

Versión 28 de abril del 2015.



Estudio de la Tasa de Cambio de las Cubiertas del Suelo para la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda (Querétaro) con insumos del proyecto MAD-Mex. Informe Final.

Consultor: Gerardo Antonio Ríos Saís

Para:

SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



KFW

Palabras clave: Tasa de transformación, cambio en las cubiertas del suelo, imágenes de satélite, Sierra Gorda, Interpretación interdependiente, MAD-Mex.

Contenidos

1.- Resumen Ejecutivo

2.- Introducción- Estudios de Tasa de Transformación en Areas Naturales Protegidas

3.- Alcances

4.- Algunos datos sobre la Biodiversidad en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

5.-Objetivos

6.- Metodología

7.- Resultados Preliminares

a.-Evaluación del producto MAD Mex

b.-Pre procesamiento de Imágenes

c.- Definición de la leyenda

d.- Análisis de cobertura de suelo y datos históricos

e.- Áreas de cambio

e.1.- 2000-2005

e.2.- 2005-2010

e.3.- Cambios acumulados 2000-2010

f.- Cálculo de la Tasa de Transformación

7.- Conclusiones

ANEXO 1. Mapas

ANEXO 2. Protocolo TTH CONANP y Propuesta técnica para incluir MAD Mex en el proceso.

ANEXO 3. Memoria del trabajo de campo y talleres con el personal de la RBSG

ANEXO 4. Literatura citada y referencias WEB

1.- Resumen Ejecutivo

Este estudio consiste en el cálculo la Tasa de Cambio de las Cubiertas del Suelo para la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (RBSG) en apego al *Protocolo para la evaluación del Uso de Suelo y Vegetación en Áreas Naturales Protegidas Federales de México (CONANP, 2007)* incorporando los productos del proyecto MAD-Mex (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ Program).

El primer componente es un análisis que se realiza mediante el tratamiento de imágenes de satélite de alta resolución (Landsat, SPOT5, SPOT6) utilizando un método híbrido o mixto que incluye técnicas de tratamiento digital y de interpretación visual a escalas finas (Paniagua, 2009; Paniagua *et. al.* 2011); la verificación en campo de los tipos de cubierta del suelo y el uso de sistemas de información geográfica para obtener las cifras de cubierta de suelo para cada fecha y una comparación multitemporal de las cubiertas.

Un segundo componente involucra la incorporación del producto MAD-Mex en el proceso de validación-interpretación de las clasificaciones a escala 1: 50 000 obtenidas como producto del primer componente, así como una evaluación de su precisión al ser utilizado como material de apoyo.

Un uso potencial es el de apoyo a la categorización de cubiertas de suelo durante la interpretación, así como insumo de subsecuentes estudios que requieren puntos de comprobación georeferenciados enfocados a tipos de vegetación o monitoreo biológico.

El documento incluye 9 mapas con las cubiertas y un análisis de evaluación del producto MAD-Mex para su incorporación en el Protocolo que la CONANP utiliza para la estimación de cambios en las cubiertas del suelo en Áreas Naturales Protegidas de administración Federal. Se realizó un taller de capacitación en las oficinas de la RBSG con el objeto de capacitar al personal adscrito a esa ANP para el uso de los datos generados en el proyecto utilizando herramientas de libre acceso (QGIS).

2.- Introducción

Las zonas forestadas han sido uno de los recursos naturales más importantes, estos proporcionan fuentes de energía y materias primas, al mismo tiempo que suministran diversos servicios ambientales. Sin embargo, la acelerada deforestación es uno de los problemas ambientales de mayor importancia en el mundo. Actualmente se calcula que el 30% de la superficie terrestre se encuentra bajo cubierta forestal (FAO, 2002 y FAO, 2005).

La deforestación es un tema que ha recibido una atención importante durante los últimos años, sobre todo por las consecuencias negativas que tiene sobre el clima, el ciclo hidrológico, la conservación de los suelos y las emisiones de gases de invernadero a la atmósfera. La deforestación constituye una de las principales amenazas para la biodiversidad que conlleva la pérdida de numerosos servicios ambientales fundamentales (CONABIO, 2009). Las actividades antrópicas son consideradas las causas principales del aumento en los niveles de desertificación, deforestación, fragmentación del hábitat y pérdida de biodiversidad (Noble y Dirzo, 1997) particularmente en las regiones tropicales, donde predomina un patrón acelerado de cambio en las cubiertas forestales, que va de condiciones predominantemente naturales a otras donde prevalece la influencia antrópica (FAO, 1996).

México presenta una situación compleja en cuanto a la conservación y manejo de los recursos naturales, lo que representa por un lado importantes oportunidades para el desarrollo, así como una mayor complejidad para el manejo de sus recursos (CONAFOR, 2011). Nuestro país está considerado mundialmente dentro de los 17 países megadiversos, ya que cuenta con un inventario biológico extenso el cual lo ubica entre los dos países con mayor número de ecosistemas y entre los cinco con mayor diversidad de especies en el mundo, representando el 12% de la biota mundial concentrado mayormente en el trópico húmedo (Mas et. al., 1996; PNUMA, 2005; CONABIO, 2009; IUCN, 2011). Esta riqueza biológica se debe en gran medida a la privilegiada ubicación geográfica que México posee entre la región Neártica y Neotropical. Sin embargo, a pesar de contar con una gran diversidad los ecosistemas son muy susceptibles a los procesos de cambio y transformación del hábitat. Durante los últimos 50 años se han transformado los ecosistemas enormemente, este periodo en particular se caracteriza por una tasa muy alta de cambio en la cobertura de la vegetación y el uso del suelo (Challenger y Dirzo, 2009). De acuerdo a estimaciones presentadas por la FAO en 2010, México se encuentra entre los diez países con mayor pérdida neta anual de área de bosque, registrando una disminución importante en los bosques primarios en los últimos 20 años. En México, el 53% del área de bosque está clasificado como bosque primario, por lo que es considerado uno de los países con mayor superficie de estos bosques, y un 43% está representado por vegetación secundaria (CONAFOR, 2011; FAO, 2011). De la superficie total del territorio nacional (196.4 millones de hectáreas), poco más del 33% (64.8 millones de hectáreas) está cubierto por selvas y bosques templados, el 37% está cubierto por ecosistemas áridos y otros tipos de vegetación, mientras que el 30% restante corresponde a usos principalmente agrícolas, pecuarios y zonas urbanas; de manera que estamos hablando que aproximadamente la tercera parte del país está cubierta por bosques y selvas (CONAFOR, 2011). Una de las principales causas por la que gran parte de los cambios en el paisaje natural de México está siendo transformado a un ritmo alarmante, es

debido a las actividades antrópicas, para satisfacer necesidades básicas de alimentación y vivienda.

Algunos de esos cambios son provocados por las prácticas específicas de manejo y otros por las fuerzas sociales, políticas y económicas que controlan los usos del suelo (Bocco et. al., 2001). El estado de la cubierta vegetal nos da un indicio del grado de conservación de los ecosistemas, siendo la cobertura vegetal o cubierta del suelo (los atributos biofísicos de la superficie terrestre) y los usos del suelo (los distintos propósitos humanos con los que se aprovechan estos atributos) los factores que determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Lambin et. al., 2001; Velázquez, et. al. 2007). Los bosques y selvas ofrecen varios servicios al ecosistema ya que participan en el ciclo hidrológico, constituyen protección del suelo evitando la erosión y presentan un gran reservorio de información genética. Al invadir y producir cambios en estos sistemas, surgen otros procesos de deterioro que entre los más importantes se encuentran la deforestación, fragmentación, la degradación y la dinámica de cambio en el uso del suelo (Lambin et. al., 2001; CONAFOR, 2011), ya que constituyen la causa principal de otros eventos como la pérdida y alteración de la diversidad biológica y hábitat (Figueroa, 2008), el cambio climático a diferentes escalas (Chase et. al. 2000), la degradación del suelo (erosión y pérdida de fertilidad), alteración de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la pérdida de los servicios ecosistémicos entre otros (Mas et. al., 1996; Lambin et. al., 2001; Velázquez et. al. 2002; Figueroa, 2008; Cuevas, 2005; Velázquez y Larrazábal, 2011). El impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas terrestres no se ha limitado a la explotación de los bosques y selvas, se debe de considerar como parte de los elementos de degradación de la vegetación natural el desmonte y la sustitución por cultivos, potreros o asentamientos humanos. En muchos casos, esos impactos directos van seguidos por la aplicación de malas prácticas de manejo forestal o agrícola, incluso sobrepastoreo, que han producido serios problemas de degradación del suelo (Sánchez, et. al., 2009). Ante la importancia de contar con información sobre el comportamiento y las tendencias de los procesos de degradación en los que intervienen factores ecológicos y socioeconómicos, surge la necesidad de realizar estudios sobre la pérdida de vegetación y la dinámica en la transformación en las coberturas y uso del suelo. El cambio de cobertura y uso de suelo representa la modificación de los elementos biofísicos que interactúan sobre la superficie, o de las actividades que ahí se llevan a cabo; pues tanto cobertura como uso son dinámicos en tiempo y espacio. Una manera confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica es a través del estudio de la dinámica espaciotemporal de uso del suelo, análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo, o también llamada Tasa de Transformación del Hábitat (TTH). Este tipo de estudios son considerados un elemento básico del diagnóstico para el ordenamiento territorial y para entender los mecanismos del proceso deterioro de los ecosistemas, ya que permite caracterizar una región ofreciendo información sobre las modificaciones en la vegetación debido al uso humano, así como la distribución e incremento (o decremento) de las tierras dedicadas a actividades antrópicas, ya sea productivas o como asentamientos humanos en un intervalo de tiempo en determinada porción de terreno (Castelán et. al., 2007; Velázquez, et. al. 2007). Éste análisis se ha mencionado ser de gran importancia para apoyar políticas encaminadas a disminuir o revertir el deterioro ambiental (Velázquez et. al., 2002). La dinámica que se produce en el paisaje al cambiar el uso que se da al suelo a lo largo del tiempo, en

términos conceptuales se puede ver como un flujo de terrenos que pasan de una cierta cobertura vegetal o forma de uso a otra (Sánchez, et. al., 2009). La manera en que se rige esta dinámica depende de los tipos de cobertura involucrados, los mecanismos de sucesión ecológica y regeneración, los componentes físicos del entorno, las actividades económicas que se realizan, el contexto cultural de la población, los eventos meteorológicos y los desastres naturales. Su dinámica incluye procesos de pérdida y recuperación de cobertura y el balance final es la consecuencia de ganancias y pérdidas (Flamenco-Sandoval et. al., 2007). En un estudio realizado por Sánchez y colaboradores (2009), reportan que de acuerdo a la información disponible hasta el año 2002, habría ocurrido una pérdida neta de hasta 103,289 km² de selvas húmedas; 94, 223 km² de selvas subhúmedas; 129,000 km² de bosques templados; 91,000 km² de matorrales xerófilos y más de 59, 000 km² de pastizales. La mayor parte de estas transformaciones ocurrió antes de los años setenta, pero en las últimas décadas se han seguido registrando pérdidas importantes. De permanecer constantes los procesos y ritmos de transformación, los ecosistemas que continuarán presentando disminuciones considerables en sus superficies son las selvas en primer lugar, los bosques templados en segundo lugar y los matorrales xerófilos en tercer lugar. La expansión de las fronteras agrícola y pecuaria, ha sido el proceso más importante de transformación de los ecosistemas terrestres del país. La sustitución por pastizales para la actividad ganadera ha predominado en la zona de selvas húmedas, en tanto que la conversión a terrenos agrícolas ha sido más importante en las zonas de selvas subhúmedas, matorrales xerófilos y bosques templados (Sánchez, et. al., 2009). Debido a la creciente amenaza que enfrenta la diversidad ante el cambio de uso del suelo y otros procesos que afectan la biodiversidad y medio ambiente, la estrategia ha sido adoptar políticas de conservación que promuevan el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) para el disminuir el aceleramiento en la pérdida de coberturas vegetales (Halffter, 1994; Velázquez, et. al., 2009; Velázquez y Larrázabal, 2011). En 2015, México cuenta con 176 áreas naturales de carácter federal que cubren más de 25 millones de hectáreas. El 81% corresponde a superficie terrestre, mientras que un 19% a zonas marinas. Los parques nacionales constituyen la categoría más numerosa; sin embargo, las reservas de biosfera, representan el 50% de la superficie total protegida. El país se destaca a nivel mundial por ser uno de los que cuentan con el mayor número de áreas con declaratoria internacional (IUCN, 2011; CONANP, 2012). Dentro de las mismas ANP, se presentan de igual forma procesos de degradación los cuales varían de un área a otra ya que la mayor parte de los bosques de México son propiedad de comunidades locales o ejidos (FAO, 2011). Gran parte de las ANP de México están sujetas a ciertos grados de procesos de deterioro, que van desde la remoción de especies o recursos de manera selectiva, hasta la transformación del ecosistema (Figueroa, 2008).

Estudios de Tasa de Transformación en ANP

De los primeros trabajos que fueron realizados para estimar la TTH, fue el Dirzo y García en 1992. Estos autores realizaron mapas de distribución de la selva tropical húmeda, de la parte norte de la Sierra de los Tuxtlas, Veracruz. Mediante mapas de cobertura vegetal para 1967, 1976 y 1986, muestran una intensa deforestación procedente de las tierras bajas, encontrándose la vegetación natural remanente, cada vez más restringida a los sectores más inaccesibles de las Sierras. De sus resultados se desprende que durante de 1967 a 1986 la vegetación sufrió una disminución considerable en un 56%. Las tasas anuales de selva remanente que es cortada por año fueron estimadas en un 4.2% para el periodo 1967–1976, y 4.3% para 1976–1986. Si estas tendencias se hubieran mantenido, para el año 2000 quedaría solamente un 8.7% de la selva original. En el mismo año, se realizó un estudio sobre la evaluación de la deforestación, en el cual incluyeron datos sobre estimaciones de cambios de usos del suelo en 16 ANP de Chiapas. Dentro de las poligonales de las ANP, en cinco de las 16 ANP elegidas fue poco más del 50% el porcentaje ocupado por áreas transformadas y/o perturbadas (que incluyeron “selvas fragmentadas” y “bosques perturbados”). Entre los datos de tasas anuales de transformación o perturbación, las ANP que tuvieron los registros más altos fueron principalmente la reserva de la biosfera La Sepultura (3,848 ha/año), Montes Azules (593 ha/año) y El Triunfo (551 ha/año). Con base a los resultados obtenidos, concluyeron que es urgente iniciar una estrategia de conservación que permita garantizar el mantenimiento de la biodiversidad que se pretende conservar en las ANP de Chiapas (March y Flamenco, 1992).

Posteriormente Ben de Jong et. al. 2003, estimaron los escenarios de cambios de uso del suelo de 1970 al 2000 para la Reserva El Ocote y áreas protegidas en la Selva Lacandona y sus respectivas áreas de amortiguamiento. Investigaron el efecto de diferentes factores sobre los procesos de cambio de uso del suelo como protección, cercanía a poblaciones y caminos. Para esto, realizaron un análisis cartográfico a diversas escalas y con diferentes fuentes de información. Entre los resultados que encontraron, fue que buena parte del cambio se ha dirigido al establecimiento de pastizales, y por lo tanto una disminución alta de la biomasa en los últimos treinta años. Concluyen que existe una relación clara entre la densidad poblacional y el cambio en el uso del suelo, siendo que la tasa de cambio disminuye con la distancia de los asentamientos.

En el 2006, Mas y colaboradores analizaron los cambios en el uso del suelo y vegetación entre 1972 y el año 2000 para el PN Nevado de Toluca. Obtuvieron cartografía digital mediante procesos de digitalización y fotointerpretación, esto lo procesaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) identificando los procesos de disminución y/o incremento en la densidad de las zonas forestales. En el periodo estudiado un poco más del 20% de la superficie del ANP sufrió pérdidas principalmente de bosque de pino y oyamel. Concluyen que la metodología que emplearon resultó válida para obtener información detallada y con alto nivel de precisión. Para ese mismo año se realizó un estudio en la reserva de la biosfera Pantanos de Centla, en el cual identificaron y cuantificaron la variación espacial de los tipos de vegetación y usos del suelo durante 1990 y 2000. Generaron bases geográficas digitales referentes a

geología, edafología, hidrología, temperaturas mínimas, temperaturas máximas, precipitación, vías de comunicación y localidades, la cual fue almacenada en un SIG. Realizaron también la clasificación de imágenes Landsat, generando mapas de vegetación y usos del suelo para 1990 y 2000. De los resultados obtenidos mostraron que las tasas de cambio estimadas fueron del 6.06% para la selva de púcté y de 34.96% para selva de tinto; en tanto que hubo una tasa de incremento de 1.15% para el manglar, 0.72% para las comunidades de hidrófitas y un 27.82% para el pastizal. Concluyeron que los cambios encontrados se relacionaron con la presencia de carreteras pavimentadas, localidades y canales, siendo éstos últimos los que más afectaron a la tasa de cambio (Guerra y Ochoa, 2006). Otro trabajo sobre TTH fue el realizado por Durán y colaboradores (2007), en el cual se analizaron los procesos de cambio en las coberturas de la vegetación comparando áreas donde se realiza un manejo forestal comunitario bien organizado (10 ejidos de Guerrero y 12 ejidos de Quintana Roo) versus el mantenimiento de la vegetación nativa en 67 ANP de México. Estos ejidos fueron seleccionados a partir del buen manejo colectivo de sus bosques durante casi dos décadas. Para realizar el análisis de procesos de cambio en las coberturas de vegetación y usos del suelo, cruzaron mapas digitales de dos fechas distintas. Encontraron que los ejidos, lograron conservar alrededor de 95.1% de la cobertura de vegetación nativa, mientras que las ANP mantuvieron el 98.8% de dicha cobertura entre 1993 y 2000. En las ANP las coberturas de vegetación nativa tendieron a decrecer, mientras que las áreas con usos antropogénicos aumentaron. Concluyeron que los dos grupos de ejidos analizados han adoptado sus propios modelos de zonificación de sus territorios y, de esta manera, tienen mayor influencia en los procesos de cambio, tanto positivos como negativos. Mientras que los procesos de cambio en las ANP siguen un modelo más impredecible, no necesariamente relacionado con su categoría de protección.

Más recientemente nos encontramos la investigación realizada en la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo publicada en 2010. En dicho trabajo se evaluaron los cambios de cobertura del suelo durante el periodo de 1973 a 2006, utilizando clasificación supervisada e interpretación visual de imágenes satelitales Landsat y Spot de la cual obtuvieron mapas de cambio para ambas fechas. Reportaron que la cobertura con mayor superficie ocupada fue el matorral con un 70.3% (para 1973) y un 62.3% (para 2006); mientras que el 87.81% del área total del ANP no presentó cambios en el periodo estudiado. Concluyeron que la mayor parte de los cambios se localizaron en áreas bajo influencia directa de las actividades humanas, siendo el pastizal la cobertura con la mayor tasa de crecimiento (Vázquez-Cuevas et. al., 2010). Durante el 2011 se publicó un estudio en el que evaluaron la efectividad de las ANP para contener los procesos de cambio de uso del suelo y vegetación. El estudio fue basado en datos de 44 ANP de México en los que se cuantificó el porcentaje de superficie transformada (ST) en 2002 y su tasa de cambio entre 1993 y de 2002, y fueron comparadas las tasas de cambio observadas en las ANP, en las áreas circundantes de cada área y en sus respectivas ecorregiones. Entre sus resultados se puede mencionar que las tendencias generales observadas en los análisis de efectividad muestran que las ANP fueron efectivas para prevenir el cambio de uso del suelo en el periodo de tiempo estudiado. Mencionan que algunas ANP están bajo una presión de cambio particularmente alta, como la reserva de la biosfera Los Tuxtlas y Barranca de Metztitlán, así como el parque nacional Cofre de Perote, los cuales

ameritan atención especial para detener o revertir estos procesos. Concluyen que la efectividad de las ANP y su relación con factores ambientales, económicos, políticos y sociales constituye un problema de investigación complejo (Figueroa et. al., 2011).

Otro estudio fue el realizado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Instituto de Ecología A. C. (INECOL) en el PN Pico de Orizaba, Veracruz. En él reportan un análisis multitemporal del uso del suelo y vegetación en el periodo 2003-2011 con la finalidad de detectar cambios y estimar la tasa de transformación mediante teledetección. Mencionan que los tipos de vegetación dominantes son el bosque de pino, bosque de oyamel y la pradera de alta montaña. Reportan que la superficie de cambios detectados fue de ≈ 750 hectáreas, durante el periodo de estudio se perdieron 679.2 hectáreas de bosque de pino y bosque de pino secundario, que fueron transformadas a pastizal y área agrícola, y 73.1 hectáreas fueron áreas incendiadas. Concluyen que las tasas de cambio obtenidas son “relativamente bajas” pero coinciden con otros estudios para la zona. Mencionan que probablemente ampliando el periodo de análisis se obtenga una perspectiva más completa de los cambios de uso del suelo y vegetación (CONANP e INECOL, 2011).

Se cuenta también con el estudio realizado en el 2011 en la reserva de la biosfera Mariposa Monarca la cual es bien conocida por sus altas tendencias de pérdida y degradación del bosque principalmente en su zona núcleo. Realizaron un análisis comparativo de los años 2003, 2005, 2007 y 2009 para mostrar el proceso de degradación y deforestación del ANP, sus posibles causas y sus tendencias de cambio a través del tiempo. Entre sus resultados reportan que hubo cambios en la cobertura forestal pero no en el uso del suelo, siendo que para el periodo de 2003 al 2009, aproximadamente 2,152 hectáreas fueron alteradas por el proceso de deforestación, y de ese total, 165 hectáreas sufrieron cambios a través del tiempo. Concluyeron que hay una tendencia a disminuir las perturbaciones en el ANP debido a la promoción de actividades productivas y trabajo social en el área así como los pagos por servicios ambientales (López, 2011). En el 2012, la Agencia Alemana de Cooperación Internacional GIZ financió una consultoría para las ANP Cuenca del Río Necaxa, Bosque Mesófilo y Sierra de Tamaulipas, que mostraron que el tipo de asociación vegetal más vulnerable en estado crítico son los bosques mesófilos y las selvas bajas, que tienen impactos muy fuertes por ganadería.

3.- Alcances

El alcance geográfico de ésta consultoría es el polígono descrito en el decreto de creación de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (DOF, 1997), y que tiene una superficie de 383,567.44875 ha. (Fig.1) que cubre porciones de los municipios Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros, Peñamiller, Pinal de Amoles, Toliman, Cadereyta de Montes. en Querétaro, Atarjea, Xichú, y Santa Catarina, en Guanajuato; Aquismón, Lagunillas, San Ciró de Acosta y Xilitla. en San Luis Potosí; y el Municipio de Pisaflores, Hidalgo.



Figura 1.- Mapa de Ubicación de La Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (DOF, 2000).

Los datos obtenidos de Tasa de Transformación sirven como una línea de base para conocer las tendencias de cambio por actividades humanas o eventos naturales extraordinarios que modifican la superficie ocupada por elementos forestales, o bien en la reconversión de la cubierta del suelo como resultado de los programas de restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que se hayan implementado.

4.- Algunos datos sobre la biodiversidad y la historia de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (RBSG)

México es un país megadiverso y la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda (RBSG) es un claro ejemplo de esta riqueza ecológica. Su diversidad se debe a su ubicación en la confluencia de las bioregiones Neártica y Neotropical, su relieve y un régimen heterogéneo de precipitaciones (350mm a 2000mm), que generan una amplitud de variaciones climáticas (Pedraza, 2010).

La RBSG abarca una gran parte de la Sierra Madre Oriental y representa un tercio de la superficie del estado de Querétaro, así como unas fracciones de los estados de Guanajuato, Hidalgo y San Luis Potosí. Es un área de una gran complejidad tanto a nivel físico, ecológico como histórico.

El relieve de origen sedimentario, presenta una variación de elevación extrema que va desde los 300 a los más de 3000 msnm. Esta variación tan amplia se debe a la importante actividad tectónica de la región de la Sierra Madre Oriental que causa plegamientos y fallas de alta amplitud. Estos accidentes geológicos se caracterizan por la presencia de laderas, cañones y llanuras de rocas calcáreas sedimentarias, por su mayoría del cretácico inferior. La naturaleza calcárea de la zona en conjunto con factores climáticos y geológicos favoreció la disolución de las rocas formando características cársticas como las cavernas, cuevas y dolinas. Forma parte de la región hidrológica del río Pánuco con las cuencas de los ríos Moctezuma y Santa María (Pedraza, *op. cit.*).

Resultantes de estas características son los diferentes tipos de vegetación presentes en la reserva; del bosque tropical caducifolio y sub-caducifolio con las típicas ceibas (*Ceiba petandra*), chacas (*Bursera* spp), higueras (*Ficus pertusa*) y guayabillos (*Psidium sartorianum*) a los matorrales xerófilos con su vegetación de zona árida como el órgano (*Stenocereus dumortieri*) y el mezquitillo (*Acacia micrantha*), pasando por los bosques mesófilo de montaña con sus helechos arborescentes (*Nephelea mexicana*), quirámbaros (*Liquidambar styraciflua*), los bosques de coníferas con los géneros *Pinus*, *Juniperus* y *Abies* y los bosques de encinos (*Quercus*). Se han descrito alrededor de 13 tipos de vegetación y sus asociaciones de transición (SEMARNAP, 1999; Pedraza-Ruíz, 2010; sierragorda.net). Existen muchas especies vegetales endémicas de la Sierra Madre y ya varias poseen algún tipo de protección (NOM ECOL 059).

Según el listado de especies del programa de manejo de la reserva, existen alrededor de 130 especies de mamíferos registrados en la zona, 27 de ellos con algún estatus de protección. Resalta la presencia de grandes depredadores en peligro de extinción o amenazados como el coyote (*Canis latrans*), el oso (*Ursus americanus*), el jaguar (*Panthera onca*) y el puma (*Puma concolor*). Son presentes todos los felinos mexicanos incluyendo el tigrillo (*Leopardus wiedii*) y el emblemático ocelote (*L.pardalis*). La reducción del hábitat y la cacería ha llevado a estas especies al borde de la extinción en toda la república (Rojas Martínez y Juárez Casillas, 2013). Es posible que este número de especies sea subestimado ya que, solo para roedores, Magaña Cota et. al.(2012) reportan un incremento de 27 especies anteriormente reportadas en el programa de manejo a un total de 40. Por ejemplo Mejenes-Lopez et. al. (2010) reportan 154 especies de mamíferos para Hidalgo, 19 de ellas endémicas, incluyendo nuevos reportes como el oso hormiguero (*Tamandua mexicana*). Erizalde Arellano et. al. (2010) reportan y describen

25 nuevas especies de mastofauna para el estado de Guanajuato, la gran mayoría colectados dentro de la Reserva de la Biosfera de Sierra Gorda. Como parte del monitoreo del jaguar (*Panthera onca*) en la región, se reportaron nuevos registros de tuza real (*Agouti paca*) (Jimenez-Malonado et. al., 2011). La Reserva forma parte del área de distribución del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y del venado temazate (*Mazama temama*), la cual, a pesar de su alta fragmentación, se convirtió en una zona de gran relevancia para su conservación (Gallina et. al., 2007).

A pesar de la carencia en inventarios exhaustivos, se han descrito 347 especies de aves en revistas arbitradas para la región (Pineda et. al., 2010). Varias de estas especies se encuentran bajo alguna categoría de riesgo y protección nacional (NOM ECOL 059 SEMARNAT 2001) e internacional (IUCN). Destacan las especies carismáticas y amenazadas como la guacamaya verde (*Ara militaris*), el hocofaisán (*Crax rubra*), el trogón de collar (*Trogon collaris*), la aguililla menor (*Buteogallus anthracinus*), la pava cojolita (*Penelope purpurascens*) y el tucancillo verde (*Aulacorhynchus prasinus*) entre otros. Alrededor de 30 de las especies presentes son endémicas y 94 son migratorias neotropicales, empezando a llegar en la reserva a partir de septiembre y regresando a sus terrenos de reproducción en marzo. De las especies migratorias más destacada son el cernícalo americano (*Falco sparverius*), el zumbador rufo (*Selasphorus rufus*), el chivirín saltapared (*Troglodytes aedon*), el mirlo primavera (*Turdus migratorius*) y varias especies de chipes (*Dendroica* sp.) (Pedraza, prog de manejo). Sin embargo, las zonas núcleos de la RBSG no incluyen las zonas de mayor distribución de las especies endémicas, en riesgo y de alta riqueza, lo cual pone en peligro la protección y la conservación de la biodiversidad de la avifauna de la Reserva (Almazán-Nuñez et. al., 2013). A pesar de ser una de las zonas con mayor número de guacamayas verdes, su población solo representa unos 80 individuos cada vez más amenazados por la destrucción de su hábitat y la cacería (Hernández-Castan et. al., 2012).

Al igual que las aves y los mamíferos, son escasos y esporádicos los registros de reptiles y anfibios para la región pero siguen los estudios reportando nuevas especies (Campos-Rodríguez et. al., 2009). La reserva alberga alrededor de 100 especies de reptiles y 35 de anfibios, varias de estas especies son endémicas como la lagartija del género *Xenosaurus* (Zamora-Abrego et. al., 2012) y bajo algún tipo de protección. Esta riqueza herpetológica sitúa la reserva en segundo lugar de las áreas naturales pero la constante presión sobre su hábitat la pone en peligro.

La historia de la ocupación humana se remonta al periodo prehispánico de México, con asentamientos de otomíes, chichimecas (jonaces y pames) y purépechas. Las actividades predominantes eran la agricultura y la minería, la región se volvió estratégica para el comercio y la explotación de minerales en toda Mesoamérica (López Cruz, 2012). Su terreno tan diverso y accidentado ayudó al establecimiento de “bastiones” de resistencia y lucha contra la invasión española; la zona conoció más de 2 siglos de conflictos violentos. Los misioneros franciscanos y dominicanos, con su labor de evangelización, se adentraron poco a poco en la Sierra estableciendo las primeras misiones buscando convertir y pacificar los pueblos locales. La rebelión de los jonaces fue acallada por Escandón en el Cerro de Media Luna en 1748 con su casi total extinción. El aumento de la propiedad privada durante la Colonia, la pérdida de

derecho de uso de suelo de los grupos indígenas, la intervención americana, las crisis económicas fueron otras fuentes de conflictos históricos en la región durante el siglo XIX. Los bosques fueron explotados de manera indiscriminada y descontrolada para la actividad minera, la agricultura, la construcción y la obtención de leña. La zona no empezó a gozar de una relativa paz hasta 1938 con la última intervención armada de las defensas rurales. Desde la segunda mitad del siglo y en especial a partir de los setentas, grandes números de pobladores empezaron a migrar a los Estados Unidos de América en busca de mejores oportunidades laborales, desencadenando una pérdida en las tradiciones, la identidad y las actividades culturales de la zona.

5.- Objetivos

- › Evaluar la utilidad y precisión del producto MAD Mex para su incorporación al protocolo CONANP para la evaluación del Cambio de Uso de Suelo en ANPS.
- › Generar información espacial de la cubierta del suelo para un período multitemporal de 3 fechas con imágenes de satélite de los sensores Landsat, SPOT 5 y SPOT 6, a escala 1:50,000 para el polígono de la RB Sierra Gorda utilizando como insumo espacial y de etiquetado los datos generados por el sistema MAD-Mex.
- › Analizar la dinámica de cambio a partir de aritmética de mapas multifecha y matriz de transición para la generación de datos sobre la transformación entre las cubiertas.
- › Analizar la tasa de transformación de las cubiertas del suelo del período.
- › Analizar las tendencias de cambio de las cubiertas del suelo.
- › Capacitar al personal de la RB Sierra Gorda en la colecta de datos de campo con fotografías georeferenciadas y en el uso de los datos producto de este estudio con herramientas de SIG de código abierto.

6.- Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se empleó la metodología descrita en el *Protocolo para la evaluación del Uso de Suelo y Vegetación en Áreas Naturales Protegidas Federales de México (CONANP, 2007)* (Anexo2) y complementada con el método híbrido (Paniagua, 2009; Paniagua *et. al.* 2011) que incluye técnicas de tratamiento digital de imágenes de satélite SPOT así como su posterior interpretación visual a escalas finas; además de incorporar el producto MADMex en las etapas de interpretación y validación. Un diagrama de flujos de proceso se muestra en la Figura 4; la descripción detallada de los procesos se encuentra en el Anexo2.

- Evaluación e Incorporación del producto MAD Mex para el estudio en la RBSG.

Un componente de este proyecto es la evaluación y eventual incorporación de los datos MAD-Mex, o bien su tecnología como insumo en los para las evaluaciones en las coberturas del suelo que CONANP lleva actualmente a cabo en Áreas Naturales Protegidas y Regiones Prioritarias para la Conservación; y abarcando escalas regionales y locales. El sistema MAD-Mex busca estandarizar la estimación de la deforestación, a través de una técnica automatizada eficiente a escala nacional, pero los datos sobre polígonos con potencial de cambio pueden ser importantes insumos-medios de validación para procesos de análisis a escalas más finas.

Se realizaron varios análisis para evaluar la precisión de los productos MAD Mex entre sí en datos multifechas (1993, 1995, 1997, 2000, 2003, 2005, 2008 y 2010) así como con insumos de CONAFOR e INEGI, con el objeto valorar su inclusión en el proceso de análisis de cambio de las coberturas de suelo que lleva a cabo la CONANP en las ANPs Federales. El índice Kappa (K) propuesto por Cohen en 1960 es un cálculo que permite estimar la calidad de un estudio y la precisión de sus resultados y poder conocer el grado de variación entre los diferentes observadores involucrados relacionando los niveles de acuerdos entre los observadores más allá de los efectos del azar (Congalton, 1991).

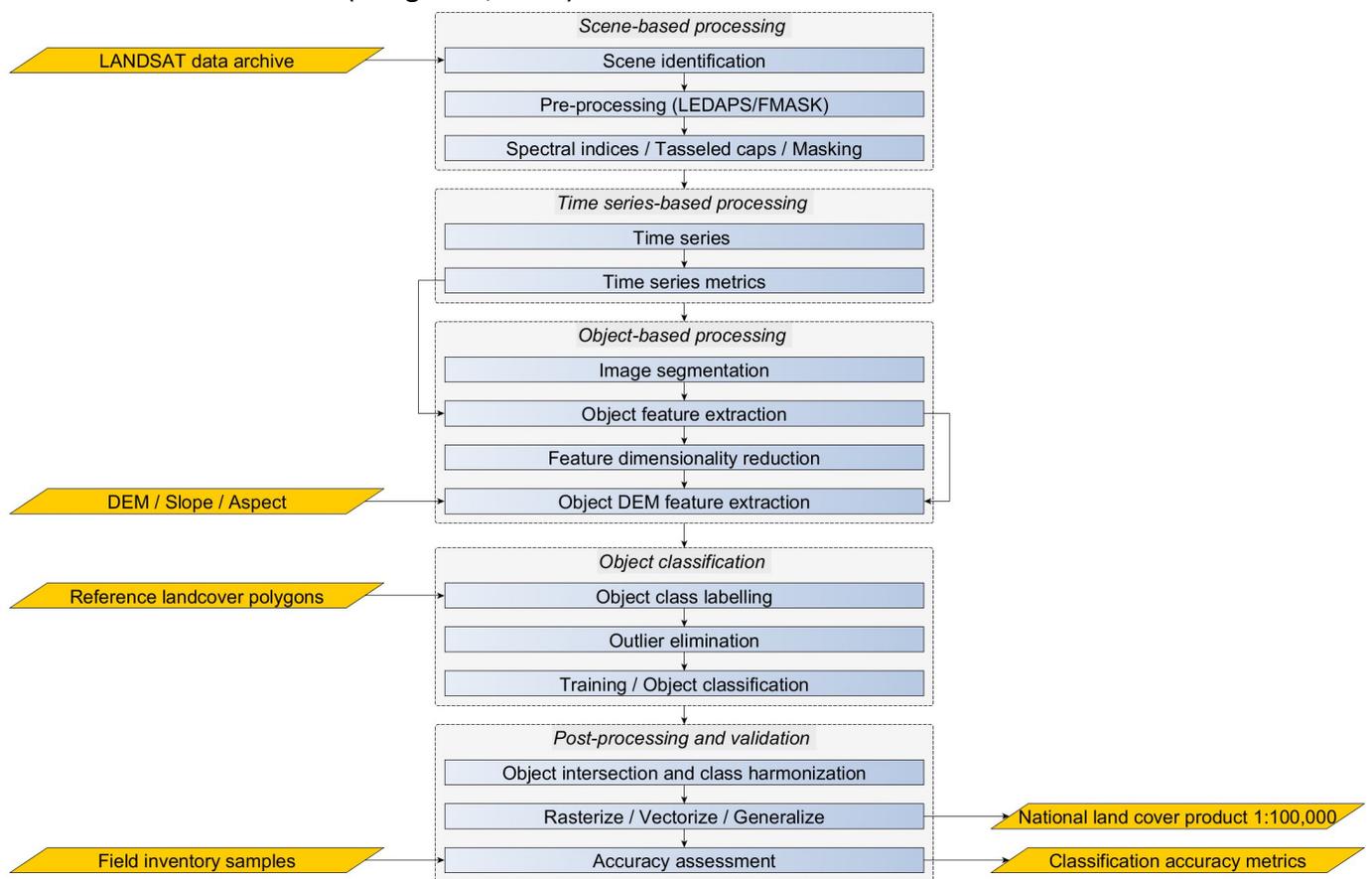


Figura 02: Flujo del procesamiento automático de clasificación basada en Landsat (Gebhardt et. al., 2014)

Cabe destacar que el índice Kappa mide el grado de acuerdo entre los observadores pero no la calidad de la observación.

K es dado por la fórmula siguiente:

$$\text{Índice kappa } K = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e}$$

siendo: $p_0 = \frac{\text{número de acuerdos}}{\text{núm. de acuerdos} + \text{núm. de desacuerdos}}$

$$p_e = \sum_{i=1}^n (p_{i1} \times p_{i2})$$

Donde:

n=número de categorías

i=número de la categoría

$p_{r(a)}$ =ocurrencia de la categoría i para el observador 1

$p_{r(e)}$ =ocurrencia de la categoría i para el observador 2

K representa el cociente entre la proporción de acuerdos observados y la proporción esperada por azar, variando así su valor entre 0, en el caso de que los observadores estén en desacuerdo total, y 1 en el caso de que el 100% de sus mediciones sean iguales (López de Ullibarri y Fernández, 2001) .

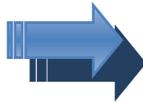
Landis y Koch (1977) proponen una clasificación cualitativa de la fuerza de concordancia en función de su valor de K:

Valor de K	Concordancia
< 0.20	Pobre
0.21-0.40	Débil
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Buena
0.81-1.00	Muy buena

Para realizar el análisis Kappa es necesario un re-arreglo de los datos, relacionando las cantidades obtenidas en los diferentes criterios entre los observadores. Así, de las dos columnas de datos de los observadores se generó una matriz de confusión con los criterios en atributos, los valores numéricos representando la correspondencia de las respuestas de los observadores. Los valores del índice Kappa dependen de todas las celdas de la matriz de confusión generada y no solamente de la diagonal principal (Arenas et. al., 2011).

Ejemplo:

Observador 1	Observador 2
A	A
A	B
C	C
A	A
B	B



	Observador 2			
Observador 1	Criterios	A	B	C
	A	2	1	
	B		1	
	C			1

	Observador 2			
Observador 1	Categoría	A	B	C
	A	2	1	3/5
	B		1	1/5
	C			1/5
		2/5	2/5	1/5

$$p_0 = \frac{4}{5} = 0.8$$

$$p_e = \left(\frac{2}{5} \times \frac{3}{5}\right) + \left(\frac{2}{5} \times \frac{1}{5}\right) + \left(\frac{1}{5} \times \frac{1}{5}\right) = 0.36$$

$$K = \frac{0.8 - 0.36}{1 - 0.36} = 0.69 = \text{Concordancia buena}$$

7. Resultados

a) Evaluación e incorporación del producto MAD Mex.

Como primer paso, se realizó la valoración cuantitativa de los productos MAD-Mex entre sí para diferentes fechas (1993, 1995, 1997, 2000, 2003, 2005 y 2010) analizando 95,327 puntos de distribución aleatoria a una distancia estandarizada de 200 metros. Se calcularon la confiabilidad global y el índice de concordancia KAPPA para dos periodos, uno entero, de 1993 a 2010 y otro de la última década (2000-2010).

Como se puede observar en la tabla 1, se obtiene un bajo coeficiente de congruencia entre productos MAD-Mex de la zona de estudio; de los más de 95,000 puntos tomados como referencia, poco más de 44,000 estuvieron en acuerdos, dando una confiabilidad global de aproximadamente 47% para el periodo total (1993-2010) y 45.6% para el subperiodo 2000-2010.

Los índices KAPPA obtenidos se califican como débiles con 0.372 y 0.366 respectivamente; los productos no se pueden considerar en concordancia satisfactoria. Cabe destacar que durante la última década, donde las imágenes tienen mejores resoluciones para el análisis, los resultados fueron inclusive inferiores a los resultados del periodo completo.

Tabla 1: Resultados de valoración cuantitativa de los productos MAD-Mex entre sí en diferentes periodos.

Periodo	Total de acuerdos	Errores de asignación		Confiabilidad global %	Índice KAPPA
		% Comisión	% Omisión		
1993-2010	44,799	26.84	28.18	46.94	0.372
2000-2010	43,523	30.5	23.84	45.66	0.366

Así como la evaluación cuantitativa demuestra que la coherencia entre las etiquetas de las capas multifechas de MAD-Mex es muy baja, visualmente es posible observar como además de variaciones en etiquetado, también se ven cambios muy drásticos en los bordes y extensiones de los polígonos de las cubiertas del suelo (Fig 03).

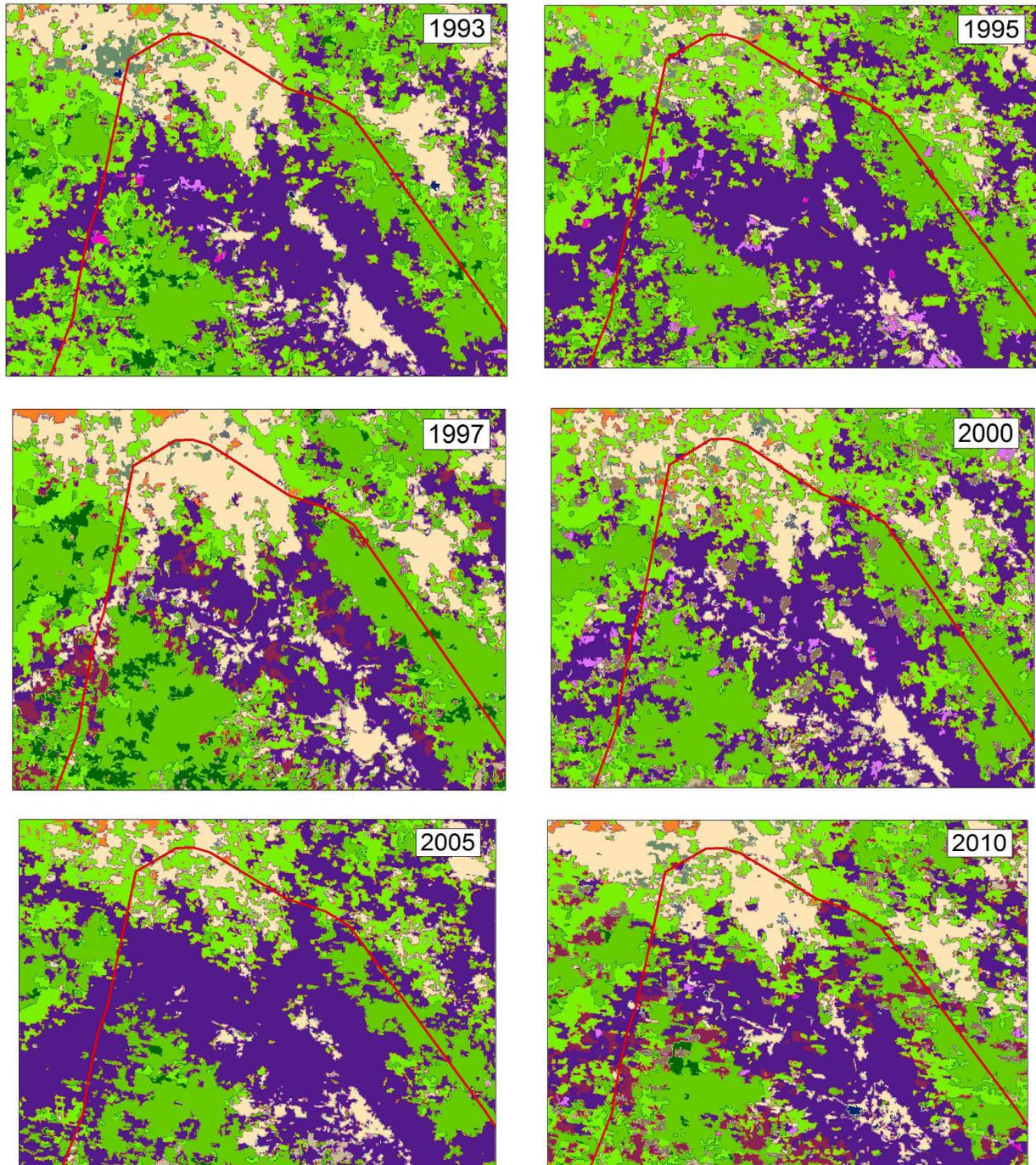


Figura 3: Acercamiento de una zona de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda con el insumo MAD-Mex en diferentes años, se observan cambios muy improbables en bordes de los polígonos de uso de suelo y vegetación para esos lapsos de tiempo.

El cálculo de la tasa de cambio anual para las diferentes fechas de MAD-Mex en la zona de estudio también muestra tendencias muy variables que reflejan cambios que no son muy probables en la realidad (Fig 4). Por ejemplo, en el bienio de 1993 a 1995 se observa una transformación de 5,889 Ha; que para el bienio 1995-1997 muestra una reversión en casi la misma cantidad de hectáreas.

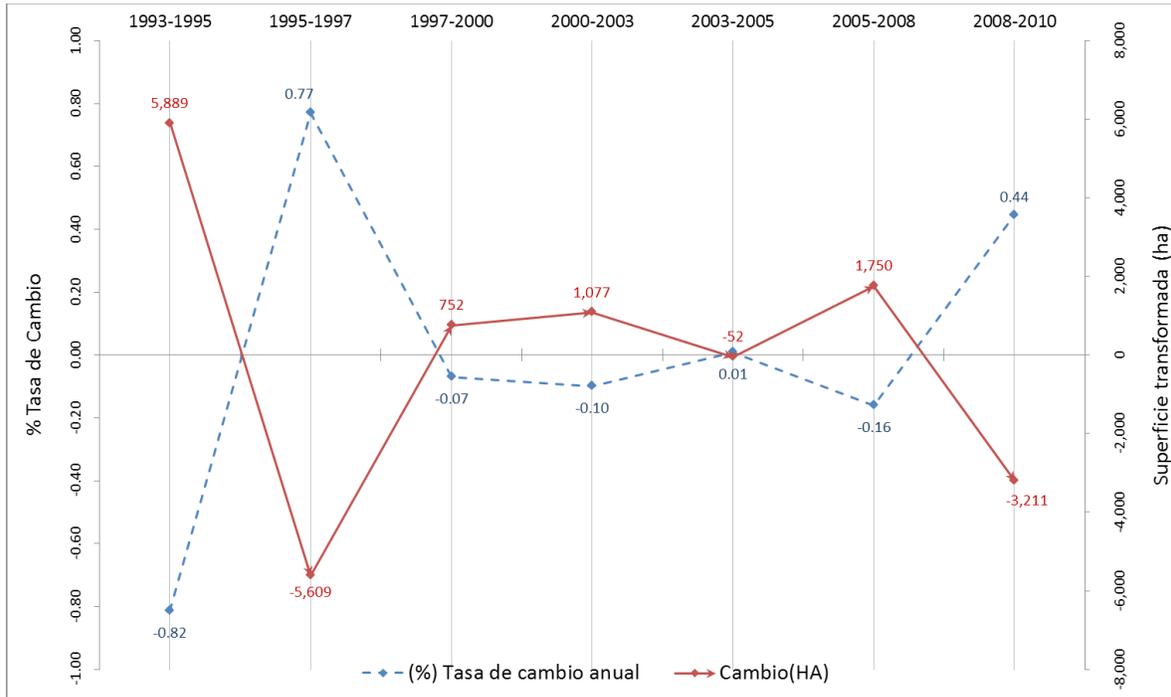


Figura 4: Tasa de cambio anual de uso de suelo y vegetación en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda calculada en base a los insumos MAD-Mex multifecha (1993-2010) y su correspondiente en superficie total.

Se realizó también un análisis de KAPPA comparando capas de MAD-Mex contra las coberturas de Serie IV de INEGI (centroides) y los puntos del Inventario Nacional Forestal CONAFOR para la zona. Se unieron las tablas de atributos por localización de las diferentes capas vectoriales para 1993, 1995, 1997, 2000, 2003, 2005, 2008 y 2010. La unión de MAD-Mex con CONAFOR generó una tabla de 67 objetos mientras la unión atributos de MAD-Mex con INEGI arrojó unos 384 objetos, dependiendo de los años (Tabla 2).

1993		CONAFOR											
N= 67	Categorías	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12	26	
MADMEX	1	1											
	2	1	32	1	2					1			
	3		6	1			1						
	4		5		5		1		1				
	5		1										
	6												
	8								2				
	9									3			
	10		1										
	12		1						1				
	26		1										

Tabla 2: Matriz de confusión de cobertura vegetal entre MAD-Mex y CONAFOR para el año 1993.

1993		INEGI																														
N=383	Categorías	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31		
MADMEX	2	13	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0	0	
	3	41	14	5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	13	0	0	
	4	19	6	6	0	0	3	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	10	0	4	
	5	10	2	1	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6	0	1	
	6	7	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	
	7	7	1	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	8	16	0	2	0	0	0	0	9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	
	9	2	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	
	10	5	1	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	0	
	11	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	
	12	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	
	13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	
	14	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	20	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	
	21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	
	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	
	26	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	
	27	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	
	28	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 3: Matriz de confusión de cobertura vegetal entre MAD-Mex e INEGI para el año 1993.

La concordancia entre Mad-Mex e INEGI fue para todos los años muy pobre, nunca se rebasaron los 5% de acuerdos, el efecto aleatorio no puede ser descartado en este caso. Cabe recordar que Kappa es dependiente del número de categorías, así, entre más categorías se consideran los valores de K serán más bajos y dificultará la interpretación de la clasificación (De Vet, 1998).

Los resultados obtenidos del análisis con los datos de CONAFOR fueron relativamente mejores, probablemente debido al número inferior de datos, restándole complejidad a la matriz. La mejor concordancia se obtuvo para el año 1993, con una concordancia moderada de aproximadamente 40% (tabla 4). Los demás años fluctuaron alrededor de los 20% lo cual es considerado un nivel de concordancia débil y poco confiable debido a la influencia del azar (Landis y Koch, 1977).

	INEGI		CONAFOR	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
1993	0.04	Pobre	0.389	Débil a Moderada
1995	0.047	Pobre	0.230	Débil
1997	0.027	Pobre	0.191	Pobre
2000	0.028	Pobre	0.245	Débil
2003	0.035	Pobre	0.213	Débil
2005	0.017	Pobre	0.277	Débil
2008	0	Pobre	0.245	Débil
2010	0	Pobre	0.163	Pobre

Tabla 4: Resultados del análisis de concordancia con sus valores de K para INEGI y CONAFOR.

b) Tratamiento digital de imágenes para el calculo de la tasa de transformación.

Este estudio se realizó mediante el análisis de imágenes SPOT obtenidas de la ERMEXS y el Global Landcover Facility. Para los años 2010 y 2005 se pudieron contar con imágenes SPOT5, mientras que para el año 2000, se trabajó con imágenes LANDSAT (Tabla 05).

Las imágenes LANDSAT se obtuvieron por medio del portal de la NASA: Global Land Cover Facility (<http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/>). Se descargaron las imágenes en formato multiespectral y pancromática ortorectificada. En cuanto a las imágenes de SPOT5, se solicitaron mediante la Subdirección de Coordinación de Geomática de la CONANP por el gestor oficial ante la Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS) (Tabla 5).

SPOT5	K/J	Fecha	Tipo	Resolución	% Cobertura
2010	585/307	22 marzo 10	Multiespectral	10m	10
			Pancromática	2.5m	
	585/308	22 marzo 10	Multiespectral	10m	10
			Pancromática	2.5m	
	587/307	19 enero 10	Multiespectral	10m	35
			Pancromática	2.5m	
	587/308	03 junio 10	Multiespectral	10m	30
			Pancromática	2.5m	
	588/307	23 marzo 10	Multiespectral	10m	5
			Pancromática	2.5m	
588/308	23 marzo 10	Multiespectral	10m	10	
		Pancromática	2.5m		
2005	586/307	19 abril 05	Multiespectral	10m	50
			Pancromática	2.5m	
	586/308	3 marzo 05	Multiespectral	10m	35
			Pancromática	2.5m	
	587/307	8 enero 06	Multiespectral	10m	10
Pancromática			2.5m		
587/308	30 enero 06	Multiespectral	10m	5	
		Pancromática	2.5m		

LANDSAT Geocover	Fecha	Modo	Resolución	%Cobertura
2000	Ca. 2000	Multiespectral	14.5 m	100.00%

Tabla 05: Imágenes utilizadas en el estudio.

c) Definición de la Leyenda

Se definieron las categorías de acuerdo al Uso de suelo y Vegetación Serie IV del INEGI (2009) y se describieron con el Diccionario de Datos de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI (2007):

Área Agrícola: Área en la que el suelo es utilizado para realizar labores agrícolas. Incluye todo tipo de agricultura: riego, temporal, humedad, secano, riego eventual

Área impactada por incendio: Área con evidencias de incendios

Área sin vegetación aparente: Área desprovista de vegetación o con una cobertura extremadamente baja. Dicha ausencia de vegetación se debe a factores naturales como clima árido, salinas, sobrepastoreo, banco de material acumulado, playa etc...

Asentamientos humanos: Establecimiento de un conglomerado demográfico con el conjunto de sus sistemas de convivencias en un área físicamente localizada, considerando de las mismas los elementos naturales y las obras materiales que lo integran.

Bosque de Encino: Bosque formado por encinos, género *Quercus*, de amplia distribución.

Bosque de Galería: Bosque formado en los márgenes de ríos y arroyos

Bosque de Liquidambar: Bosque formado por el género *Liquidambar* ampliamente distribuido

Bosque de Pino: Bosque de coníferas, del género *Pinus*, ampliamente distribuido en clima templado

Bosque de Tascate: Bosque bajo formado por tascate del género *Juniperus*.

Bosque Mesófilo de montaña: Bosque denso y alto en zonas templadas húmedas o en condiciones topográficas con humedad alta y con una composición florística característica.

Bosque Mixto: Bosque formado por una combinación de varios géneros de árboles.

Cuerpos de agua: Cuerpos de agua incluyendo ríos, lagos, represas, lagunas temporales etc...

Matorral Crasicáule: Vegetación arbustiva de altura: -1 con predominancia de cactáceas
-2 con presencia de arbustos rosetófilos

Pastizal: Comunidades vegetales dominadas por la presencia de gramíneas o graminoideas. Se incluyen tanto los pastizales de origen natural como los establecidos por influencia humana.

Selva Baja Caducifolia: Vegetación arbórea en clima cálido-semiseco entre 4 y 15m de altura, más del 75% de los arboles pierden el follaje durante la época seca.

d) Análisis de cobertura de suelo y datos históricos

De acuerdo con el Protocolo para la evaluación de uso de suelo y vegetación en Áreas Naturales Protegidas Federales de México (CONANP, 2007), se obtuvieron datos de la cobertura de suelo a partir de imágenes satélites utilizando el método híbrido o mixto (Paniagua *et. al.*, 2013) que incluye análisis por tratamiento digital e interpretación visual.

Las leyendas de datos de uso de suelo se generaron usando la capa de uso de suelo y vegetación serie IV del INEGI 2009. Ciertas modificaciones fueron realizadas como la simplificación de los tipos de agricultura a áreas agrícolas generales.

Los datos raster fueron convertidos a vectoriales para luego generar sus tablas de atributos y redelimitar las fronteras de categorías.

Los datos de cubierta de suelo así obtenidos a partir de las imágenes satélites recientes fueron validados gracias a fotos aéreas, observaciones de campo, comentarios del personal del área y otros insumos de fuentes oficiales nacionales y extranjeras.

A partir de la capa de uso de suelo y vegetación de fecha reciente se empezaron a generar los datos históricos usando el método de interpretación interdependiente (FAO, 2001), realizando cambios a los límites de categorías en base a la observación de las imágenes de fechas anteriores. Se genera así una matriz de transición (Ramírez y Subieta, 2005) para posteriormente obtener la matriz de dinámica de cambios la cual muestra las diferencias entre las categorías en el periodo estudiado. Las pérdidas se representan con un signo negativo y las ganancias con un signo positivo.

El procesamiento de los datos espaciales, raster y vector, se emplearon herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) con los programas ArcMap 10.1 y QGIS 2.6. Toda la

cartografía producida en este proyecto se encuentra en el Anexo 1, bajo las siguientes especificaciones cartográficas:

Sistema de coordenadas	UTM
Zona	14 Norte
Datum/ Elipsoide	WGS 84
Unidades	Metros

A partir de la capa de uso de suelo y vegetación generada y validada para el 2010 y usando las fotos SPOT5 del 2005 se ubicaron las áreas de cambio evidente de vegetación para modificar los límites de las categorías.

De la misma manera, a partir de la capa generada para el 2005, se analizaron las imágenes LANDSAT del 2000 y se pudieron ubicar las zonas de cambio y adaptar así los límites de las categorías. Se mantiene la escala de interpretación y se limitan las observaciones a cambios evidentes para evitar que la diferencia de resolución de las imágenes y el tamaño de pixel alteren la calidad de la interpretación. Los resultados de superficies por cada fecha se muestran en la tabla 6.

CUBIERTAS DEL SUELO	2000		2005		2010	
FORESTAL	HA	%	HA	%	HA	%
Area sin Vegetacion Aparente	625	0.16	625	0.16	625	0.16
Bosque de Encino/vs	55,827	14.55	55,678	14.51	55,144	14.37
Bosque de Galeria/vs	170	0.04	170	0.04	170	0.04
Bosque de Pino/vs	9,486	2.47	9,484	2.47	9,475	2.47
Bosque de Tascate/vs	19,143	4.99	19,111	4.98	19,088	4.97
Bosque Mesofilo de Montaña/vs	9,882	2.58	9,812	2.56	9,712	2.53
Bosque Mixto/vs	33,751	8.79	33,718	8.79	33,215	8.65
Matorral Crasicaule/vs	30,473	7.94	30,420	7.93	30,413	7.92
Matorral Crasicaule/vsT2	18,360	4.78	18,344	4.78	18,315	4.77
Selva Baja Caducifolia/vs	144,078	37.54	143,705	37.44	142,861	37.22
Subtotal	321,794	83.85	321,067	83.66	319,019	83.13
NO FORESTAL						
Area Agricola	30,968	8.07	31,105	8.11	31,527	8.21
Area Impactada por Incendio	79	0.02	9	0.00	75	0.02
Asentamientos Humanos	1,582	0.41	1,593	0.42	1,599	0.42
Pastizal	28,906	7.53	29,555	7.70	31,109	8.11
Subtotal	61,535	16.03	62,262	16.22	64,310	16.76
OTROS						
Cuerpo de Agua	448	0.12	448	0.12	448	0.12
Subtotal	448	0.12	448	0.12	448	0.12
TOTAL	383,777	100	383,777	100	383,777	100

Tabla 06: Superficies de uso de suelo y vegetación en la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda.

Como se puede observar en la tabla 06 en el 2000 se contaba con un 83.85% de cobertura forestal, mayormente representada por selva baja caducifolia y bosque de encino, disminuyendo ligeramente en el 2010 a 83.13%. Estos cambios se reflejan principalmente en la selva baja caducifolia con una disminución de 1,217 hectáreas a lo largo de los 10 años de estudio; en el 2000 contaba con una superficie de 144,078 hectáreas para disminuir de unas 373 hectáreas en el 2005 con 143,705 hectáreas, sufrió una mayor pérdida hacia el 2010 con la desaparición de 844 hectáreas para una superficie total de 142, 861 hectáreas. Los bosques de encino con una superficie total de 55,827 en el 2000 perdieron un total de 683 hectáreas en 10 años con un total en 2010 de 55,144 hectáreas.

Esta disminución de 0.72% de cobertura forestal se ve directamente vinculada con el aumento de las actividades humanas: la mayoría es atribuible al aumento de la superficie destinada a pastizales con unas 2,203 hectáreas ganadas, de las cuales 1,554 hectáreas entre 2005 y 2010. El aumento de superficie en áreas agrícolas representa unas 559 hectáreas, de las cuales 422 hectáreas fueron añadidas en los últimos 5 años del estudio. Los asentamientos humanos se desarrollaron de unas 1,582 hectáreas en el 2000 a 1,593 hectáreas en el 2005 para alcanzar unas 1,599 en el 2010, totalizado un aumento de 17 hectáreas.

Cabe destacar que se observa una reducción de 70 hectáreas impactadas por incendios entre el 2000 y el 2005, se observa también en los 5 siguientes años por un total de 75 hectáreas incendiadas en el 2010. Los mapas de uso de suelo y vegetación para el 2000, 2005 y 2010 se encuentran en el Anexo 1.

e) Áreas de Cambio

Gracias a los programas de análisis de sistemas de información geográfica, y utilizando la interpretación interdependiente (FAO) se generaron los datos de tipo y dinámica de cambios . Se identificaron los principales tipos de cambio gracias a la matriz de cambio generada (Ramírez y Subieta, 2005); la deforestación se considera la pérdida total del arbolado por un uso de suelo no forestal, cuando la revegetación es el establecimiento de vegetación secundaria en áreas de uso no forestal abandonadas o bosques alterados recuperándose.

e.1) 2000-2005

En las tablas 07 y 08 se muestra la matriz de cambios para el periodo 2000-2005; se observa una pérdida neta de 727 hectáreas, con el cambio a pastizal (637 ha) el tipo que ocasionó más impactos especialmente en los bosques de encino (143 ha) y la selva baja caducifolia (332 ha). Todos los tipos de vegetación analizados en este estudio, salvo el bosque de galería, fueron impactados por cambio a pastizal. Después de los pastizales, la actividad agrícola es el mayor factor de cambio con un total de 137 hectáreas, afectando mayormente la selva baja caducifolia con 92 hectáreas y el matorral crasicaule con 28 hectáreas. 11 hectáreas de selva baja caducifolia fueron utilizadas para la creación de asentamientos humanos y 61 hectáreas fueron impactadas por incendios. La pérdida anual fue de unas 145 hectáreas totales.

Tabla 07: Matriz de transición 2000-2005

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2000-2005	Area sin Vegetación Aparente	Bosque de Encino/vs	Bosque de Galeria/vs	Bosque de Pino/vs	Bosque de Tascate/vs	Bosque Mesofilo de Montaña/vs	Bosque Mixto/vs	Matorral Crasicaule/vs	Matorral Crasicaule/vsT2	Selva Baja Caducifolia/vs	Area Agricola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal	Cuerpos de Agua	Total 2000
Area sin Vegetación Aparente	625															625
Bosque de Encino/vs		55,647									3	4		174		55,827
Bosque de Galeria/vs			170													170
Bosque de Pino/vs				9,465										21		9,486
Bosque de Tascate/vs					19,092									50		19,143
Bosque Mesofilo de Montaña/vs						9,812					15			55		9,882
Bosque Mixto/vs							33,701							50		33,751
Matorral Crasicaule/vs								30,420			28			25		30,473
Matorral Crasicaule/vsT2									18,344					16		18,360
Selva Baja Caducifolia/vs										143,620	99	2	11	345		144,078
Area Agricola										8	30,961					30,968
Area Impactada por Incendio										64				15		79
Asentamientos Humanos												1,582				1,582
Pastizal		31	19	19			17			13		3		28,804		28,906
Cuerpos de Agua															448	448
Total 2005	625	55,678	170	9,484	19,111	9,812	33,718	30,420	18,344	143,705	31,105	9	1,593	29,555	448	383,777

Tabla 08: Tabla de dinámica de cambio 2000-2005

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2000-2005	Area Agricola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal
Area sin Vegetación Aparente				
Bosque de Encino/vs	-3	-4		-143
Bosque de Galeria/vs				
Bosque de Pino/vs				-2
Bosque de Tascate/vs				-32
Bosque Mesofilo de Montaña/vs	-15			-55
Bosque Mixto/vs				-33
Matorral Crasicaule/vs	-28			-25
Matorral Crasicaule/vsT2				-16
Selva Baja Caducifolia/vs	-92	61	-11	-332
Subtotal	-137	57	-11	-637
Cambio neto en el periodo HA		-727		
Total por año HA		-145		

e.2) 2005-2010

Las tablas 09 y 10 a continuación muestran los cambios para el periodo siguiente, 2005-2010, donde se observa una pérdida neta 3 veces mayor al periodo anterior con 2,048 hectáreas. De nuevo, el cambio de uso de suelo más importante fue el de los pastizales con 1,567 hectáreas afectando la selva baja caducifolia (540 ha), los bosques mixtos (454 ha) y los bosques de encino (448 ha). La selva baja caducifolia fue igualmente afectada por la actividad agrícola con una pérdida de 302 hectáreas, unas 210 hectáreas más que en el periodo anterior. Con el mismo tipo de orden de magnitud con el periodo anterior, las pérdidas por cambio a áreas agrícolas pasaron de 137 hectáreas en 2005 a 409 hectáreas en el 2010. Como mencionado anteriormente la selva baja caducifolia fue la mayor impactada cuando los bosques de encino perdieron un total de 69 hectáreas, el bosque mesófilo de montaña 16, el bosque mixto 13 y el bosque de pino 9. El matorral crasicaule fue impactado por pastizal únicamente. En este periodo se perdieron 410 hectáreas forestales al año.

Tabla 09: Matriz de transición 2005-2010

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2005-2010	Area sin Vegetación Aparente	Bosque de Encino/vs	Bosque de Galeria/vs	Bosque de Pino/vs	Bosque de Tascate/vs	Bosque Mesofilo de Montaña/vs	Bosque Mixto/vs	Matorral Crasicaule/vs	Matorral Crasicaule/vsT2	Selva Baja Caducifolia/vs	Area Agricola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal	Cuerpos de Agua	Total 2005
Area sin Vegetación Aparente	625															625
Bosque de Encino/vs		55,116									70	20		472		55,678
Bosque de Galeria/vs			170													170
Bosque de Pino/vs				9,449							9			27		9,484
Bosque de Tascate/vs					19,088							18		5		19,111
Bosque Mesofilo de Montaña/vs						9,650					44			117		9,812
Bosque Mixto/vs							33,136				26	36		519		33,718
Matorral Crasicaule/vs								30,413						7		30,420
Matorral Crasicaule/vsT2									18,314					30		18,344
Selva Baja Caducifolia/vs										142,371	367		1	965		143,705
Area Agricola		1			28	14				65	30,955		5	38		31,105
Area Impactada por Incendio		4												5		9
Asentamientos Humanos													1,593			1,593
Pastizal		23	26	34	65			1	424	56	1		28,925		29,555	
Cuerpos de Agua														448	448	
Total 2010	625	55,144	170	9,475	19,088	9,712	33,215	30,413	18,315	142,861	31,527	75	1,599	31,109	448	383,777

Tabla 10: Matriz de dinámica de cambio 2005-2010

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2005-2010	Area Agrícola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal
Area sin Vegetacion Aparente				
Bosque de Encino/vs	-69	-16		-448
Bosque de Galeria/vs				
Bosque de Pino/vs	-9			0
Bosque de Tascate/vs		-18		-5
Bosque Mesófilo de Montaña/vs	-16			-84
Bosque Mixto/vs	-13	-36		-454
Matorral Crasicaule/vs				-7
Matorral Crasicaule/vsT2				-29
Selva Baja Caducifolia/vs	-302		-1	-540
Subtotal	-409	-70	-1	-1,567
Cambio neto en el periodo HA		-2,048		
Total por año HA		-410		

d.3) Cambios acumulados 2000-2010

La tabla 11 representa la matriz de transición en la reserva de la biosfera Sierra Gorda en el intervalo de estudio de 2000-2010. Una pérdida total neta de 2,775 hectáreas de suelo forestal se registró en esta década, favoreciendo principalmente los pastizales (2,193 ha) y la actividad agrícola (549 ha) (tabla 11). La selva baja caducifolia fue el tipo de vegetación más impactado por el cambio a pastizal con una pérdida de 862 hectáreas, siguiéndole los bosques de encino con 591 hectáreas, los bosques mixtos con 487 hectáreas y los bosques mesófilo de montaña con 138 hectáreas. De las 549 hectáreas afectadas por cambio a actividad agrícola, 396 hectáreas fueron de selva baja caducifolia y 72 hectáreas de bosque de encino. En esta década se cambiaron anualmente el uso de suelo de 278 hectáreas forestales, aunque como observado anteriormente, la mayor afectación ocurrió en el periodo 2005-2010.

Tabla 11: Matriz de transición 2000-2010

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2000-2010	Area sin Vegetación Aparente	Bosque de Encino/vs	Bosque de Galeria/vs	Bosque de Pino/vs	Bosque de Tascate/vs	Bosque Mesofilo de Montaña/vs	Bosque Mixto/vs	Matorral Crasicaule/vs	Matorral Crasicaule/vsT2	Selva Baja Caducifolia/vs	Area Agricola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal	Cuerpos de Agua	Total general
Area sin Vegetacion Aparente	625															625
Bosque de Encino/vs		55,089									73	20		645		55,827
Bosque de Galeria/vs			170													170
Bosque de Pino/vs				9,430							9			48		9,486
Bosque de Tascate/vs					19,070							18		55		19,143
Bosque Mesofilo de Montaña/vs						9,653					61			169		9,882
Bosque Mixto/vs							33,125				26	36		563		33,751
Matorral Crasicaule/vs								30,413			28			32		30,473
Matorral Crasicaule/vsT2									18,314					46		18,360
Selva Baja Caducifolia/vs		0								142,332	467		12	1,266		144,078
Area Agricola		1				28	14			71	30,811		5	38		30,968
Area Impactada por Incendio										53				26		79
Asentamientos Humanos													1,582			1,582
Pastizal		54	46	19	31	76		1	404		53	1		28,221		28,906
Cuerpos de Agua															448	448
Total general	625	55,144	170	9,475	19,088	9,712	33,215	30,413	18,315	142,861	31,527	75	1,599	31,109	448	383,777

Se perdieron aproximadamente 275 hectáreas de suelo forestal por año a lo largo de esta década, la selva baja caducifolia y el bosque de encino siendo las principales víctimas de deforestación para pastizales y áreas agrícolas (tabla 12).

Tabla 12: Matriz de dinámica de cambio 2000-2010.

Matriz de transición de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro 2000-2010	Area Agrícola	Area Impactada por Incendio	Asentamientos Humanos	Pastizal
Area sin Vegetacion Aparente				
Bosque de Encino/vs	-72	-20		-591
Bosque de Galeria/vs				
Bosque de Pino/vs	-9			-2
Bosque de Tascate/vs		-18		-36
Bosque Mesofilo de Montaña/vs	-33			-138
Bosque Mixto/vs	-13	-36		-487
Matorral Crasicaule/vs	-28			-32
Matorral Crasicaule/vsT2				-44
Selva Baja Caducifolia/vs	-396	53	-12	-862
Subtotal	-549	-21	-12	-2,193
Cambio neto en el periodo HA		-2,775		
Total por año HA		-278		

e) Cálculo de la Tasa de Transformación

Las categorías de uso de suelo y vegetación de cada año se re-categorizaron en dos grandes grupos: Forestal y No Forestal, y posteriormente se calculó la tasa de cambio a partir de la fórmula de la FAO (2001):

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{S1 - S2}{S1}\right)^{1/n}$$

Dónde:

δ= Tasa de Cambio

S1 = Superficie Forestal, al inicio del periodo

S2 = Superficie Forestal, al final del periodo

n = Número de años entre las dos fechas

El balance en la dinámica de cambios positivos y negativos de las cubiertas del suelo en los periodos de análisis se hizo construyendo la matriz de dinámica de cambio, donde alas categorías No Forestales del último año se le restan las categorías Forestales del primer año, obteniendo el cambio neto del periodo que puede representar ganancias o pérdidas de las cubiertas forestales.

En la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, aproximadamente el 83% de la superficie es de uso forestal, perdiendo un 0.72% de superficie (2,775ha) durante la década del estudio (tabla 13).

La mayor tasa de cambio anual obtenida fue durante el último periodo del estudio, de 2005 a 2010 con un 0.13% equivalente a 2,048 hectáreas. La tasa del periodo anterior (2000-2005) fue de 0.05% correspondiente a las 727 hectáreas de uso cambiado. En acumulado la tasa anual para todo el periodo (2000-2010) fue de 0.09% o 278 hectáreas por año por un total de 2,775 hectáreas pérdidas para el uso forestal (tabla 14).

Tabla 13: Superficies forestales y no forestales en hectáreas y porcentaje en los periodos de estudio

	Forestal	%	No Forestal	%
SUPERFICIE ORIGINAL	383,777			
2000	321,794	83.85	61,535	16.03
2005	321,067	83.66	62,262	16.22
2010	319,019	83.13	64,310	16.76

Tabla 14: Tasa de transformación en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

Período	Fecha 1	Fecha 2	Cambio(HA)	Año	Tasa de cambio	(%) Tasa de cambio anual	HA/año	Cambio Acumulado
2000-2005	321,794	321,067	-727	5	0.00045	0.05	-145	-727
2005-2010	321,067	319,019	-2,048	5	0.00128	0.13	-410	-2,775
2000-2010	321,794	319,019	-2,775	10	0.00087	0.09	-278	-2,775

8.- Conclusiones.

- Aunque más del 80% de la superficie de la reserva es de uso forestal y que su tasa de cambio sea relativamente baja (0.09%) en la última década, el 74% de estos cambios ocurrió en los últimos 5 años, señalando allí una clara presión sobre la reserva por las actividades de pastoreo y agrícolas principalmente.
- La selva baja caducifolia, el bosque mixto y el bosque de encino son los principales afectados por los cambios de uso de suelo con una pérdida total de 1,270; 536 y 683 hectáreas respectivamente.
- Todos los tipos de vegetación forestal de la reserva sufrieron pérdidas, salvo el bosque de galería. Así, el bosque mesófilo de montaña se vió impactado por 171 hectáreas, los matorrales crasicaules (tipo uno y dos) disminuyeron de 104 hectáreas, el bosque de tascate de 54 hectáreas y el bosque de pino se redujo por 11 hectáreas, para el total del período.
- Los cambios fueron mayormente debido a la conversión a pastizales con 2,193 hectáreas y las áreas agrícolas con 549 hectáreas. Por otro lado los asentamientos humanos tuvieron un aumento de alrededor de 12 hectáreas y 21 hectáreas fueron afectadas por incendios.
- La coherencia ente los insumos MAD-Mex de las varias fechas disponibles es poco satisfactoria; la concordancia KAPPA obtenida es débil, independientemente de las fechas. Tanto las etiquetas de las capas como sus bordes no coinciden en una multitud de puntos.