



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Facultad de Geografía

“Escenarios de cambio de uso de suelo en el
Valle de Ixtlahuaca - Atlacomulco, México
mediante Sistemas de Información Geográfica”

Reporte Final

Que para obtener el grado de
Especialista en Cartografía Automatizada
Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

Presenta

Lic. en Geografía Mayeli González Escobar.

Director:

Dr. Noel Bonfilio Pineda Jaimes

Toluca, México; Julio 2017.

Índice general

Introducción	1
Planteamiento del problema	3
Justificación	4
Objetivos	5
1. Capítulo 1. Marco teórico	
1.1 Antecedentes y desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	6
1.2 Funciones de los SIG	8
1.3 Teledetección	10
1.4 Imágenes de satélite	11
1.5 Escenarios o modelo tendencial	12
1.6 Módulo Análisis en Cadena de Markov	12
1.7 Antecedentes en el tema de estudio	14
1.8 Caracterización de la zona de estudio	17
2. Capítulo 2. Metodología	
2.1 Investigación bibliográfica	24
2.2 Investigación cartográfica	26
2.3 Determinación de variables	27
2.4 Mapa conceptual	28
2.4.1. Obtención del uso del suelo	29
2.4.2. Análisis de los cambios del uso del suelo	31
3. Capítulo 3. Análisis de resultados	
3.1. Uso de suelo en el Valle de Ixtlahuaca – Atlacomulco del año 1989	34
3.1.2. Uso de suelo en el Valle de Ixtlahuaca – Atlacomulco del año 2010	38
3.2. Análisis de cambios de uso del suelo	41
3.2.1. Matriz de Tabulación Cruzada y modelación cartográfica	41
3.2.2. Pérdidas y ganancias, cambios e intercambios	44
3.3. Escenarios de probabilidad	49
4. Conclusiones y recomendaciones	
4.1. Conclusiones	55
4.2. Recomendaciones	56
Bibliografía	57

Listado de figuras

Figura 1. Mapa: Zona de estudio	17
Figura 2. Mapa: Uso de suelo y vegetación	21
Figura 3. Procedimiento Tabulación cruzada	24
Figura 4. Mapa conceptual	28
Figura 5. Fase 1	30
Figura 6. Fase 2	31
Figura 7. Fase 2.1.	32
Figura 8. Fase 2.2.	33
Figura 9. Mapa: Uso de suelo 1989	36
Figura 10. Mapa: Uso de suelo y vegetación serie II, INEGI	37
Figura 11. Mapa: Uso de suelo 2010	39
Figura 12. Mapa: Uso de suelo y vegetación serie V, INEGI	40
Figura 13. Mapa: Cambio de uso de suelo 1989 – 2010	43
Figura 14. Mapa: Pérdidas y ganancias en pastizal	44
Figura 15. Mapa: Pérdidas y ganancias en agricultura	45
Figura 16. Mapa: Pérdidas y ganancias en suelo descubierto	46
Figura 17. Mapa: Pérdidas y ganancias en bosque	47
Figura 18. Mapa: Probabilidad de cambio en pastizal 2015	48
Figura 19. Mapa: Probabilidad de cambio en pastizal 2020	50
Figura 20. Mapa: Probabilidad de cambio en agricultura 2015	51
Figura 21. Mapa: Probabilidad de cambio en agricultura 2020	52
Figura 22. Mapa: Probabilidad de cambio en bosque 2015	53
Figura 23. Mapa: Probabilidad de cambio en bosque 2020	54

Listado de tablas

Tabla 1. Población total por municipio	22
Tabla 2. Características generales de las imágenes utilizadas	26
Tabla 3. Determinación de variables	27
Tabla 4. Uso de suelo 1989	35
Tabla 5. Uso de suelo 2010	38
Tabla 6. Matriz de tabulación cruzada	41

Listado de gráficas

Gráfica 1. Ganancias y pérdidas entre 1989 y 2010	48
Gráfica 2. Cambio neto entre 1989 y 2010	48

Introducción

En las últimas décadas el ser humano ha sido responsable de realizar un sinnúmero de cambios en la superficie terrestre, derivado de las actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos naturales, la gran mayoría de estos cambios tienen impactos negativos al ambiente debido a la excesiva explotación y a falta de cultura encaminada a cuidar y respetar el ambiente que nos rodea.

Actualmente la urbanización es considerada el componente principal del cambio de uso de suelo y fuerza motriz principal del cambio ambiental. Se estima que el 2% de la superficie terrestre está ocupada por áreas urbanas, estas son muy complejas y dinámicas, cuya velocidad y magnitud de cambio se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, especialmente en los países en desarrollo (Antrop, 2004).

En la actualidad los estudios sobre la dinámica en el cambio de la cobertura del suelo son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada. En las últimas décadas, el hombre se ha convertido en el principal desencadenador de la actividad transformadora de los ecosistemas. Su impacto ha sido evaluado desde diversas perspectivas entre las que destacan: la pérdida de biodiversidad, el calentamiento global, alteración de ciclos hidrológicos y pérdida de hábitats.

Hoy en día el uso de tecnología permite mostrar y/o analizar el comportamiento de los diferentes fenómenos que se desarrollan en la superficie terrestre, siendo naturales o antrópicos. Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron imágenes satelitales mismas que sirvieron para obtener la cartografía del uso del suelo del periodo 1989 - 2010, seguido de esto se realizó la manipulación de las dos capas en el software IDRISI, teniendo como resultado la matriz de tabulación cruzada, que muestra el comportamiento entre cada cobertura del tiempo 1 y 2, las ganancias, pérdidas, cambio total, cambio neto e intercambio. Además, esta parte se complementa con la elaboración de mapas que permiten hacer un análisis espacio-temporal, para identificar los valores que inciden en los cambios de coberturas.

El objetivo principal del presente trabajo es realizar escenarios de cambio de uso de suelo en el Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco, México, mediante Sistemas de Información Geográfica, usando como base la cartografía del uso de suelo del periodo de 1989 -2010

y con ayuda del Módulo de Markov. El módulo genera una matriz de probabilidad de transición, que expresan la probabilidad de que un pixel de cierta clase cambie a cualquier otra clase en el próximo periodo.

El documento está integrado por la introducción, el planteamiento del problema, donde se destaca la importancia de los cambios del uso de suelo y su relación con otras variables, la justificación expresa la trascendencia del trabajo en términos sociales y/o técnicos, los objetivos establecen las metas que se pretenden alcanzar al término de la presente investigación.

Capítulo uno, incluye el marco teórico, donde se abordan temas como: la importancia de los Sistemas de información Geográfica (antecedentes, desarrollo y funciones), antecedentes de la investigación, donde se abordan los puntos de vista de diferentes autores y sus aportes a temas relacionados al cambio del uso del suelo. La caracterización de la zona de estudio no podía faltar, esta ayudó para relacionar las variables con los resultados y de esta forma entender los cambios.

La metodología se incluye en el capítulo dos, se explican las fases y procedimientos que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos establecidos, teniendo como base la metodología de Pontius y haciendo uso de las herramientas de IDRISI: Land Change Modeler y Análisis en Cadena de Markov, que permitieron cuantificar y cartografiar los principales cambios en el Valle de Ixtlahuaca-Atlatomulco.

El capítulo tres se enfoca a mostrar el análisis de los resultados obtenidos, en el uso de suelo del año 1989 y 2010, el análisis de cambios de uso del suelo y los escenarios de probabilidad (mapas).

Finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones.

Planteamiento del problema

El cambio de uso del suelo es uno de los principales problemas a nivel mundial, las repercusiones se pueden observar a diversas escalas del espacio, incluyendo una serie de factores como: cambios naturales ocasionados por las variaciones climáticas, procesos hidrometeorológicos, geomorfológicos y antropogénicos, este último es ocasionado por el hombre, causante de la deforestación, la degradación del suelo, con la finalidad de tener áreas destinadas a desarrollar actividades económicas, construcción de viviendas, creación de infraestructura carretera, todo esto con propósito de satisfacer la demanda en alimentos y espacios para vivir.

Según datos del censo de población y vivienda del INEGI (1990 y 2010), la población del Valle de Ixtlahuaca-Atlahcomulco, para el año 1990 era de 181,689 habitantes y para el año 2010 ascendió a 296,404 habitantes, ante estas cifras los cambios son inevitables, las coberturas más vulnerables a los cambios son: las zonas de agricultura, pastizal y bosque, la falta de planeación para desarrollar diversas actividades en estas coberturas, ocasionando un desequilibrio ecológico.

El cambio de uso de suelo, es un problema que se hace cada vez más frecuente a lo largo del territorio nacional, el Valle no es la excepción, la falta de escenarios que muestren el comportamiento de las coberturas a corto y mediano plazo, lo cual ayudará a la toma de decisiones en la planificación del territorio. Es por ello que la elaboración del presente trabajo, permitirá analizar, mediante el empleo de los Sistemas de Información Geográfica, la relación entre los cambios de uso del suelo y las pérdidas y ganancias de las coberturas que integran el Valle.

Justificación

El crecimiento acelerado de la población crea la necesidad de una mayor demanda de espacios que permitan satisfacer las necesidades tales como: la expansión de las zonas urbanas, la explotación del campo para las diversas actividades económicas primarias, con la finalidad de producir más alimentos, el establecimiento centros especializados como el sector industria y la apertura de vías de comunicación que conecten a los municipios y localidades son factores que aceleran el cambio de uso de suelo y vegetación.

El Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco, se localiza al norte del Estado de México y se integra por los Municipios de Atlacomulco, Ixtlahuaca y Jocotitlán, el cambio de uso del suelo es derivado de su localización geográfica, el Valle se encuentra muy cerca del Municipio de Toluca y de la Ciudad de México, siendo estos tres municipios receptores de población económicamente activa, la población busca satisfacer sus necesidades y se establecen cerca de sus centros de trabajo conformando así el crecimiento urbano-rural.

La elaboración de este trabajo permitirá conocer las pérdidas y ganancias de las coberturas que presenta el Valle, además de cartografiar los cambios y mostrar las probabilidades de cambios (escenarios), mediante imágenes satelitales y el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), los SIG permiten realizar diversos procesos metodológicos en poco tiempo y con pocas personas, esto facilita y acelera la obtención de resultados. Los escenarios que se pretenden obtener serán a corto y mediano plazo, se pretende utilizar el escenario tendencial.

Según Henríquez (2012) un escenario tendencial presenta indicadores de las condiciones futuras de las variables, estos estudios son esenciales principalmente en situaciones críticas que generan problemas, los cuales deberán solucionar o corregir la planeación presente para prevenir contrariedades en el futuro. Estos escenarios se determinan mediante proyecciones del comportamiento a través del tiempo de la variable analizada, teniendo en cuenta otras variables o situaciones que están ligadas a la variable en cuestión.

Objetivos

General

- ❖ Elaborar escenarios de cambio de uso de suelo en el Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco, utilizando Sistemas de Información Geográfica.

Particulares

- ❖ Determinar el uso del suelo del Valle a partir del procesamiento de imágenes satelitales del año 1989 y 2010.
- ❖ Calcular la tasa cambio, mediante una matriz de tabulación cruzada que permita conocer las pérdidas, ganancias, cambios netos e intercambios de cada una de las coberturas.
- ❖ Estimar la tendencia de cambio de uso de suelo a corto y mediano plazo, mediante el módulo de Análisis en Cadena Markov (IDRISI).

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. Antecedentes y desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta compuesta por cinco elementos los cuales son: software, hardware, dato y recursos humanos que actúan coordinada y sistemáticamente para recolectar, almacenar, validar, actualizar, manipular, integrar, analizar, extraer y desplegar una serie de datos georreferenciados, con el fin de solucionar problemas complejos para la toma de decisiones en planificación y gestión (Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado, 1993).

Olaya V. (2010), en su libro *Sistemas de Información Geográfica* hace la recopilación histórica de los SIG:

- a) En 1959, Waldo Tobler define los principios de un sistema denominado MIMO (map in-map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En él, establece los principios básicos para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado.
- b) En la década de los 60, Roger Tomlinson desarrolló el primer Sistema de Información Geográfica en Canadá. Este sistema, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), tenía por objeto el manejo de los datos del inventario geográfico canadiense y su análisis para la gestión del territorio rural.
- c) En 1964, en el Harvard Laboratory SYMAP, desarrollaron una aplicación que permitía la entrada de información en forma de puntos, líneas y áreas, lo cual se corresponde a grandes rasgos con el enfoque que conocemos hoy en día como vectorial.
- d) En 1969, utilizando elementos de una versión anterior de SYMAP, David Sinton, también en el Harvard Laboratory, desarrolló un programa en el que la información es almacenada en forma de cuadrículas.

La evolución de los datos siendo el elemento principal del trabajo dentro de un SIG, la relación entre los datos y los elementos de software y hardware empleados en su manejo, ha ejercido una notable influencia en el desarrollo de las tecnologías SIG y, recíprocamente, estas han definido el marco de trabajo para los avances en los tipos de datos.

El desarrollo sufrido por los SIG desde sus orígenes hasta nuestros días es enorme. La popularización de las tecnologías y los esfuerzos de desarrollo llevados a cabo por un amplio abanico de ciencias beneficiarias de los SIG, todos han contribuido a redefinir la disciplina e incorporar elementos impensables entonces. No obstante, los componentes principales que identifican el núcleo principal de un SIG se mantienen a lo largo de todo ese desarrollo, y es su aparición la que define el momento inicial en el que podemos situar el origen de los SIG (Olaya, 2010).

Este momento surge al inicio de la década de los sesenta como resultado de unos factores que convergen para dar lugar al desarrollo de los primeros SIG. Estos factores son principalmente dos: la necesidad creciente de información geográfica y de una gestión y uso óptimo de la misma, y la aparición de las primeras computadoras (FAO, 2009).

Estos mismos factores son los que desde entonces han seguido impulsando el avance de los SIG, ya que el interés en el estudio y conservación del medio se incrementa paulatinamente también hoy en día, y ello crea una situación ideal para la evolución de las técnicas y herramientas empleadas, muy particularmente los SIG.

Bosque (2012), Durante las siguientes décadas, los Sistemas de Información Geográfica se han aplicado a problemas de gestión territorial y de recursos naturales, a cuestiones relacionadas con el medio ambiente, la logística militar o en contextos directamente vinculados con las ciencias de la Tierra, como la geografía, la geología, etc. Solo recientemente se han empezado a considerar el uso potencial de los SIG para otros campos y otras disciplinas relativamente inéditos y en particular con las ciencias Humanas y Sociales.

La aplicación y utilización de los sistemas de información ha incrementado el conocimiento en aquellos ámbitos o áreas de investigación en los que se vienen aplicando, en virtud a su habilidad para recibir, almacenar y, sobre todo, relacionar y

operar sobre distintas bases de datos informatizadas (internas o externas, cuantitativas o cualitativas, monotemáticas o multitemáticas) generando información imposible de obtener por otros cauces que no deriven de la aplicación de estos programas y aplicaciones informáticas. Esta es, también, la característica intrínseca a los sistemas de información geográfica y así lo manifiesta Chuvieco al afirmar que de las siglas SIG la más importante es la de Información, que el término Geográfica no es más que un calificativo de ésta, y el de Sistema puede aplicarse a otras muchas aplicaciones informáticas (Chuvieco, 1996).

1.2. Funciones de un SIG

De acuerdo con Limón (2013), un SIG almacena la información en capas temáticas que pueden enlazarse geográficamente. Este concepto simple pero altamente poderoso y versátil ha probado ser crítico en la resolución de muchos problemas que van desde el rastreo de vehículos de reparto, registrando los detalles de la planificación hasta el modelamiento de la circulación atmosférica global.

Las funciones de los SIG se pueden agrupar en cuatro conjuntos fundamentales: a) entrada de información, b) gestión de datos, c) transformación y análisis espacial y d) salida de datos.

Hernández C. (2014) describe las funciones de los SIG de la siguiente forma:

- a) Entrada de información: permite la introducción, edición y visualización de datos geográficos, los procesos de edición incluidos en las funciones de entrada suelen requerir de grandes recursos; se trata en este caso de la modificación de las características geométricas de las entidades (orientación, posición, forma), de la corrección de inconsistencias de los datos o de la generalización o suavizado de las líneas. Sin ellos, los datos no están “preparados” para ser utilizados.
- b) Gestión de datos: capturada y almacenada la información geográfica, el siguiente paso a realizar será el de extraer de la base de datos del SIG las porciones de información espacial que interesan en cada momento, con finalidad de permitir la independencia entre la base de datos y los programas que la gestionan para controlar su almacenamiento, recuperación y actualización.

- c) Transformación y análisis espacial: aquí radica todo el potencial operativo, sin duda las más representativas del SIG, son las que en definitiva atribuyen valor a los datos geográficos, al revelarnos nuevos datos a partir de los existentes. Conocer y comprender las operaciones espaciales es útil para planificar mejor y de forma más eficiente el trabajo con los SIG.
- d) Salida o representación gráfica y cartográfica de la información: son las que permiten transferir los datos, imágenes o mapas contenidos en él, a otro medio o soporte, de este modo podemos representar los datos almacenados a partir de una serie de criterios que permitirán visualizar la información en función de los objetivos establecidos.

Ordoñez C. (2003) mencionan que los componentes esenciales de un SIG son:

- a) Bases de datos espacial y temática: son elementos donde se almacenan, de forma estructurada, los objetos cartográficos (su posición, tamaño y forma) y sus características no geométricas (atributos), respectivamente.
- b) Sistema Gestor de Bases de Datos (DBMS): el tipo de software usado para gestionar y analizar los datos almacenados en una base. Desde estos sistemas se pueden almacenar los datos en tablas, establecer relaciones entre ellos y crear nuevas tablas con los resultados obtenidos. Estas tablas se pueden relacionar con la base de datos espacial y representar el resultado en forma de mapas temáticos.
- c) Sistema de digitalización de mapas: las bases de datos cartográficas de los SIG se construyen a partir de los mapas, fotografías o imágenes que conforman los datos de partida. Para cargar estos datos en la base de datos del SIG, es necesario convertirlos al formato digital propio del sistema, para lo cual disponen de programas de digitalización y de conversión de formatos.
- d) Sistema de representación cartográfica: permiten dibujar mapas a partir de los elementos seleccionados de las bases de datos, hacer distintas composiciones cartográficas y enviar estos mapas a los dispositivos de salida, como impresoras o graficadores. Los mapas son los medios más utilizados para representar los resultados de los análisis efectuados en un SIG y, con frecuencia, van

acompañados de tablas y diagramas, por lo que estos sistemas incorporan herramientas para crear este tipo de documentos.

- e) Sistema de análisis geográfico: este sistema permite relacionar datos espaciales y obtener nuevos mapas en función de la relación establecida.
- f) Sistema de procesado de imágenes: algunos SIG disponen de módulos para analizar y operar con imágenes obtenidas con sensores aerotransportados o desde satélites artificiales. Las imágenes procedentes de satélite se emplean cada vez más como fuentes de datos en los sistemas de información geográfica, especialmente en el análisis y resolución de problemas relacionados con el medio ambiente.

1.3. Teledetección

La teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales. Se asume que entre el suelo y el sensor existe una interacción energética, ya sea por la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia (Chuvienco, 2008).

Los sensores que se encuentran en los satélites son los encargados de captar la energía reflejada o emitida por los objetos. Las imágenes generadas por los sensores pueden ser caracterizadas a partir de tres parámetros: resolución espacial, espectral y radiométrica.

Según Chuvienco E. (1996), los principales sistemas espaciales de percepción remota se dividen en dos, dependiendo del origen de la señal captada:

- a) Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electro-magnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya emitida en virtud de su propia temperatura. De acuerdo a nuestra previa clasificación, puede establecerse una división en estos sensores en función del procedimiento que emplea para recibir la radiación procedente de los objetos. En el primer grupo estarían las cámaras fotográficas; en el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, las cámaras de vidicon, mientras los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de microondas.

- b) Los sensores activos se caracterizan por su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recoge tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Entre ellos, el sistema más conocido es el radar radiométrico activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprimida entre 0.1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad puede trabajar en cualquier condición atmosférica, el radar está ganando la atención de la comunidad científica, especialmente para su aplicación a países en donde resulta casi persistente la cobertura de nubes.

1.4. Imágenes de satélite

Las imágenes están compuestas por matrices de celdas llamadas pixeles y están formadas por determinado número de filas y columnas, cada una de estas celdas representan un área geográfica. El tamaño de la superficie que puede ser representada varía dependiendo del satélite y de los sensores que tome la imagen. Cada pixel contiene un valor numérico que representa la cantidad de energía solar que esta superficie refleja (Chuvienco E., 1996).

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron imágenes Landsat y Spot

a) Imágenes Landsat

INEGI (2014), menciona que la constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satelites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y del sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15 m., 30 m., 60 m. y 120 m.

b) Imágenes Spot

INEGI (2014), en el año 2003, la compañía francesa Spot Image y el Ejecutivo Federal de los Estados Unidos Mexicanos, a través de Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria ASERCA, firmaron el primer contrato de recepción directa de los satélites de la constelación SPOT en América Latina. Dicho contrato incluye un sistema completamente automatizado para obtener imágenes de los satélites en órbita de la constelación Spot (2, 4 y 5).

Es así como surge la Estación de Recepción México de la constelación SPOT (ERMEXS), que tiene como fin el contar con imágenes de los satélites SPOT, de manera oportuna en espacios y tiempos definidos, que permitan un análisis integral de la información para el desarrollo sustentable del país. Su función principal es adquirir y proporcionar imágenes a los usuarios autorizados que las soliciten.

1.5. Escenarios o modelo tendencial

Escenario o modelo tendencial, es un modelo de predicción o tendencial es un esquema teórico que se presenta generalmente en forma matemática de la realidad el cual tiene como principal función el facilitar su comprensión y su comportamiento (Aguilera, 2006).

Un escenario tendencial presenta indicadores de las condiciones futuras de las variables, estos estudios son esenciales principalmente en situaciones críticas que generan problemas, los cuales deberá solucionar o corregir la planeación presente para prevenir contrariedades en el futuro. Estos escenarios se determinan mediante proyecciones del comportamiento a través del tiempo de la variable analizada, teniendo en cuenta otras variables o situaciones que están ligadas a la variable en cuestión (Henríquez E., 2012).

1.6. Modelo Análisis en Cadena de Markov

En matemáticas, se define como un proceso estocástico discreto que cumple con la propiedad de Markov, 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.

Una cadena de Markov recibe el nombre del matemático ruso Andrei Markov quién la define como una serie de eventos en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inminente anterior. Las cadenas de este tipo recuerdan el último evento y eso condiciona las posibilidades de eventos futuros (Sánchez E., 2012).

La matriz de probabilidades de transición, designada por Pij Scherer (1972), representa la probabilidad de moverse al estado j en tiempo Tr+1 dado que el proceso está en el estado i en el tiempo (t), lo cual es el mecanismo básico en el proceso Markov, que proporciona un potencial modelo descriptivo y prospectivo para el análisis de los cambios en el uso de la tierra y la distribución de los mismos. Aplicando lo mencionado a una parcela se tiene que la probabilidad de que esté en uso i=1 en un tiempo (t), representado por la expresión $\pi_i(t)$, y la probabilidad de un cambio de uso de (1) a (2), o de i a j, durante un intervalo de tiempo (t, t+1) como $P_{ij}(t, t+1)$, entonces la probabilidad de que esa parcela esté en una categoría de uso j en el tiempo (t+1), será dada por la expresión probabilística siguiente:

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) * P_{ij}(t, t+1)$$

Donde (n) es el número total de categorías de uso. Simplificando, se tiene que hacer 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:

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P(t, t+1)$$

Y para el caso donde las probabilidades de transición dependen sólo del intervalo de tiempo (t, t+1), se considera que el proceso es temporalmente homogéneo, pudiendo escribirse la ecuación anterior en la forma siguiente:

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

De esta manera, el proceso Markov se lleva a efecto mediante operaciones entre matrices. Pudiendo hacerse de forma automatizada, con el software apropiado, obteniéndose la matriz de probabilidades de transición a partir de la matriz de conteo, generada de la tabulación cruzada de los datos de dos fechas que tienen las mismas categorías de uso en la clasificación. A partir de la matriz de probabilidades de transición o de tabulación cruzada proporcional, se genera la matriz de probabilidades condicionales que permite hacer el pronóstico de los cambios en función de probabilidades de cambio.

1.7. Antecedentes en tema de estudio

Existen diversas investigaciones relacionadas con el cambio en el uso del suelo, la cobertura de la tierra y el análisis multitemporal han sido desarrolladas por numerosos autores entre los que se pueden citar:

Contexto Internacional

- *Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio (Camacho M. et al., 2010)*

Se llevó a cabo una labor de comparación de modelos de simulación de cambios de uso del suelo, con el objetivo de obtener conclusiones acerca de los principales avances temáticos y metodológicos que pueden extraerse de su utilización.

Aquí se presentan los primeros resultados obtenidos en un área-test de la Región de Murcia de aproximadamente 2300 km² de extensión. Para la fase de calibración (t0 y t1) se han utilizado los mapas de usos del suelo del proyecto Corine Land Cover 1990 y 2000, y para la simulación de los resultados (T), el año 2006. Las variables descriptivas y explicativas utilizadas proceden de distintas fuentes y bases de datos oficiales, siendo transformadas como factores o restricciones de las categorías de ocupación del suelo y de las transiciones detectadas en la fase de calibración.

Las herramientas TIGs utilizadas (Land Change Modeller, CA_MARKOV) están incluidas en el software IDRISI 16, versión Taïga. El objetivo es poder conocer las ventajas y limitaciones de estos modelos y comparar la especificidad de cada uno en la fase de calibración (estimación y localización de los cambios, métodos para transformación de variables).

Ambos modelos presentan grados variados de intervención para establecer la relación entre las categorías o transiciones y las variables explicativas. La evaluación multicriterio de CA_MARKOV, por ejemplo, facilita la inclusión del conocimiento del experto y convierte esta herramienta en un útil complejo y sofisticado. LCM es bastante más rígido y condiciona más la transformación e inclusión de las variables.

La capacidad de modelizar funciones complejas no es necesariamente una ventaja en modelización prospectiva ya que puede conducir a un sobreajuste del modelo, por lo que

las condiciones pasadas utilizadas para calibrar el modelo determinarían su rendimiento. Así, por ejemplo, Mas et al (2004) encontró que las redes neuronales más complejas permitían una mejor conexión durante el período de calibración, pero fallaban al predecir los cambios en el período siguiente.

- *Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra* (Francisco Briceño Valera, 2003)

El desarrollo de los sistemas automatizados para la captura de información espacial y para el desarrollo de procesos de análisis ha permitido que la visualización y modelaje de los cambios de uso de la tierra sobre el tiempo se puedan hacer resumiendo la cantidad total, tipos y sitios de cambio. De igual manera, se han desarrollado instrumentos para indagar el patrón espacial de los cambios dentro o entre las categorías de uso y cobertura de la tierra.

En el presente trabajo muestra como el proceso estocástico conocido como cadenas de Markov, resulta ser un potencial modelo descriptivo y predictivo para los análisis de cambios de uso de la tierra y para las futuras distribuciones o asignaciones de usos. También, se presenta la utilización de una interfase automatizado para los análisis de cambios donde se emplea un Sistema de Información Geográfica (SIG) en formato ráster y una aplicación que facilita la construcción y el análisis espacial de los mecanismos de cambio. La herramienta de análisis espacial es aplicada a un sector de la zona baja del estado Trujillo, utilizando el software IDRISI para Windows e información de imágenes de satélite de los años 1988 y 1996.

Contexto Nacional

- *Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del Río Metztitlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007* (Valdez J., et al., 2011).

El análisis espacial-cuantitativo realizado de los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo ocurridos de 1985 a 2007 en la cuenca de Metztitlán, Hidalgo, generó información valiosa para el monitoreo de los recursos naturales de la cuenca. La tasa de deforestación calculada se considera baja (-0.5 % anual), y puede ser explicada mediante la apertura de terrenos agrícolas de temporal en áreas forestales, los cuales una vez improductivos dan paso a la mancha urbana que ha crecido un 250.8% en 22 años, a un ritmo de 4.3% anual.

Los asentamientos humanos desplazaron a la agricultura de riego y temporal en Tulancingo, al bosque en Zacualtipán y al matorral en Atotonilco el Grande (Hidalgo, México). Sin duda, estos cambios ya tienen implicaciones en el ciclo hidrológico, la biodiversidad, la erosión del suelo y el clima local, entre otros aspectos relevantes. Pero éstos podrán ser monitoreados mediante el desarrollo de modelos que cuantifiquen, expliquen y predigan escenarios a futuro, y sirvan como herramienta de planeación a mediano-largo plazo para los tomadores de decisiones.

Contexto Local

- *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica (Pineda N., 2010).*

Los resultados obtenidos en los modelos de RGP muestran como algunas variables explicativas que se relacionan con la pérdida de la cobertura forestal tienen parámetros que no son constantes ni homogéneos en la zona de estudio. Es decir, se encontró variabilidad espacial en los datos. Lo anterior es importante, pero el análisis de los resultados reveló que son aún más interesantes aquellas variables que mostraron signos opuestos en los parámetros estimados. Es claro que la aplicación de la RGP resultó particularmente efectiva para entender como los procesos de deforestación varían de una región a otra en el territorio estatal y además se descubrió como los factores relacionados con la expansión agrícola y los políticos e institucionales ya sea de forma directa o indirecta no actúan de forma similar en todo el territorio.

El análisis estadístico propuesto en este trabajo aporta resultados cuantitativos que pretenden ayudar a entender mejor las causas y mecanismos de los cambios ocurridos en la cubierta forestal. Los resultados de los modelos ajustados mediante RGP arrojaron variables con un p-valor significativo en el test de variabilidad espacial, lo que demuestra que los datos no son constantes en el territorio. Sin embargo, las variables que merecen un análisis más detallado son las que presentan un nivel de confianza significativo y coeficientes positivos y negativos. Estas variables provocan que las relaciones y posibles explicaciones cambien a través del territorio.

Finalmente, el trabajo procura aportar elementos que ayuden a explicar en qué medida los factores aquí planteados están relacionados o son los responsables de los procesos de deforestación en el Estado de México. Del mismo modo, los resultados muestran que la aplicación conjunta de métodos estadísticos y tecnología SIG, es una potente herramienta

de análisis geográfico. En el caso de la RGP la posibilidad que tiene de interactuar en un entorno SIG le confiere la capacidad de elaborar una amplia variedad de cartografía estadística con los resultados generados: parámetros estimados, valores t, residuos, R 2 locales entre otros.

1.8. Caracterización de la zona de estudio

➤ Ubicación

Para la delimitación de la zona de estudio se utilizó el condensado del Estado de México del INEGI, el cual tomó como base el límite Estatal y el Geoestadístico Municipal 2010.

El Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco se ubica al norte del Estado de México y atraviesa tres municipios que son: Atzacomulco, Jocotitlán e Ixtlahuaca, presenta una elevación mínima de 2,200 m.s.n.m., alcanzando la cima del Cerro de Xocópetl (Jocotitlán) una altura máxima de 3,400 m.s.n.m., La extensión territorial de los tres municipios asciende a 885.14 km cuadrados. El Valle colinda con los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya, Jiquipilco, Morelos, Timilpan, Acambay, Temascalcingo, El Oro y San Felipe del Progreso (GEM, 2013)

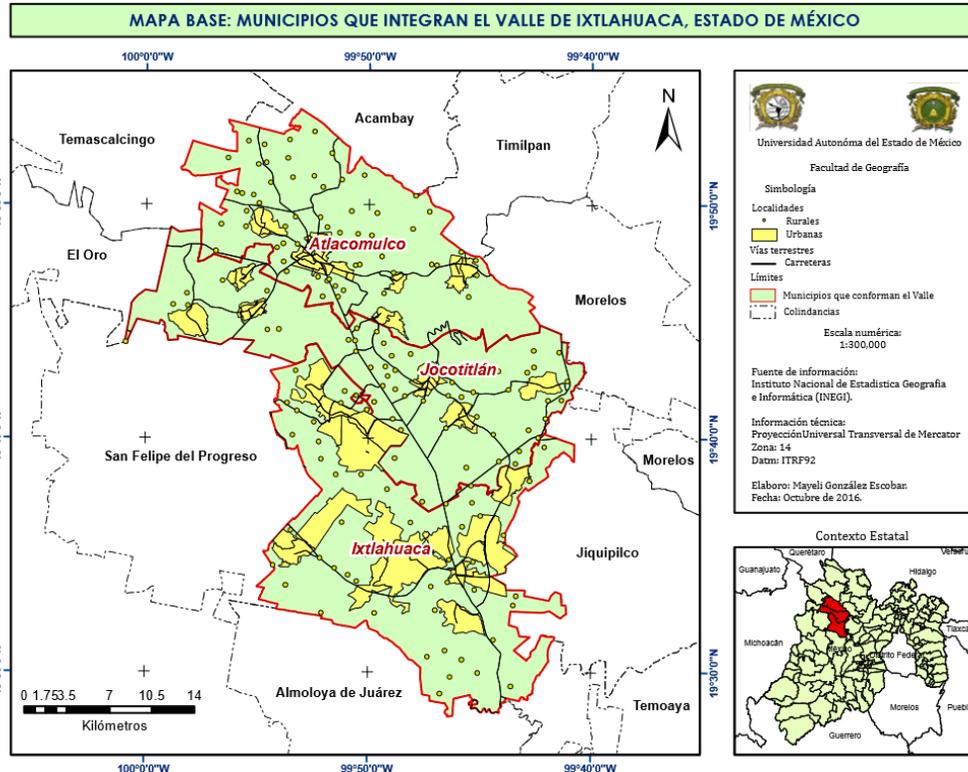


Figura 1. Mapa: Zona de estudio

El Valle se localiza aproximadamente a 118 km. de la Ciudad de México, a partir del sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, en el Estado de México ocurrió un fenómeno de migración que dio como resultado la ocupación de ciertos espacios, principalmente hacia los municipios cercanos a esta ciudad.

➤ Características del medio físico

El clima que predomina en la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano, alcanzando un rango de precipitación de 800 a 1100 mm³., en los meses de junio a septiembre. La temperatura media anual es de 14°C con una máxima de 22°C y una mínima de 4°C en los meses de diciembre y enero (GEM, 2013).

El Valle se localiza dentro de dos cuencas hidrológicas: RH-12 Lerma Santiago y RH-26 Pánuco, siendo estas de suma importancia a nivel nacional por el volumen de sus corrientes superficiales. Son drenadas por un conjunto de corrientes intermitentes pequeñas y por corrientes perennes, presentando un patrón de drenaje dendrítico.

El abundante régimen de lluvias que se presente en el Valle, permite la existencia de una gran cantidad de manantiales, pozos, ríos, arroyos, bordos y presas, perennes e intermitentes que captan los escurrimientos del Cerro Xocótepetl, la Sierra de San Juan Coajomulco, el Cerro de la Campana y el Cerro de Santa Cruz Tepexpan y constituye una importante zona de recarga acuífera.

Sumado a lo anterior existen pozos y manantiales que abastecen el sistema de agua potable, dando servicio a las localidades del Valle, las presas se utilizan para el abastecimiento de agua en la actividad agrícola y pecuaria.

El Valle se encuentra localizado en el Eje Neovolcánico Transversal rodeado por una cadena montañosa que empieza al norte con el Cerro de Lashco en Atlacomulco, Cerro Xocótepetl en Jocotitlán, al este con el Cerro de Santa Cruz Tepexpan en Jiquipilco, al sur con el Cerro de la Campana y la Guadalupana en Ixtlahuaca, Cerro de Cabeza de Mujer en Atlacomulco y la Sierra de San Juan Coajomulco en Jocotitlán.

La mayor parte del territorio del Valle presenta un rango de pendiente de 0° a 5°, considerado como muy apto para el desarrollo urbano, el rango de pendientes de 5° a 15° tienen algunas limitaciones para el desarrollo urbano, se localiza en las laderas de las

principales elevaciones del Valle y finalmente el rango de más alta pendiente (15° y más) se encuentra en el edificio volcánico del Cerro Xocótepetl, en el Cerro Cabeza de Mujer, así como en la Sierra de San Juan Coajomulco ubicada al poniente del Valle. Este rango representa fuertes limitaciones para la dotación de servicios y el desarrollo urbano, sin embargo, en la zona existen viviendas dispersas que se asentaron en este nivel de pendientes.

La presencia de los volcanes Cerro de Jocotitlán y dos de menor tamaño cercanos a la localidad de Santa María Endaré, han sido el origen de que parte importante del territorio esté conformado por rocas ígneas extrusivas intermedias, particularmente por andesitas (rocas de textura fina compuestas predominantemente por plagioclasas sódicas) que se localizan en las laderas del Cerro Xocótepetl. Esta roca se utiliza como material de construcción, además de que algunas localidades se encuentran asentadas sobre ella, situación que no genera riesgos ya que se considera apta para el uso urbano.

Las rocas ígneas presentes en la zona son las tobas (rocas formadas a partir de la ceniza volcánica) que son utilizadas como material para la construcción y la brecha volcánica, localizada principalmente en los conos de los volcanes Cerro Xocótepetl, Cerro Cabeza de Mujer y Cerro Media Luna al poniente del Valle (GEM, 2013).

La localización del Valle en el Eje Neo volcánico Transversal otorga una mayor vulnerabilidad a los asentamientos humanos y a las actividades que en ellos se desarrollan, esto por la presencia de volcanes inactivos y de estructuras geológicas como una falla (ruptura de la corteza terrestre en donde ha habido desplazamiento entre los bloques) cercana a la localidad La Venta Municipio de Jocotitlán y de fracturas (ruptura de la corteza en donde no ha habido desplazamiento) localizadas al norte del Cerro Xocótepetl y en el Cerro Cabeza de Mujer.

➤ Características de la vegetación y usos del suelo

Según el INEGI (2005), las principales unidades edafológicas que se encuentran en el Valle son:

- a) Planosol: Se localiza en las porciones planas del Valle, posee una capa superficial arcillosa y subhorizontes albacos ácidos, además presenta tepetates (duripanes y fragipanes). La unidad predominante es el planosol mólico, suelo muy fértil de color oscuro y rico en materia orgánica, mientras que en porciones más reducidas se encuentra mezclado con otras unidades como el feozem y el vertisol.

- b) Feozem: se localiza en la zona oriente, poniente de Jocotitlán, al noroeste, oeste y sur de Atlacomulco, este suelo se utiliza en agricultura de riego a escala y agricultura de temporal (granos, legumbres y hortalizas), también presenta un rendimiento aceptable en el pastoreo y la ganadería.
- c) Andosol: se encuentra en el edificio volcánico del Cerro Xocótepetl y son suelos que surgen a partir de las cenizas y arenas generadas por actividad volcánica. Los andosoles se caracterizan por ser una capa superficial que varía desde el color ocre al negro, tienen una textura esponjosa y suelta.
- d) Luvisol: cuenta con potencial agrícola que va de moderado a bueno, se ubican en la porción sur de Atlacomulco e Ixtlahuaca en las inmediaciones del Río Lerma y en la parte poniente del Cerro Xocótepetl.

El uso predominante del suelo del Valle es evidentemente agrícola y en menor extensión urbana, forestal y pecuaria; esto a causa de las características naturales del suelo y las pendientes del mismo.

Las pendientes en el Valle han permitido el buen desarrollo de la actividad agropecuaria y facilitado la rápida filtración del agua de lluvia al subsuelo, pues se considera que la mayor parte del Valle está entre 0° y 5° de pendiente, con aptitud para uso agrícola o urbano. El territorio que tiene una pendiente entre 5 y 15%, restringe de forma considerable el desarrollo urbano, por lo cual se deben de considerar técnicas adecuadas para la labranza ya que en caso contrario se pueden presentar problemas de erosión.

Finalmente, las pendientes superiores al 15°, se localizan principalmente en el Cerro de Lashco, el Cerro Xocótepetl, el Cerro de la Campana, Cerro de Cabeza de Mujer y la Sierra de San Juan Coajomulco en Jocotitlán, esta pendiente presenta limitantes para el desarrollo urbano y para la agricultura, por lo que generalmente se destina para zonas de conservación natural y ecoturísticas, sin embargo, existen asentamientos humanos en este rango de pendientes, además de actividades agrícolas, lo que reduce las zonas de recarga acuífera, además de que dificulta la atención de la población en materia de servicios (GEM, 2013)..

En el siguiente mapa se puede observar la distribución del uso del suelo y vegetación del Valle, confirmando que la mayor parte del Valle es uso agrícola, seguido de zona urbana, pastizal, bosque, cuerpos de agua y uso industrial.

La vegetación que prevalece en el Valle es: Bosque de pino, coníferas, encino, cedro, eucalipto, sauce, fresno, madroño, ocote, roble, árboles frutales, áreas de pastizal, matorral para uso pecuario, hortalizas como: ejote, chilacayote, nopal, rábano, chayote, calabaza, zanahoria, papa, etc. Las semillas más sembradas son maíz, avena, trigo, haba, chícharo y frijol. Todos son recursos aprovechados como parte de la economía municipal.

Así mismo se siembran plantas de ornato (clavel, geranio, jacaranda, malvón, alcatraz y buganvilia) y jitomate, mediante invernaderos y se distribuyen de manera local y regional.

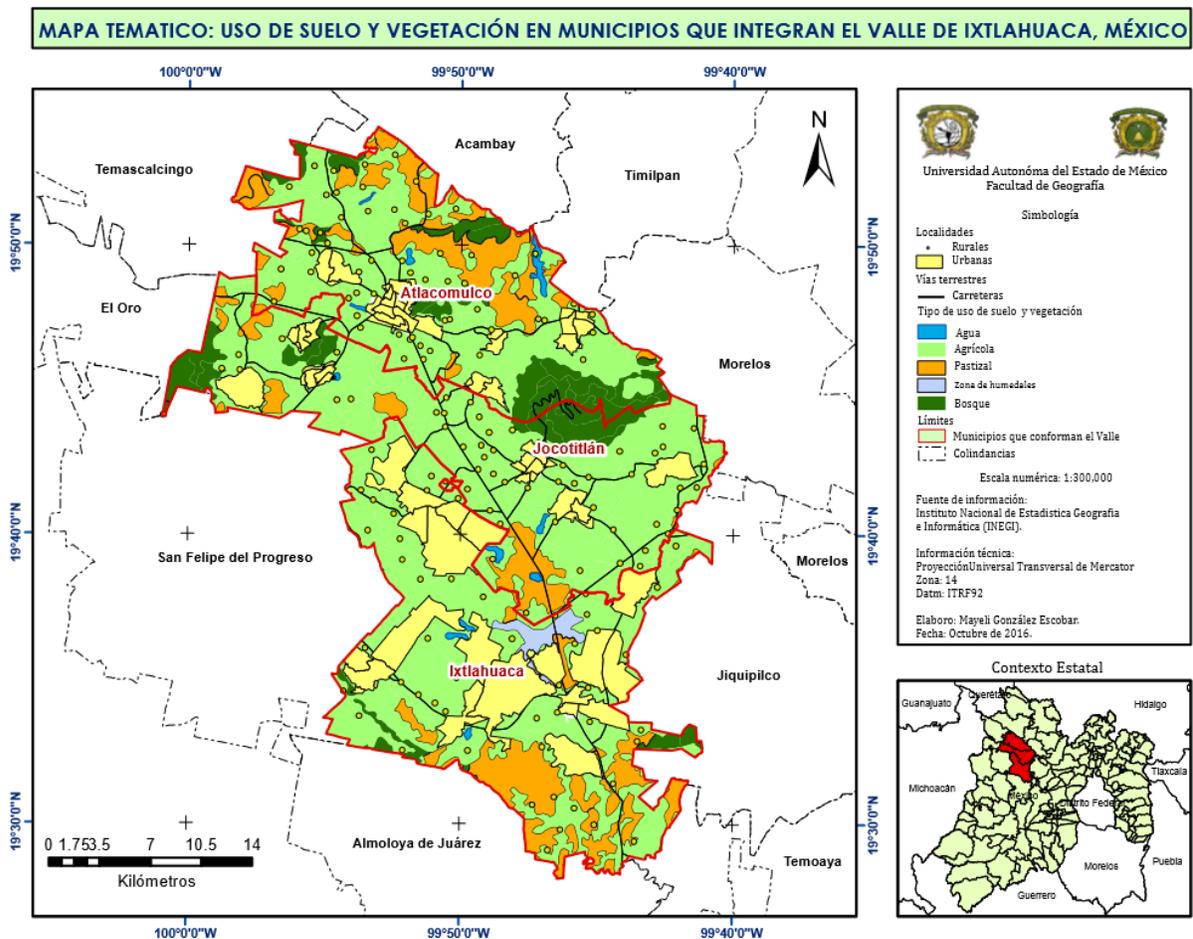


Figura 2. Mapa: Uso de suelo y vegetación.

La problemática existente en estos usos de suelo es causada de la ocupación de zonas no aptas para la construcción de viviendas, explotación inadecuada del suelo, la pulverización de la tierra, construcciones en áreas naturales y forestales, proceso de ocupación dispersa y localidades no consolidadas.

➤ Características del medio socioeconómico

De acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, el Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco cuenta con 296,404 habitantes (ver tabla 1.) que representa el 1.95% de la población total con respecto al Estado de México.

Tabla 1. Población total por municipio

Municipio	Población		
	1990	2010	2015
Atzacomulco	54 067	93 718	100 675
Ixtlahuaca	88 545	141 482	153 184
Jocotitlán	39 077	61 204	65 291
Total	18 1689	296 404	319 150

Fuente: INEGI, Censo de Población y Vivienda, 1990 y 2010
INEGI, Censo de Población y Vivienda, 2015.

La densidad de población por municipio se comporta de la siguiente manera: Atzacomulco 362 habitantes (hab.) por kilómetro cuadrado, Ixtlahuaca 514 hab. por kilómetro cuadrado y Jocotitlán 181 hab. por kilómetro cuadrado. La mayor concentración de la población se da en las tres cabeceras municipales, seguido de aquellas localidades donde se desarrolla alguna actividad económica, están cerca de la cabecera municipal o junto a la zona industrial, comportándose de la siguiente manera:

- Atzacomulco: San Lorenzo Tlacotepec (cultivo de planta), Santiago Acutzilapan (comercio de diversos productos), San Antonio Enchisi (siembra de nopal) y San Pedro del Rosal (comercio de diversos productos).
- Ixtlahuaca: La Concepción de los Baños, San Pedro de los Baños (comercio), San Bartolo del Llano (cerca de cabecera municipal y zona industrial), Santo Domingo de Guzmán (cerca de cabecera municipal y zona industrial), Santa Ana Ixtlahuaca y San Ildelfonso.
- Jocotitlán: San Miguel Tenochtitlán (comercio), San Juan Coajomulco (banco de material), Santa María Citendeje (cerca de la zona industrial).

La actividad económica del Valle se ha caracterizado desde hace mucho tiempo en la agricultura, el principal producto que se cultiva en el Valle es el maíz, además de este producto existen otros de los que se producen en menor escala, siendo estos: la avena, el trigo, cebada en grano, nopal y plantas de ornato.

Aunque hay que aclarar que el volumen y valor de la producción agrícola no es suficiente para cubrir las necesidades de un campo que se encuentra cada vez más empobrecido y abandonado, ya que por muchos años el monocultivo fue una actividad muy rentable para estos municipios, pero a la fecha ya no lo es, y esto debido al encarecimiento de los fertilizantes y las nuevas tecnologías, la mano de obra, y los bajos precios a los que se tiene que vender el producto en el mercado.

La actividad ganadera ha tenido presencia en ciertas partes del Valle, dedicándose a la crianza y engorda de ganado bovino en primer término, seguido del porcino y del ovino. La producción del Centro Acuícola Tiacaque en Jocotitlán, para el año 2013 fue de 16, 559,799 crías de carpas (INEGI, 2015).

El sector secundario en el Valle fue el que llegó a desplazar al sector primario, se empezó a aprovechar y explotar los materiales para la construcción existentes en el mismo como la arena, grava, tezontle, cantera y tepojal; para comercializarlos en los municipios de la región, con ello se han estado obteniendo mejores niveles de ingreso que los que se estaban obteniendo con la actividad agrícola.

Los parques industriales de Atlacomulco y Pasteje, se han logrado consolidar como un nodo de desarrollo entre los municipios que colindan con el Valle, debido a sus características económicas, políticas y sociales, pues concentra vías de comunicación intermunicipal con conexiones a carreteras estatales y federales (GEM, 2013).

Capítulo 2. Metodología

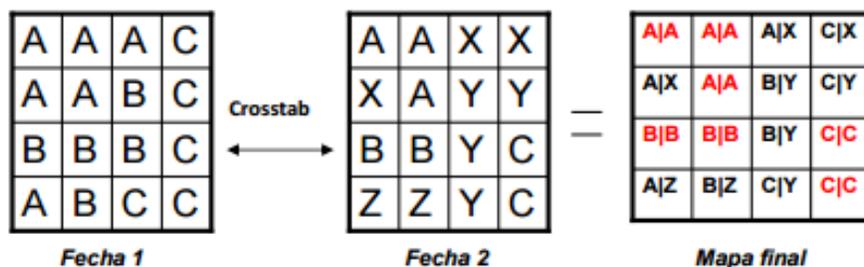
El objeto principal de esta investigación es elaborar escenarios de cambio de uso de suelo, se tomaron en cuenta diversos criterios, que permitieron analizar la relación espacial que existe entre los cambios del uso del suelo, las pérdidas y ganancias, utilizando las nuevas tecnologías de los Sistemas de Información Geográfica, permitiendo la integración y modelado de datos espaciales a gran escala, dando como resultado escenarios, que muestran la probabilidad del comportamiento de las coberturas a corto y mediano plazo.

2.1. Investigación bibliográfica

Para el desarrollo de esta investigación se siguió la metodología de Pontius, la cual resalta la importancia de la matriz de tabulación cruzada para evaluar el cambio total de las categorías (coberturas de uso) de acuerdo a dos componentes: el cambio neto e intercambio y ganancias y/o pérdidas. El análisis de estos componentes puede distinguir entre una transición del paisaje claramente sistemática y una transición del paisaje aparentemente aleatoria. Esto permitirá mostrar las áreas del terreno donde ocurren cambios (Pontius, 2014).

La tabulación cruzada: consiste en el procesamiento de dos mapas en formato ráster donde el resultado es un mapa cuyos valores son dados por la correspondencia de las leyendas de ambas claves en un mismo espacio, señalando la primera como la leyenda del mapa de la fecha inicial y la segunda como la leyenda del mapa más actual, que es el que determina la transición que sucedió en el periodo comprendido entre ambos. De manera gráfica, el proceso consiste en lo siguiente:

Figura 3. Procedimiento Tabulación cruzada.



Fuente: (Regil, 2005)

Las matrices de transición se utilizan para analizar detalladamente la dinámica de cambio en la cobertura y uso del suelo. Se describen como tablas con arreglos simétricos que contienen en uno de los ejes los tipos de vegetación y usos del suelo en el año base y en el otro eje estos mismos tipos de vegetación en el segundo tiempo (tiempo 0 y tiempo 1).

De esta forma, cada una de las celdas de la diagonal principal de la matriz representa la superficie (en hectáreas) de cada categoría de cobertura vegetal y uso de suelo que permaneció en la misma categoría en el periodo de tiempo considerado, mientras que el resto de las celdas estiman la superficie de una determinada cobertura o tipo de uso de suelo que pasó a otra categoría (Dirzo y Masera, 1996 en: Regil, 2005).

El módulo Análisis en Cadena Markov simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema. El algoritmo compara dos mapas de ocupación del suelo que se suceden cronológicamente, y estima y configura una matriz de probabilidad de transición. La predicción se materializa en una serie de mapas de ocupación del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada (Paegelow M., 2003).

La matriz P es central en el proceso de transición, las probabilidades de cambio de una categoría a otra han sido medidas a lo largo de un período y son de utilidad para extrapolar el cálculo hacia un período similar en el futuro.

Si el estado puede ser definido como:

$$X_t = [X_1, X_2 \dots X_n]$$

Donde X_t , representa las proporciones de cada categoría para el tiempo t, el estado del sistema para el tiempo t+1 se logra multiplicando el vector por la matriz de probabilidad de cambios de la forma:

$$X_{t+1} = X_t P$$

2.2. Investigación cartográfica

Como insumo de apoyo se utilizó cartografía que fue procesada y delimitada al Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco, obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la información vectorial que ofrece el instituto es a nivel nacional, estatal y municipal, para este caso se tomaron en cuenta las siguientes capas:

- división política estatal y municipal,
- áreas geoestadísticas municipales 2010
- localidades rurales
- vegetación y uso de suelo
- edafología
- hidrología
- modelo digital de elevación (DEM)

Para esta investigación las imágenes satelitales son la principal fuente de información, se trabajó con dos temporalidades, aunque de diferente sensor, para seleccionar las imágenes se consideró el criterio de 0% de nubosidad.

La imagen Landsat ya estaba georreferenciada por el servicio Geológico de los Estados Unidos, bajo la proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (zona 14 Norte, Datum WGS84, elipsoide de Clarke 1986), la resolución espacial es de 30 metros. La imagen Spot se georreferenció utilizando el software ArcMap y PCI Geomatics tomando de base los parámetros técnicos de la imagen Landsat, la resolución espacial que presenta la imagen Spot es de 10 metros, debido a la diferente resolución entre imágenes, se realizó un remuestreo a los valores del pixel de la imagen Landsat, con la finalidad de tener las dos imágenes con la misma resolución.

Tabla 2. Características generales de imágenes utilizadas

Satélite	Sensor	Fuente de información	Resolución temporal	Resolución espacial	Datum de referencia
Landsat 5	TM	Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)	1989-12-27	30 m	WGS84
Spot 5	HRVIR	Antena Ermexs	2010-01-13	10 m	WGS84

2.3. Determinación de variables

El crecimiento demográfico demanda espacio para la construcción de zonas habitacionales, siendo este el principal factor del cambio de uso de suelo, como ejemplo se puede mencionar que, a raíz del sismo de 1985 registrado en la Ciudad de México, en el Estado de México ocurrió un fenómeno de migración, ocasionando la construcción de zonas habitacionales en municipios aledaños a esta ciudad.

Las actividades primarias como la agricultura, ganadería y minería modifican el uso de suelo, en primer lugar, para desarrollar la actividad agrícola es necesario contar con la superficie, esta actividad le quita espacio a otro tipo de cobertura vegetal como es el caso del bosque o pastizal. En segundo lugar, la ganadería con fines productivos, modifica la cobertura de pastizal a suelo descubierto, derivado del pastoreo, la cobertura más vulnerable es el bosque debido a que el productor no puede sacrificar las tierras agrícolas, así que comienza a deforestar para tener espacio y desarrollar dicha actividad. En tercer lugar, la minería siendo la extracción de arena, grava, tezontle, cantera y tepojal (roca de tipo ígneo) que es usado para el revestimiento de caminos de terracería y para la construcción, los municipios de Atlacomulco y Jocotitlán presentan bancos de material que son explotados por pequeños grupos de ejidatarios, desafortunadamente el bosque pierde superficie ante esta actividad.

Debido a la cercanía con las Ciudades de Toluca y México, el sector industria es favorecido, el establecimiento de pequeñas zonas industriales favorece en la creación de empleos, pero por otra parte el cambio de uso de suelo y la contaminación del ambiente traerá repercusiones a largo plazo.

Tabla 3. Determinación de variables

Fenómenos generados por el hombre	Fenómenos naturales
1. Crecimiento de la población	1. Erosión
2. Agricultura (deforestación)	2. Disminución de nutrientes
3. Ganadería (pastoreo)	
4. Extracción de material a cielo abierto (contaminación se suelo y agua)	
5. Actividades secundarias: industria	

2.4. Mapa conceptual

El siguiente esquema metodológico muestra las fases a seguir en el desarrollo de la investigación:

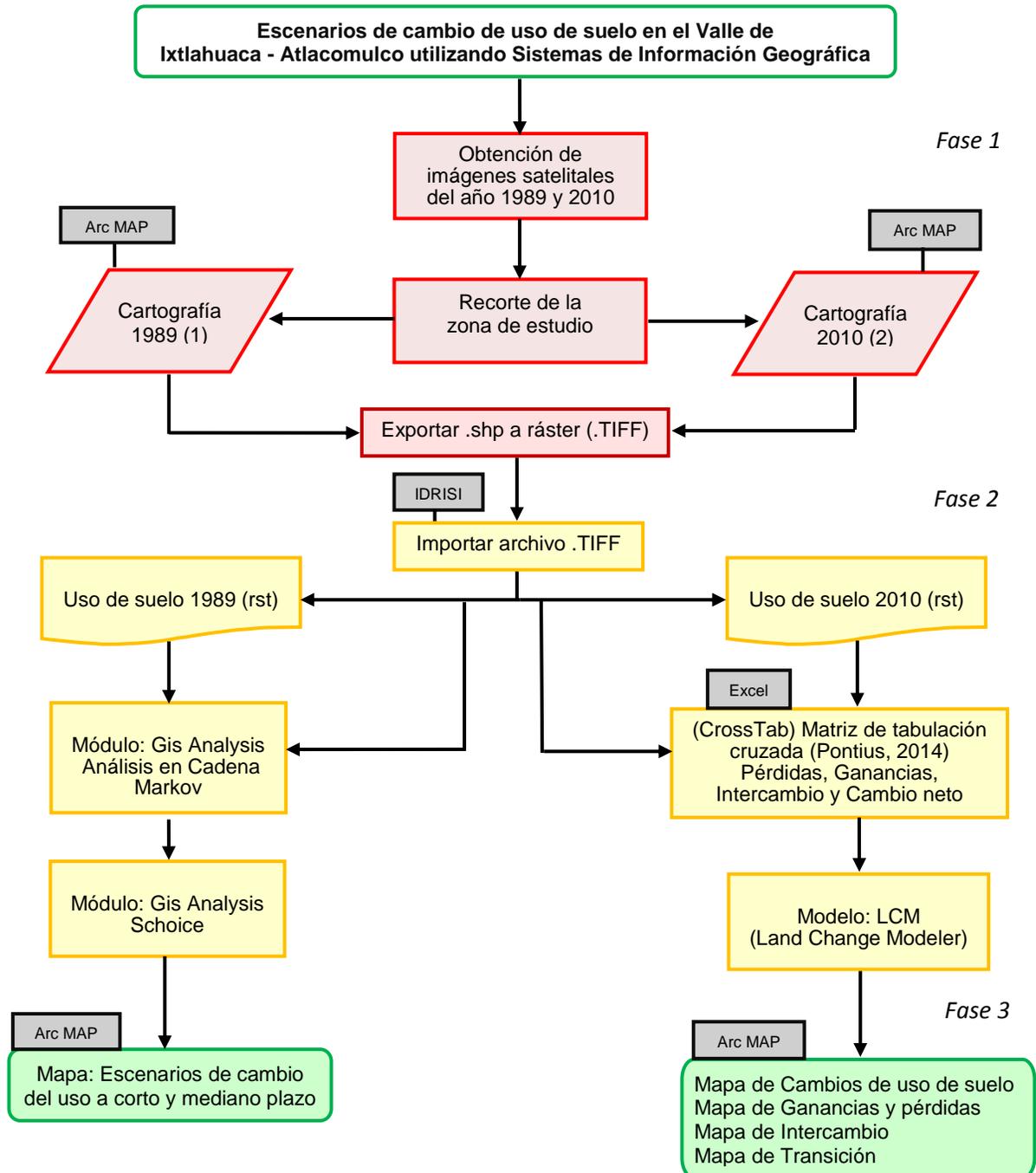


Figura 4. Mapa conceptual. Elaboración propia



El desarrollo y aplicación de la metodología se desarrollará en el software Arc Map e IDRISI Selva. El software Arc MAP, se utilizó en la generación de la cartografía del uso de suelo de 1989 y 2010, por su parte IDRIS integrado con una herramienta de modelación de gran potencia que permite crear diversos modelos, para este caso se ocupó el módulo *Land Change Modeler*, este módulo permite obtener para cada categoría de uso de suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales, representados espacialmente.

De esta manera el diseño de esta investigación se desarrolló en tres fases metodológicas:

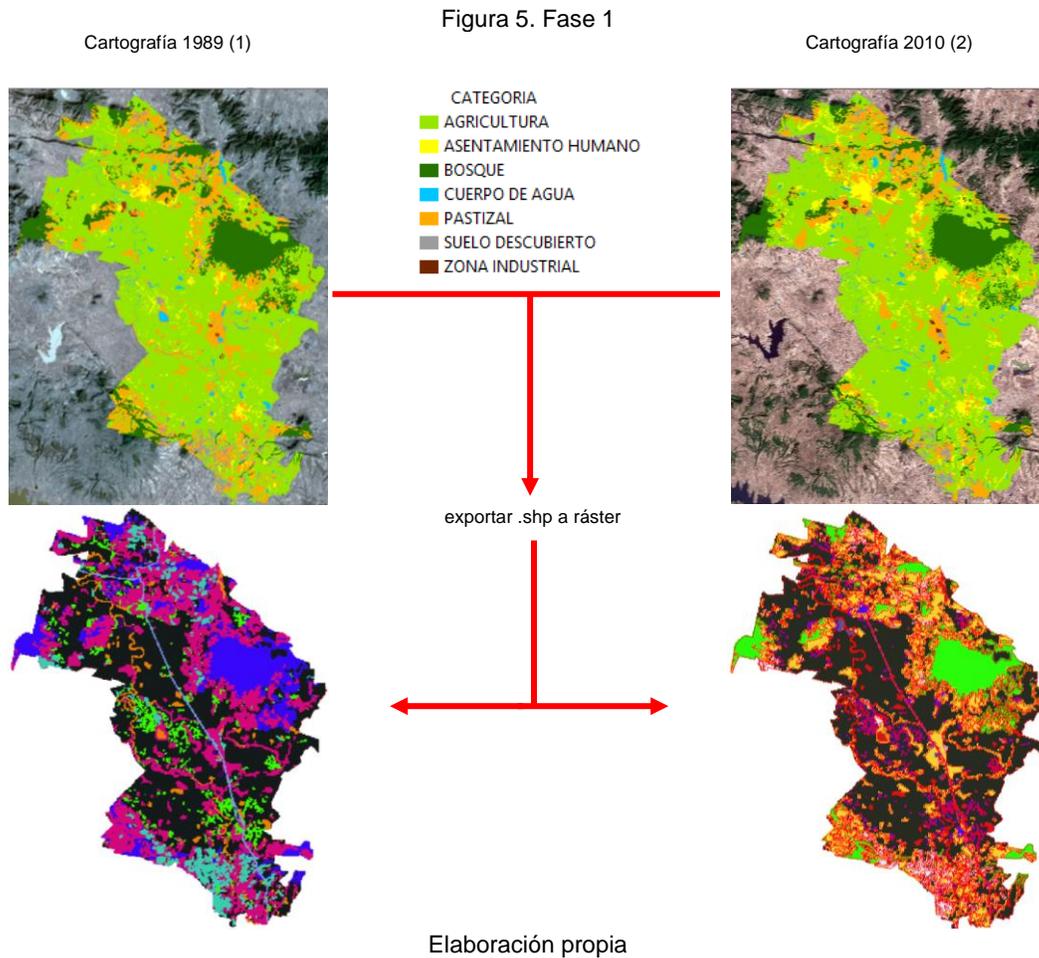
- Fase 1. Obtención de uso del suelo
- Fase 2. Análisis de los cambios de uso de suelo
- Fase 3. Análisis de resultados (véase en capítulo 3)

2.4.1. Obtención del uso del suelo

Las imágenes satelitales juegan un papel importante en esta investigación, la imagen Landsat 1989 fue descargada del sitio Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos con una resolución espacial de 30 metros. La imagen Spot del 2010 fue obtenida de la Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS) con una resolución de 10 metros. Con la finalidad de estandarizar las imágenes, se realizó el remuestreo de la imagen Landsat, dejando el tamaño de pixel de 10 metros

Después de estandarizar las imágenes, se realizó el corte de la zona de estudio en las imágenes, seguido de esto se digitalizó el uso del suelo sobre las imágenes y se capturó en la tabla de atributos las coberturas que describen el tipo de suelo de cada una de las capas, todo este proceso se realizó en el software Arc MAP 10.2., dando como resultado la cartografía del uso de suelo del año 1989 y 2010.

Según Franco et al. (2003) El proceso de digitalización es el primer paso para la creación de cartografía digital es la conversión de datos analógicos a su forma digital. Los datos deben ser adquiridos en un formato compatible con el equipo disponible, tener la exactitud adecuada y ser debidamente codificados, estructurados y etiquetados con códigos descriptivos apropiados, así como sus atributos. Además, La velocidad de captura depende del tipo de procedimiento utilizado, del operador que interactúa con el equipo y de la calidad del documento base.

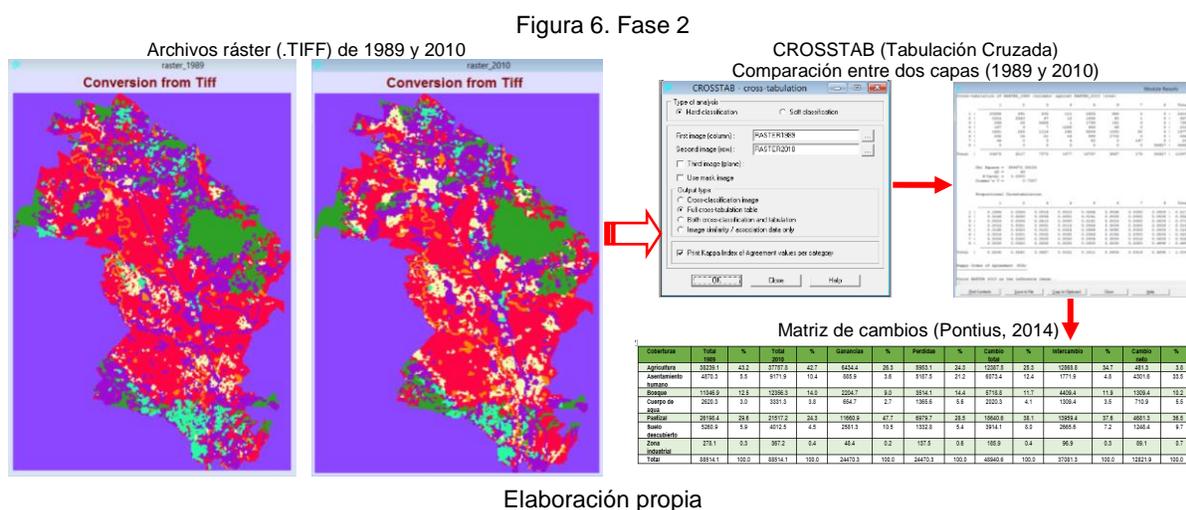


Durante la digitalización se ubicaron siete categorías, donde se agruparon los diferentes usos del suelo, quedando de la siguiente manera: agricultura (zona agrícola y se incluyeron algunos cultivos que son sembrados bajo condiciones de invernadero), asentamiento humano (todas aquellas poblaciones urbanas y rurales), bosque (zona arbolada), cuerpos de agua (ríos, presas y bordos), pastizal (vegetación herbácea), suelo descubierto (aquél que no presenta vegetación, producto de la erosión o del tipo del suelo) y zona industrial (naves industriales).

Después de terminar con la digitalización, las capas se exportaron a formato .TIFF, este formato define cómo se almacenan los píxeles, por ejemplo, el número de filas y columnas, los valores de píxeles reales y otros parámetros específicos de los formatos de ráster. Los productos ráster aparecerán en el catálogo en el lugar de los archivos de metadatos asociados con productos de proveedor específicos como su información en el archivo de metadatos se usa para generarlos, como las imágenes de satélite, con este paso se termina la fase 1.

2.4.2. Análisis de los cambios del uso de suelo

En esta fase se utilizaron las dos capas del uso el suelo en formato ráster (.TIFF), en primer lugar, se realizó el CrossTab, (en IDRISI) la cual consiste en establecer una correlación entre los atributos de la capa anterior (1989) y la más reciente (2010). La tabla de tabulación cruzada muestra las frecuencias con las cuales las clases han permanecido iguales (la frecuencia a lo largo de la diagonal) o han cambiado (las frecuencias fuera de la diagonal). El índice de acuerdo a Kappa, indica el grado de entre las dos capas y teniendo como base las mismas categorías.

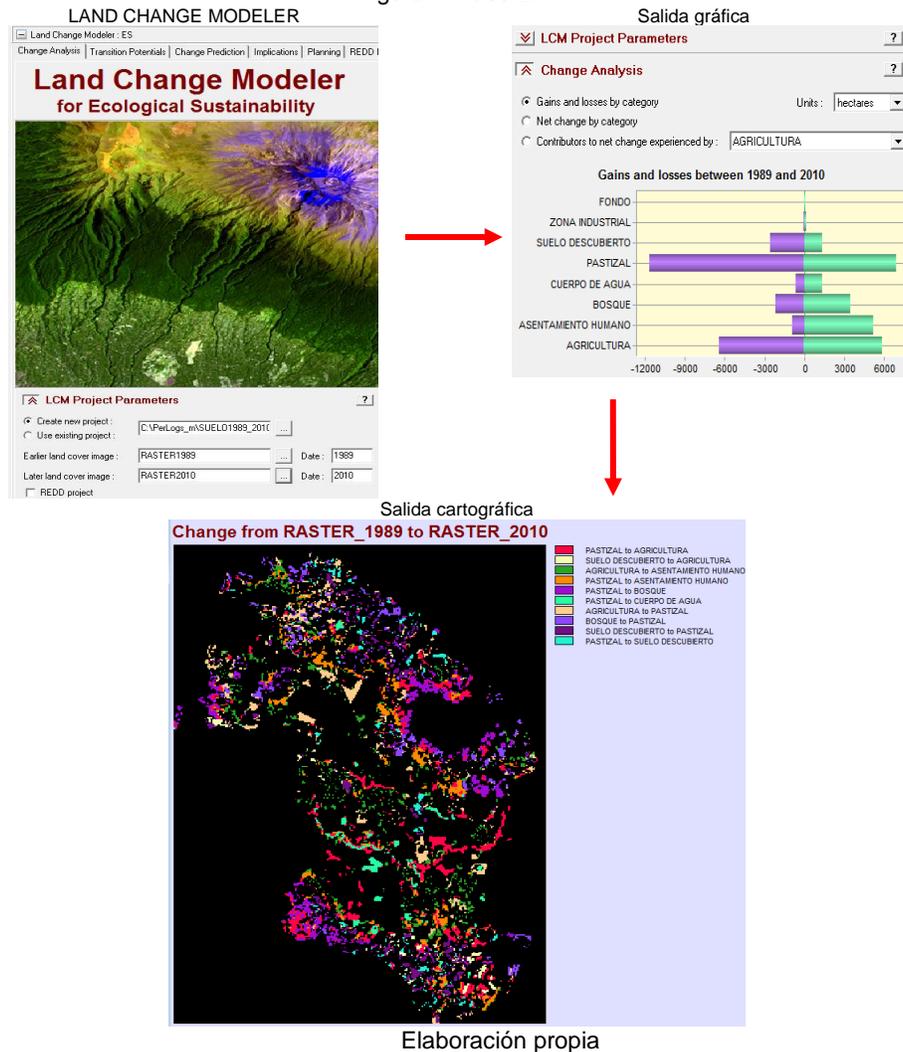


Siguiendo con la metodología de Pontius (2014) se trabajó con la matriz de tabulación cruzada (en Excel), donde se cuantificó en hectáreas y porcentajes las ganancias, pérdidas, cambio total, intercambio y cambio neto, realizándose los siguientes cálculos para cada categoría:

- Ganancias: resulta de la diferencia entre la columna del total del año 1989 y la persistencia.
- Pérdidas: resulta de la diferencia entre la fila total del año 2010 y la persistencia.
- Cambio total: se obtiene a partir de la suma de la columna de pérdidas y ganancias.
- Intercambio: se calcula a través de la multiplicación del valor mínimo de ganancias y/o pérdidas.
- Cambio neto: se calcula utilizando la función ABS (devuelve el valor absoluto de un número) y haciendo la resta entre las columnas de pérdidas y ganancias, tomando como primera cifra el valor más alto.

El segundo paso de esta fase, fue utilización del Módulo Land Change Modeler de IDRISI (Modelador de Cambios en el Terreno), es una herramienta que permite analizar los cambios en la cobertura del terreno, proyectar su curso en el futuro y evaluar sus implicaciones en el cambio del hábitat y la biodiversidad.

Figura 7. Fase 2.1.



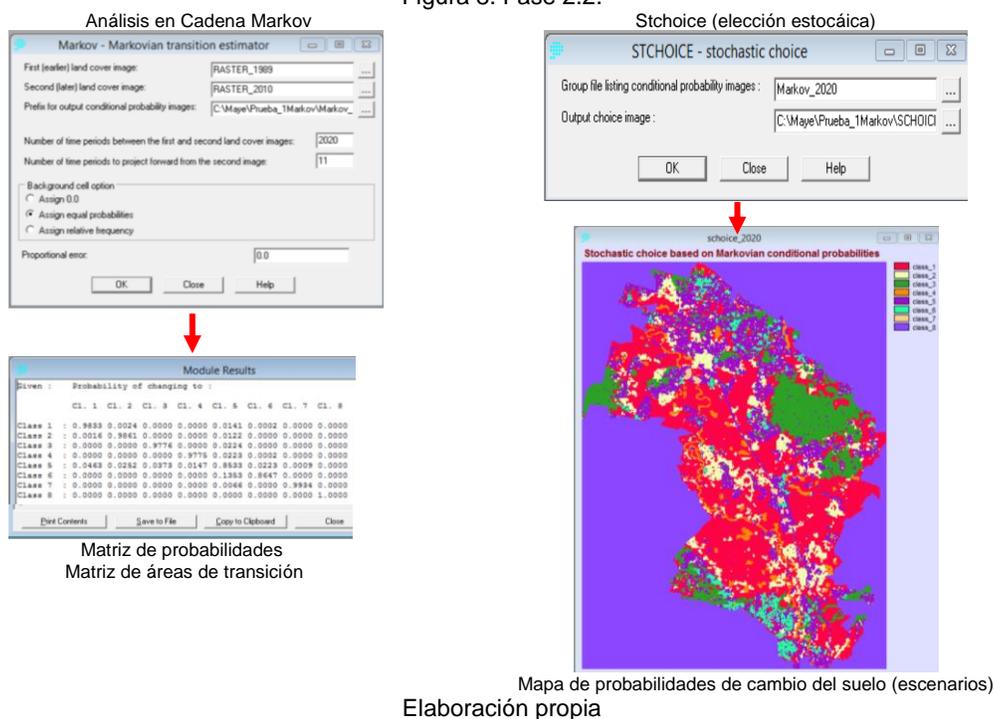
Elaboración propia

Las capas que se utilizaron dentro del módulo fueron el ráster de 1989 y 2010, desplegando la salida gráfica y cartográfica, con las que se identificaron los cambios más significativos del uso del suelo en el Valle, obtenidos a través del cálculo de transiciones sistemáticas, ya sea en términos porcentuales o de superficie de: pérdidas y ganancias, por categorías, cambios netos por categoría, así como mapas de cambios, de persistencias, de pérdidas y ganancias, de transiciones y de intercambios por categoría.

En el tercer paso se realizó el Análisis en Cadena Markov herramienta básica para la modelación de cambios predecibles (futuros) en el uso del suelo, un proceso Markoviano es uno en el que el estado de un sistema en tiempo 2, se puede predecir por el estado del sistema 1, con una matriz de probabilidades de transición de cada categoría a cada una de las otras categorías. El módulo de Markov se puede emplear para crear dicha matriz de probabilidad de transición. Como entrada, necesita dos archivos ráster y luego generó los siguientes archivos:

- Matriz de áreas de transición: expresa el área total (en celdas) que se espera cambie en el próximo periodo.
- Matriz de probabilidad de transición: expresan la probabilidad de que un pixel de cierta clase cambie a cualquier otra clase (o permanezca en la misma) en el próximo periodo.

Figura 8. Fase 2.2.



Finalmente, el módulo Stchoice (Elección Estocástica) crea un mapa estocástico del uso del suelo, al evaluar las probabilidades condicionales de cada categoría en cada ubicación de pixel en contra de una distribución aleatoria rectilínea de probabilidades.

Capítulo 3. Análisis de resultados

3.1. Uso de suelo en el Valle Ixtlahuaca – Atlacomulco del año 1989

Uno de los objetivos particulares fue determinar el uso del suelo en el Valle a partir del procesamiento de imágenes satelitales de los años 1989 y 2010, se pretendía realizar una clasificación supervisada, con la finalidad de automatizar los procesos y obtener la capa de uso del suelo, pero debido a que las imágenes fueron captadas en época de invierno y el estado fenológico que presenta la vegetación no favoreció en el proceso de clasificación, ya que las firmas espectrales del uso agrícola con el pastizal presentaban similitud y las de suelo descubierto con asentamientos humanos.

Derivado de lo anterior se procedió a realizar la digitalización del uso de suelo sobre las imágenes, la escala con la se trabajó fue 1:10,000, esto permitió trabajar a más detalle, dando como resultado siete categorías de las cuales, la agricultura presenta una superficie de 38,239.1 ha. localizándose en zonas planas, en esta categoría se incluyeron a los invernaderos donde se siembra jitomate, nopal y plantas de ornato.

La cobertura de pastizal, presenta 26,198.4 ha. esta se ubica en zonas planas (muy poco) donde se desarrolla la crianza y engorda de ganado bovino, porcino y ovino, otras partes que presentan pastizal se localizan en zonas con pendientes entre 6° y 10°, en las orillas de los bosques, en algunas partes se observa el pastizal como consecuencia de la deforestación.

En la cobertura de bosque se incluyó todo tipo de árbol que presenta el Valle, representa una superficie de 11,046.9 ha. la cobertura se localiza principalmente en el Cerro Xocótepetl, el Cerro Cabeza de Mujer, en la Sierra de San Juan Coajomulco, el Cerro de las Cruces y el Cerro Maye.

Los asentamientos humanos hacen referencia a las localidades urbanas y rurales, presentando una superficie de 4,870.3 ha., la mayoría de estos asentamientos se localizan en pendientes entre los 0° y 5°, teniendo una buena aptitud de desarrollo y favorece en la atención de la población en materia de servicios públicos. Sin embargo, existen poblaciones que se localizan en pendientes entre los 6° y 10°, localizados en las laderas de las principales elevaciones, esto dificulta la dotación de servicios públicos y ocasiona rezago social en la población.

El suelo descubierto tiene una superficie de 5,260.9 ha., este se presenta en la zona norte y sur del Valle, la mayoría de estos suelos son producto de la degradación a consecuencia de la erosión, esta cobertura presentó dificultades durante la digitalización, debido a que la tonalidad de los pixeles se confundía con pixeles de asentamiento humano.

Los cuerpos de agua presentan una superficie de 2,620.3 ha., dentro de esta cobertura se incluyeron ríos, arroyos, bordos y presas, el régimen de lluvias que presenta el Valle, permite la existencia de dichos cuerpos de agua y se abastecen de los escurrimientos de las principales elevaciones.

La zona industrial tiene una superficie de 278.1 ha., esta cobertura cuenta solo con el 0.3% del territorio del Valle, solo existen dos parques industriales ubicados en el Municipio de Atlacomulco y Jocotitlán, ambas están conectadas con vías de comunicación intermunicipales con conexiones a carreteras estatales y federales.

Tabla 4. Uso de suelo 1989

Coberturas	Total 1989 (ha.)	%
Agricultura	38239.1	43.2
Asentamiento humano	4870.3	5.5
Bosque	11046.9	12.5
Cuerpo de agua	2620.3	3.0
Pastizal	26198.4	29.6
Suelo descubierto	5260.9	5.9
Zona industrial	278.1	0.3
Total	88,514.1	100.0

En el siguiente mapa se pueden observar las diferentes coberturas que conforman el uso del suelo del año 1989:

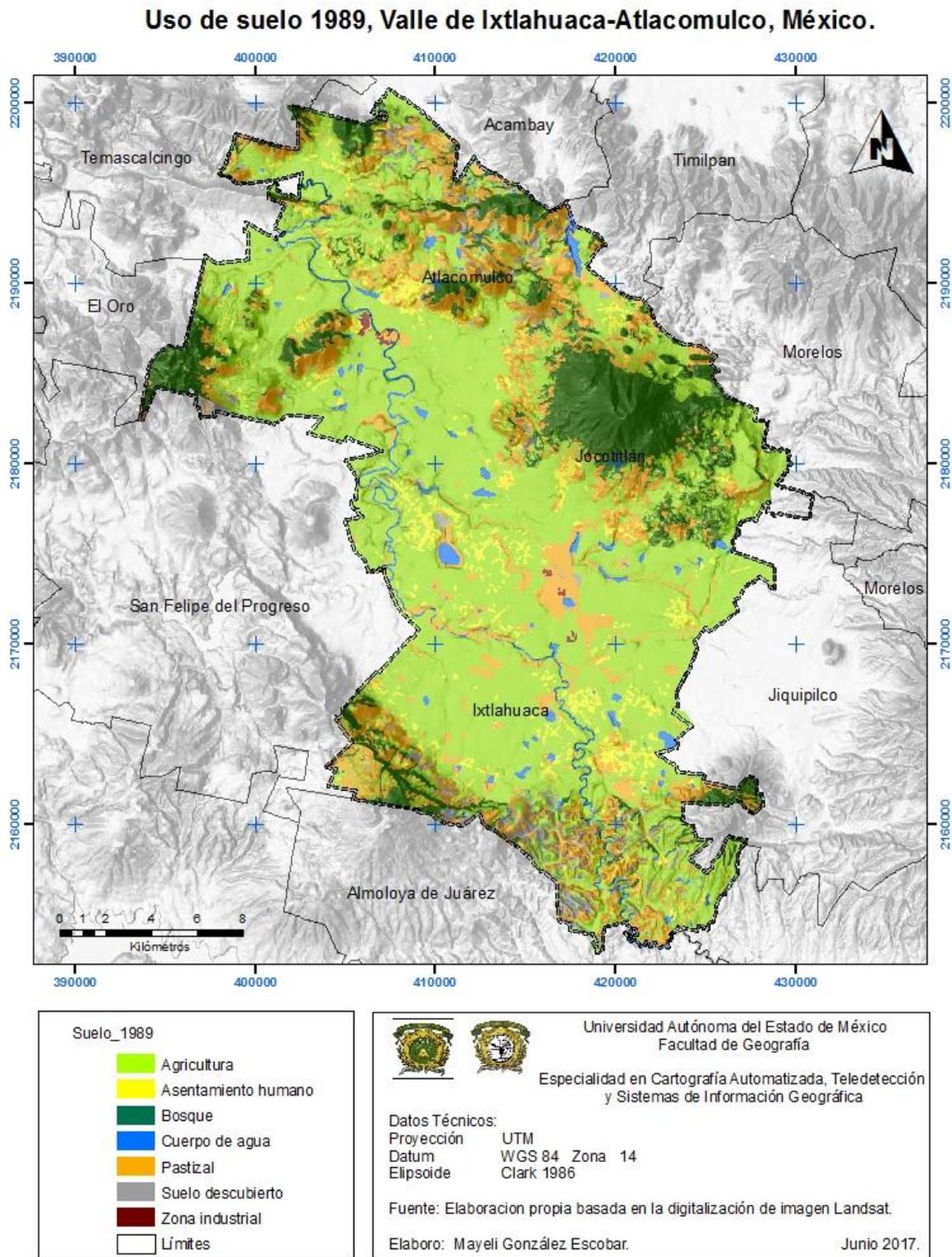


Figura 9. Mapa: Uso de suelo 1989.

Para validar la cartografía de suelo de 1989, se comparó con la serie II de INEGI, según la ficha técnica esta serie se comenzó a trabajar en el periodo de 1993 a 1999 en escala 1: 250,000, se puede observar que, para la zona de estudio, la serie solo tiene las capas de agricultura, asentamiento humano, bosque, cuerpo de agua y pastizal, omitiendo las coberturas de suelo descubierto y zona industrial.

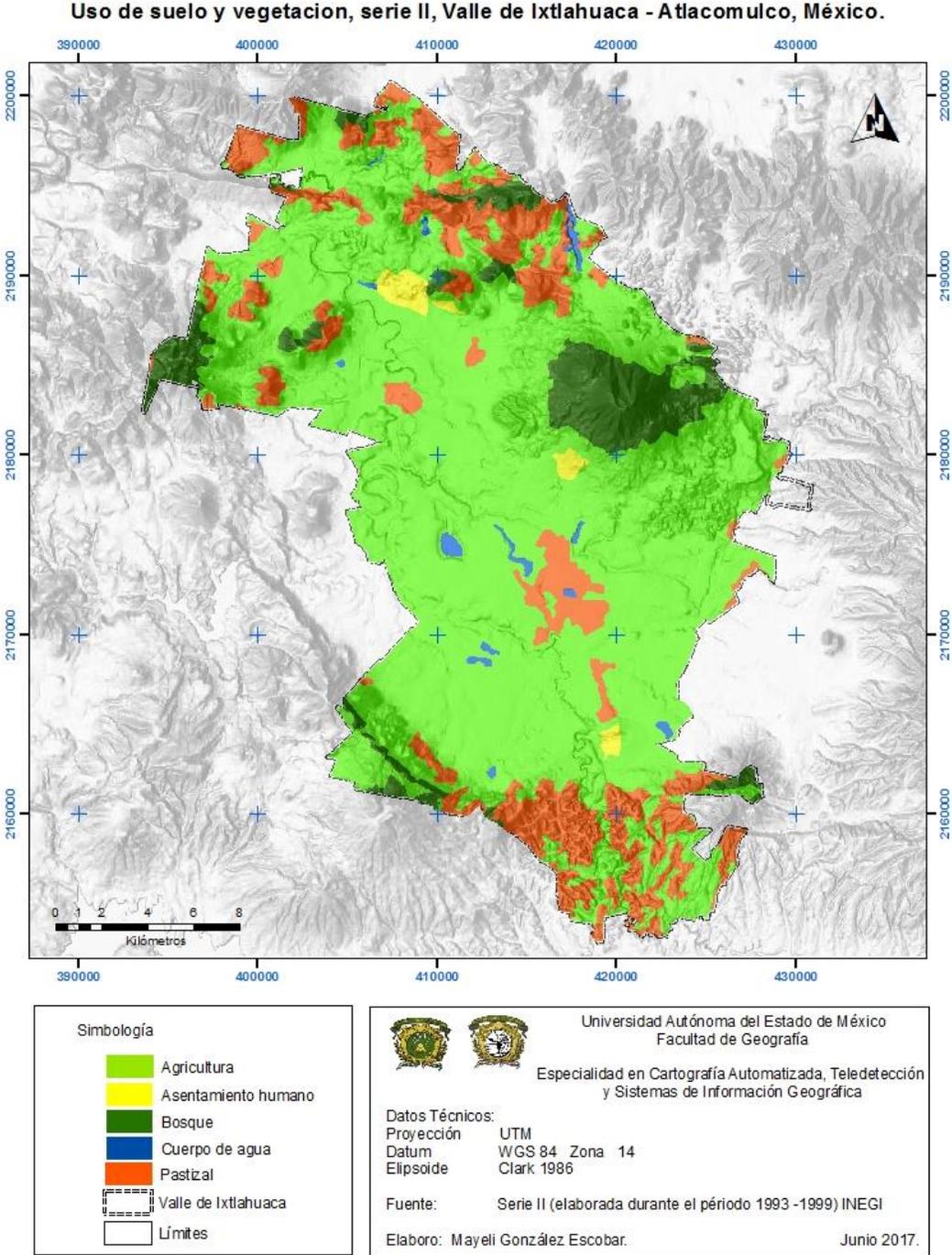


Figura 10. Mapa: Uso de suelo y vegetación serie II, INEGI.

3.1.2. Uso de suelo en el Valle de Ixtlahuaca – Atlacomulco del año 2010

Para el año 2010, el uso de suelo presenta cambios en las diferentes coberturas, comparándolo con los resultados del año 1989, se puede observar que la agricultura tiene una superficie de 37,757.8 ha. y perdió 481.3 ha., la cobertura de asentamientos humanos tiene una superficie de 9,171.9 ha., esta cobertura ganó 4,301.6 ha., recordemos que, a partir del sismo ocurrido en 1985 en la Ciudad de México, los municipios cercanos a la Ciudad presentaron un fenómeno de migración.

La cobertura de bosque tiene una superficie de 12,356.3 ha. presentando un aumento de 1,309.4 ha., se puede decir que una de las causas por las cuales incremento la superficie, tiene que ver con los Programas encaminados a la conservación y recuperación de terrenos, el Programa Estatal de Reforestación, bajo la coordinación de instituciones del orden federal, estatal y municipal.

Los cuerpos de agua tienen una superficie de 3,331.3 ha., presentan un aumento de 710.9 ha., hay que recordar que la digitalización se realizó sobre imágenes satelitales captadas en época de estiaje, la cifra puede variar de acuerdo a la época del año.

El pastizal presenta una superficie de 21,517.2 ha. presentando una pérdida de 4,681.3 ha., el suelo descubierto tiene una superficie de 4,012.5 ha. y presenta una disminución de 1,248.4 ha., ambas coberturas perdieron ante los asentamientos humanos. La cobertura de zona industrial presenta una superficie de 367.2 ha., ganando 89.1 ha.

Tabla 5. Uso de suelo 2010

Coberturas	Total 2010 (ha.)	%
Agricultura	37757.8	42.7
Asentamiento humano	9171.9	10.4
Bosque	12356.3	14.0
Cuerpo de agua	3331.3	3.8
Pastizal	21517.2	24.3
Suelo descubierto	4012.5	4.5
Zona industrial	367.2	0.4
Total	88514.1	100.0

En el siguiente mapa se puede observar la ubicación de las diferentes coberturas que conforman el uso del suelo del año 2010.

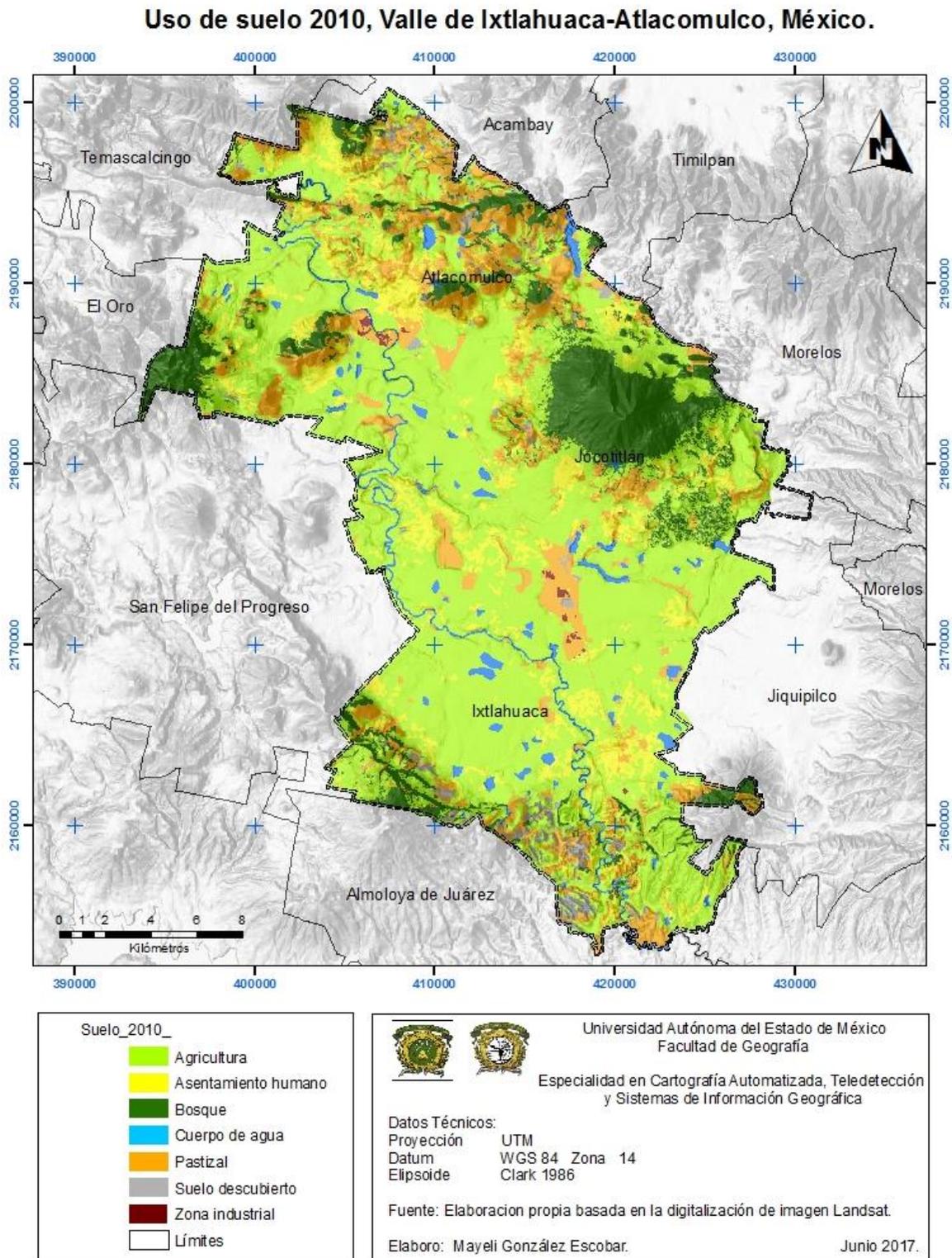


Figura 11. Mapa: Uso de suelo 2010.

Para validar la capa de uso de suelo 2010, se comparó la cartografía, con la serie V de INEGI, según la ficha técnica esta serie se comenzó a trabajar en el periodo de 2011 a 2013 en escala 1:250,000, en esta serie se omiten las capas de suelo descubierto y zona industrial. La escala con la que se trabajó el mapa anterior (Fig. 12) fue a escala 1:10,000 esto permite tener un mayor detalle en las coberturas, para el caso de la serie V se generalizo mucha información.

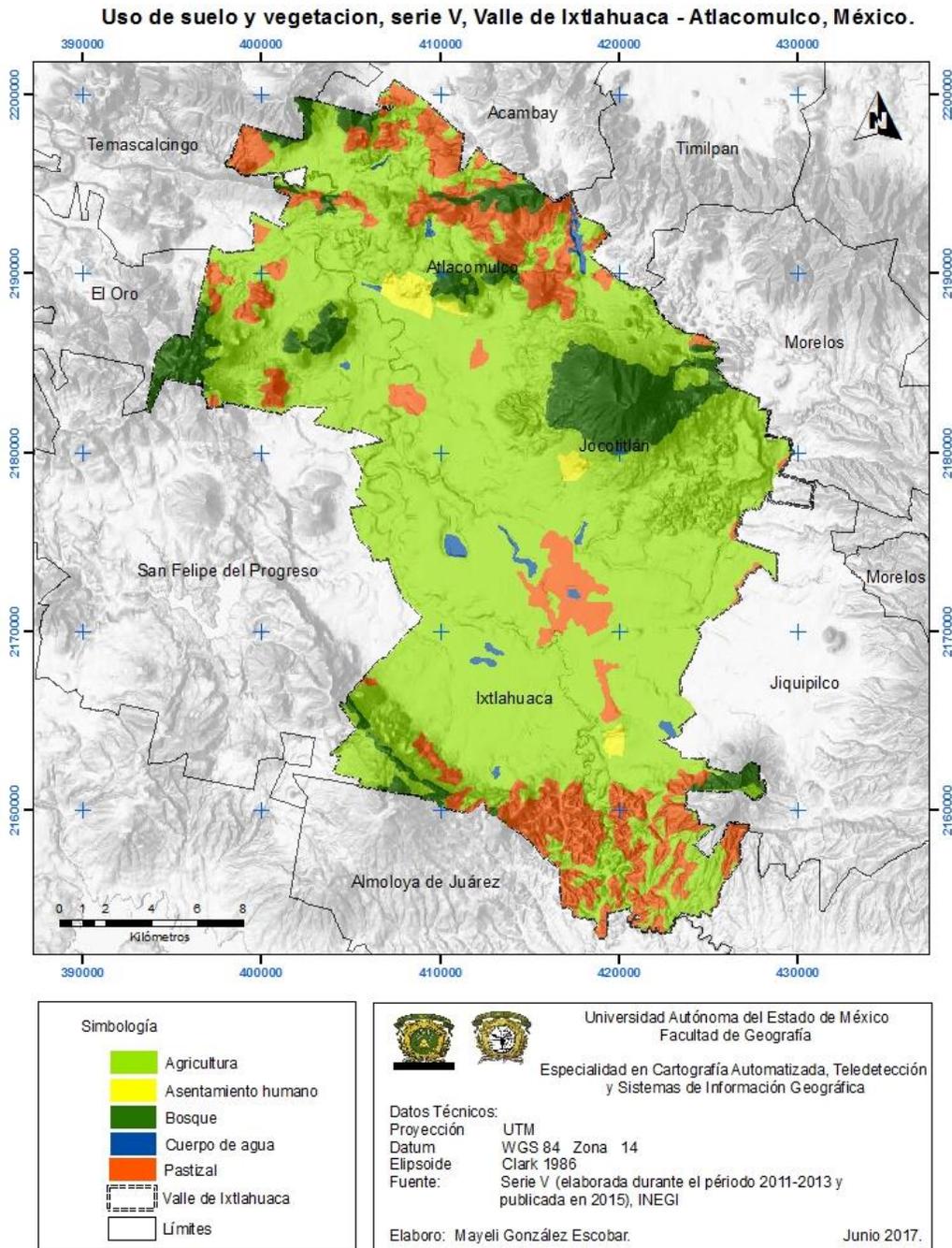


Figura 12. Mapa: Uso de suelo y vegetación serie V, INEGI.

3.2. Análisis de cambios de uso de suelo

3.2.1. Matriz de Tabulación Cruzada y modelación cartográfica

Para el análisis de cambio de uso de suelo se utilizaron las dos capas del uso de suelo (1989 y 2010) y por medio de la herramienta CrossTab (en IDRISI) se obtuvo la tabla de tabulación cruzada, que muestra las frecuencias con las cuales las categorías han permanecido iguales o han cambiado.

La matriz de tabulación cruzada se trabajó en Excel, se cuantificó en hectáreas y porcentajes las pérdidas, las ganancias, el cambio total, intercambio y cambio neto. Los resultados obtenidos muestran que de las 88,514.1 ha. de la superficie total que tienen el Valle, para el año 1989 las coberturas con mayor superficie fueron: la agricultura con el 43.2%, seguido del pastizal con el 29.6%, bosque con el 12.5%, suelo descubierto con el 5.9% y los asentamientos humanos con un 5.5% del territorio total. Dada la dinámica de la zona en el año 2010, la agricultura perdió 3.8%, el pastizal perdió el 36.5%, el bosque ganó un 10.2%, el suelo descubierto perdió 9.7%, mientras que los asentamientos humanos tienen un incremento del 33.5%.

Sin duda los asentamientos humanos van ganando superficie, en aquellas coberturas muy cercanas a ellos, la cobertura más vulnerable a estos cambios es el pastizal, entre el periodo de 1989 a 2010, perdió cerca de 4,681.3 ha., la agricultura solo perdió 481.3 ha. se entiende que la población prefiere ocupar aquellas áreas que no generan rentabilidad económica, las actividades agrícolas se han diversificado en el Valle, antes solo se cultivaba maíz y ahora se cultivan diversos vegetales como: el ejote, rábano, nopal, chayote, calabaza, papa, jitomate, haba, chícharo, frijol, avena, trigo y plantas de ornato, que se distribuyen de manera local y regional.

El bosque ha incrementado su superficie, con el 10.2% que corresponde a 1,309.4 ha., esto con la ayuda del Programa Estatal de Reforestación que se lleva a cabo anualmente con la ayuda de instituciones federales, estatales, municipales y la sociedad. El Valle cuenta con áreas naturales protegidas como: el Parque Estatal Lic. Isidro Fabela (Cerro de Xocótepetl), Parque Ecoturístico Tiacaque y Parque Estatal Isla de las Aves.

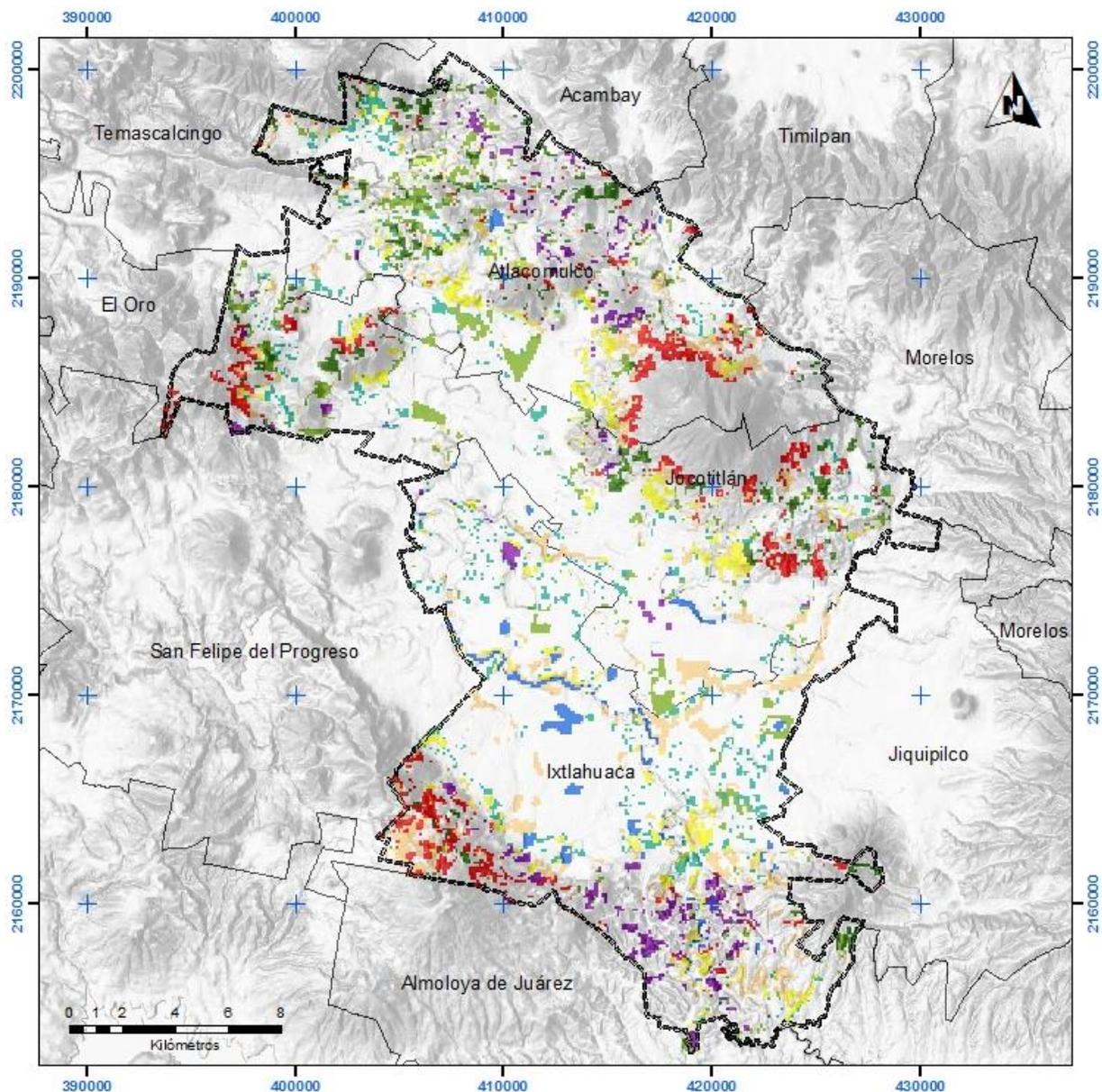
Tabla 6. Matriz de Tabulación Cruzada

Coberturas	Total 1989	%	Total 2010	%	Ganancias	%	Perdidas	%	Cambio total	%	Intercambio	%	Cambio neto	%
Agricultura	38239.1	43.2	37757.8	42.7	6434.4	26.3	5953.1	24.3	12387.5	25.3	11906.3	33.0	481.3	3.8
Asentamiento humano	4870.3	5.5	9171.9	10.4	885.9	3.6	5187.5	21.2	6073.4	12.4	1771.9	4.9	4301.6	33.5
Bosque	11046.9	12.5	12356.3	14.0	2204.7	9.0	3514.1	14.4	5718.8	11.7	4409.4	12.2	1309.4	10.2
Cuerpo de agua	2620.3	3.0	3331.3	3.8	654.7	2.7	1365.6	5.6	2020.3	4.1	1309.4	3.6	710.9	5.5
Pastizal	26198.4	29.6	21517.2	24.3	11660.9	47.7	6979.7	28.5	18640.6	38.1	13959.4	38.6	4681.3	36.5
Suelo descubierto	5260.9	5.9	4012.5	4.5	2581.3	10.5	1332.8	5.4	3914.1	8.0	2665.6	7.4	1248.4	9.7
Zona industrial	278.1	0.3	367.2	0.4	48.4	0.2	137.5	0.6	185.9	0.4	96.9	0.3	89.1	0.7
Total	88514.1	100.0	88514.1	100.0	24470.3	100.0	24470.3	100.0	48940.6	100.0	36118.8	100.0	12821.9	100.0

Al combinar las dos capas de uso de suelo, mediante el uso y aplicación de la herramienta Land Change Modeler (LCM) de IDRISI, se obtuvo el siguiente mapa que muestra la localización de los cambios registrados en el uso de suelo, a simple vista pareciera que ciertas coberturas tienden a ganar en lugar de perder o simplemente intercambian superficie, las coberturas con más cambios fueron:

- agricultura a asentamiento humano con 2523.4 ha., este cambio se da por la cercanía de las localidades hacia las zonas agrícolas.
- agricultura a pastizal con 2860.9 ha., se puede inferir que este cambio se realiza debido a que la zona agrícola ya no es cultivada y se deja en descanso por cierto tiempo.
- pastizal a agricultura con 4414.1 ha., caso contrario a lo anterior, estas zonas vuelven a ser ocupadas con algún cultivo.
- pastizal a asentamiento humano con 2445.3 has, el crecimiento de la población demanda espacios para construir viviendas y la cobertura más vulnerable a estos cambios es el pastizal y se observa como la más cercana a las localidades.
- pastizal a bosque con 2796.9 ha., este cambio se observa principalmente en la zona baja del Cerro de Xocótepetl, en la Sierra de San Juan Coajomulco y el Cerro La Guadalupana.
- pastizal a cuerpo de agua con 1004.7 ha., los cuerpos de agua tienen diferente gasto, dependiendo de la época del año y la profundidad que tienen.
- bosque a pastizal con 1743.8 ha., las campañas de reforestación han cambiado el uso de suelo.
- suelo descubierto a pastizal con 1562.5 ha., este cambio se observa al norte y sur del Valle.

Mapa de cambio uso de suelo 1989 - 2010, Valle Ixtlahuaca - Atlacomulco, México.



Cambios	
	Agricultura to Asentamiento humano
	Agricultura to Pastizal
	Pastizal to Agricultura
	Pastizal to Asentamiento humano
	Pastizal to Bosque
	Pastizal to Cuerpo de agua
	Bosque to Pastizal
	Suelo descubieto to Pastizal
	Valle de Ixtlahuaca_
	Límites



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Geografía

Especialidad en Cartografía Automatizada, Teledetección
y Sistemas de Información Geográfica

Datos Técnicos:
 Proyección UTM
 Datum WGS 84 Zona 14
 Elipsoide Clark 1986

Fuente: Elaboracion propia basada en la digitalización de imagen Landsat.

Elaboro: Mayeli González Escobar. Junio 2017.

Figura 13. Mapa: Cambio de uso de suelo 1989-2010.

3.2.2. Pérdidas y ganancias, cambios e intercambios

El balance sobre pérdidas y ganancias que muestra la cobertura de pastizal mantiene un cambio total de 18,640.6 ha., de las cuales ha ganado 11,660.9 ha., la superficie que ha perdido es de 6,979.7 ha. y el intercambio que presenta la cobertura es de 13,959.4 ha. En el siguiente mapa se muestran las pérdidas en color naranja, las ganancias en color verde y la persistencia en color amarillo.

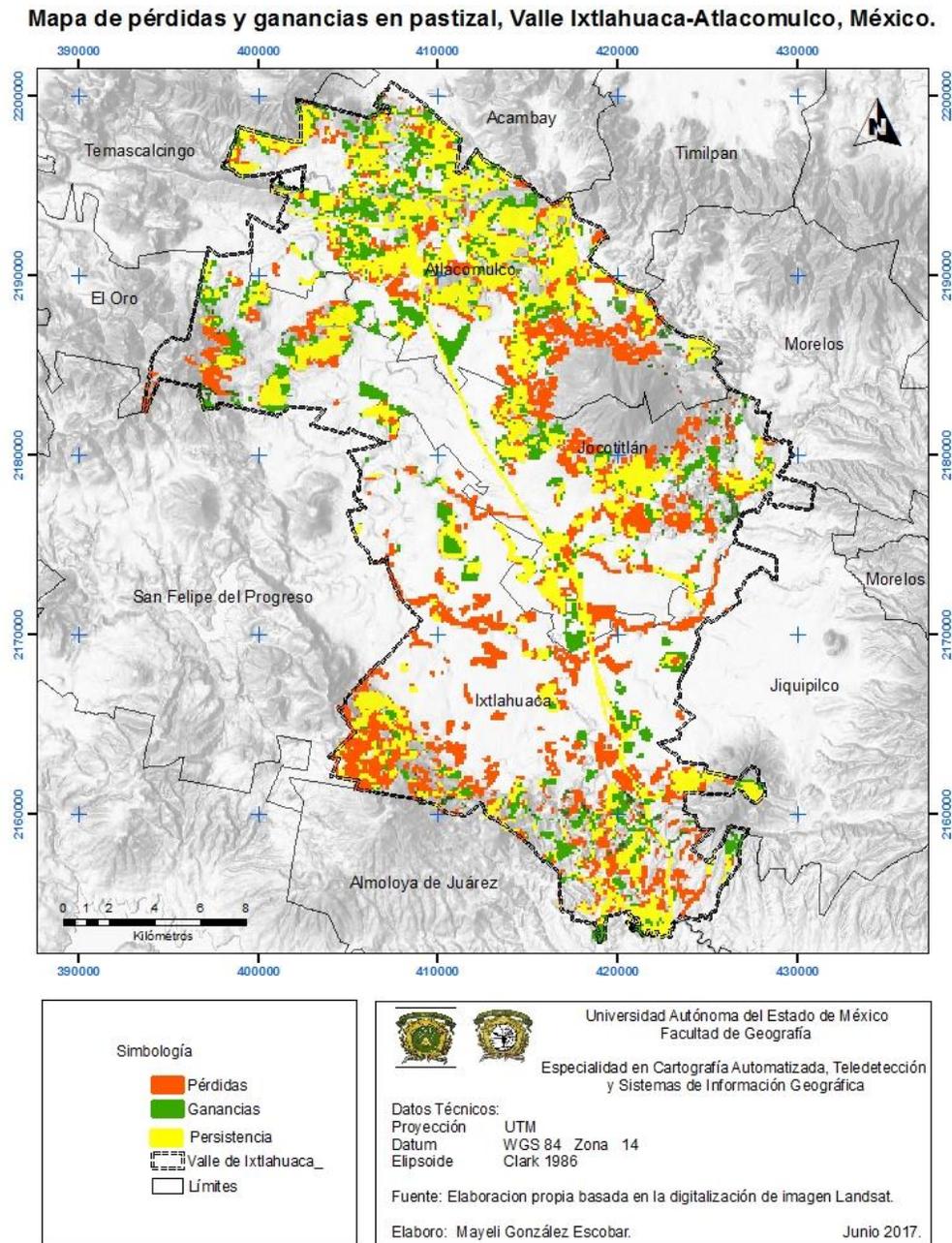


Figura 14. Mapa: Pérdidas y ganancias en pastizal

La cobertura de agricultura con un total de 12,387.5 ha. ha ganado 6,434.4 ha. esto en el mapa se representa en color verde, también ha perdido 5,953.1 ha. se representa en color naranja y además presenta un intercambio de 11,906.3 ha., la tonalidad en color amarillo representa la persistencia de que esta cobertura continúa. Al parecer la actividad agrícola ha perdido en aquellas zonas cercanas a las localidades, debido a la expansión de los asentamientos humanos, también hay varias zonas de cultivo que se dejan de trabajar y pasan a formar parte de la cobertura de pastizal.

Mapa de pérdidas y ganancias en agricultura, Valle Ixtlahuaca - Atlacomulco, México.

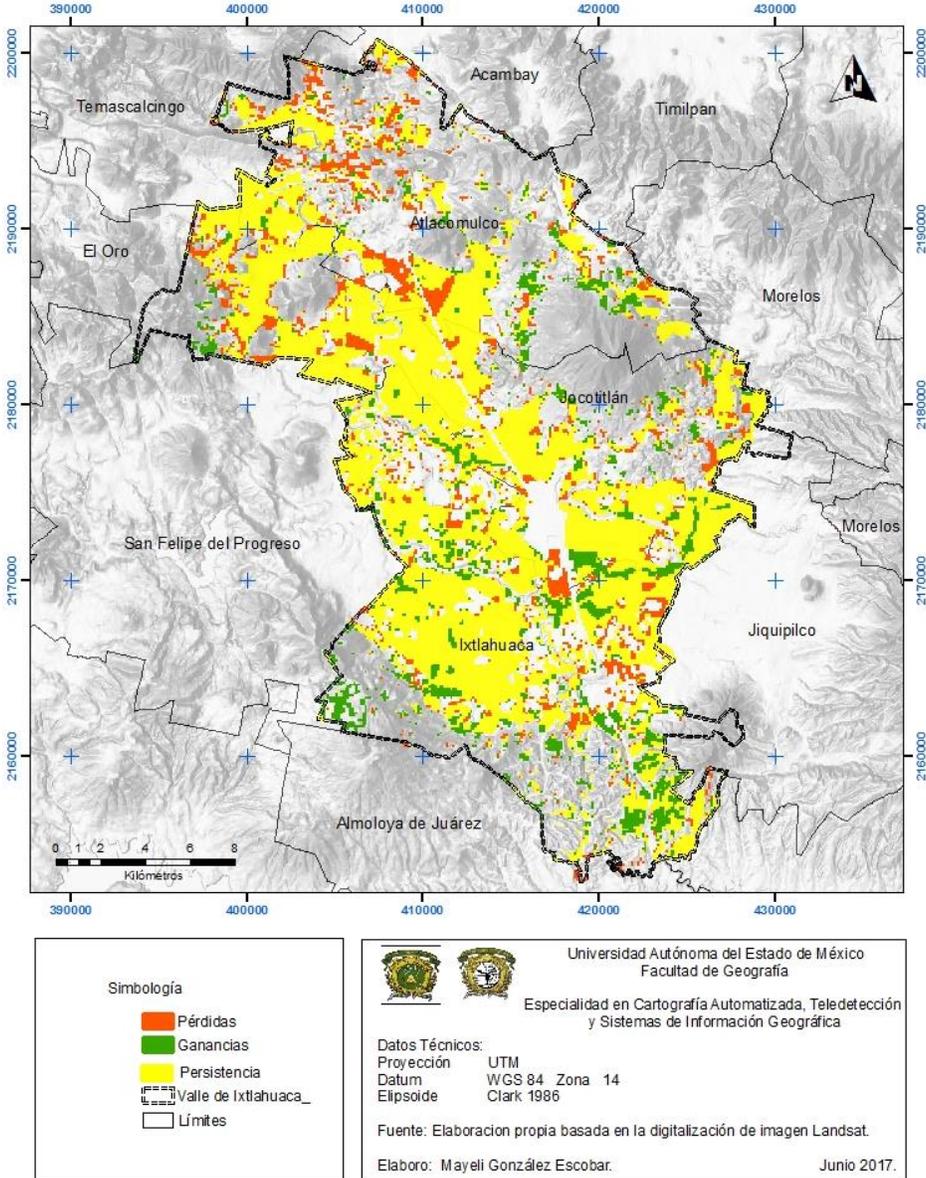


Figura 15. Mapa: Pérdidas y ganancias en agricultura.

El suelo descubierto, presenta un cambio total de 3,914.1 ha. de las cuales ha ganado 2,581.3 ha. representado en el mapa en color verde, también ha perdido 1,332.8 ha. se muestran en color rojo y presenta un intercambio de 2,665.6 ha.

Esta capa solo se presenta al norte y sur del Valle, según el mapa de cambios esta cobertura pasa de suelo descubierto a pastizal, esta superficie es vulnerable a que cambie a asentamientos humanos, esto se ve principalmente en la zona sur del Valle.

Mapa de pérdidas y ganancias en suelo descubierto, Valle Ixtlahuaca - Atlacomulco, México.

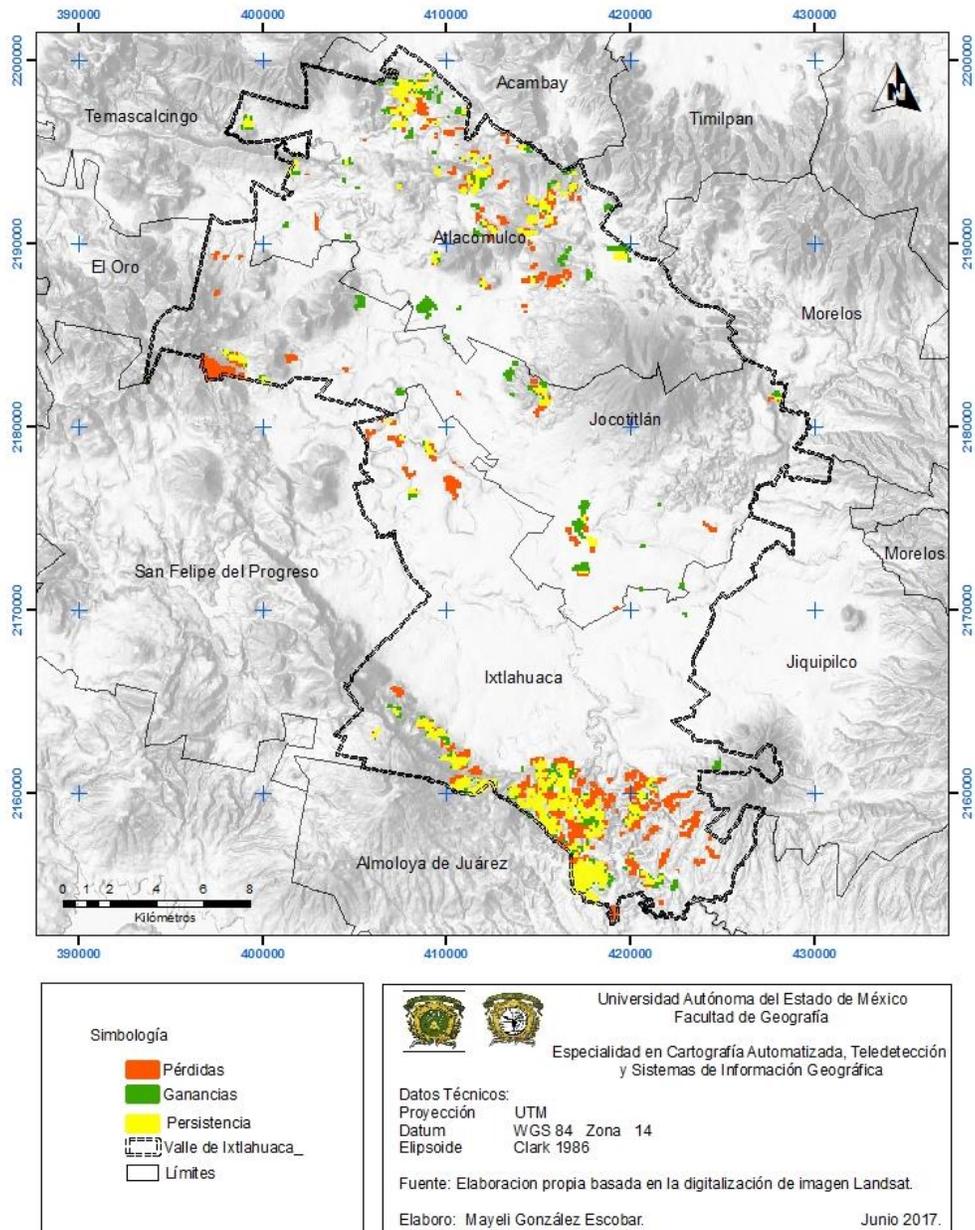


Figura 16. Mapa: Pérdidas y ganancias en suelo descubierto

La cobertura de bosque tiene un total de 5,718.8 ha., de las cuales ha ganado 2,204.7 ha. esta se representa en color verde, las pérdidas se muestran en color naranja y ascienden a 3,514.1 ha., la cobertura presenta un intercambio de 4,409.4 ha.

Las pérdidas se observan en la zona norte y en las partes bajas de las principales elevaciones, según el mapa de cambios la cobertura de bosque cambia a pastizal y viceversa.

Mapa de pérdidas y ganancias en bosque, Valle Ixtlahuaca - Atlacomulco, México.

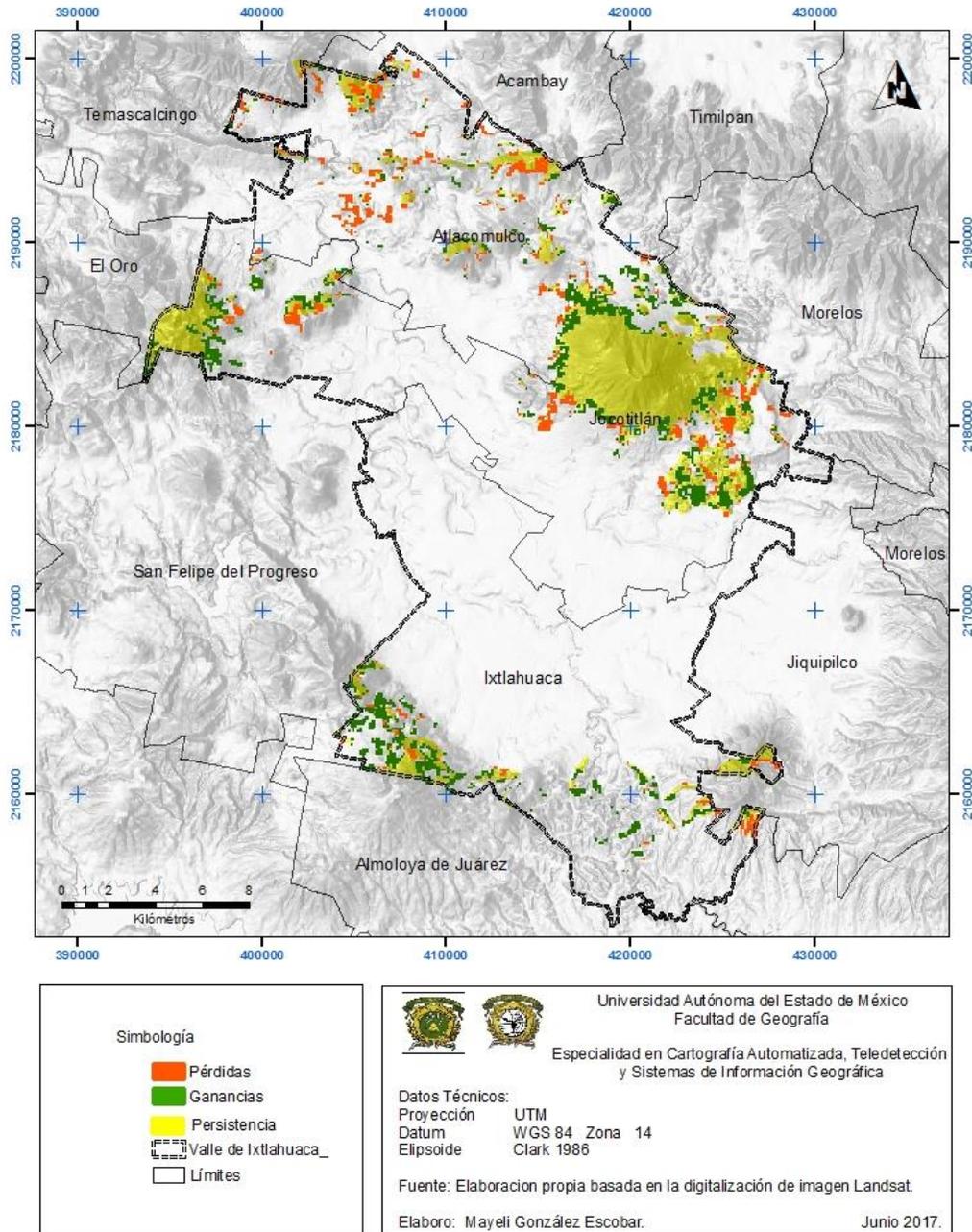
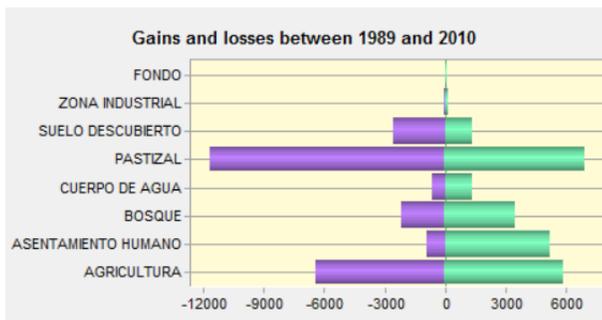


Figura 17. Mapa: Pérdidas y ganancias en bosque

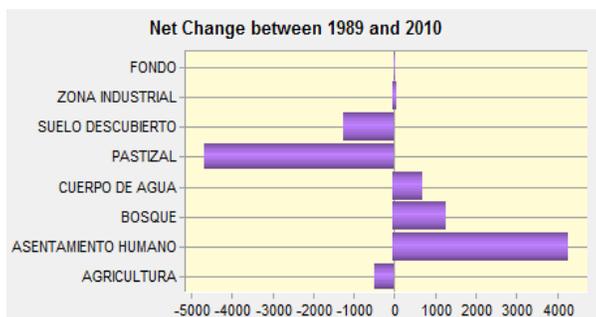
Los resultados expresan que la cobertura que ha ganado más superficie es el pastizal con 11,660.9 ha. que equivale al 44.7% del total de las ganancias, pero a su vez también ha perdido 6,979.7 ha. que equivalen al 28.5% del total de las pérdidas. La tasa de intercambio muestra que las coberturas de pastizal, agricultura y bosque son las categorías más dinámicas en términos de ganar o perder superficie, ante la cobertura de asentamientos humanos.



Gráfica 1. Ganancias y Pérdidas entre 1989 y 2010.

Las contribuciones al cambio neto por coberturas, muestran tres categorías con cambio neto negativo, el pastizal presenta un cambio de 4,681.3 ha. equivalente al 36.5% del total, el suelo descubierto presenta un cambio de 1,248.4 ha. equivalente al 9.7% del total y la agricultura presenta un cambio de 481.3 ha. equivalente al 3.8%.

Las coberturas que presentan un cambio neto positivo son: asentamientos humanos presentan un cambio de 4,301.6 ha. que corresponde al 33.5% del total, el bosque presenta un cambio de 1,309.4 ha. correspondiente a 10.2% del total, los cuerpos de agua presentan un cambio de 710.9 has, que equivale al 5.5% del total.



Gráfica 2. Cambio neto entre 1989 y 2010.

Para realizar los mapas de probabilidades de cambio, se utilizó el módulo Análisis en Cadena Markov, el cual analizó las dos capas del uso del suelo (1989 y 2010) creando una matriz de probabilidades de transición de cada categoría y el módulo de Stchoice (Elección Estocástica) creó un mapa a partir del archivo de salida de Cadena Markov, los mapas que a continuación se presentan muestran las categorías más dinámicas como: pastizal, agricultura y bosque.

3.3. Escenarios de probabilidad

Se tomo como escenario el año 2015, debido a la falta de información por parte de INEGI, según la ficha técnica de la serie V (última), se trabajó en el periodo 2011-2013, con imágenes Landsat 2011 y fue publicada hasta 2015. Las capas de pastizal, agricultura y bosque fueron revisadas en imágenes Landsat del 2015, de esta forma se validó los resultados en los escenarios.

En el siguiente mapa se observa que la probabilidad de la cobertura de pastizal para el 2015, presenta una superficie de 19,989.1 ha. con respecto al 2010 presenta una disminución del 22.5%, en el mapa se puede observar en color amarillo el pastizal 2010 y en color naranja los cambios que se presentaran para 2015, los principales cambios se observan en la zona norte de Valle a consecuencia de la expansión de la población.

Probabilidad de cambio en pastizal 2015 , Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco, México.

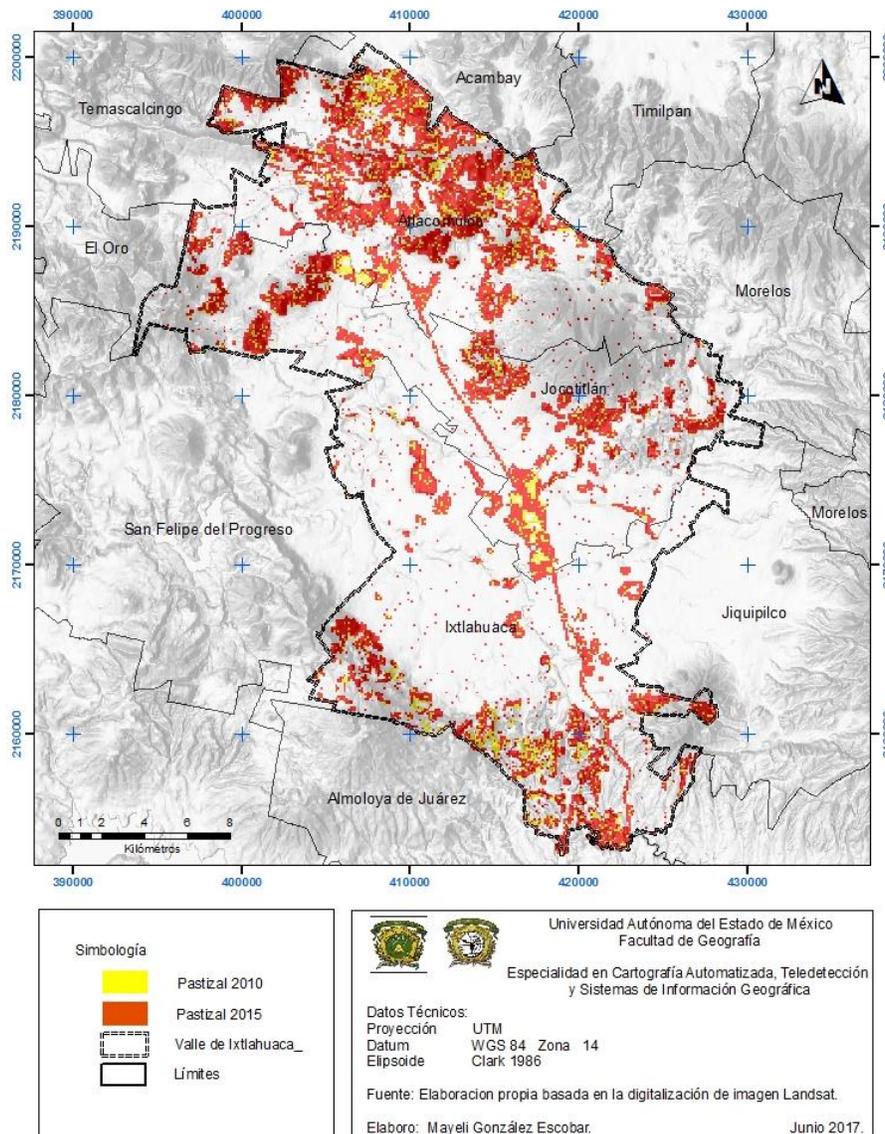


Figura 18. Mapa: Probabilidad de cambio en pastizal 2015

La probabilidad de cambio en pastizal para 2020 es positiva, con respecto al 2015 presenta un incremento del 22.5%, como se ha visto anteriormente el pastizal tiende a perder superficie ante las coberturas de asentamientos humanos, agricultura, bosque y cuerpos de agua, pero también gana superficie en coberturas de agricultura, bosque y suelo descubierto. En el mapa se observa la cobertura de pastizal 2015 en color rojo y la de 2020 en color naranja, llama la atención que la cobertura tiende a crecer hacia las zonas de bosque (Cerro de Xocótepetl), la zona agrícola y el suelo descubierto.

Probabilidad de cambio en pastizal 2020 , Valle de Ixtlahuaca - Atlacomulco, México.

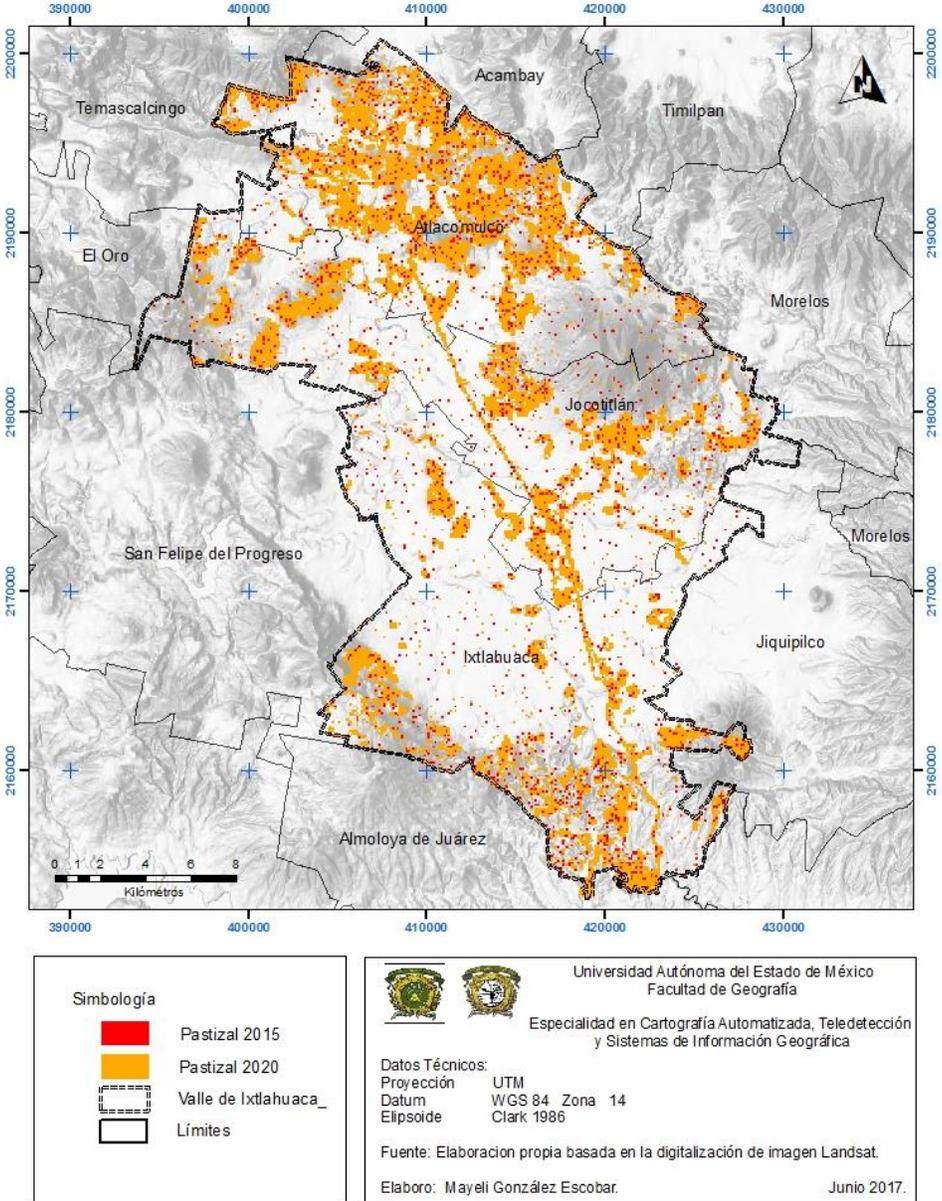


Figura 19. Mapa: Probabilidad de cambio en pastizal 2020

La agricultura para 2015 presenta una superficie de 38,129.7 ha. con respecto al 2010 presenta un crecimiento del 43.1%, se puede entender que la agricultura recuperó todas aquellas superficies que estaban abandonadas o sin trabajar.

En el mapa se observa la distribución de la zona agrícola 2010 en color verde y para el 2015 se presenta en color verde claro, hay que poner atención ya que las zonas agrícolas están muy cerca de los bosques, como se observó en el mapa anterior el pastizal tiende a ganar superficie sobre el bosque y a su vez el pastizal pierde superficie sobre la agricultura.

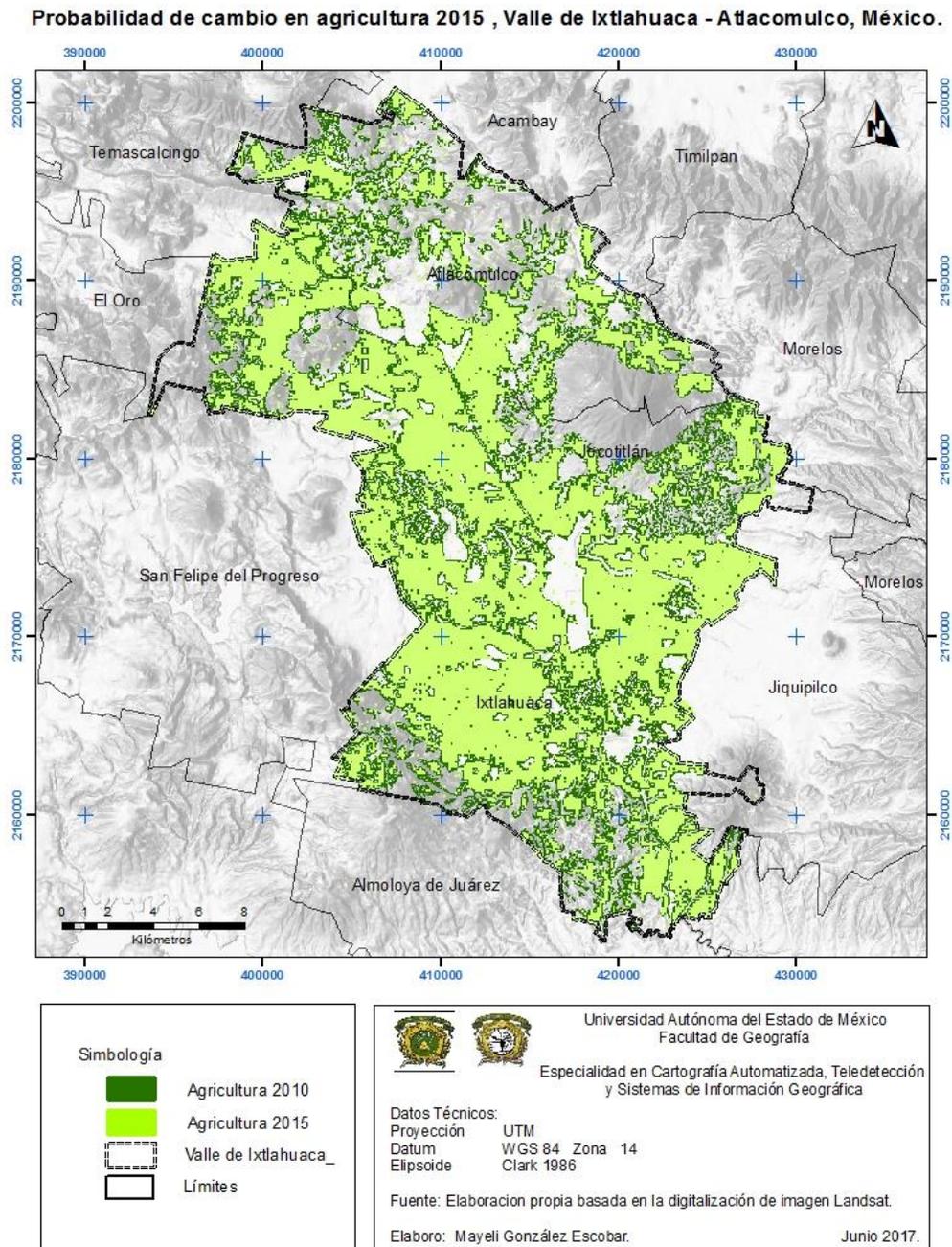


Figura 20. Mapa: Probabilidad de cambio en agricultura 2015

La probabilidad de cambio para la agricultura en 2020, presenta una disminución en su superficie, la agricultura para esta fecha tendrá una superficie de 38,100 has, además de que esta cobertura presenta disminución, también gana superficie en otras áreas. En el mapa se observa la capa de agricultura 2015 en color verde y para el 2020 se observa en color verde claro.

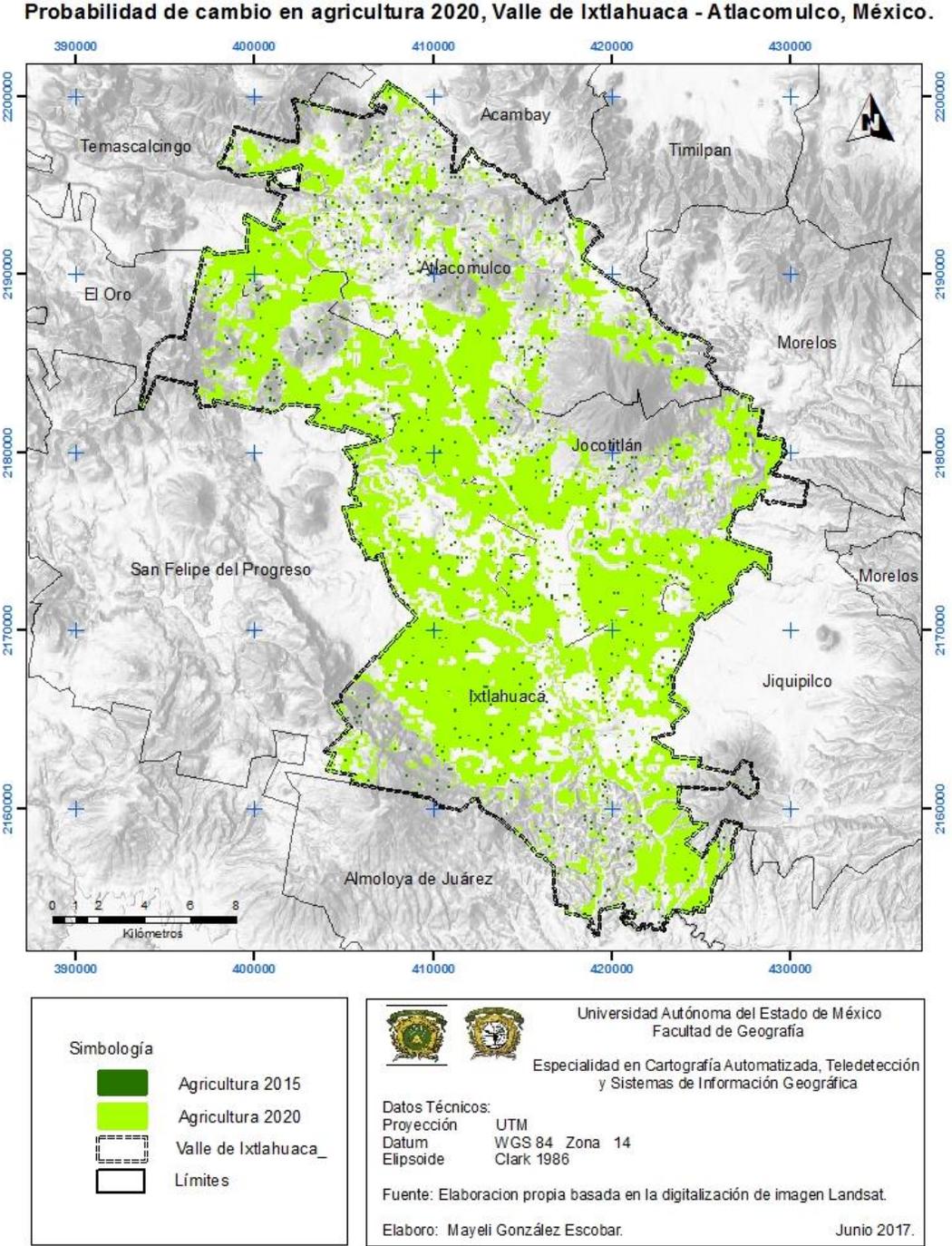


Figura 21. Mapa: Probabilidad de cambio en agricultura 2020

La cobertura de bosque para 2015 presenta una superficie de 12,834.4 ha., teniendo una disminución del 14.5%, en el mapa se observa la cobertura de bosque 2015 en color verde claro, esta cobertura gana terreno en las zonas planas y pierde superficie en el Cerro de Xocópetl, la superficie que pierde se incorpora a pastizal, esto se observa en la figura 17.

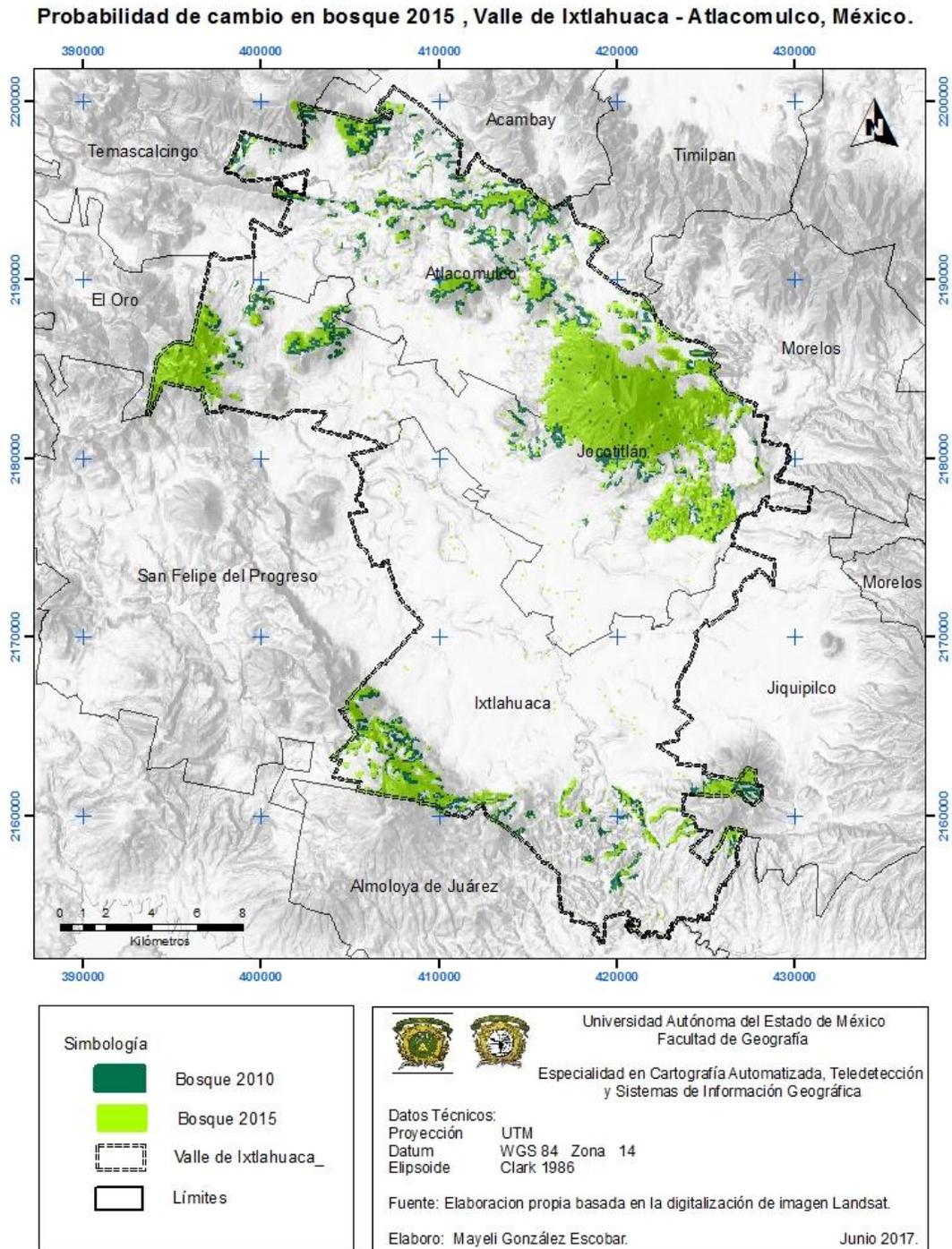


Figura 22. Mapa: Probabilidad de cambio en bosque 2015

Para el 2020, la cobertura estimada de bosque tendrá una superficie de 12,865.6 ha., presenta un aumento en la superficie, en el mapa se puede observar la cobertura de bosque 2020 en color verde claro, mientras que la cobertura de 2015 se presenta en color verde oscuro, el bosque en 2020, gana superficie en las zonas planas y en las zonas de suelo descubierto que se ubican al norte del Valle.

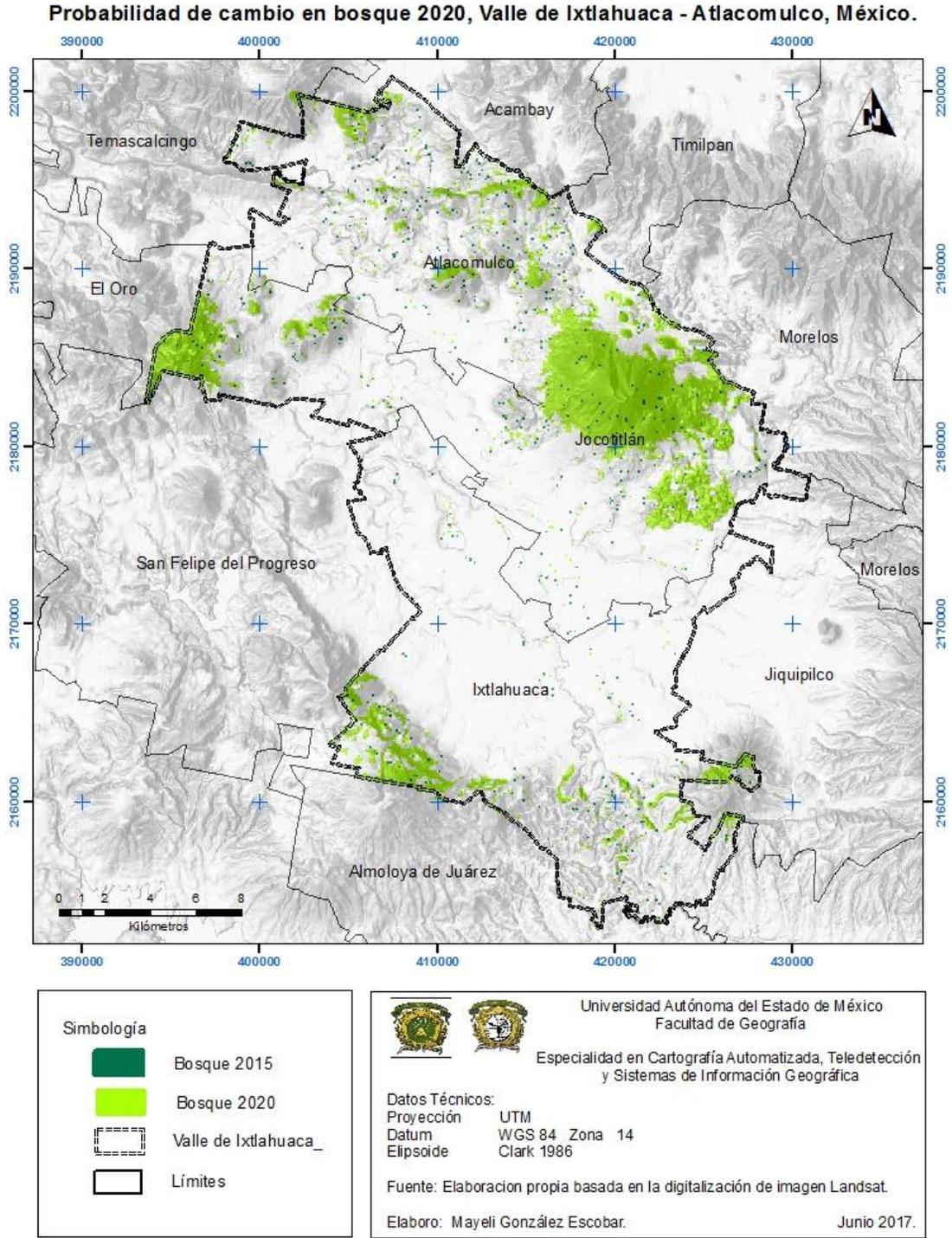


Figura 23. Mapa: Probabilidad de cambio en bosque 2020.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

La cartografía del uso de suelo del Valle de Ixtlahuaca – Atlacomulco, obtenida a partir de la digitalización y aplicando técnicas digitales y visuales de interpretación en imágenes Landsat y Spot, presenta un grado de confiabilidad del 90%. La precisión y confiabilidad del método utilizado se basa en la interpretación visual.

La utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) fue de gran utilidad para el estudio. Los módulos de Land Change Modeler, CrossTab, Análisis en Cadena Markov y el módulo Stchoice del programa IDRISI, se constituyeron como herramientas clave para alcanzar los resultados presentados.

La metodología que se aplicó para el análisis de los cambios de uso de suelo, permitió determinar las ganancias y pérdidas, los intercambios y cambio neto tomando como referencia las persistencias entre las diferentes categorías consideradas. Esto permitió identificar las categorías que sufrieron intercambios y aquellas que tuvieron transiciones significativas.

A partir de los resultados del análisis de la matriz de tabulación cruzada, se confirma una tendencia general en el crecimiento de los asentamientos humanos y una correspondiente disminución de las coberturas de pastizal, agricultura y suelo descubierto. Estas tendencias se observan con mayor exactitud en las zonas cercanas a las áreas urbanas, como factor de crecimiento y en demanda de nuevos espacios que requiere la población.

El modelo predictivo que se obtuvo del Análisis en Cadena de Markov demostró que la cobertura de asentamiento humano tiende a crecer rápidamente, en los mapas de probabilidad de cambio para el año 2015 se muestran un crecimiento en las coberturas de agricultura, bosque y pastizal, aproximadamente del 2%, para el 2020 las coberturas presentan un incremento muy lento, aproximadamente el 0.9%.

Las cadenas de Markov, como proceso para el análisis de cambios de uso, resulta ser una herramienta de utilidad para el estudio de la dinámica que se produce en el territorio, aportando información útil cuando se desea generar propuestas de asignación de usos y actividades permisibles, lo cual resulta ser de gran utilidad para la ordenación y uso del espacio y la planificación del territorio.

4.2. Recomendaciones

Los resultados obtenidos muestran que este tipo de estudios pueden contribuir de manera importante al proceso de toma de decisiones ya que la información generada puede ser útil para analizar y gestionar de forma más óptima al uso de suelo.

Los resultados obtenidos se pueden complementar con el análisis de evaluación multicriterio, seleccionando las posibles variables explicativas, esto complementara el estudio y con ello el grado de certeza sobre lo que se propone.

Este modelo de Cadenas de Markov puede aplicarse a diferentes temáticas como: crecimiento de áreas urbanas, cuestiones forestales, degradación de suelo por factores antrópicos, sistemas de prevención de alerta temprana, etc. el cual puede analizar y proyectar la evolución de dichas temáticas y determinar los cambios positivos y negativos.

Se hace la invitación para que instituciones gubernamentales encargadas de generar información cartográfica, utilicen este u otros modelos de predicción, con la finalidad de contar con información actual, precisa y confiable.

Bibliografía

Aguilera, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. Geofocus (artículo).

Antrop, M. (2004). Landscape change and the urbanization process in Europe. Land and Urban Planning.

Aplicación práctica de la metodología de Pontius y otros (2004). Desarrollo estadístico y espacial en el SIG IDRISI Andes. Disponible en https://www.google.com.mx/search?site=&source=hp&q=modulo+land+change+modeler+idrisi&oq=modulo+land+change+modeler%2C+idrisi&gs_l=hp.3.0.33i21k1j33i160k1l3.1886.24864.0.27111.40.39.0.0.0.0.552.5104.2j30j5-

Bosque, I. (2012). Los Sistemas de Información Geográfica y la investigación en Ciencias Humanas y Sociales. Madrid, España.

Briseño, F. (2003). Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra, Revista Geográfica Venezolana, vol. 46, núm. 1, Universidad de los Andes Mérida, Venezuela. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/3477/347730348006.pdf>

Camacho Olmedo, M.T., Molero Melgarejo, E. y Paegelow, M. (2010). Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Disponible en http://www.age-geografia.es/tig/2010_Sevilla/ponencia3/CAMACHO.pdf

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. Madrid.

Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ed. Ariel S.A. Barcelona, España.

Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para asuntos económicos y sociales Organización de Estados Americanos (2003). Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Washington D.C. Disponible en <http://www.org/dsd/publications/Unit/oea65s/ch10.htm#1>. Aplicaciones del SIG a nivel nacional.

FRANCO, S., y Valdez, M., (2003). Principios básicos de Cartografía y Cartografía Automatizada. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

FAO (2009). Sistemas de Información Geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a0906s.pdf>

Gobierno del Estado de México (2013). Plan de Desarrollo Municipal, Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Estado de México y Municipios (IPOMEX). Disponible en www.ipomex.org.mx

Hernández, C. (2014). Aproximación a los factores explicativos del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de Toluca Estado de México, periodo 1980-2010, mediante Sistema de Información Geográfica y Técnicas de Regresión. Especialidad en cartografía automatizada, teledetección y sistemas de información geográfica. Toluca, México.

Henríquez, E. (2012). Escenarios futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de la macha oriental. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005), Recursos naturales, Edafología, Disponible en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Censo de Población y Vivienda 1990, 2010. Resultados definitivos. Disponible en <http://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014), Imágenes de satélite, Disponible en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite>

Víctor, O. (2014). Sistemas de Información Geográfica, de creativecommons, Disponible en http://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Ordóñez, C. (2003). Sistemas de Información Geográfica: Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. España: Alfa-Ra-Ma.

Paegelow, M. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje”, GeoFocus (artículos) no 3, 2003.

Pineda, N. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica. Tesis de doctorado. Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía, Madrid. España.

Pontius, R., Shusas, E. y McEachern, M. (2004): Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, Ecosystems & Environment.

Sánchez E. (2012). Sistemas de monitoreo de la dinámica de uso de suelo MODUS en la regional binacional México-Estados Unidos”. Geofocus (artículos) no 12. ISSN: 1578-5157.

Scherer, W. (1972). Aplicación de cadenas de Markov a la sedimentación cíclica de la formación oficina. Cuarto Congreso Geológico Venezolano. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Caracas. Disponible en http://biblioteca.universia.net_bufa/ficha/markov/id/65321206.html.

Ruiz, V., et al. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. Nicaragua.

Regil, H., (2005). Análisis de Cambio de Uso de Suelo y Vegetación para la Obtención de la Dinámica de Perturbación-Recuperación de las Zonas Forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000. Tesis de Licenciatura, Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. UAEM

Valdez, J. et al., (2011). Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del Río Metztitlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007. Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente 17(3):313_324, 2011, México.