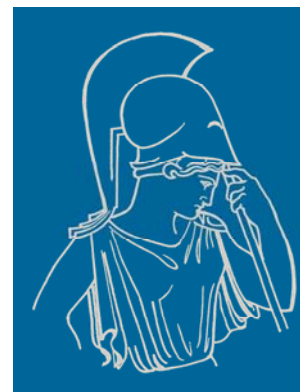


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA



DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**MODELOS PREDICTIVOS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA
PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.**

**TESIS que presenta como requisito parcial para optar por el grado de
Doctor en Geografía**

M. en C. FERNANDO ANTONIO ROSETE VERGÉS

**TUTOR
DR. GERARDO BOCCO VERDINELLI**

**COTUTORES
DRA. ILEANA ESPEJEL CARBAJAL
DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MONTES**

Julio de 2008

i CONTENIDO

i Contenido.....	2
ii Índice de figuras.....	4
iii Índice de Tablas.....	6
iv Agradecimientos.....	8
I Introducción.....	9
I.1 ¿Por qué es importante el análisis del cambio de uso del suelo?.....	9
I.2 El presente trabajo.....	15
II Antecedentes.....	16
II.1 Antecedentes del presente trabajo.....	16
II.2 Casos de utilización de modelos predictivos de cambio de uso del suelo....	18
III Objetivos e hipótesis.....	19
III.1 Objetivos.....	19
III.1. 1 General.....	19
III.1. 2 Particulares.....	19
III. 2 Hipótesis.....	19
IV Marco teórico.....	19
IV. 1 Modelos predictivos.....	20
IV. 1. 1 Escala del modelo.....	23
IV. 1. 2 Complejidad del modelo.....	24
IV. 2. El modelo de Markov.....	33
IV. 3 Análisis multivariado.....	37
IV. 3. 1 El análisis de correlación canónica.....	38
V Metodología.....	40
V. 1 Uso del suelo y vegetación.....	40
V. 2 Análisis de cambios.....	42
V. 3 Construcción de los modelos.....	47
V. 3. 1 Probabilidad de cambio.....	47
V. 3. 2 Población.....	47
V. 3. 3 CCA e identificación de causas.....	49
V. 3. 4. Modelos predictivos.....	50
VI Descripción del área de estudio.....	50

VI. 1 Características biofísicas.....	50
VI. 2 Proceso de poblamiento de la Península.....	54
VI. 3 Características socioeconómicas.....	56
VII Análisis regional y selección de sitios.....	58
VII. 1 Resultados del análisis regional.....	58
VII. 2 Identificación de sitios.....	70
VIII Descripción de sitios.....	72
VIII. 1 Tijuana.....	72
VIII. 2 San Quintín.....	75
VIII. 3 Santo Domingo.....	78
VIII. 4 Desierto del Vizcaíno.....	83
IX Resultados.....	88
IX. 1 Mapas de uso de suelo y vegetación por sitio.....	88
IX. 2 Procesos de cambio de uso del suelo y vegetación por sitio.....	92
IX. 2. 1 Tijuana.....	92
IX. 2. 2 San Quintín.....	98
IX. 2. 3 Santo Domingo.....	104
IX. 2. 4 Desierto del Vizcaíno.....	109
IX. 3 Resultados del análisis estadístico.....	115
IX. 4 Desarrollo de los modelos.....	126
X Discusión.....	128
X. 1 Previsiones a corto y mediano plazo.....	135
XI Conclusiones.....	136
XII Literatura citada.....	140
XIII Anexos.....	153
XIII. 1 Información demográfica por sitio.....	154
XIII. 2 Matrices primaria y secundaria para el análisis de CC.....	200
XIII. 3 Mapas base de los sitios.....	208
XIII. 4 Mapas de vegetación y uso del suelo por sitio (T1-T4).....	213
XIII. 5 Mapas de cambio por sitio (T1-T2, T2-T3 y T3-T4).....	230
XIII. 6 Matrices de cambio por sitio (T1-T2, T2-T3, T3-T4 y T1-T4).....	243
XIII. 7 Resultados de la corrida final del análisis de CC.....	260

I.- INTRODUCCIÓN

¿Por qué es importante el análisis del cambio de uso del suelo?

El paisaje es un ente dinámico en términos de los patrones espaciales, estructurales y funcionales (Dunn *et al.*, 1991; Forman, 1995; Hobbs, 1997). El conjunto de componentes espaciales del paisaje está condicionado por la combinación de factores biofísicos y socio-económicos (Fernández *et al.*, 1992; Zonneveld, 1995). En la escala temporal de décadas, las actividades humanas que impactan el uso de suelo son el factor clave en la forma que adoptan los cambios del paisaje. Algunos de ellos son provocados por prácticas específicas de manejo y otros por las fuerzas sociales, políticas y económicas que controlan los usos de suelo (Medley *et al.*, 1995; Pan *et al.*, 1999). Los cambios temporales en el paisaje inducidos por el hombre afectan tanto los procesos bióticos como los abióticos (Forman, 1995; Farina, 1998).

Los estudios sobre los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo se encuentran en el centro de la atención de la investigación ambiental actual (Bocco *et al.*, 2001), debido a las implicaciones que estos conllevan con relación a la pérdida de hábitat, de diversidad biológica, servicios ambientales y la capacidad productiva de los ecosistemas (Dunjó *et al.*, 2003; Milesi *et al.*, 2005; Heistermann *et al.*, 2006), además de ser reconocido como uno de los factores más importantes del cambio global (Xiao *et al.*, 2006) y representar la segunda fuente antropogénica de CO₂ a la atmósfera (Campos *et al.*, 2004).

El cambio en la cobertura y uso del suelo es un tema que unifica las diferentes dimensiones del cambio ambiental global (Manson, 2006), por lo que su estudio tiende a la interdisciplinariedad al incorporar conceptos, información y metodologías de diferentes áreas del conocimiento.

Las actividades humanas han sido reconocidas como las principales fuerzas que transforman la biosfera, así como responsables de la mayoría del cambio contemporáneo en los paisajes (Skole *et al.*, 1994; Kummer y Turner II, 1994; Meyer y Turner II, 1994; Foster

et al., 1999). La mayoría de los cambios experimentados en los ecosistemas terrestres son producidos por la conversión del uso del suelo o por la intensificación del uso, y la degradación subsecuente de la tierra (Lambin, 1994; Lambin y Geist, 2006). La deforestación y la presión humana sobre la tierra para la producción de cultivos y la mecanización desmedida son las principales causas de la degradación de la tierra, que genera erosión del suelo, cambios en los ecosistemas y deslizamientos de tierra. (Chikhaoui *et al.*, 2005).

El uso del suelo se define como resultado de las actividades socioeconómicas desarrolladas sobre un territorio. En primera instancia se puede diferenciar los usos “naturales” de los usos “antrópicos” sobre el territorio (Anderson *et al.*, 1976).

La degradación de la tierra es comúnmente definida como un proceso inducido por el hombre o por el clima que tiene consecuencias negativas en el funcionamiento de la tierra y los ecosistemas relacionados, y sugiere una percepción del papel desfavorable que ha jugado el hombre por mucho tiempo o de las consecuencias negativas hacia los paisajes. La mayoría de las definiciones reconocen las conexiones explícitas entre las diferentes unidades del paisaje, tales como la existente entre las laderas y las llanuras de inundación (Hudson y Alcántara-Ayala, 2006).

Según Lambin (1997), la mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres se debe a: 1) conversión de la cobertura natural del terreno, 2) degradación del terreno y 3) intensificación en el uso del terreno. Estos procesos, que usualmente se engloban en lo que se conoce como deforestación¹, se asocian a impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas. Localmente inducen la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima (Salinas y Treviño, 2002) y pérdida en la diversidad de especies (Saunders *et al.*, 1991); regionalmente afectan el funcionamiento de las cuencas hidrográficas (Mendoza *et al.*, 2002; Pérez y Ortiz, 2002) y de los asentamientos humanos;

¹ Si bien en sentido estricto deforestación se refiere a la remoción de árboles, principalmente en bosques templados o cálido-húmedos, también se aplica a comunidades vegetales primarias dominadas por árboles bajos, arbustos leñosos o cactáceas.

a nivel global, coadyuvan a las emisiones de gases de efecto invernadero (Kerr *et al.*, 2003) que dan por resultado el problema del cambio climático global (Bocco *et al.*, 2001).

Tanto la cobertura del suelo como el uso del suelo son dos elementos clave que describen al ambiente terrestre en relación con sus atributos naturales y las actividades humanas que se desarrollan en él. El primer concepto se aplica a aquellos objetos de origen natural (montañas, ríos, lagos, etc.) o producidos y mantenidos por el hombre (carreteras, presas, ciudades, etc.) que se localizan sobre la superficie terrestre (Jansen y di Gregorio, 2002). El segundo concepto se refiere al tipo de actividad humana que se desarrolla en la superficie de la tierra con la finalidad de producir bienes y servicios para satisfacer las demandas de la sociedad en su conjunto.

Las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores culturales y humanos. Al influir el ser humano en el ambiente para producir bienes y servicios, el uso del terreno² (o uso del suelo como se le conoce en México) se convierte en la principal causa de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y de la alteración del ciclo hidrológico. El balance entre hábitat natural y paisaje modificado por el hombre podría determinar el futuro de la conservación de la diversidad biológica y el sostenimiento de las actividades productivas en grandes áreas del planeta, por lo que cartografiar y cuantificar el grado de conversión humana de los ecosistemas naturales es muy importante.

El generar datos sobre el cambio de cobertura y uso del suelo proporciona información clave para el manejo ambiental (Byun *et al.*, 2005), ya que los cambios en el uso del suelo están transformando la cobertura del mismo a un paso acelerado, provocando las alteraciones más fuertes que el hombre realiza a la superficie terrestre (Jianchu *et al.*, 2005).

El caso más claro de cambio de uso del suelo es la deforestación en las regiones tropicales. Según la FAO (1995) la conversión en la cobertura forestal tropical alcanzó un promedio de

15.5 millones de hectáreas por año durante el periodo de 1981-1990, lo que se traduce en una tasa anual de deforestación de 0.8%. Aproximadamente el 50% del total del cambio ocurre en Latinoamérica.

En el reporte 2005 de la FAO, (FAO, 2005a), sobre la situación forestal en América Latina y el Caribe, se identifica que Mesoamérica es la región del continente con mayor tasa anual de deforestación (1.2 %) durante el periodo 1990-2000.

En México, estudiar la magnitud, dinámica y causalidad de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo es una tarea prioritaria (Bocco *et al.*, 2001). Los datos obtenidos por Masera *et al.* (1997) indican que nuestro país se encuentra entre los países con mayor deforestación al nivel mundial, situación que ha sido corroborada por los datos oficiales más recientes (FAO, 2005b y SEMARNAT, 2007).

Los patrones de deforestación en México varían notablemente por regiones, en donde los factores ambientales y socioeconómicos, tales como el tipo de vegetación, las condiciones de relieve, las características edáficas, las demandas de la sociedad, los patrones de consumo y las principales fuerzas económicas de la región, determinan en forma importante el patrón ocurrido en cada región en particular (Masera, 1996).

Los estudios de caso en regiones del país han sido elaborados con diferentes técnicas y metodologías (p. ej. Dirzo y García, 1991; Mas Porras, 1992; Álvarez-Icaza *et al.*, 1993; Sierra de Santa Marta, 1996; Trejo y Hernández, 1996; Mas *et al.*, 1996; Masera, 1996; Mendoza, 1997; Rosete *et al.*, 1997; Cortina *et al.*, 1999; Velázquez *et al.*, 2003) y se han concentrado en el trópico húmedo o en bosques templados, pero sin incluir un análisis de los factores causantes del cambio de uso del suelo.

Entre las excepciones, Mendoza (1997) relacionó las tasas de deforestación para la selva Lacandona con parámetros demográficos y de infraestructura. En un estudio de los bosques del centro de México, Mas *et al.*, (1996) utilizaron datos de altitud, pendiente y distancia a

² Traducción del inglés *land use*, concepto utilizado en los países anglófonos y adoptado por la FAO y varios

carreteras para generar un modelo de simulación de carácter espacial del proceso de deforestación. Geoghegan *et al*, (2001) desarrollaron dos modelos econométricos para conocer las causas que provocan la deforestación en los ejidos del sur de la península de Yucatán, incorporando variables novedosas, como el nivel de escolaridad de la cabeza de familia. García *et al*, (2005) también estudian tres ejidos en el sur de Quintana Roo para entender las causas que han generado de la deforestación de la selva, encontrando que la inyección de capital para proyectos agropecuarios es la causa principal de la pérdida de selva.

La península de Baja California es una de las últimas grandes extensiones del territorio nacional en donde la presión antrópica hacia los recursos naturales es casi nula. Esta se encuentra muy focalizada hacia sus extremos (Tijuana y Mexicali, en BC y La Paz y Los Cabos en BCS). La frontera con los EU representa la mayor zona de congregación humana, dejando en las partes intermedias extensas zonas casi prístinas en donde los ecosistemas naturales han evolucionado sin presiones humanas.

Además, por su condición de península, esta región del país es la que presenta mayor grado de endemismos, situación que le da gran relevancia en términos de diversidad biológica (Riemann, 2001; Garcillán y Ezcurra, 2003; Garcillán *et al*, 2003; Riemann y Ezcurra, 2005). Sin embargo, por sus características climáticas, los ecosistemas presentes tienden a recuperarse en forma muy lenta de las perturbaciones ocasionadas por el hombre (en comparación con selvas húmedas y bosques templados), es decir, son poco resilientes, y las afectaciones que en otras latitudes pueden llegar a ser soportadas por los ecosistemas, en esta región prácticamente son irreversibles, por lo que también son ecosistemas poco resistentes (Whitford, 2002). Esta condición de baja resistencia y resiliencia, aunado a la gran importancia biológica de la región, y las grandes extensiones de ecosistemas prácticamente prístinos, le dan un carácter de alta fragilidad ambiental.

En las últimas décadas se ha desarrollado una amplia serie de modelos de cambio de uso del suelo para conocer las necesidades de los manejadores del territorio, y para una mejor

países en todo el mundo.

evaluación y proyectar el papel futuro del uso del suelo y los cambios en el uso del suelo en el funcionamiento del sistema terrestre (Veldkamp y Lambin, 2001). El modelamiento es una técnica importante para la proyección de patrones alternativos en el futuro (Lambin *et al.*, 2000; Lambin *et al.*, 2001).

Los modelos permiten probar la estabilidad integrada de los sistemas social y ecológico, a través de la construcción de escenarios. Por definición, cualquier modelo se queda corto en la incorporación de todos los aspectos de la realidad, sin embargo nos proveen información valiosa sobre el comportamiento del sistema bajo un rango de condiciones (Veldkamp y Lambin, 2001).

Por su impacto en el ambiente, los modelos predictivos asociados al cambio de uso de suelo y la evaluación de las políticas públicas han tomado relevancia en México desde la década de los 90.

Los modelos de cambio en el uso y la cobertura del suelo son poderosas herramientas que pueden utilizarse para comprender y analizar la importante relación entre los procesos socioeconómicos asociados al aprovechamiento del territorio, las actividades agrícolas y las estrategias en el manejo de los recursos naturales, con las formas en que esos cambios afectan la estructura y la función de los ecosistemas (Turner y Meyer, 1991).

El análisis de las causas del cambio de uso del suelo se ha movido de la explicación simplista de una causa única a un entendimiento que integra múltiples causas y sus interacciones complejas. Mejorar la comprensión de los complejos procesos dinámicos es fundamental para que el cambio de uso del suelo pueda permitir proyecciones más confiables y escenarios más realistas de los cambios futuros (Lambin *et al.*, 2003).

Geist y Lambin (2002) señalan que existen dos explicaciones principales, mutuamente excluyentes y aún poco satisfactorias, para la deforestación en los trópicos. Por un lado la argumentación de que es causada por un solo factor de complejidad irreducible, pero no existe un consenso en cual es el factor principal, ya que algunos proponen el incremento de

la agricultura mientras otros al incremento poblacional. Por el otro lado, existe la hipótesis de que la deforestación está relacionada con diversos factores causales.

Uno de los principales motivos para estudiar las fuerzas que provocan los cambios en los paisajes es el encontrar patrones generales de cambio del paisaje, que sean válidos más allá de la situación específica estudiada (Bürgi, *et al.*, 2004).

Estos modelos han servido para alertar sobre los riesgos a corto y mediano plazo en regiones particulares del país sobre cambios de cobertura y uso del suelo, así como a procesos de deterioro ambiental, tales como la pérdida de hábitat, de diversidad biológica, servicios ambientales y potencial productivo de los ecosistemas.

Este tipo de alerta es de crucial importancia para zonas de alta fragilidad ambiental o de relevancia biológica, tal como lo es la península de Baja California, por lo que la identificación puntual en zonas específicas de presión antrópica es vital para la planeación territorial y el manejo y conservación de los recursos naturales.

El presente trabajo

El presente trabajo plantea un proceso metodológico para generar modelos predictivos de cambio de uso del suelo y vegetación, además de que presenta datos concretos aplicables a diferentes casos en la península de Baja California, a partir de datos reales, con la finalidad de poder contar con una proyección de los posibles cambios a futuro generados por las principales fuerzas que definen el patrón de ocupación del territorio.

El documento está estructurado en XIII capítulos. En los primeros seis se presenta la introducción, los antecedentes, objetivos e hipótesis, marco teórico, metodología y descripción del área de estudio. En el capítulo VII se presenta el análisis regional de cambio de uso del suelo en el que se sustenta la elección de los cuatro sitios específicos a ser estudiados a detalle para generar el modelo predictivo correspondiente a cada uno de los