(t,t+1) \dots\dots\dots(4)$$

Y para el caso donde las probabilidades de transición dependen solo del intervalo de tiempo (t, t+1), se considera que el proceso es temporalmente homogéneo, por tanto, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P \dots\dots\dots (5)$$

Así, el proceso Markov se lleva a efecto mediante operaciones entre matrices. Las matrices de Markov son tablas con arreglos simétricos que contienen en uno de los ejes las categorías de análisis de uso de suelo y vegetación en el año (t1) y, en el otro eje las mismas categorías, pero en el año (t2). La matriz de probabilidades se puede resolver de forma automatizada utilizando el software R.

4.5.3 Tasas de cambio de uso de suelo

Los resultados de las superficies de cada categoría de análisis que arrojó la matriz de cambios se utilizaron para obtener las tasas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. Las tasas de cambio de la cobertura y uso del suelo para el periodo de tiempo 1984-2018 se determinaron mediante la fórmula de la FAO (1):

$$T=1-(S2/S1)^{1/n} \dots \dots \dots (6)$$

Dónde: t corresponde a la tasa de cambio; S1 la superficie cubierta por un tipo dado de uso/cobertura del suelo en la fecha 1; S2 es la superficie del mismo uso/cobertura del suelo en la fecha 2 y; n es el número de años transcurridos entre las dos fechas (Camacho *et al.*, 2015).

4.5.4 Ganancias, pérdidas e intercambio entre categorías.

Las ganancias se determinaron como la diferencia del área total de la categoría i (t2) en la fecha 2 (t2) y la persistencia expresada en la diagonal de la matriz (t 1,2):

$$G_i = \text{área total de la categoría } i \text{ (t}_2\text{)} - [\text{Categoría } i \text{ (t}_1\text{), categoría } i \text{ (t}_2\text{)}] \dots \dots \dots (7)$$

Las pérdidas son la diferencia entre el área total de una categoría i (t₁) en la fecha 1 (t₁) y la persistencia:

$$P_i = \text{área total de una categoría } i \text{ (t}_1\text{)} - [\text{Categoría } i \text{ (t}_1\text{), categoría } i \text{ (t}_2\text{)}] \dots \dots \dots (8)$$

El intercambio es el proceso en que la pérdida de una determinada categoría en un lugar está acompañada por su ganancia simultánea en otra ubicación. Por ejemplo, cuando la deforestación de un bosque va acompañada de su reforestación en otro lugar dentro del mismo periodo de tiempo. El intercambio entre categorías (Int) se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas (Farfán *et al.*, 2016).

$$Int = 2 \times \text{MIN (ganancia de cada categoría, pérdida de cada categoría)} \dots \dots \dots (2)$$

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las categorías de análisis que se identificaron en campo (Fig. 3) coinciden con las categorías que tienen los mapas temáticos de la Serie II año 1997 y Serie V año 2013 de INEGI, las cuales son: agricultura (A), bosque de encino (BE), bosque de oyamel (BO), bosque de pino (BP), pastizal inducido (PI), sin vegetación aparente (SVA) y asentamientos humanos (AH). Los recorridos de campo también dieron cuenta que existe en la región un problema significativo de tala clandestina y afectación por incendios forestales, lo cual genera una perturbación en el paisaje natural y el medio físico-biológico.





5.1 Matriz de Cambio

De acuerdo a datos proporcionados por la Universidad Popular Autónoma de Puebla-UPAEP (2015), la zona metropolitana de Puebla creció 12 veces y la población aumentó 2.46 veces en los últimos 35 años; sin embargo, el proceso se realizó en desorden y sin un proyecto de planeación a largo plazo. Lo anterior ha traído como consecuencia un incremento en la demanda de productos y servicios, lo cual ha derivado en una mayor presión sobre los recursos naturales de San Miguel Canoa. En consecuencia, se observa un cambio significativo en la cantidad y las actividades de la población económicamente activa, lo cual puede influir en la dinámica de cambio de uso del suelo en el área de estudio.

Con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica se realizó una reclasificación de superficies y se obtuvo un balance de superficies con cambio de uso de suelo y vegetación en los años 1984 y 2018 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Balance de cambios, años 1984 y 2018.

Año 1984		Año 2018		Dinámica de cambio (ha)
Uso de suelo y vegetación	Superficie (ha)	Uso de suelo y vegetación	Superficie (ha)	
Agricultura	1383.467	Agricultura	2071.145	Aumento en 687.67 ha
Asentamientos humanos	39.607	Asentamientos humanos	66.118	Aumento en 26.51 ha
Bosque de encino	633.042	Bosque de encino	789.514	Aumento en 156.47 ha
Bosque de oyamel	287.438	Bosque de oyamel	169.300	Disminuyó en 118.13 ha
Bosque de pino	1501.973	Bosque de pino	815.154	Disminuyó en 686.81 ha
Pastizal inducido	441.114	Pastizal inducido	353.548	Disminuyó en 87.56 ha
Sin vegetación aparente	47.418	Sin vegetación aparente	69.280	Aumento en 21.86 ha
Total	4334.059	Total	4334.059	

Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio presentó cambios importantes en la estructura espacial, tal como se muestra en la matriz de cambio (Cuadro 6), la diagonal muestra la superficie que permaneció en el periodo de los dos momentos analizados, a partir de la matriz de cambios se determinó la matriz de probabilidades (Cuadro 7), los cambios también son visibles en los mapas temáticos de uso de suelo y vegetación (Figura. 3).

Cuadro 6. Matriz de cambio de uso de suelo.

Año 1984	Año 2018								
	Uso de suelo y vegetación	AG	AH	BE	BO	BP	PI	SVA	Total general (1984)
AG	1263.414	33.820	79.374			4.771	0.797	1.291	1383.467
AH	11.311	28.034	0.261						39.607
BE	399.407	4.202	169.395	1.705	47.501	10.062	0.770		633.042
BO	6.373		39.379	110.701	76.942	46.067	7.977		287.438
BP	286.483		458.623	23.543	613.877	117.022	2.425		1501.973
PI	104.157	0.061	42.482	31.455	70.969	174.096	17.894		441.114
SVA				1.897	1.094	5.504	38.923		47.418
Total general (2018)	2071.145	66.118	789.514	169.300	815.154	353.548	69.280		4334.059

Nota: AG-Agricultura; AH- Asentamientos Humanos BE- Bosque de Encino; BO- Bosque de Oyamel; BP- Bosque de Pino; PI- Pastizal Inducido y SVA- Sin Vegetación Aparente. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Matriz de probabilidades.

Año 1984	Año 2018								
	Uso de suelo y vegetación	AG	AH	BE	BO	BP	PI	SVA	Total general
AG	0.913	0.024	0.057	0.000	0.003	0.001	0.001		1.00
AH	0.286	0.708	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000		1.00
BE	0.631	0.007	0.268	0.003	0.075	0.016	0.001		1.00
BO	0.022	0.000	0.137	0.385	0.268	0.160	0.028		1.00
BP	0.191	0.000	0.305	0.016	0.409	0.078	0.002		1.00
PI	0.236	0.000	0.096	0.071	0.161	0.395	0.041		1.00
SVA	0.000	0.000	0.000	0.040	0.023	0.116	0.821		1.00

Nota: AG-Agricultura; AH- Asentamientos Humanos BE- Bosque de Encino; BO- Bosque de Oyamel; BP- Bosque de Pino; PI- Pastizal Inducido y SVA- Sin Vegetación Aparente. Fuente: Elaboración propia.

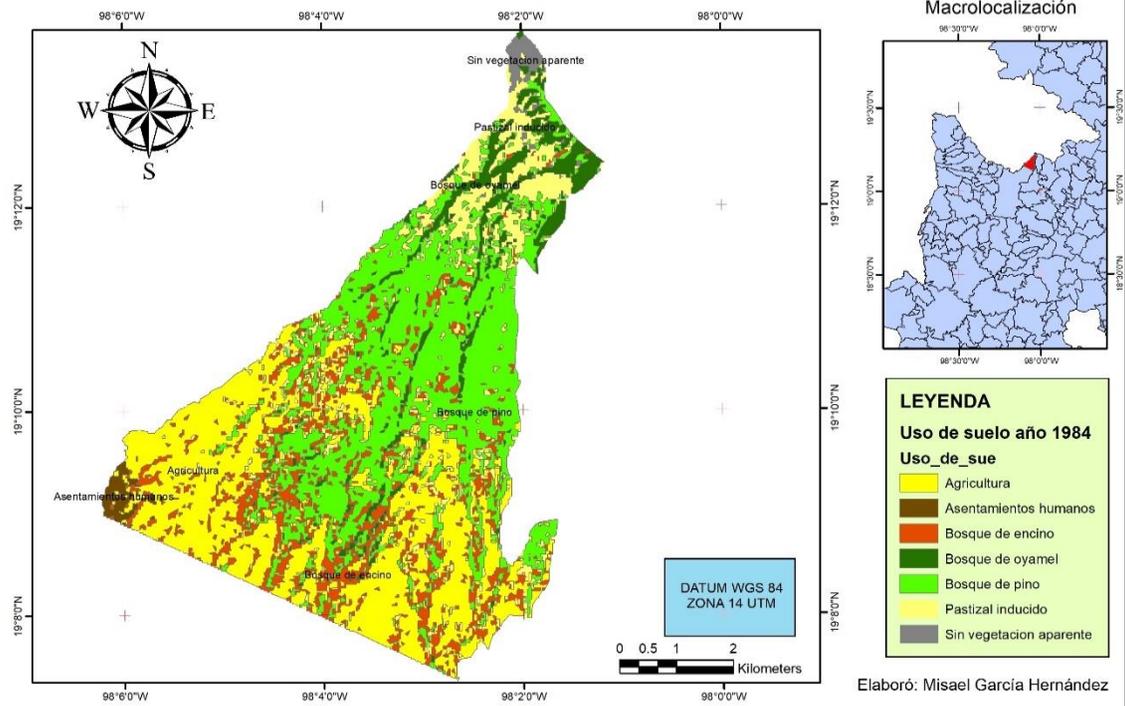
La probabilidad se calculó dividiendo la superficie de la categoría que permaneció sin cambios entre el total general de esa categoría. Estos valores se obtuvieron de la matriz de cambios de uso de suelo (Cuadro 6).

De 1980 a la actualidad el municipio de Puebla y la zona metropolitana ha crecido 12 veces el tamaño de su superficie, lo cual representa una urbanización descontrolada

de la zona metropolitana de Puebla y su población ha aumentado más del doble en el mismo lapso de tiempo, según datos de UPAEP (2015). Por lo cual, aparentemente el aumento en la población pudiera indicar que se requiere mayor cantidad de espacios para vivienda y se presente un cambio de uso de suelo.

En el análisis espacio-temporal destacan que los principales cambios de uso del suelo y vegetación son de origen antrópico como procesos de deforestación para la expansión de las actividades agropecuarias, como en el caso del estudio de Camacho *et al.*, (2015) sobre cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. Mientras que para los terrenos del parque nacional “La Malinche” del municipio de Puebla, la dinámica del cambio del uso del suelo está relacionada principalmente con la disminución y la pérdida de las áreas boscosas, destacando la pérdida del bosque de pino y encino. Además de un incremento 66% en la superficie destinada a las actividades agrícolas.

Mapa de uso de suelo y vegetación en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al Municipio de Puebla (año 1984)



Mapa de uso de suelo y vegetación en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” pertenecientes al Municipio de Puebla (año 2018)

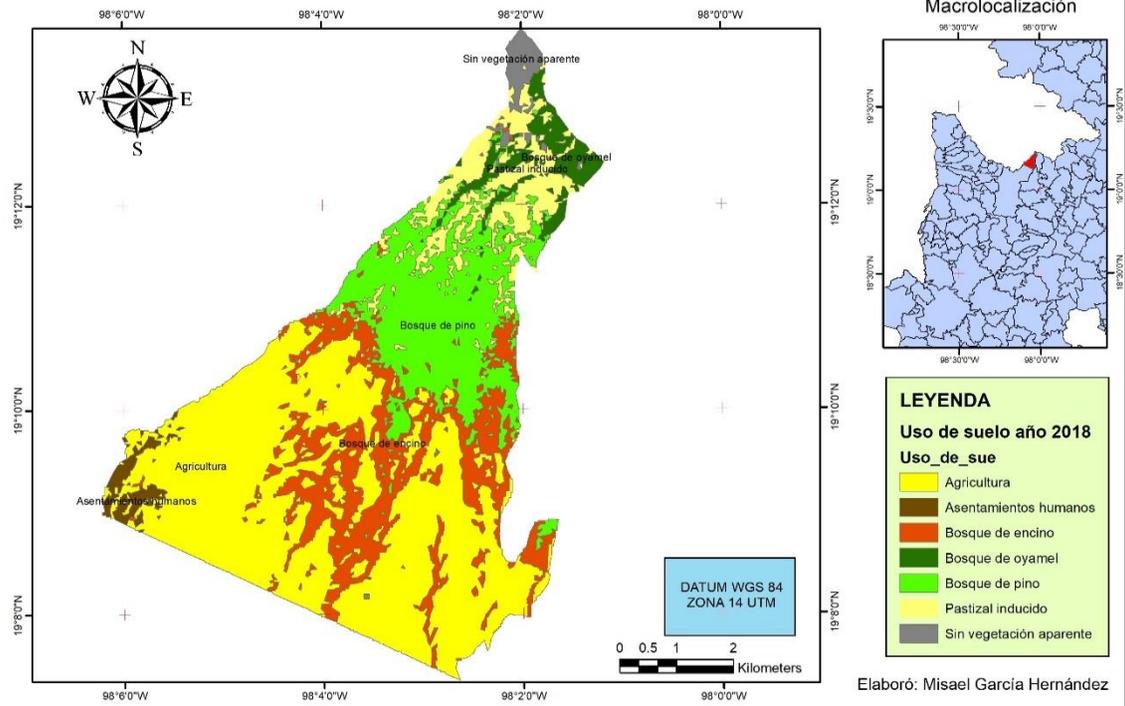


Figura 4. Mapas temáticos de uso de suelo y vegetación.
 Fuente: elaboración propia.

5.2 Cadenas de Markov

Con la matriz de probabilidades (Cuadro 7) se generaron las probabilidades de cambio para periodos de 34 años (Fig. 5).

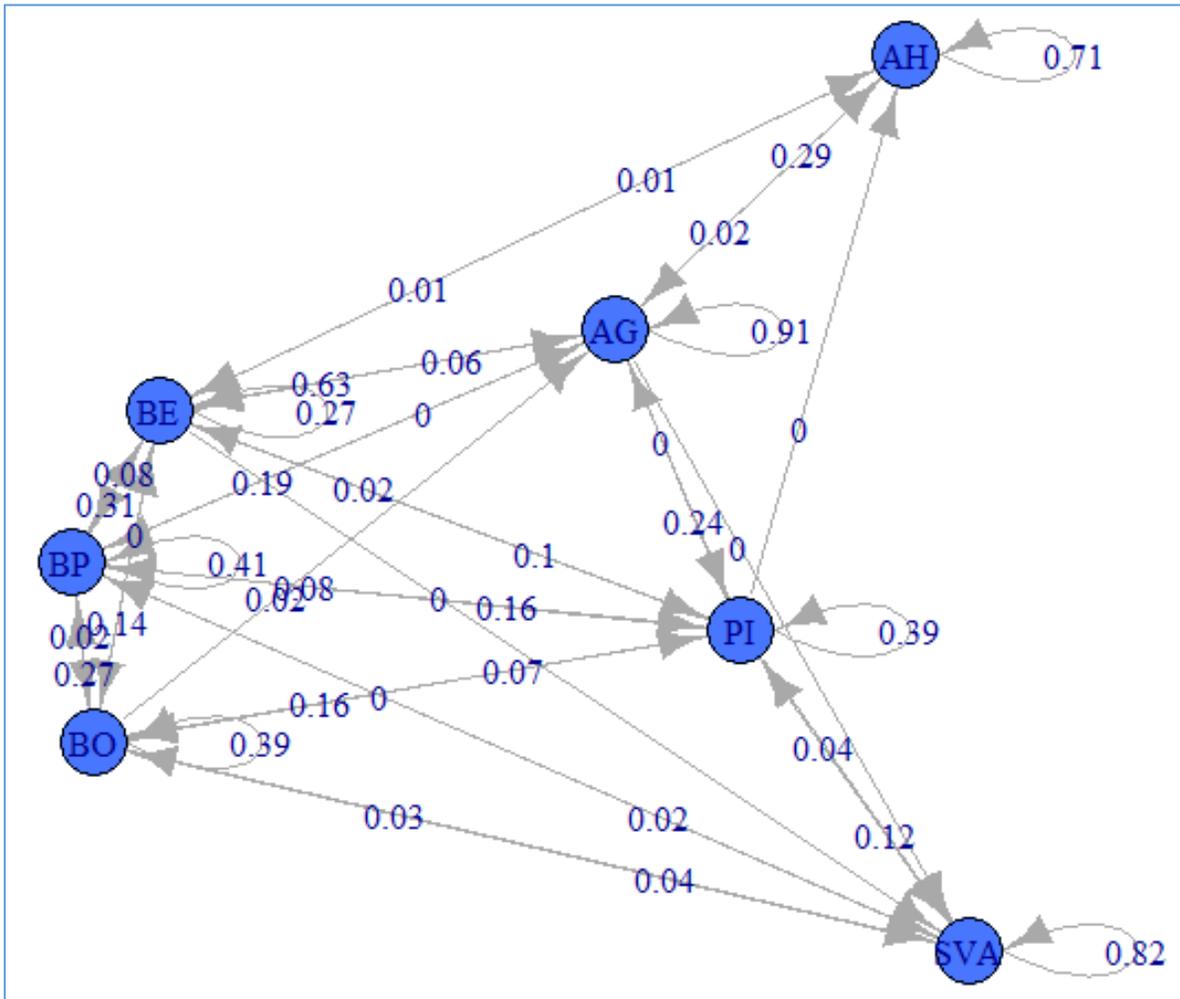


Figura 5. Cadena de Markov, la cuales indican la probabilidad de cambio, aplicada al cambio de uso de suelo y vegetación en terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla, Puebla. Elaboración propia.

La probabilidad de permanencia del bosque de encino es de 27 % ya que la tendencia es a seguir cambiando la cobertura encinar hacia las actividades agrícolas donde la permanencia de la superficie que cubre se estima en un 91 %, la cual tiende a cambiar en muy poco porcentaje de uso agrícola a bosque de pino y bosque de encino. El pastizal inducido tiende a cambiar hacia bosque de pino y bosque de oyamel, y a ganar

superficie muy incipiente de la agricultura. El bosque de oyamel presenta la probabilidad de permanecer en un 39 % y tiende a cambiar hacia el bosque de pino, el pastizal inducido y hacia zonas sin vegetación aparente. Los asentamientos humanos presentan la probabilidad de permanecer en un 71 % y tiende a crecer hacia los estratos de agricultura y bosque de encino.

5.3 Tasas de cambio de uso de suelo

La tasa de cambio de uso de suelo (Cuadro 8) para el bosque de pino es de -1.78 %, para el bosque de oyamel es -1.54 % y para asentamientos humanos es 1.52 %, lo cual indica que las superficies de estas categorías para el año 2018, tuvieron un cambio relevante respecto a la superficie inicial (año 1984) de estos mismos estratos, en lo referente a la superficie con agricultura y bosque de encino aunque tuvieron mayor cambio en cantidad de superficie, presenta un cambio menor en cuanto al total, teniendo una tasa de cambio de 1.19 % y 0.65 % respectivamente. Mientras que el pastizal inducido presenta una baja tasa de cambio con un valor de -0.65 %.

Cuadro 8. Tasas de cambio, pérdidas y ganancias del uso de suelo y vegetación de terrenos del Parque Nacional “La Malinche” del municipio de Puebla.

Uso de suelo y vegetación	TASAS DE CAMBIO PERIODO (1984-2018)	Pérdidas	Ganancias	Cambio total	Intercambio entre categorías
Agricultura	1.19	120.05	807.73	927.78	240.11
Asentamientos humanos	1.52	11.57	38.08	49.66	23.15
Bosque de encino	0.65	463.65	620.12	1083.77	927.29
Bosque de oyamel	-1.54	176.74	58.60	235.34	117.20
Bosque de pino	-1.78	888.10	201.28	1089.37	402.55
Pastizal inducido	-0.65	267.02	179.45	446.47	358.90
Sin vegetación aparente	1.12	8.50	30.36	38.85	16.99

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos del cálculo de la tasa de cambio de uso de suelo (Cuadro 8) se representaron mediante una gráfica (Fig. 6) las categorías que ganan y pierden superficie en el lapso de tiempo de esta investigación, el cual es 34 años.

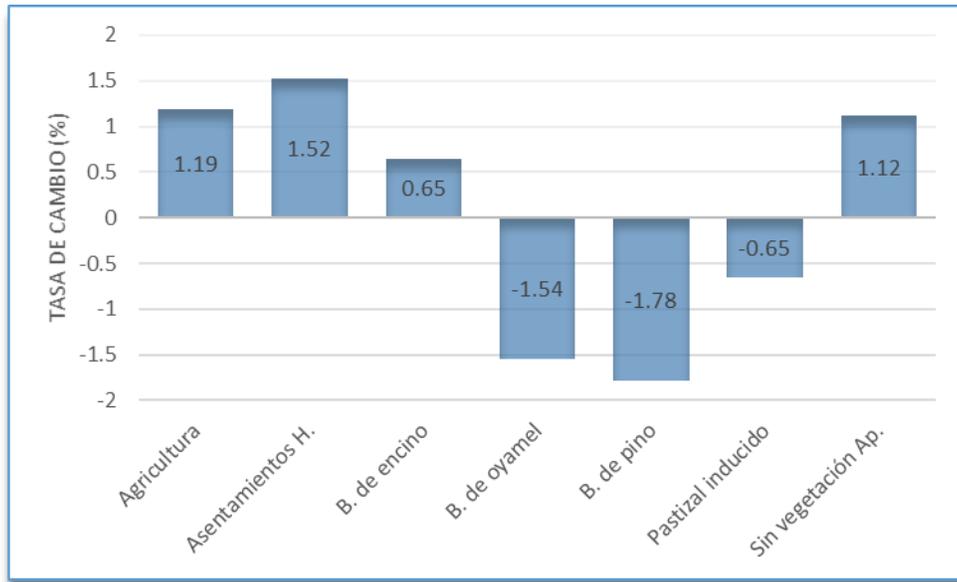


Figura 6. Tasas de cambio de uso de suelo para las categorías que ganan y pierden superficie en el periodo 1984-2018. Elaboración propia

5.4 Ganancias, pérdidas e intercambio entre categorías.

Con respecto a las ganancias la categoría que tuvo una mayor superficie de ganancia fue la agricultura generando pérdida en la cobertura de bosque de encino y pino. Lo que indica que en un lapso de 34 años el cambio de uso de suelos forestales a agrícola fue considerable, provocando que actualmente algunos terrenos estén abandonados, sujetos a erosión y degradación de suelos. Además de presentarse disminución en cantidad y calidad de bienes y servicios ambientales. Con respecto al intercambio entre categorías el bosque de encino y el bosque de pino, presentan una mayor variación en la superficie en 34 años (1984-2018) analizados, seguidos del pastizal inducido (Cuadro 7).

VI. CONCLUSIONES

La metodología que se utilizó permitió analizar los cambios en el espacio y el tiempo e identificar los principales procesos de cambio, que son originados por la actividad antropogénica, principalmente, el cambio de uso de suelo forestal a uso de suelo agrícola.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son de gran utilidad para este tipo de investigaciones, ya que en ellos se puede almacenar información, manipularla por diversos procesos o de análisis y estos a su vez pueden realizarse mediante métodos distintos para generar productos de interés para los usuarios. Sin embargo, no se puede prescindir de la capacidad de análisis y del sentido común del humano, por lo que es necesario que en lo relacionado a estudios del territorio se tenga conocimiento de la zona y la información se complemente con datos obtenidos en campo.

Es necesario contar con este análisis para identificar las áreas que tienen mayor degradación de los recursos naturales. Además, el mismo puede fungir como herramienta de planificación para el uso y manejo de los recursos naturales y focalización de esfuerzos de protección, conservación y restauración.

Con esta investigación se puede visualizar el escenario futuro en el área de estudio respecto a los cambios de uso de suelo que, si bien es inevitable, lo que se pretende es lograr un ordenamiento territorial para el aprovechamiento y conservación del suelo como recurso natural y de sus usos como bosque, agua, pastizales y agricultura.

VII. LITERATURA CITADA

- Buendía, R. E., Terrazas D.S. y Vargas, P. E. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8(1): 13-19. ISSN: 2007-3828.
- Briceño, V, F. (2005) *Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra*. Revista Geográfica Venezolana, vol. 46, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 35-45 Universidad de los Andes Mérida, Venezuela.
- Camacho, S. J. M., Juan, P. J. I., Pineda, J. N. B., Cadena, V. E. G., Bravo, P. L. C., y Sánchez, L. M. (2015) Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques* 21(1): 93-112.
- Congalton, R. 1988. A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(5):593-600.
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of the Environment* 37:35-46.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2013. Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del estado de Puebla. Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad de Puebla. México.

- Comision Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2013. *Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México DF.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. (Ed.). 1a ed. Barcelona, España: Gedisa, S.A.
- García, O. J. A., Cedillo, G. J. G. Juan P. J. I. y Balderas, P. M. Á. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el Altiplano Mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, (55-56): 63-73, ISSN: 0213-1781
- Gordillo, R. M. C. y Castillo, S. M. A. (2017). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4 (10), 39-49. DOI: 10.19136/era.a4n10.803
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., y Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la Investigación*. 6ta ed., México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. ISBN: 978-1-4562-2396-0
- Ibarra, M. J.L., Román, R., Gutierrez, K., Gaxiola, J., Arias, V. y Bautista, M. (2011). *Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático*. *Ami-Agua*, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 111-128, 2011.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2014. *Sistema de Información Geográfica*. México. Disponible en: www.inegi.org.mx
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*. 21(3): 375-393.

Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección Al Ambiente. Última Reforma DOF 24-01-2017

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Última Reforma DOF 26-03-2015.

Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. Última reforma DOF 2016.

López, V. V. H., Balderas, P. M. A., Chávez, M. M. C., Juan, P. J. I. y Gutiérrez C. J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *CIENCIA Ergo Sum*, 22 (2): 136-144. ISSN 1405-0269

Mas, J. F., Velázquez, A. y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*. 1(1): 23-39

Millington, A. y R. Alexander. 2000. *Vegetation mapping in the last three decades of the twentieth century*. In: A. Millington y R. Alexander, eds. *Vegetation mapping*. John Wiley y Sons, Chochester, Inglaterra. p:321-331.

Moreno, J. J. M., Aguarón, J. J. y Escobar, U. M. T. (2001). Metodología científica en valoración y selección ambiental. *Pesquisa Operacional* – 3, 21(1), 0101-7438.

Olaya, V. 2014. *Sistemas de Información Geográfica*. Disponible en:

<http://volaya.es/writing>

- Padrón, J. (2007). Tendencias Epistemológicas de la Investigación Científica en el Siglo XXI. *Cinta de Moebio* 28: 1-28
- Palacio, P. J.L., Sánchez, S. M.T., Casado, I. J.M., Propin, F. E., Delgado, C. J., Velázquez, M. A., Chias, B. L., Ortiz, A. M.I., González, S. J., Negrete, F. G., Gabriel, M. J., Márquez, H. R., Nieda, M. T., Jiménez, R. R., Muñoz, L. E., Ocaña, N. D., Juárez, A. E. Anzaldo, G. C., Hernández, E. J.C., Valderrama C. K., Rodríguez C. J., Campos, C. J.M., Vera, L.C.H., Camacho, R. C.G. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. (Ed.). 1a ed. México. ISBN 970-32-1885-7.
- Porta, J., López-Acevedo, M.; Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 3ª edición. Madrid.
- Ramos, R. R., Palma, L. D., Ortiz, S. C., Ortiz, G. C. y Díaz, P. G. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22 (3): 267-278, E-ISSN: 2395-8030
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. *Diagnóstico del Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva*. Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables, Ciudad de México, México.
- Serfozo, R. (2009) Basics of Applied Stochastic Processes. Springer.
- Soria, R. J., Ortiz, S. C. A., Islas, G. F. y Volke, H. V. (1998). *Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de recursos naturales, experiencias en México*. CONACYT, Publicación especial 7, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Méx. 93 p.