

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
DES de Ciencias Naturales y Exactas**

**Facultad de Ciencias
Facultad de Ciencias Marinas
Instituto de Investigaciones Oceanológicas**



**LA CUENCA DEL RÍO TIJUANA,
UN ÁREA, DOS HISTORIAS DE CAMBIO.**

**Tesis que para obtener el grado de
Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo
presenta:**

Lina Ojeda Revah

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
DES de Ciencias Naturales y Exactas
Facultad de Ciencias
Facultad de Ciencias Marinas
Instituto de Investigaciones Oceanológicas



TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

PRESENTA

Lina Ojeda Revah

Dr. Martha Ileana Espejel Carbajal
Director de Tesis

Dr. Exequiel Ezcurra
Codirector de Tesis

Dr. Gerardo Bocco Verdinelli
Sinodal

Dr. Rosa Imelda Rojas Candela
Sinodal

Dr. Richard Wright
Sinodal

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser
Sinodal

Ensenada, Baja California, Junio 2007

Resumen

La Cuenca del Río Tijuana (CRT), ubicada en la frontera entre México y Estados Unidos (E.U.), es un que área ofrece un excelente ejemplo para estudiar los efectos que dos culturas con diferentes historias y formas de apropiación del territorio, han tenido sobre un mismo espacio geográfico. Las principales actividades realizadas en forma de crecimiento urbano, agricultura y ganadería, han provocado una acelerada deforestación, con diferentes consecuencias ambientales. Bajo el marco teórico de la ecología del paisaje, la biohistoria o historia ambiental y el modelo conceptual del ecosistema urbano, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar históricamente los cambios de uso del suelo ocurridos en la CRT; y los principales factores que le dieron lugar, resaltando las diferencias en que dos culturas con dos formas de apropiación de recursos naturales se expresan territorialmente. Con base en la interpretación de fotos aéreas e imágenes de satélite de 1953-56, 1970-72, 1994 y 2005 y con verificación en campo, se construyeron mapas de uso del suelo y tipos de vegetación a una escala común de 1:50,000. Se analizó y comparó la estructura del paisaje de cada país, en cada año y sus cambios en el tiempo, utilizando el área, el número de fragmentos, y tasas de cambio por categoría. Para el estudio de la dinámica de cambio, se construyeron matrices de transiciones de Markov. Por medio de una revisión bibliográfica y de estadísticas de población y relacionando los hallazgos con los mapas obtenidos, se identificaron los principales acontecimientos que determinaron los cambios y sus consecuencias espaciales. Los cambios antrópicos ocurridos dentro de la cuenca, se iniciaron con una población relativamente pequeña, seminómada, que modificó poco al paisaje. Durante la Colonia, bajo un sistema de Misiones, se introdujo la ganadería extensiva y la agricultura, pero se mantuvo una población pequeña. Con ello, el impacto sobre el paisaje más importante fue la introducción de especies exóticas. A finales del siglo XIX, debido a las innovaciones tecnológicas y a la proliferación de las vías de comunicaciones terrestres, la población comenzó a crecer aceleradamente y aumentó su impacto sobre el ambiente. Actualmente, con más de un millón de habitantes, concentrados en zonas urbanas, las actividades económicas dentro la cuenca han estado orientadas hacia los sectores secundario y terciario. Dada su localización fronteriza con E.U., durante el siglo XX y el presente, los patrones de uso del suelo en la cuenca, han estado más determinados por intereses económicos y solución de conflictos políticos, que por las propias limitaciones biofísicas de los recursos existentes. Esto es, el desarrollo de la región se ha dado totalmente al margen de sus recursos naturales. La principal modificación fue causada por el crecimiento urbano, creando diferentes patrones de ocupación espacial del territorio en cada país. Algunas de las fuerzas conductoras que influyen en los patrones espaciales del cambio de uso del suelo de la CRT fueron influenciadas por una administración descentralizada en E.U. y una centralizada en México. La gran demanda de espacio disperso de los suburbios en California, fragmenta más los ecosistemas que en Baja California. Las políticas públicas en cada país están orientadas hacia sus principales necesidades sociales. Con altos niveles de vida California aplica fuertes estrategias de conservación, mientras que en Baja California, prevalecen las políticas de desarrollo de infraestructura urbana y de creación de empleo.

Abstract

The Tijuana River Watershed (TRW), in the Mexico-United States (U.S.) border, is an excellent example area, to study the effects of land-cover/use changes that two cultures with different histories and land managements, have imprinted within the same geographic area. Urban development, agriculture and cattle ranch, the main land-uses in the region, have replaced natural ecosystems and created different environmental problems. Using a theoretical frame of biohistory or environmental history, landscape ecology and the urban ecosystem model, the main purpose of this study was to analyze historically the land-cover/use changes undergone in the TRW; and their main driving forces, pointing out the differences in which two natural resources appropriation styles were expressed in the territory. Land cover/use maps were constructed with photo-interpretation of 1953-56 aerial photos, and 1970-72, 1994 and 2005 satellite images, at a 1:50,000 common scales, and by verifying in the field. Landscape patterns and changes in each country were analyzed and compared between countries and years, using metrics such as area, number of fragments, and rates of change by category. Markov transitions matrices were constructed, in order to study change dynamics. References and population statistics reviews were related to the maps, in order to determine the main events that changed land-use patterns and their consequences. From a biohistorical point of view anthropogenic changes within the TRW, began with a relatively small, semi-nomadic native population, which modified lightly the landscape. During Colonial times, under a Missions system, extensive cattle ranch and agriculture was introduced, but population remained small, so the main landscape impacts were the introduction of exotic species. By the end of the 19th century, due to technological innovations and to road construction, population started to grow increasing their environmental impact. Today, with more than one million inhabitants concentrated in urban zones, economic activities in the TRW have been mainly oriented towards the secondary and tertiary sectors. Given its border setting near U.S., during 20th century, land-cover/use patterns within the basin have been driven more by economic interests and political conflicts resolutions, than by natural biophysical restrictions. The region has developed without considering the natural resources in which it is set. The main land-cover/use changes have been driven by urban development; reflecting spatial occupation differences in each side of the border. Some of the different driving forces of land cover/use change have been influenced by a decentralized administration in U.S. and a centralized one in Mexico. Suburbanization in California demands more area, so it fragments more the ecosystems than in Baja California. Public policies in each country are oriented towards their main social needs. With high living standards California applies strong conservation strategies, while in Baja California; priorities are oriented to urban infrastructure construction and job creation policies.

“...el infierno de los vivos no es algo que será: hay uno, es aquel que existe ya aquí, el infierno que habitamos todos los días, que formamos estando juntos. Dos maneras hay de no sufrirlo. La primera es fácil para muchos: aceptar el infierno y volverse parte de él hasta el punto de no verlo más. La segunda es riesgosa y exige atención y aprendizaje continuos: buscar y saber reconocer quién y qué, en medio del infierno, no es infierno, y hacerlo durar y darle espacio.”

Italo Calvino. *Las ciudades invisibles*. Buenos Aires. Minotauro.
1974.

Agradecimientos

A Ileana Espejel, Exequiel Ezcurra y Gerardo Bocco principalmente por creer en mí, pero también por su gran ánimo, paciencia, asesoría y colaboración. A Richard Wright y Rosa Imelda Rojas por sus valiosas contribuciones, así como a Walter Daesslé por su apoyo al final de esta experiencia. Agradezco asimismo a todos aquellos que contribuyeron técnicamente con el sistema de información geográfica en las diferentes etapas de este trabajo (Francisco Lares, Miguel Heredia, José Manuel Rodríguez, Zenia Saavedra, Rafael Bermúdez e Hiram Rivera). Esta tesis recibió apoyo parcial del fondo CONACYT-SEMARNAT-2002-C01-1313.

A mis padres por todo.

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. Introducción | 8 |
| II. Marco Teórico | 11 |
| II. 1. El concepto de paisaje y su estudio | 11 |
| II. 2. Escalas y unidades del paisaje | 15 |
| II. 3. La ecología del paisaje y la ordenación del territorio | 15 |
| II. 4. Relaciones hombre-naturaleza. La biohistoria y el ecosistema urbano. | 17 |
| II.5. Modelo de crecimiento urbano | 20 |
| III. Justificación | 22 |
| IV. Objetivos..... | 25 |
| IV.1. General..... | 25 |
| IV.2. Específicos | 26 |
| V. Método..... | 26 |
| VI. Resultados..... | 27 |
| VII. Conclusiones | 28 |
| VIII. Referencias bibliográficas..... | 34 |

Artículos producidos.

Capítulo 1. La cuenca binacional del Río Tijuana: un enfoque biohistórico. *Economía Sociedad y Territorio*. Aceptado.

Capítulo 2. Land-cover/use transitions in the binational Tijuana River Watershed during a period of rapid industrialization *Applied Vegetation Science*. En prensa.

Capítulo 3. Tendencias de ocupación del territorio en la Cuenca del Río Tijuana: 1970-1994-2005.

I. Introducción

Gran parte de los problemas ambientales tienen sus raíces en las relaciones establecidas entre el hombre y la naturaleza a través del tiempo. Una de estas relaciones se expresa en la forma en que se ocupa el territorio. Un territorio ocupado por dos culturas que imprimen huellas diferentes, puede constituir un excelente ejemplo comparativo de distintas formas de apropiación del espacio y de las consecuencias en cada una tiene.

La Cuenca del Río Tijuana (CRT) se localiza en la esquina occidental de la frontera entre México y Estados Unidos (E.U.). Cubre una superficie de 4,450 km², de los cuales tres cuartas partes pertenecen a México (Figura 1). La mayor parte de la cuenca es montañosa y con una topografía accidentada con las partes más altas en los extremos norte y sur. El drenaje confluye en el valle del Río Tijuana en México, en donde se sitúa la ciudad de Tijuana, y termina por drenar hacia el Océano Pacífico, en forma de un estero protegido por E.U. Las mayores elevaciones se localizan en el extremo noreste, en el condado de San Diego, California, donde se alcanza una altura de 1,964 metros sobre el nivel del mar (msnm). En la parte mexicana la mayor altitud, de 1,850 msnm, se ubica en el extremo sureste en la Sierra de Juárez. Se trata de una zona semiárida, con precipitaciones anuales que varían entre los 150 y los 500 milímetros (mm) anuales y con temperaturas medias anuales de entre 10 y 16° C, siendo las partes más altas las más húmedas y frías y viceversa (SDSU y COLEF 2005). La cuenca esta cubierta por diversos tipos de vegetación en los que se desarrollan comunidades con gran número de endemismos. En las partes más elevadas del norte se localizan los bosques (mixtos y de pino); en las grandes altitudes del sur habita el matorral de junípero y en las planicies altas de toda la cuenca, las praderas de alta montaña. El chaparral es el tipo de vegetación más extendido, se distribuye entre los 700 y los 1200 msnm, seguido del matorral costero, el cual generalmente habita por debajo de los 900 msnm. La vegetación riparia, que flanquea los cauces de arroyos varía su extensión proporcionalmente a las

corrientes de agua. Los usos del suelo se concentran principalmente en los valles y las áreas planas (SDSU y COLEF 2005).

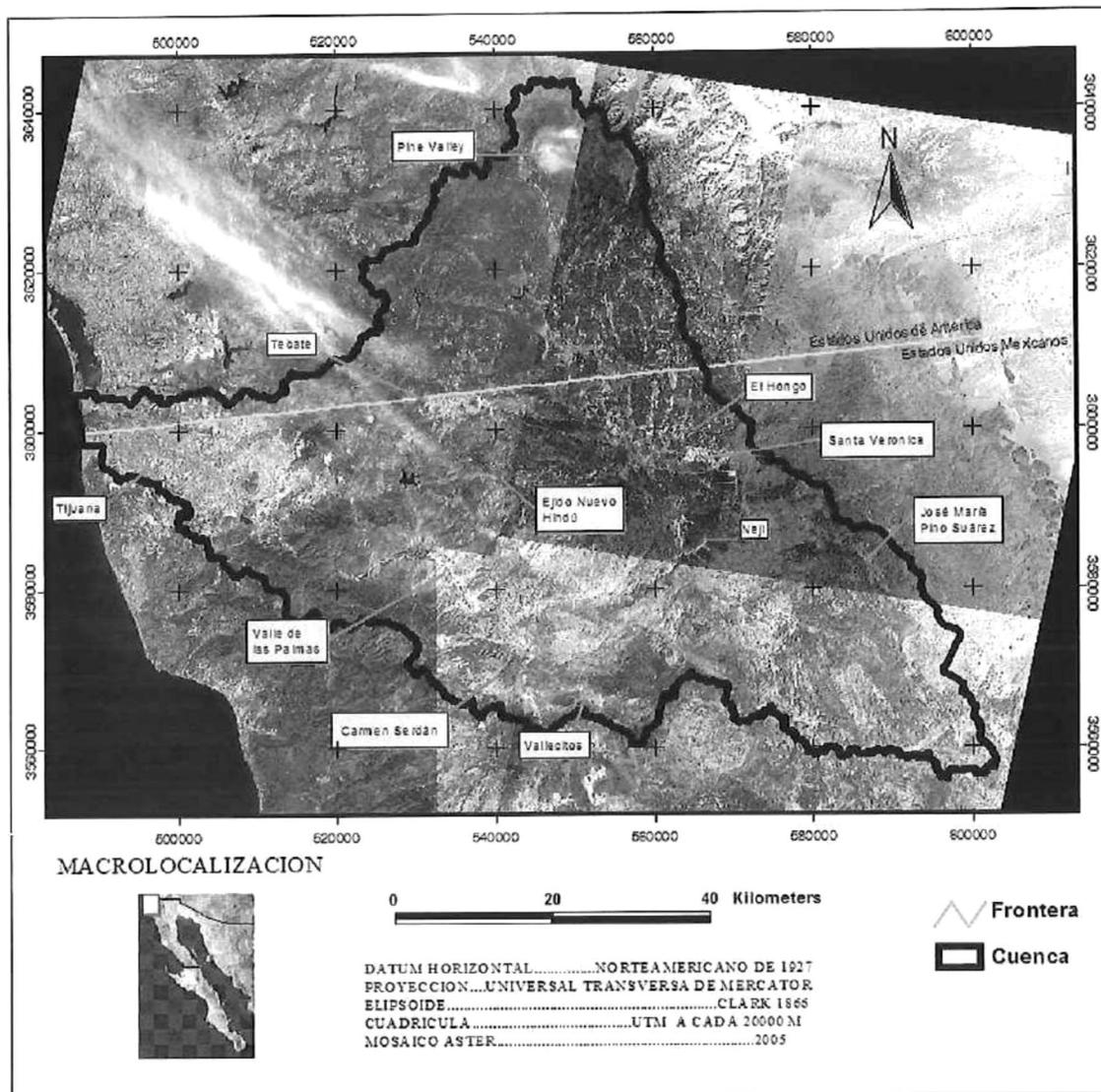


Figura No.1. Área de estudio. Cuenca del Río Tijuana.

En lo referente a la geomorfología, a escala de paisaje y basándose en las pendientes Chávez (1996) dividió a la CRT en ocho unidades: planicie, valle, peniplanicie, altiplanicie, piedemonte, lomerío bajo, lomerío alto y sierra. La parte baja está compuesta por lomeríos y mesas de rocas sedimentarias del antiguo delta

y valle del Río Tijuana, en la parte media predominan las formas rugosas, lomeríos y montañas; separados por valles y piedemontes y la parte superior es suavemente ondulada, con peniplanicies y lómeríos. Según este autor, la topografía accidentada es lo que más caracteriza a la cuenca y el proceso más importante dentro es la erosión.

La cuenca está bajo las jurisdicciones de los municipios de San Diego, en E.U., y principalmente de Tijuana y Tecate (en el Municipio de Ensenada sólo se distribuye un 5% de la CRT), en México. En estos municipios las tasas de crecimiento de la población fueron de 3.0% durante la década de los 70, de 4.8% en las de los 80 y 90 y de 3.1% entre 2000 y 2005, en los municipios mexicanos (INEGI 2000 y 2006). En el Condado de San Diego éstas fueron de 3.2% en la década de los 70, de 2.9% en la de los 80, de 1.2% en la de los 90 y de 1.4% entre 2000 y 2006 (SANDAG 2006). Actualmente en ambos lados de la frontera sólo el 1% de la población realiza actividades relacionadas a la producción primaria; en México 41% de la población trabaja en el sector secundario (principalmente industria) y 52% en servicios, mientras que en E.U. el 16% de la población trabaja en el sector secundario y 83% en el de servicios (INEGI 2000, SANDAG 2006). A nivel nacional, las tasas de crecimiento poblacional anual entre 1970-2005, fueron de 1.7% en México (INEGI 2005) y de 1.3% en E.U. (U.S. Census Bureau 2005), esto es, cifras inferiores a las reportadas para la región de estudio, indicando que es una zona de gran crecimiento de la población en ambos países.

Las principales actividades realizadas en forma de crecimiento urbano, agricultura y ganadería, han provocado una acelerada deforestación con diferentes consecuencias ambientales.

El presente estudio tiene como objetivo analizar históricamente los cambios de uso del suelo ocurridos en la CRT; y los principales factores que los determinaron, enfatizando en las diferencias en que dos culturas expresan en el territorio las formas en que se apropian o manejan los recursos naturales. El marco teórico utilizado para ello se basa en una aproximación interdisciplinaria cuyos principales

aportes provienen de la ecología del paisaje, la biohistoria o historia ambiental y el modelo conceptual del ecosistema urbano.

II. Marco Teórico

II. 1. El concepto de paisaje y su estudio

El término "*paisaje*" proviene del latín "*pagus*" que significa país, lugar o sector territorial. Su equivalente en inglés "*landscape*", también indica un área territorial (Naveh y Lieberman, 1990). Originalmente, el concepto de paisaje fue concebido de una forma subjetiva y emocional, como el escenario observado que de forma estética se crea en la mente del observador y que puede ser un poderoso motor de las acciones del hombre. Con este enfoque se desarrolló el estudio de la percepción del paisaje, que pretende discernir las actitudes individuales y culturales hacia el paisaje y los criterios de manejo que sustentan el modelado del entorno.

A principios del siglo XIX, el paisaje como término geográfico fue introducido por A. Von Humboldt, definiéndolo como "*el carácter total de una región*" (Naveh y Lieberman 1990). En 1926, con la Teoría del Holismo, la ecología introdujo la visión del universo como un todo ordenado en una jerarquía de sistemas estratificados en múltiples niveles, en el que cada nivel mayor está compuesto por niveles menores de sistemas con cualidades emergentes adicionales (Smuts 1929 en Naveh y Lieberman 1984). Paralelamente, Tansley (1935, en Naveh y Lieberman 1984) incluyó en el concepto de "*ecosistema*", "*no sólo al complejo orgánico, sino también al complejo de factores físicos que forman lo que conocemos como ambiente*". Bajo la influencia de la Teoría del Holismo y del concepto de ecosistema, la visión del paisaje fue ampliada por Troll en 1939 al definirlo como: "*la entidad total, espacial y visual en que el hombre desarrolla su vida, integrando la geosfera, biosfera y noosfera*" (Naveh y Lieberman 1984).

Desde entonces el término paisaje ha sido definido por diversos autores que pueden ser agrupados en dos grandes tipos (González-Bernáldez 1981; De Pablo, *et al.* 1987):

1. *"Imagen que representa una extensión de escenario terrestre, ya sea pintada, fotografiada o percibida por el ojo humano y/o por todos los sentidos, haciendo referencia a los elementos más fácilmente perceptibles de un territorio, formando una escena o conjunto de fácil observación"*
2. *"Superestructura espacial conspicua, resultado de un sistema de interacciones entre los múltiples componentes de un territorio (edáficos, climáticos, topográficos, botánicos, zoológicos y de uso humano)"*

Al respecto Berque (1990) sugiere que el paisaje es tanto la impresión del pasado, como la matriz de las actividades humanas actuales y futuras en un área dada. El concepto por lo tanto es subjetivo y objetivo al mismo tiempo y puede ser usado en diferentes formas por gente diferentes.

Como disciplina, la ecología del paisaje evolucionó en el centro de Europa después de la segunda guerra mundial, bajo un enfoque holístico en un intento por relacionar los sistemas naturales, agrícolas y urbanos. Como se mencionó anteriormente, aparentemente fue el geógrafo alemán Troll, quien acuñó en 1939, el término *"ecología del paisaje"* definiéndola como *"el estudio del complejo de elementos interactuantes entre la asociación de seres vivos (biocenosis) y sus condiciones ambientales, los cuales interactúan en una parte específica del paisaje"* (Troll, 2003). Este autor combinó el enfoque horizontal de los geógrafos al examinar las relaciones espaciales de los fenómenos naturales, con el enfoque vertical de los ecólogos, al estudiar las relaciones funcionales. Australia y algunos países de Europa han adoptado este enfoque, ampliando su metodología para incluir parámetros sociales.

Actualmente, la ecología del paisaje es *"un paradigma integral que entreteje la teoría ecológica con la aplicación práctica"* (Barret 1984) y constituye una intersección sintética de muchas disciplinas, que enfocan el patrón espacial y temporal del paisaje (Risser 1991) y cuya característica central es el

reconocimiento del papel dinámico que juega el ser humano sobre el paisaje y la búsqueda sistemática de sus repercusiones ecológicas (Naveh y Lieberman 1984).

Partiendo del reconocimiento de que los patrones naturales de cobertura del suelo son el resultado de complejas interacciones entre clima, terreno, suelo, disponibilidad de agua y biota (Whittaker 1972); las alteraciones producidas por el hombre han dado como resultado paisajes compuestos por una mezcla de mosaicos naturales y manejados por el hombre, con diferentes arreglos, tamaños y formas (Forman 1995, Forman y Godron 1981 Krummel *et al.* 1987). El paisaje por lo tanto es heterogéneo y consiste de componentes diferentes. Asimismo, el paisaje cambia con el tiempo produciendo heterogeneidad temporal. La ecología del paisaje considera el desarrollo y dinámica de la heterogeneidad espacial, sus interacciones e intercambios, las influencias de la heterogeneidad en los procesos bióticos y abióticos, y el manejo de esa heterogeneidad espacial para beneficio de la sociedad (Forman 1995, Risser *et al.* 1984, Risser 1991).

Las investigaciones de ecología del paisaje se pueden dividir en tres enfoques: el primero se refiere al desequilibrio producido por actividades humanas sobre los factores bióticos en los ecosistemas, el segundo a la recuperación de los ecosistemas después de ser sometidos a perturbaciones como el cambio en el uso del suelo, y el tercero pretende proporcionar bases científicas para las políticas de gestión de recursos naturales (Risser *et al.* 1984; Naveh y Lieberman 1990; Forman y Godron 1986).

La ecología del paisaje se centra en el conocimiento de tres características del territorio: la primera, el patrón o estructura, está conformada por las relaciones espaciales entre los diferentes ecosistemas o fragmentos de los mismos, naturales y creados por el hombre, que varían en número, tipo, tamaño, forma y arreglo. Todos los paisajes comparten una estructura común, están compuestos por fragmentos, corredores y una matriz que los contiene y constituyen los tipos de elementos del paisaje (Forman y Godron 1986; Krummel *et al.* 1987; Turner 1987 y 1990).

La segunda característica del paisaje es su funcionamiento o interacción entre los elementos espaciales: compuesto por los flujos de energía, materiales y especies, entre los componentes del sistema. Estos flujos son resultado de complejas interacciones de fuerzas físicas, biológicas y sociales (Forman y Godron 1986; Krummel *et al.* 1987; Turner 1987, 1990). Actualmente se sabe que cambios en el área, forma y conectividad de los fragmentos causan cambios en la riqueza de especies y probabilidad de perturbaciones (Franklin y Forman 1987; Van Dorp y Opdam 1987).

Por último, el cambio o alteración de la estructura y función del mosaico ecológico en el tiempo constituyen la tercera característica del paisaje (Forman y Godron 1986). La importancia de ésta es resaltada por Ruiz (1993) quien hace la siguiente analogía: *“Como el retrato de Dorian Grey, los paisajes componen sus rostros con las cicatrices del tiempo, con las marcas de los procesos físicos, biológicos y culturales que los han conformado”*. Es en este sentido que la historia, entendida como cambio en la estructura, se erige como un concepto clave en la interpretación del paisaje.

Los estudios sobre los cambios ocurridos en el paisaje se enfocan en los cambios de los patrones espaciales (Turner 1990; Kienast 1993), en la relación de los cambios con características físicas (Iverson 1988; Turner y Rischer 1988; Pan *et al.* 1999), en los cambios temporales en función de los factores socioeconómicos que los determinan (Medley *et al.* 1995) o sus efectos sobre la biodiversidad o sobre los procesos ecológicos (Iverson 1988, Soulé 1992; Rescia *et al.* 1994 y 1995). Los estudios sobre la influencia de los cambios a lo largo de la historia en la estructura del paisaje permiten planificar las acciones para favorecer la conservación de un determinado tipo de heterogeneidad (Rescia *et al.* 1995).

La fragmentación o subdivisión de un hábitat continuo en piezas más pequeñas, es uno de los procesos más comunes observables en un paisaje. Sucede en sistemas naturales (incendios), es dinámico, continuo y depende de la escala (Forman, 1995). Históricamente, los ecosistemas han sufrido diversos grados de fragmentación, como resultado de la conversión del uso del suelo provocada por el

hombre, modificando la continuidad de los hábitat naturales. De hecho, la fragmentación es un acompañante inevitable del crecimiento de la población, desarrollo, agricultura y extracción de recursos (Noss 1996). La fragmentación ha tenido efectos que deterioran algunos componentes de la biota (como la disminución de la biodiversidad) por la pérdida de hábitat original, la reducción del área del mismo, su aislamiento, el aumento proporcional de fronteras con relación a las condiciones de interior y el incremento de ambientes alterados dentro del paisaje (Andren 1994; Li y Reynolds 1993). Se sabe que cambios en el área, forma y conectividad de los fragmentos causan cambios en la riqueza de especies, su distribución y permanencia y en la probabilidad de que se propaguen las perturbaciones (Franklin y Forman, 1987; Van Dorp y Opdam 1987). Se considera que la fragmentación tiene dos componentes: la reducción de la extensión de tipo de hábitat natural en un paisaje y su descomposición en fragmentos más pequeños y aislados (Harris 1984, Wilcove *et al.* 1986, Saunders *et al.* 1991).

II. 2. Escalas y unidades del paisaje

Los estudios sobre ecología del paisaje varían de nivel, desde un tipo de comunidad en particular, hasta territorios de cierta extensión (Turner 1987), y desde unos cuantos años hasta la extensión temporal que la información disponible lo permita.

La escala se refiere a la dimensión espacial y temporal de un objeto o evento y a su tamaño y duración (King 1999). Involucra unidades de medición, como la proporción espacial o longitud de un mapa con relación a la longitud real (Forman y Godron 1986). Los patrones de mosaicos se encuentran en todas las escalas espaciales y temporales, desde la submicroscópica hasta la planetaria. A escala humana los mosaicos se miden en cientos o miles de kilómetros (Forman 1995). La extensión y el grano son característicos de la escala. La primera es el área incluida en un estudio y la segunda el tamaño de la unidad individual de observación. Ambas definen los límites de resolución superior e inferior de un estudio (Wiens 1999). La determinación de la escala de estudio es importante, ya

que el funcionamiento y efecto de los procesos ecológicos varía dependiendo de ella (Risser 1991).

La determinación de las unidades espaciales en un paisaje depende del objetivo a alcanzar y de la escala empleada. Hunter *et al.* (1988) propusieron usar los ambientes físicos definidos por la topografía, el substrato y otros factores para definir el grano grueso al nivel del paisaje. De forma semejante Zonneveld (1989) propuso a las unidades ambientales, definidas como: *"porciones de la superficie terrestre ecológicamente homogéneas de acuerdo a la escala de trabajo, que son reconocidas por los atributos de la tierra más obviamente cartografiables: geomorfología, suelos y vegetación"* (incluyendo las alteraciones causadas por el hombre).

II. 3. La ecología del paisaje y la ordenación del territorio

El ser humano modifica al paisaje con el propósito de adaptarlo a sus necesidades, supeditando sus elementos, destruyéndolos o transformándolos (cambio de uso del suelo), aunque también intervenga en su conservación (Ribas 1992). En este contexto, para el control espacial de las actividades humanas se desarrolló la ordenación del territorio (OT), esto es, *"la proyección en el espacio de las políticas social, cultural, ambiental y económica de una sociedad"* (Gómez 1995).

El OT pretende proveer las bases para un desarrollo económico en congruencia con la capacidad de oferta de los recursos naturales de una región. La ecología del paisaje ha comenzado a contribuir al OT, al estudiar las interrelaciones entre el ser humano y su paisaje natural y construido, determinando áreas de conservación en un contexto regional. De hecho, en Europa es utilizada en la planificación territorial (Naveh y Lieberman 1994).

La regionalización del territorio en unidades de paisaje es el primer paso para la planificación de las actividades humanas (Rosete y Bocco, 1999). Las unidades homogéneas deben describir tanto los componentes relativamente estables del

terreno (roca, forma del relieve y suelos, en forma integrada), como los menos estables, cuya tasa de cambio en el tiempo es más alta (vegetación y uso del suelo, fauna) (Bocco *et al.*, 1999). La planificación del uso del territorio y sus recursos naturales conforme a los conceptos y lineamientos postulados por la ecología del paisaje, debe seguir un esquema secuencial lógico que involucra tres niveles de trabajo. Estos niveles son la regionalización ecológica, la evaluación de tierras (o evaluación de aptitud de los suelos) y la detección y solución de conflictos (Rosete y Bocco, 1999).

Otros autores como Salinas (2004) sugieren que en el ordenamiento territorial, el paisaje puede ser considerado como sujeto y objeto de la actividad humana. Como sujeto porque posee características (potencial de recursos) que son el soporte del desarrollo socioeconómico del territorio y el objeto del mismo porque la actividad humana transforma con su dinámica al paisaje que le sirve de base. Esta doble función del paisaje se constituye en el fundamento para comprender la dinámica natural y social, desde la perspectiva de la ordenación del territorio. Las ventajas de hacer uso del concepto de paisaje en la planificación ambiental y el ordenamiento son que:

- Refleja objetivamente la interrelación de los fenómenos que ocurren en un territorio, pudiendo diferenciar espacialmente unidades territoriales y sistemas de unidades que constituyen y funcionan como un todo.
- Permite jerarquizar y clasificar unidades diferenciables y cartografiables.
- Puede ser considerada como una unidad con la que es factible calcular, analizar, comparar y evaluar el potencial de recursos naturales de un territorio.

II. 4. Relaciones hombre-naturaleza. La biohistoria y el ecosistema urbano.

La relación hombre-naturaleza, para ser entendida en una forma comprensiva, debe ser analizada de manera interdisciplinaria. Debido a que los problemas ambientales no están estructurados dentro de una disciplina tradicional con límites profesionalmente definidos, resulta necesario aplicar una amplia gama de conceptos y métodos. La tradicional dicotomía cartesiana de la relación hombre-

naturaleza ha sido la base de la generación del conocimiento en compartimentos y especializado. Esto ha obstaculizado el desarrollo de un entendimiento más amplio de las condiciones de contexto de los hábitat humanos y de los temas ecológicos y ambientales (Lawrence, 2005).

Durante la segunda mitad del siglo XX, a partir de diversas disciplinas (geografía, historia, antropología) se desarrollaron muchos enfoques y conceptos sobre la relación-hombre naturaleza como la historia ecológica, la biohistoria, la ecología humana, la ecología cultural, la ecología urbana, etc. La diferencia entre ellos radica en el énfasis que se le da a la sociedad, la cultura, la historia o al ambiente. El principal reto de todas ellas es construir puentes de comunicación entre las ciencias naturales y los estudios, históricos, sociales, culturales y económicos (Meléndez 2002) para así, hablar una "historia ambiental".

Biohistoria.

El capital humano es la cultura y cada cultura concentra dos capitales: el cognitivo y técnico (prácticas, saberes, reglas); y el mitológico y ritual (creencias, prohibiciones, valores); mismos que se transmiten de individuo a individuo y de generación en generación (Morin 2002).

Las formas en que las sociedades humanas interactúan con sus paisajes dependen del tiempo, el lugar y los contextos históricos en los que se da esta relación. Estructuras sociales, tradiciones, actividades económicas y sistemas políticos han desempeñado un papel crucial en la configuración de los paisajes (White 2002). Cada cultura, en distintas etapas de su historia, ha necesitado evaluar el potencial económico del lugar donde habita, para organizarse con lo que el ambiente le ofrece. Con esta valoración, modifica a los paisajes, conforme incrementa su ocupación territorial y aumenta su población y sus conocimientos (Sauer 1925, Thomas *et al.* 1956). La "biohistoria" o historia ambiental, es un campo nuevo que pretende relacionar a las ciencias biológicas y las sociales. La biohistoria analiza las formas de apropiación y modificación que ha ejercido el

hombre sobre la naturaleza mediante la recuperación de los procesos históricos (Boyden 1992).

La biohistoria se define "como un sistema coherente de conocimiento, o campo de estudio, que refleja la amplia secuencia de sucesos en la historia de la biosfera y de la civilización, desde principios de la vida al día de hoy. [...] La historia entonces se mueve al estudio de la historia de la humanidad, prestando atención especialmente a los patrones de cambio de las interacciones entre los sistemas culturales y los biofísicos" (Boyden 1992)

Este autor considera las interrelaciones entre los componentes y procesos biofísicos y culturales de la Tierra desde el principio de la civilización humana. Sugiere que una analogía orgánica, que aplica principios y leyes biológicas para interpretar procesos sociales y culturales, podría ser engañosa. Argumenta que los principios biológicos son necesarios y pertinentes para un entendimiento comprensivo de los componentes biológicos de las sociedades humanas. Que las interrelaciones entre los componentes y procesos biofísicos y culturales están circunscritas por la dependencia de los procesos y sistemas biológicos, incluyendo a las leyes de la termodinámica, los ciclos biogeoquímicos, selección genética, ecología de suelos, fisiología, salud, enfermedad y comportamiento social.

De acuerdo a Boyden (1992), existen cuatro fases en la biohistoria de la humanidad:

- Fase prístina de cazador colector, ha sido la más larga de las cuatro fases
- Fase temprana de la agricultura, que comienza en algunas regiones hace 11-12,000 años.
- Fase temprana urbana, que comienza en algunas regiones hace 8-9,000 años.
- Fase de alta energía que comenzó hace 150-200 años en Europa.

Boyden (1992) argumenta que desde el principio de la segunda fase, mientras la población humana se multiplicó cerca de 1,000 veces durante el mismo periodo, la tasa de impacto de las actividades humanas en la biosfera se multiplicó 10,000 veces, y que más de la mitad de este aumento ha ocurrido durante el siglo XX.

Boyden y sus colegas han estudiado los impactos de las actividades de las sociedades humanas sobre los componentes biofísicos de la biosfera y sobre los humanos en sí mismos. También han estudiado los procesos de adaptación usados en respuesta a los cambios en los ecosistemas humanos. El término *evodesviación* se refiere al principio biológico general que describe las condiciones de vida humanas y de otras especies, que son diferentes de aquellas que se encuentran en su hábitat natural. Cuando estas diferencias se hacen muy grandes, pueden darse sorpresivas y tal vez irreversibles inadaptaciones de comportamiento y fisiológicas, como el cólera, la tifoidea y la influenza, ocurridas en los últimos 10,000 años.

Otra aproximación de la biohistoria (Boyden 1992) estudia la llegada y aceptación de nuevas tecnologías, incluyendo a aquellas que no son esenciales para las necesidades y sustentos básicos del ser humano. Estas tecnologías llegan a ser parte integral de las sociedades humanas, mediante un proceso denominado *tecno-adicción*. La organización social y espacial de las sociedades puede hacerlas dependientes de ellas, como lo demuestra el uso de motores que usan combustibles fósiles, por mencionar un ejemplo, que incluso ha conducido a la creación de políticas de transporte en muchos países.

Ecosistema urbano.

Para incluir al ecosistema urbano como parte integral del paisaje, éste se puede visualizar como un sistema geográfico compuesto por tres subsistemas, el natural, el social y el construido (Herzog 1990). Siguiendo a este autor en las zonas urbanas, la ecología ha sido usada para caracterizar patrones de asentamientos humanos y de interacciones sociales (ejemplo escuela de ecología social urbana de Chicago). Si este concepto se amplía e incluye elementos socio-ecológicos y físicos, se puede completar el modelo. El ambiente natural consiste de las características físicas y geográficas de la región (terreno, suelo, vegetación), las condiciones atmosféricas (aire) y los sistemas hidrológicos. El ambiente construido representa un espacio entre

el ambiente natural y el social. La sociedad (sistema social) modifica al ambiente natural para satisfacer sus necesidades mediante las actividades que realiza (producción, consumo, reproducción, etc.) y el resultado de esa modificación se expresa a través de la innovación tecnológica y la construcción y reconstrucción del paisaje cultural.

El modelo se hace más complejo al estar situado en una frontera entre dos países ya que el mundo natural opera de acuerdo a principios diferentes que los de la geografía política del paisaje humano y en contraste, el ambiente social no está aislado de la frontera política (Herzog 1990).

En el presente trabajo se considera particularmente la variable espacial (subsistema natural), la población y las políticas públicas (subsistema social) y los usos del suelo —urbano, agrícola y pastizales— (subsistema construido).

II.5. Modelo de crecimiento urbano

Los estudios del crecimiento urbano tienen una larga tradición en el campo de la geografía, en la que aparentemente en Europa presentaban una visión mas integrada de los procesos socioeconómicos y la estructura del paisaje. Posteriormente los estudios fueron enfocados desde dos perspectivas diferentes: la que resalta los procesos que dan lugar al crecimiento urbano (Dietzel *et al.* 2005) y la que tiene base geográfica (Syphard *et al.* 2005 y Luck y Wu 2002). No es sino hasta recientemente con el uso de los SIG, cuando se vuelve a intentar relacionar estas dos visiones (Jenerette y Wu 2001 y López *et al.* 2001).

Existen muchos tipos de modelos de cambio de uso del suelo (Briassoulis 2000), que varían en cuanto si son dinámicos o estáticos, deductivos o inductivos y basados en agentes o en pixeles (Verburg *et al.* 2004). De entre ellos, cabe resaltar los basados en técnicas de estadística (regresión logística o logit, análisis multivariado, etc.), superposiciones con SIG, matrices de transición de Markov y más recientemente autómatas celulares, o combinaciones de los mismos (Yang y Lo 2003, Verburg *et al.* 2004). En todos estos modelos los Sistemas de Información

Geográfica (SIG) juegan un papel preponderante ya que permiten la captura, almacenamiento, edición y análisis de datos geográficos.

Uno de los modelos propuestos para entender el crecimiento urbano lo presentan Dietzel *et al.* (2005) y Herold *et al.* (2005) quienes desde una perspectiva urbana y usando tres medidas espaciales (contagio, distancia al vecino más cercano y densidad de bordes) construyeron un modelo de crecimiento urbano. La urbanización transforma al paisaje homogéneo no-urbano en una mezcla heterogénea de urbano y no-urbano y posteriormente se da una transición a un paisaje homogéneo urbano. La expansión urbana comienza con una base histórica que crece y se dispersa a nuevos centros de desarrollo individuales. Este proceso de *difusión* sigue una trayectoria de crecimiento orgánico y hacia afuera y luego transita a la fusión de los centros urbanos individuales. A medida que este patrón de crecimiento conceptual continúa, el sistema avanza hacia un estado saturado, que puede ser considerado como otra base urbana inicial sobre una extensión menos detallada. Las diferencias cuantitativas reflejan que el crecimiento urbano no es constante en el tiempo y entre regiones. Factores locales o exógenos (espaciales y temáticos), como topografía, infraestructura del transporte, barreras del crecimiento o esfuerzos de planificación, afectan la estructura de crecimiento espacial urbano. Las variaciones locales proporcionan información sobre el proceso en curso.

Otro modelo urbano fue realizado por Bocco y Sánchez, (1995) quienes usaron técnicas de percepción remota para medir el área urbana y estimar la población urbana de Tijuana desde la década de 1950 con modelos de crecimiento alométricos que los relacionan. Asimismo, López *et al.* (2001) estudiaron los cambios ocurridos en la ciudad de Morelia y en sus alrededores entre los años 1960, 1975 y 1990, usando cadenas de Markov de primer y segundo orden. Los resultados indican un gran crecimiento urbano sobre áreas agrícolas, producto de la migración desde las zonas rurales y crecimiento urbano sobre pendientes lo que aumenta la vulnerabilidad de la ciudad a riesgos geológicos.

biofísica y social, y conservando su habilidad para proveer bienes y servicios". Se trata de que la sociedad ejerza control sobre sus acciones en el paisaje sin interferir con los servicios ambientales, se trata de planificar las actividades humanas de acuerdo con los principios que regulan la estructura y función de los paisajes. El planificador debe conocer qué estructura del paisaje garantiza el mantenimiento de los requisitos de la vida tales como el sostenimiento de la biodiversidad, la conservación de los flujos y la calidad del agua, la retención de los suelos, la calidad del aire, la belleza escénica, la seguridad alimentaria y el bienestar de la población.

Un ejemplo de desequilibrio energético y su consecuente deterioro ambiental se da en la CRT. Ubicada en una zona árida, esta cuenca ha sufrido una acelerada transformación en los últimos cien años. Pasó de ser un conjunto de ranchos con apenas doscientos cincuenta habitantes a principios del siglo XX, a conformarse en una zona de gran crecimiento urbano con más de un millón de habitantes. Sin embargo, su desarrollo se ha dado al margen de sus recursos naturales, con una economía basada fundamentalmente en los sectores secundario y terciario y originando graves problemas ambientales.

El medio físico de la cuenca presenta ciertas características que hacen muy compleja su problemática ambiental. Es una zona vulnerable a inundaciones, en la que, por su formación geológica, hay probabilidad de derrumbes y es sensible desde el punto de vista sísmico (Bocco *et al.* 1993; Aragón-Arreola 1994). La vegetación de la cuenca, además de singular y con un elevado número de endemismos (Riemann y Ezcurra 2005), ha evolucionado adaptándose a regímenes de incendios naturales (Minnich 1983).

Un problema ambiental derivado del crecimiento demográfico y urbano es el aumento en la demanda de agua, en una zona semiárida con escasa disponibilidad de la misma. Históricamente, las fuentes de abastecimiento de agua han aumentado, han cambiado y se han diversificado.

Si se considera la complejidad de los problemas ambientales (especies endémicas amenazadas, alta demanda de agua, inundaciones y derrumbes, etc.) la solución no puede estar centrada en una sola estrategia aislada, sino en muchas en las que se

permitiendo el balance entre sus componentes biofísicos y culturales, manteniendo su integridad biofísica y social, y conservando su habilidad para proveer bienes y servicios". Se trata de que la sociedad ejerza control sobre sus acciones en el paisaje sin interferir con los servicios ambientales, se trata de planificar las actividades humanas de acuerdo con los principios que regulan la estructura y función de los paisajes. El planificador debe conocer qué estructura del paisaje garantiza el mantenimiento de los requisitos de la vida tales como el sostenimiento de la biodiversidad, la conservación de los flujos y la calidad del agua, la retención de los suelos, la calidad del aire, la belleza escénica, la seguridad alimentaria y el bienestar de la población.

Un ejemplo de desequilibrio energético y su consecuente deterioro ambiental se da en la CRT. Ubicada en una zona árida, esta cuenca ha sufrido una acelerada transformación en los últimos cien años. Pasó de ser un conjunto de ranchos con apenas doscientos cincuenta habitantes a principios del siglo XX, a conformarse en una zona de gran crecimiento urbano con más de un millón de habitantes. Sin embargo, su desarrollo se ha dado al margen de sus recursos naturales, con una economía basada fundamentalmente en los sectores secundario y terciario y originando graves problemas ambientales.

El medio físico de la cuenca presenta ciertas características que hacen muy compleja su problemática ambiental. Es una zona vulnerable a inundaciones, en la que, por su formación geológica, hay probabilidad de derrumbes y es sensible desde el punto de vista sísmico (Bocco *et al.* 1993; Aragón-Arreola 1994). La vegetación de la cuenca, además de singular y con un elevado número de endemismos (Riemann y Ezcurra 2005), ha evolucionado adaptándose a regímenes de incendios naturales (Minnich 1983).

Un problema ambiental derivado del crecimiento demográfico y urbano es el aumento en la demanda de agua, en una zona semiárida con escasa disponibilidad de la misma. Históricamente, las fuentes de abastecimiento de agua han aumentado, han cambiado y se han diversificado.

Si se considera la complejidad de los problemas ambientales (especies endémicas amenazadas, alta demanda de agua, inundaciones y derrumbes, etc.) la solución no puede estar centrada en una sola estrategia aislada, sino en muchas en las que se integren y relacionen estos problemas. Por ejemplo, la recarga de los mantos acuíferos depende en gran medida de la existencia de una capa vegetal. La pérdida de vegetación incrementa los escurrimientos de agua y el depósito de sedimentos en los canales colectores, decreciendo así su capacidad de transporte. La vegetación natural juega un papel muy importante en la estabilización de laderas, por lo que su remoción aumenta los riesgos de derrumbes. El proceso de urbanización incrementa la magnitud y la frecuencia de las inundaciones al aumentar las superficies altamente impermeables, impidiendo la infiltración de agua y ocasionando escurrimientos que llegan a saturar los drenajes. Por lo tanto, están estrechamente relacionados tanto la conservación del agua, de la biodiversidad, del suelo como la mitigación de riesgos a derrumbes e inundaciones.

Debido a que gran parte de la problemática ambiental de la cuenca está relacionada con el recurso agua, la unidad que contempla su distribución espacial adquiere relevancia para el manejo del territorio. La cuenca hidrográfica es una unidad de estudio conveniente debido a que es una unidad funcional, integral, con límites definidos, salidas puntuales y estructurada jerárquicamente (Mass y Martínez Yrizar 1990).

La CRT se sitúa en la Provincia Florística de Baja California, un área considerada por Myers *et al.* (2000) como una de las 25 prioritarias para la conservación identificadas a nivel mundial, consideración que se basa en la concentración de endemismos (plantas y vertebrados, sin incluir peces) y en la pérdida de hábitat que experimentan estas regiones.

Se sabe que la mayor parte de los cambios ecológicos se dan al inicio de la transformación del uso del suelo. El punto crítico para la planificación y conservación parece ser cuando el paisaje aún presenta entre 60 y 90% de su área con vegetación natural. En esta situación se encuentra la CRT, ya que

conserva cerca de 80% de sus ecosistemas naturales. Sin embargo, para poder planificar y conservar áreas naturales, *“es preciso no considerar lo natural como algo excepcional ni como un elemento puramente escénico. Por el contrario, el espacio natural debe actuar como receptor de las demás funciones urbanas mediante operaciones de protección o restauración a largo plazo, viables a través de la creación de un sistema territorial de espacios naturales”* (Díaz-Pineda y Valenzuela 1989).

Considerando la velocidad a la que actualmente se está dando el cambio de uso del suelo y la consecuente pérdida de biodiversidad, en el futuro cercano será necesario aceptar un conocimiento parcial de la naturaleza, usar las metodologías existentes y a partir de nuestros conocimientos hacer el mejor esfuerzo (Margules 1999). De lo contrario, no existirán áreas naturales para poder ser estudiadas, ni conservadas ni que provean recursos naturales y protejan a los ecosistemas urbanos. El objetivo es presentar opciones idóneas o determinar las posibilidades y límites espaciales del desarrollo, para que el territorio funcione libre de conflictos (Ot'ahel' 1999). Por ello, conviene integrar a los factores que afectan las decisiones del uso del suelo (dimensiones cultural, política y socioeconómica), con las consecuencias ecológicas de la transformación del paisaje, bajo un enfoque que trascienda disciplinas (With 1999).

Dentro de la CRT la mayor parte de los estudios realizados mantienen un enfoque muy local, puntual o aislado. Bajo el marco teórico anteriormente descrito, el presente trabajo pretende estudiar los cambios ocurridos en los patrones espaciales de la CRT, usando las fotos aéreas e imágenes disponibles (1953-56, 1970-72, 1994 y 2005) con las unidades cartográficas de usos del suelo y tipos de vegetación reconocibles en las fotos áreas más antiguas (1953), a una escala común de 1:50,000. Asimismo, analizar las consecuencias que dos culturas diferentes (de México y E.U.) han ejercido sobre un territorio, identificando los principales factores históricos y socioeconómicos que determinaron dichos patrones.

Los detalles técnicos y metodológicos se describen en cada uno de los artículos.

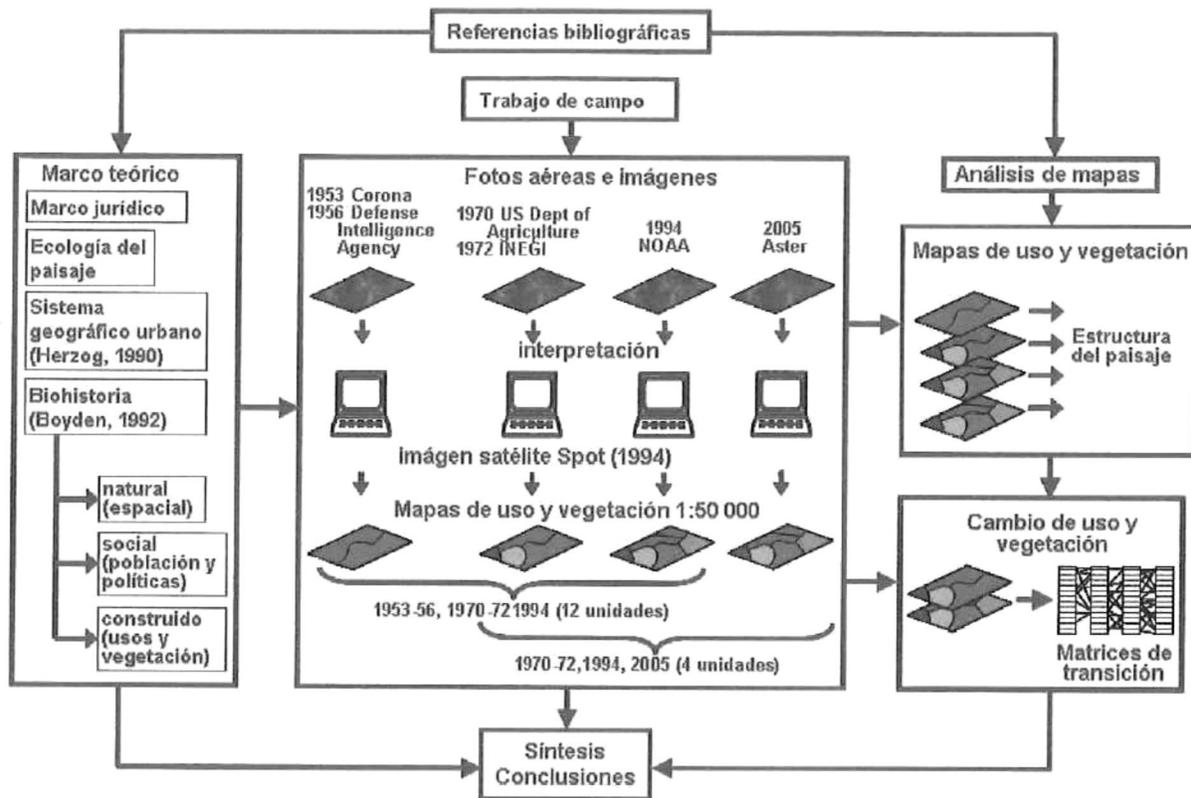


Figura No.2. Métodos y técnicas para el análisis de historia ambiental de la Cuenca del Río Tijuana.

VI. Resultados

El documento se divide en dos secciones. La primera parte, que corresponde al cuerpo de la tesis, resume el marco teórico bajo el cual se realiza la investigación. A través de diversas fuentes bibliográficas se describen los principales conceptos y enfoques de la ecología del paisaje y la biohistoria o historia ambiental. Asimismo, se incorpora un resumen de los artículos generados y se incluye una discusión y conclusiones de manera integrada.

En la segunda parte se incorporan, como capítulos, los tres artículos generados.

Capítulo I. Recopila la información histórica sobre la CRT, resaltando los eventos que mayor influencia tuvieron sobre la ocupación del territorio (Artículo: La cuenca binacional del Río Tijuana: un enfoque biohistórico. Economía Sociedad y Territorio, aceptado con modificaciones).

Capítulo 2. Analiza los cambios ocurridos dentro de la Cuenca entre 1970-72 y 1994, las transiciones de uso del suelo y las diferencias existentes en cada país (Artículo: Socio-economic dynamics and natural land-cover change: Land-cover/use transitions in the binational Tijuana River Watershed during a period of rapid industrialization. *Applied Vegetation Science*. En prensa).

Capítulo 3. Actualiza la información al 2005, y analiza la estructura y cambios principalmente entorno al crecimiento urbano (Artículo: Tendencias de ocupación del territorio en la Cuenca del Río Tijuana: 1970-1994-2005).

VII. Conclusiones

En una cuenca con ecosistemas similares dos culturas con historias diferentes crearon dos paisajes con características peculiares. El estudio de la cuenca desde un punto de vista de la biohistoria o la historia ambiental, a partir de fuentes primarias y secundarias, permitió identificar las fuerzas conductoras que han moldeado al paisaje de cada lado de la frontera

La historia de los usos del suelo y coberturas vegetales dentro de la cuenca de forma esquemática se inició con una población relativamente pequeña, seminómada, que modificó poco al paisaje. Durante la Colonia, bajo un sistema de Misiones, con uso de ganadería extensiva y poca agricultura, se mantuvo una población pequeña. Con ello, los impactos ocasionados sobre el paisaje no fueron substanciales, a excepción de la introducción de especies exóticas. Fue hasta finales del siglo XIX, debido a las innovaciones tecnológicas y a las comunicaciones terrestres, cuando la población comenzó a crecer aceleradamente y aumentaron sus actividades e impacto sobre el ambiente. Actualmente, con más de un millón de habitantes, concentrados en zonas urbanas, las actividades económicas dentro la cuenca han estado orientadas hacia los sectores secundario y terciario. Dada su localización fronteriza con E.U., durante el presente siglo los patrones de uso del suelo han estado más determinados por intereses económicos y solución de conflictos políticos, que por las propias limitaciones biofísicas de los recursos existentes. El desarrollo de la región se ha dado totalmente al

través de diversas fuentes bibliográficas se describen los principales conceptos y enfoques de la ecología del paisaje y la biohistoria o historia ambiental. Asimismo, se incorpora un resumen de los artículos generados y se incluye una discusión y conclusiones de manera integrada.

En la segunda parte se incorporan, como capítulos, los tres artículos generados.

Capítulo I. Recopila la información histórica sobre la CRT, resaltando los eventos que mayor influencia tuvieron sobre la ocupación del territorio (Artículo: La cuenca binacional del Río Tijuana: un enfoque biohistórico. Economía Sociedad y Territorio, en prensa).

Capítulo 2. Analiza los cambios ocurridos dentro de la Cuenca entre 1970-72 y 1994, las transiciones de uso del suelo y las diferencias existentes en cada país (Artículo: Socio-economic dynamics and natural land-cover change: Land-cover/use transitions in the binational Tijuana River Watershed during a period of rapid industrialization. *Applied Vegetation Science*. En revisión).

Capítulo 3. Actualiza la información al 2005, y analiza la estructura y cambios principalmente entorno al crecimiento urbano (Artículo: Tendencias de ocupación del territorio en la Cuenca del Río Tijuana: 1970-1994-2005).

VII. Conclusiones

En una cuenca con ecosistemas similares dos culturas con historias diferentes crearon dos paisajes con características peculiares. El estudio de la cuenca desde un punto de vista de la biohistoria o la historia ambiental, a partir de fuentes primarias y secundarias, permitió identificar las fuerzas conductoras que han moldeado al paisaje de cada lado de la frontera

La historia de los usos del suelo y coberturas vegetales dentro de la cuenca de forma esquemática se inició con una población relativamente pequeña, seminómada, que modificó poco al paisaje. Durante la Colonia, bajo un sistema de Misiones, con uso de

ganadería extensiva y poca agricultura, se mantuvo una población pequeña. Con ello, los impactos ocasionados sobre el paisaje no fueron substanciales, a excepción de la introducción de especies exóticas. Fue hasta finales del siglo XIX, debido a las innovaciones tecnológicas y a las comunicaciones terrestres, cuando la población comenzó a crecer aceleradamente y aumentaron sus actividades e impacto sobre el ambiente. Actualmente, con más de un millón de habitantes, concentrados en zonas urbanas, las actividades económicas dentro la cuenca han estado orientadas hacia los sectores secundario y terciario. Dada su localización fronteriza con E.U., durante el presente siglo los patrones de uso del suelo han estado más determinados por intereses económicos y solución de conflictos políticos, que por las propias limitaciones biofísicas de los recursos existentes. El desarrollo de la región se ha dado totalmente al margen de sus recursos naturales, ya que no son estos los que le han sustentado el crecimiento ni de su población, ni de sus actividades económicas.

Los principales eventos históricos que han determinado los patrones del paisaje en la CRT se inician por el uso que hicieron del fuego los primeros pobladores de la cuenca, cuyas repercusiones sobre el patrón del paisaje se desconocen; y continúan con la introducción de la ganadería la agricultura y especies exóticas en general, realizada por los misioneros durante la conquista. Con la demarcación de la nueva frontera, a partir de 1848, se inician dos historias diferentes. La de México, determinada fundamentalmente por migraciones inducidas por distintos eventos en E.U., como la Ley Volsted, las guerras mundiales, la agricultura tecnificada, etc. La de E.U., determinada por varios sucesos entre los que destacan las guerras mundiales durante las cuales E.U. eligió a San Diego como base militar y naval, atrayendo población y conservando grandes áreas con vegetación natural; la suburbanización, producto de una búsqueda de mejorar la calidad de vida y fomentada por políticas federales, la construcción de carreteras y los menores impuestos cobrados en las zonas rurales; y el aumento de la conciencia ambiental que provocó la aplicación de fuertes políticas de conservación y la creación de muchas áreas naturales protegidas.

Aunque el enfoque del presente trabajo no es hidrográfico, cabe mencionar que al ser la CRT una zona semiárida, mucho se ha discutido sobre la presión ejercida

sobre el recurso agua. Por lo mismo, se infiere que su abastecimiento puede llegar a determinar el crecimiento urbano (citas). El estudio y análisis de la historia del uso del suelo y su distribución espacial en la CRT, demuestra que existe cierto grado de relación espacial entre la agricultura de riego y la disponibilidad o localización de los cursos de agua o mantos acuíferos, especialmente del lado mexicano. La agricultura de temporal, por otro lado, depende más de la lluvia cuya disponibilidad varía temporal y espacialmente. Por último, según esta investigación, no existen indicios de que históricamente el crecimiento urbano hubiera estado determinado espacialmente por la disponibilidad de este recurso. De hecho, el abastecimiento de agua de Tijuana, la ciudad más grande contenida en la CRT, ha encontrado históricamente diversas fuentes cada vez más lejanas y costosas. Durante los años cincuenta, cuando la población rebasó los 60,000 habitantes, la capacidad de carga hidrológica fue superada. Desde entonces, el abastecimiento de agua siempre ha estado basado en el trasvase del recurso de una cuenca a otra. En la actualidad, sus fuentes de abastecimiento son muy variadas, siendo las más importantes las provenientes de la cuenca del Río Colorado y la acumulada por la propia Cuenca del Río Tijuana en las presas o en aguas subterráneas. La primera es obtenida a un alto costo, dado el gasto energético necesario para su bombeo a más de 1000 metros de altitud. La segunda constituye una fuente ocasional y difícil de predecir, ya que depende de las condiciones climáticas de precipitación. Sin embargo, cuando las presas se llenan, representan un gran ahorro energético y por lo tanto económico para los gobiernos, los cuales pueden destinar los recursos ahorrados para cubrir otras necesidades.

La metodología usada con base en la interpretación de fotografías aéreas e imágenes secuenciales de la cuenca, complementan el panorama histórico de la estructura y cambio de los usos del suelo y de la cobertura vegetal. El análisis de esta información indica que diferentes sistemas sociales, económicos y culturales afectan de forma desigual los patrones de uso de suelo y sus dinámicas de cambio. La relación de los resultados obtenidos en este trabajo, con los modelos de cambio presentados en la sección del marco teórico, así como las diferencias y

similitudes más importantes entre los paisajes de cada cultura, se describen a continuación bajo un orden temático.

Crecimiento urbano

Desde el punto de vista de crecimiento urbano, la dinámica existente dentro de la CRT, coincide con las fases de crecimiento definidas por el modelo de Dietzel *et al.* 2005 y Herold *et al.* (2005), con pocos centros urbanos históricos de partida, hacia un crecimiento con fragmentos aislados, que con el tiempo se incorporan agrandando la mancha urbana central.

Por otro lado, dentro de la CRT las áreas de los polígonos urbanos son casi del mismo tamaño en E.U., mientras que en México los polígonos son grandes y pequeños. Asimismo, la cuenca en su totalidad y en las tres fechas estudiadas, se encuentra en la fase de paisaje heterogéneo de urbano y no urbano que mencionan Dietzel *et al.* (2005) y Herold *et al.* (2005). Sin embargo, si consideramos una regionalización altitudinal, la parte baja de la CRT pasó de un patrón heterogéneo (1972) a lo que podría considerarse como un paisaje homogéneo urbano (2005). Las partes más altas en México y E.U. aún se mantienen homogéneas en la categoría de no urbanas. La parte media, a ambos lados de la frontera, es heterogénea entre urbano y no urbano.

La urbanización se ha dado a través de dos procesos fundamentalmente: una de forma continua, en la cual el crecimiento de Tijuana hacia el oriente y el de Tecate hacia el occidente se erigen en una barrera física que actualmente pone en peligro la continuidad de los ecosistemas entre México y E.U., especialmente la del matorral costero. Y otra de forma esparcida con pequeños ranchos de recreación, ubicados en la parte alta del este de la cuenca, en las áreas del Ejido Colonia Nuevo Hindú, Santa Verónica y el Hongo, en México, y con el desarrollo de suburbios en la parte este de la cuenca sobre territorio de la Reservación India de Campo, en E.U. su desarrollo en forma de pequeñas perforaciones ha provocando la reducción de la superficie de hábitat de interior principalmente en el chaparral.

Los diferentes estilos de crecimiento urbano han aumentado los riesgos de derrumbes, deslaves e inundaciones, del lado Mexicano, y de incendios del lado de E.U. En el caso mexicano principalmente por la ocupación de terrenos sobre pendientes pronunciadas y la eliminación total de vegetación en las mismas; y en el estadounidense por el aumento del perímetro urbano-vegetación natural, dado por el aumento de los suburbios y una fuerte política de conservación de ecosistemas.

En México las pendientes más acusadas y con alto riesgo a la erosión fueron localizadas en altitudes medias en la parte oeste de la cuenca, en donde se distribuye el matorral costero y en donde existe una constante amenaza por invasión urbana.

Existen diferencias que repercuten en la ocupación espacial del territorio, entre una administración descentralizada en E.U. y una centralizada en México. En California la urbanización por suburbios demanda más espacio disperso por lo que los ecosistemas se encuentran más fragmentados que en Baja California. Las políticas públicas en cada país están orientadas hacia sus principales necesidades sociales. En California, debido al alto nivel en la calidad de vida, las políticas incluyen estrategias de conservación, mientras que en Baja California, prevalecen las políticas orientadas a la construcción de infraestructura urbana y de creación de empleo.

En la dinámica de transiciones de uso del suelo y vegetación La principal diferencia entre ambos periodos estudiados, es que mientras en el periodo 1972-1994 el crecimiento urbano se extendió más sobre la vegetación natural, para el periodo 1994-2005 éste ocupó principalmente las áreas de agricultura y pastizales. Es posible entonces que en los límites urbano-rurales se den ciclos en los que primero se remueve la vegetación tal vez con fuego y posteriormente se ocupa el espacio con asentamientos humanos. Sin embargo, esto debe ser estudiado más a fondo.

La dinámica de crecimiento de la ciudad de Tijuana se está transformando de una ocasionada fundamentalmente por grandes asentamientos irregulares, que se apegan espacialmente a la infraestructura y servicios ya establecidos (y que continua en forma de invasión "hormiga") a una en la que se establecen fraccionamientos con

todos los servicios, no necesariamente en los límites de la ciudad, sino en fragmentos aislados.

Coberturas de vegetación natural

Desde la perspectiva de la ecología del paisaje y de la conservación de los ecosistemas, las tendencias de cambio de uso de suelo dentro de la CRT, se manifiestan en todas las formas de procesos espaciales identificadas al nivel mundial (Forman, 1995). En forma resumida el proceso de perforación dispersa se hace aparente con polígonos fundamentalmente urbanos en ambos lados de la frontera. El proceso de disección se conforma mediante la separación de los ecosistemas de E.U. y de México mediante una barrera urbana que se desarrolla a lo largo de la frontera, partiendo a la CRT en dos. La fragmentación y reducción de polígonos se expresa en la agricultura, los pastizales y la vegetación natural, producto del crecimiento urbano disperso, que con el tiempo se traduce en la atrición o desaparición de los mismos.

Cuantitativa y cualitativamente la vegetación sufrió deterioro por actividades ganaderas, en las partes altas de la cuenca, y por desarrollo urbano (ejemplo: el Alamar o el Cerro Colorado) en la parte baja, principalmente del lado Mexicano, y porque en toda la cuenca, continúa la sustitución de la cubierta de vegetación natural por especies exóticas.

Los ecosistemas más amenazados en general son el matorral costero, seguido del matorral de junípero, el chaparral y la pradera de alta montaña. Por otro lado, los que presentan menor amenaza son el Bosque de Jeffrey y luego el mixto. La principal amenaza para el matorral costero y el chaparral es la urbanización y para el matorral de junípero la tala para uso como combustible, la cual no está regulada. En México el grado de amenaza sobre las coberturas vegetales es el mismo que el general, aunque la agricultura de temporal y los pastizales juegan también un papel importante en la deforestación que, sin embargo, a diferencia del desarrollo urbano, es reversible. En E.U., los ecosistemas más amenazados son el chaparral, después

el matorral costero y la vegetación riparia, siendo su principal amenaza la urbanización.

Una diferencia notoria en la dinámica de cambio de uso del suelo y cobertura vegetal entre ambos países, es el proceso de recuperación de vegetación secundaria en la parte mexicana de la cuenca, después de haber sido usada para agricultura de temporal o para pastizales inducidos. Aunque en la parte de E.U. las transiciones hacia vegetación natural también existen, estas son muy reducidas en extensión y muy probablemente sean producto de políticas y proyectos puntuales de restauración.

Cabe resaltar que en el presente trabajo no se incluyeron las carreteras por lo que los resultados de fragmentación están subestimados y por lo que este es un tema al que deberían orientarse futuras investigaciones.

Agricultura y pastizales

En términos generales cuatro aspectos definen la ocupación espacial y dinámica de la agricultura y los pastizales dentro de la CRT.

1. Desde la década de los 70 la agricultura de riego ha tendido a disminuir en ambos lados de la frontera. En E.U. producto de la tecnificación y reorientación hacia la producción de plantas de ornato urbanas y en México por la competencia de espacios para el crecimiento urbano.
2. En la parte mexicana de la CRT las unidades espaciales de agricultura de temporal como consecuencia de prácticas agrícolas tradicionales, varían mucho espacialmente y sólo aparecen cuando hay periodos de mucha precipitación. Las unidades de pastizales surgen cuando los ganaderos usan el fuego para inducirlos (práctica tradicional prohibida legalmente) y también varían mucho espacialmente. Como consecuencia, ambos usos del suelo incrementan la complejidad de la dinámica de cambio de uso de suelo del lado mexicano de la CRT.

3. En ambos países estos usos del suelo parecen constituir los pasos precursores del establecimiento de usos urbanos.
4. Debe resaltarse, además, la influencia de políticas públicas en la determinación de los usos del suelo. Un ejemplo de esto lo constituye el Programa Ganadero aplicado durante la década de los 70 en México, cuya finalidad era abastecer carne a las ciudades. Esta política se reflejó en un notorio aumento de la superficie de pastizales durante esa década.

En términos generales y para finalizar se puede decir que el análisis retrospectivo del uso del suelo revela que el estado actual de la CRT aún permite planificar y monitorear el desarrollo urbano y la conservación de la vegetación natural y la agricultura, orientándolo hacia su sustentabilidad.

VIII. Referencias bibliográficas

- Andren, H. 1994. Effect of habitat fragmentation on birds and mammals in landscape with different proportions of suitable habitat: A review. *Oikos* 71: 355-366.
- Aragón-Arreola, M 1994. *Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la ciudad de Tijuana*, BC. México. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, BC.
- Barret, G.W. 1984. Applied ecology: An integrative paradigm for the 1980's. *Environmental Conservation* 11:319-322.
- Berque, A. 1990. *Médiance. De milieux en paysage*. Reclus, Montpellier. 156p.
- Bocco, G., Mendoza, M. Velásquez, A. y A. Torres. 1999. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas*. 40: 7-21.
- Bocco, G. y R. Sánchez, 1995. Quantifying urban growth using GIS: the case of Tijuana, Mexico (1973-1993). *Geo Info. Syst.* 5(10): 18-19.

- Bocco, G., Sánchez, R. y Reimann, H. 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. *Frontera Norte* 5(10): 53-84.
- Briassoulis, H. 2000. Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. Regional Research Institute. West Virginia University. <http://www.rr.i.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>
- Boyden, S. 1992. *Biohistory: the Interplay between Human Society and the Biosphere-Past and Present*. MAB. Vol. 8. UNESCO-The Parthenon Publishing Group, Paris. 265p.
- Cifaldi, R. L., Allan, J.D., Duh, J.D. & Brown, D.G. 2004. Spatial patterns in land cover of exurbanizing watersheds in southeastern Michigan. *Landscape Urban Planning* 66:107-123.
- Chávez Velazco, G. 1996. Geomorfología de la Cuenca del Río Tijuana aplicada al análisis de uso de suelo a nivel regional. Tesis de Maestría CICESE. 70p.
- De Pablo, C.L., A. Gomez Sal y F.D. Pineda. 1987. Elaboration automatique d'une cartographie écologique et son évaluation avec des paramètres de la théorie de l'information. *L'Espace Géographique* (Francia) 2: 115-128.
- Díaz Pineda, F. y Valenzuela, M. 1989. Los espacios naturales en áreas urbanas y periurbanas. En: Casa de Velásquez (ed.): *Supervivencia de los Espacios Naturales*. Ministerio de. Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid: 335-347.
- Dietzel, C., Herold, M. Hemphill, J.J., y Clarke, K.C. 2005. Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: Empirical links to urban theory. *International Journal of Geographical Information Science* 19(2): 175-195.
- Forman, R.T.T. 1995. *Land Mosaics. The Ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. 632 p.
- Forman R.T.T. y Godron, M. 1981. Patches and structural components for landscape ecology. *BioScience* 31:733-740.
- Forman R.T.T y Godron, M. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons. 619 p.

- Franklin, J.F. y Forman, R.T.T. 1987. Creating landscape patterns by forest cutting: ecological consequences and principles. *Landscape Ecology* 1(1): 5-18.
- Gómez, D. 1995. *Ordenación del territorio*. Coedita Agrícola e Instituto Geominero de España, Madrid, España. 237 p.
- González Bernáldez, F. 1981. *Ecología y Paisaje*. Editorial Blume. Barcelona. 250 p.
- Harris, L. D. 1984. *The fragmented forest: Island Biogeography*. Theory and the Preservation of Biotic Diversity. University of Chicago Press. Chicago. 211p.
- Herold, M., Hemphill, J. Dietzel, C. y Clarke, K.C. 2005: Remote sensing derived mapping to support urban growth theory. – *Proceedings of URS2005 conference*. Phoenix, AZ, March 2005.
- Herzog, L. 1990. *Where North Meets South. Cities, Space and Politics on the U.S.-Mexico Border*. Center for Mexican American Studies. University of Texas, Austin, Texas.
- Hunter, M.L., Jacobson, G.L. y Webb, T. 1988. Paleoecology and the coarse filter approach to maintaining biodiversity. *Conservation Biology* 2: 375-385.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). 2000. *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. INEGI, Aguascalientes, México.
- INEGI. 2006. *II Conteo Nacional de Población y Vivienda 2005*. INEGI. Aguascalientes, México.
- Iverson, L.R. 1988. Land-use changes in Illinois, U.S.A.: The influence of landscape attributes on current and historic land use. *Landscape Ecology* 2(1): 45-61.
- Kienast, F. 1993. Analysis of historic landscape patterns with a Geographical Information System -a methodological outline. *Landscape Ecology* 8(2): 103-118.
- King, A.W. 1999. Hierarchy theory and the landscape...level? Or words do matter. En: Soulé, M.E. y J. Terborgh. 1999. *Continental Conservation. Scientific Foundations of Regional Reserve Networks*. Island Press, USA. Pp. 6-9.

- Krummel, J.R., Gardner, R.H., Sugihara, G., O'Neill, R.V. y Coleman, P.R. 1987. Landscape pattern in a disturbed environment. *Oikos* 48: 321-324.
- Lawrence, R.J. 2005. What is human ecology? Commonwealth human ecology council. 23p. www.chec-hq.org/fileadmin/What_is_Human_Ecology.pdf
- Li, H. y Reynolds, J.F. 1993. A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology* 8(3): 155-162.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M. y E. Duhau. 2001. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico. *Landscape and urban planning* 55:271-285.
- Luck, M. y Wu, J. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona USA. *Landscape Ecology* 17: 327-339.
- Mas, J., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, R., Mayorga-Saucedo, T., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. y Pérez-Vega, A. 2004. Assessing land use/cover changes/nation wide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of applied earth observation and geoinformation* 5(2004): 249-261.
- Mass, M. y Martínez, Y. 1990. Los Ecosistemas: Definición, origen e importancia del concepto. En: *Ciencias* Número Especial 4:10-20.
- Margules, C. 1999. Conservation planning at the landscape level. En: Wiens, J. y M. Moss. (eds). 1999. *Issues in Landscape Ecology*. Fifth World Congress. Snowmass Village, Colorado, USA. Pp.83-87.
- Medley, K.E., Okey, B.W. Barret, G.W. Lucas, M.F. y Renwick W.H. 1995. Landscape change with agricultural intensification in a rural watershed, southwestern Ohio, U.S.A. *Landscape Ecology* 10(3): 161-176.
- Meléndez, S. 2002. La historia ambiental: aportes interdisciplinarios y balance crítico desde América Latina. Cuadernos digitales: Publicación electrónica en historia, archivística y estudios sociales 17(19): 1-48. ISSN: 1409-4681 Costa Rica. <http://www.fcs.ucr.ac.cr/~historia/cuadernos/a-historia.htm>

- Minnich, R.A. 1983. Fire mosaics in southern California and Northern Baja California. *Science* 219: 1287-1294.
- Morin, E. 2002. *El Método*. Quinta edición. Cátedra-Teorema, Madrid, España. 543 p.
- Myers, N., Mittermeier, R.A. Mittermeier, C.G. da Fonseca G.A. y Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- Riemann H. y Ezcurra, E. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico. *Biological Conservation* 122:141-150.
- Naveh, Z. y Lieberman, A.S. 1990. *Landscape Ecology. Theory and application*. Springer-Verlag. 356 p.
- Noss, R. F. 1996. 36. Conservation of biodiversity at the landscape level. In: Szaro, R. C. y Johnston D.W. *Biodiversity in managed landscapes. Theory and practice*. Oxford University Press. New York. Pp. 574-589.
- Ot'ahel', Ján. 1999. The political-economic dimension of landscape ecology. En: Wiens, J.A. y M.R. Moss. (eds). *Issues in Landscape Ecology. Fifth World Congress*. Snowmass Village, Colorado, US..Pp. 134-137.
- Pan, D., Domon, G. Domon S. y Bouchard, A. 1999. Temporal (1958-1993) and spatial pattern of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Landscape Ecology* 14:35-52.
- Peck, S. 1998. *Planning for biodiversity. Issues and examples*. Island Press. 221 p.
- Ribas, V. 1992. Análisis y diagnóstico. En: Bolos, M. (coord.). 1992. *Manual de ciencia del paisaje, teoría, métodos y aplicaciones*. Editorial Masson, S.A. Barcelona, España. 127 p.
- Rescia, A.J., Schmitz, M.F., Martín de Agar, P, de Pablo, C.L., Autari, J.A. y Pineda, F.D. 1994. Influence of landscape complexity and land management on woody plant diversity in northern Spain. *Journal of Vegetation Science* 5: 505-516.

- Rescia, A.J., Schmitz, M.F., Martín de Agar, P, de Pablo, C.L., y Pineda, F.D. 1995. Ascribing plant diversity values to historical changes in landscape: a methodological approach. *Landscape and Urban Planning* 31: 181-194.
- Riemann H. y Ezcurra, E. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico. *Biological Conservation*. 122:141-150.
- Risser, P.G. 1991. 1. Landscape ecology: The State of the art. En: Turner, M.G. (ed.). *Landscape heterogeneity and disturbance*. Springer-Verlag. Pp. 3-14.
- Risser, P.G., Karr, J.R. y Forman, R.T.T. 1984. *Landscape ecology: directions and approaches*. Special Publication no.2. Champaign: Illinois Natural History Survey.
- Rosete, F. y G. Bocco. 1999. Ordenamiento territorial. Bases conceptuales y estrategias de aplicación en México. *Geografía Agrícola* 28:21-39.
- Ruiz, J. 1993. *El Paisaje y el cosmos*. Quercus no.88: 11-13.
- Salinas, E. 2004. Geografía física y ordenamiento territorial en Cuba. III Seminario Latinoamericano de Geografía Física. Red Latinoamericana de Información en Ordenamiento Territorial. 29 de abril del 2004. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- San Diego Association of Governments (SANDAG). 2006. Data Warehouse. SANDAG, San Diego, CA. <http://datawarehouse.sandag.org/>
- San Diego State University (SDSU) & Colegio de la Frontera Norte (COLEF). 2005. *Tijuana River Watershed Atlas*. SDSU & COLEF. San Diego University Press. Institute for Regional Studies of the Californias. San Diego, California.
- Sauer, C. O. 1925. The morphology of Landscape. En: Leighly, J. (ed.). *Land and Life. A selection from the writings of Carl Ortwin Sauer*. University of California Press, Berkeley y Los Angeles, EE.UU. Pp. 315-350.
- Saunders, D.A, Hobbs, R.J. y Margules, C.R. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology* 5(1): 18-32.

- Seto, K. y Fragkias, M. 2005. Quantifying spatiotemporal patterns of land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecology* 20: 871-888.
- Soulé, M.E., Alberts, A.C. y Bolger, D.T. 1992. The effects of habitat fragmentation on chaparral plants and vertebrates. *Oikos* 63:39-47.
- Syphard, A.D., Clarke, K.C. y Franklin, J. 2005. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in Southern California. *Ecological Complexity* 2: 185-203.
- Toledo, A. 2006. *Agua, hombre y paisaje*. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. 260p.
- Tudela, F. 1991. Usos del suelo, vivienda y medio ambiente. En: Schteingart, M. (coord.). *Espacio y Vivienda en la Ciudad de México*. El Colegio de México. CEDDU. 1ra Asamblea de Representantes del DF. pp. 203-222.
- Thomas, W.L. (ed.). con la colaboración de Sauer, C.O., Bates, M. y Mumford, L. 1956. En: W. Thomas (ed.). *Man's Role in Changing the Face of the Earth*. The University of Chicago Press, Chicago. E.U. 1193p.
- Troll, C. 2003. Ecología del paisaje. *Gaceta Ecológica (INE-SEMARNAT)*: 68:71-84.
- Turner, M.G. 1987. Spatial simulation of landscape changes in Georgia comparison of 3 transitional models. *Landscape Ecology* 1(1): 29-36.
- Turner, M.G. 1990. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology* 4(1): 21-30.
- Turner, M.G. y Rischer, C.L. 1988. Changes in landscape patterns in Georgia, U.S.A. *Landscape Ecology* 1(4): 241-251.
- Van Dorp, D. y Opdam, P.F.M. 1987. Effects of patch size, isolation and regional abundance on forest bird communities. *Landscape Ecology* 1(1): 59-73.
- Verburg, P.H., Schot, P., Dijst, M. y A. Veldkamp. 2004. Land use change modeling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61(4): 309-325.

- White, I.D. 2002. *Landscape and History since 1500*. Reaktion Books, Londres, Reino Unido. 252 p.
- Whittaker, R.H. 1972. *Communities and Ecosystems*. Second Edition. Macmillan, New York. 385p.
- Wiens, J.A. 1999. Towards a unified landscape ecology. En: Wiens, J. y Moss, M.R. (eds.). *Issues in Landscape Ecology*. Fifth World Congress. Snowmass Village, Colorado, USA. Pp. 148-151.
- With, K.A. 1999. Landscape conservation: new paradigm for the conservation of biodiversity. En: Wiens, J.A. y Moss, M.R. (eds). *Issues in Landscape Ecology*. Fifth World Congress. Snowmass Village, Colorado, USA. Pp. 78-82
- Wilcove, D.S., Mclellan, C.H. y Dobson, P. 1986. Habitat fragmentation in the temperate zone. En: Soulé, M.E. (ed.). *Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass. Pp. 237-256.
- Yang, X. y C.P. Lo. 2003. Modeling urban growth and landscape change in the Atlanta metropolitan area. *Int. J. Geographical Information Science* 17(5): 463-488
- Zonneveld, I.S. 1989. The land unit. A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology* 2: 67-89.

La Cuenca Binacional Del Río Tijuana: Un Enfoque Biohistórico

Lina Ojeda Revah

Investigadora.

Departamento de Estudios Urbanos y de Medio Ambiente.

El Colegio de la Frontera Norte.

Km. 18.5 carretera Tijuana-Ensenada. San Antonio del Mar. Tijuana, Baja California, México.

Maestra en Ciencias (actualmente cursando Doctorado)

Tel. 01(664) 631 63 00.

lojeda@colef.mx

Ileana Espejel

Doctora en Ciencias

Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California.

Profesora de tiempo completo.

Km 106 carretera Tijuana-Ensenada, Baja California, México. CP 22800.

Tel. 01(646) 174 4560.

ileana@uabc.mx; iespejel@gmail.com

La Cuenca Binacional Del Río Tijuana: Un Enfoque Biohistórico

Resumen

La Cuenca del Río Tijuana, por su carácter binacional (México-Estados Unidos), permite contrastar dos formas de apropiación del espacio en una unidad física homogénea pero socioeconómicamente muy diferente. Históricamente, el crecimiento de la población ha estado ligado a migraciones, más que a un crecimiento natural, y determinado fundamentalmente por eventos económicos ligados a Estados Unidos. El patrón de usos del suelo es diferente en cada país. En México el acelerado crecimiento de la población, sin la inversión en infraestructura, configuró un patrón urbano más compacto y aumento en las zonas de riesgos a inundaciones, derrumbes y deslaves. En Estados Unidos el crecimiento, aunque también acelerado, se hizo a la par de una fuerte inversión en infraestructura, con un patrón urbano más disperso que derivó en una gran interfase urbana en una matriz de vegetación que naturalmente esta sujeta a incendios.

Abstract

The binational Tijuana River Watershed (Mexico-United States) is an excellent study area of two contrasting land management patterns within a single, homogenous physical unit, which differ socioeconomically. Historically, economic events in the United States and migration rather than natural growth have been the source of population growth. Land-use patterns differ in each country. In Mexico, rapid population growth and poor infrastructure created a more compact urban pattern, but also an increase in floods and landslides. In the United States a rapid population growth occurred with an outstanding investment in the infrastructure, but with a suburban pattern that created a matrix of suburban areas intermingled with natural vegetation naturally prone to wildfire.

Palabras clave: Cuenca del Río Tijuana, uso del suelo, biohistoria, frontera, urbanización.

INTRODUCCIÓN

Las referencias históricas son de gran utilidad para seguir la cronología y localización de los impactos humanos (Meyer y Turner II, 1990). Las formas de apropiación y modificación que ha ejercido el hombre sobre la naturaleza se han analizado mediante una recuperación de los procesos históricos a través de lo que se ha denominado "biohistoria" (Boyden, 1992). Espacialmente, los límites de las cuencas son ideales para analizar la historia de los paisajes naturales y culturales y sus cambios en el tiempo (Shugart, 1998), ya que son unidades ecosistémicas con características físicas homogéneas, en las que se pueden contrastar formas de apropiación y transformación de la naturaleza, integrar las fuerzas que les dieron lugar y sus consecuencias ambientales. La estimación de las poblaciones humanas es una de las piezas más confiables, con todo y no ser muy precisas (Lepart y Debussche, 1992) en las fuentes de documentación histórica. Las fotografías aéreas e imágenes de satélite y las estadísticas de población pueden ser usadas para ligar la dinámica de ocupación territorial a la transformación de los paisajes, al nivel mundial (Meyer y Turner II, 1990) o al regional (Webster y Bahre, 2001).

En particular, la Cuenca del Río Tijuana es un área singular, tanto ambiental como socialmente, que comparten México y Estados Unidos (EU). Desde una perspectiva ambiental presenta un clima de tipo mediterráneo, que ha dado origen a comunidades naturales únicas en Norteamérica. Social y económicamente, se trata de una región fronteriza, en donde conviven dos culturas muy diferentes. En este entorno, ambos países han transformado al paisaje en un lapso de tiempo muy corto y de forma diferente (Figura 1).

Los análisis regionales históricos permiten visualizar las transformaciones ambientales integradamente con las fuerzas que directamente les dieron lugar. La cuenca hidrográfica del Río Tijuana, como unidad ecosistémica, provee un contexto significativo y manejable para analizar los cambios, ya que son unidades con ambientes físicos homogéneos en los que se pueden contrastar las diversas formas de apropiación de la naturaleza y sus consecuencias ambientales.

A pesar de ser una cuenca semiárida, con recursos hídricos limitados, en ella se han desarrollado grandes centros urbanos. Conforme éstos han crecido, la demanda de agua ha aumentado, rebasando la capacidad de abastecimiento de las fuentes originales y grandes inversiones y tecnología han permitido su transferencia desde cuencas más lejanas (Michel, 2002). Aunque siempre fue un factor de preocupación, el agua no parece haber sido determinante del uso urbano. La complejidad de la historia del uso y manejo del agua en la región, merece una atención particular, que el presente artículo no incluye.

El trabajo forma parte de un estudio en el que con fotos aéreas de la Cuenca del Río Tijuana de 1953(56), 1970(72) y 1994, se construyeron mapas de tipos de vegetación y usos del suelo en un sistema de información geográfica, con el que se realizó un análisis espacial retrospectivo de los cambios ocurridos y descritos por Ojeda (1999 y 2002) y Ojeda, *et al*, (en revisión) El presente artículo constituye una fase inicial basada en una revisión bibliográfica y en estadísticas de población, relacionadas con los resultados de la fotointerpretación, y tiene como objetivo relatar los cambios ocurridos en la Cuenca del Río Tijuana, identificando las principales variables que los impulsaron y sus consecuencias espaciales. El estudio se realiza bajo los modelos conceptuales de la biohistoria, y del ecosistema urbano, consistente en un sistema geográfico compuesto por tres subsistemas, el natural, el social y el construido (Herzog, 1990). Dado que el sistema es muy complejo, se considera particularmente la variable espacial (subsistema natural), la población y las políticas públicas (subsistema social) y los usos del suelo -urbano, agrícola y pastizales- (subsistema construido). Aunque el interés particular se centra sobre la Cuenca del Río Tijuana, mucha de la

información citada se refiere a las ciudades de Tijuana y San Diego, no solo porque estas han rebasado las fronteras de la cuenca, sino porque su desarrollo ha influido los cambios mas trascendentes de la cuenca.

El entorno natural de la Cuenca del Río Tijuana

La cuenca del río Tijuana se ubica en el ángulo que forma la línea internacional entre México y EU y el Océano Pacífico. La región abarca 4,450 km² de los cuales, cerca de dos terceras partes se encuentran dentro del territorio mexicano (Figura 1). Las mayores elevaciones se localizan en el extremo noreste, en el condado de San Diego, California donde se alcanza una altura de 1,964 metros sobre el nivel del mar (msnm). En la parte mexicana la mayor altitud de 1,850 msnm, se ubica en el extremo sureste, en la Sierra de Juárez. Casi toda la cuenca es montañosa y con una topografía accidentada. La desembocadura de las corrientes intermitentes drena hacia el Océano Pacífico del lado de EU. Se trata de una zona semiárida, con precipitaciones anuales que varían entre los 150 y los 500 mm anuales y con temperaturas medias anuales de ente 10 y 16° C, siendo las partes más altas las más húmedas y frías y viceversa (SDSU y COLEF, 2005).

La cuenca esta cubierta por diversos tipos de vegetación. En las partes más elevadas del norte se localizan los bosques (mixtos y de pino); en las grandes altitudes del sur habita el matorral de junípero y las praderas de alta montaña en las planicies altas de toda la cuenca. El chaparral es el tipo de vegetación mas extendido, se distribuye entre los 700 y los 1200 msnm, seguido del matorral costero, el cual generalmente habita por debajo de los 900 msnm. La vegetación riparia, flanqueando los cauces de arroyos, varía su extensión proporcionalmente a las corrientes de agua. Los usos del suelo se concentran principalmente en los valles y áreas planas (SDSU y COLEF, 2005).

La cultura prehispánica

Los primeros pobladores de la cuenca afectaron fuertemente su entorno con presiones de fuego y de colecta sobre especies de flora y fauna, pero parecen haber estado en un equilibrio dinámico por más de un milenio (Blackburn y Anderson, 1993)¹. Por el uso del fuego, es posible que hayan desarrollado el paisaje más humanizado que cualquier sociedad no agrícola haya creado (Aschmann, 1973).

Las culturas paleoindígenas o prehistóricas de San Dieguito y La Jolla dejaron restos del uso de recursos marinos y costeros en los litorales donde desemboca la cuenca, conocidos como "concheros" (Treganza, 1947; Rogers, 1945, 1966).

La primera cultura que habitó en el área fue la de los Kumiai, extendiéndose desde Torrey Pine en California, hasta Baja California (BC). Las evidencias sugieren su presencia en el Valle del Río Tijuana en tiempos de la llegada de los españoles (Shipek, 1969, 1993). Eran seminómadas y vivían en chozas hechas de ramas que abandonaban con el cambio de estaciones. Se procuraban sustento con base en la recolección, la caza o la pesca (Piñera y Ortiz, 1985). Modificaban al paisaje, con métodos de manejo de suelo, labranza (usaban ramas para cavar, cosechar bulbos y tubérculos, aflojar el suelo para propagar plantas y mejorar las cosechas) y uso del fuego. Usaban ramas para cavar, cosechar bulbos y tubérculos, aflojar y airear el suelo así como para propagar plantas mejorando las cosechas subsecuentes. Aparentemente el fuego era usado para manipular la arquitectura de arbustos, aumentar la reproducción de pastos y mejorar el acceso a las áreas de cosecha y de forraje para animales de caza (Barbour *et al*, 1993). Las versiones sobre los efectos de los incendios varían desde un régimen muy amplio provocado por rayos y la contribución ocasional de una hoguera de campamento, hasta un patrón deliberado de manejo de paisaje (Minnich, 1988).

¹ Esto autores compilan una serie de artículos detallados sobre el manejo ambiental de los nativos californianos al norte de la cuenca, pero que debieron ser muy similares al manejo de chaparrales y bosques del sur, como lo señala especialmente Florence Shipek para los Kumeyaay.

Los Kumiai se organizaban por clanes o bandas de familias extensas conocidas como sh'mules los cuales aprovechaban o usufructuaban determinados territorios tradicionales y en ocasiones compartían con grupos más grandes arboledas, veredas, áreas de reunión, de caza, ceremoniales o religiosas (Dep. of Landscape Architecture, 1989). Mantuvieron interacciones con tribus aledañas, a través de una extensa red de intercambio de bienes e información de diversas zonas ecológicas al este hasta el Río Colorado (Luomala, 1978).

El encuentro de dos mundos

Durante el periodo de la colonia, los cambios sobre el paisaje se hicieron más acusados. A las modificaciones ya impresas sobre la naturaleza por la forma de vida de los indígenas, con una extracción no intensiva en amplias zonas, se añadieron aquellas ocasionadas por la vida misional con otro tipo de perturbaciones y sobre otros recursos, con una extracción más intensiva y sobre zonas más reducidas, al introducir la agricultura y la ganadería. Dada la escasa población, las modificaciones creadas sobre el paisaje no pueden ser consideradas de gran magnitud, a excepción de la introducción de especies exóticas -especialmente en los pastizales inducidos por la ganadería-, y la transformación de áreas originalmente ocupadas por matorral costero en campos agrícolas.

Las características geográficas de la península de Baja California ejercieron una gran influencia sobre su historia: "Su ubicación, separada del macizo continental del país, contribuyó a retardar el asentamiento de los españoles en ella y su aridez, fue un factor limitante para el desarrollo de conglomerados humanos y originó prácticas especiales en la agricultura y la ganadería, condicionando las dimensiones de los predios utilizados, pequeños para los cultivos, enormes para la ganadería" (Piñera, 1991).

Las primeras noticias del establecimiento de los españoles en la región están registradas en los diarios de los misioneros franciscanos Junípero Serra y Juan Crespi, quienes en una expedición terrestre en 1769 fundaron en la Bahía de San

Diego la primera misión en la Alta California. Sus descripciones del Valle del Río Tijuana son muy detalladas. La Cañada El Matadero (Smuggler's Gulch) ha sido identificado como la entrada al valle de Fray Junípero Serra, mientras que el punto de entrada de Fray Juan Crespi fue más al oeste. Este último, se instaló en la parte sur del valle, cerca de un pueblo y lo describió como "*una gran planicie de buena tierra, con mucho pasto verde... donde teníamos agua buena... Aunque la leña es escasa, las montañas que no están lejos, la tienen en abundancia*" (Crespi, 1927). El Padre Serra describe el lado norte del valle: "*A corta distancia de cerca de una hora de camino, observamos que el campo no solo eran buenos pastizales, sino que también tenía un río agradable de agua buena*" (Serra, 1955).

Al llegar al noroeste de la península, los misioneros se encontraron con un entorno que en gran medida se asemejaba al de su tierra de origen: la Península Ibérica. La incorporación de los indígenas a las labores del campo les permitió conocer el entorno natural y desarrollar formas de apropiación de los recursos semejantes a las que ellos usaban antes, esto es sistemas agropastoriles.

Con el desarrollo de la ganadería y la agricultura se iniciaron una serie de transformaciones en el paisaje que afectaron especialmente a los ecosistemas riparios, al matorral costero y a los pastizales. De esta época data la llegada a la región, de al menos tres plantas exóticas y las primeras 200 cabezas de ganado, comenzando una larga historia de introducción de especies no nativas, que para 1993 se calcula que eran 1,023 (Barbour *et al*, 1993).

La ganadería extensiva e itinerante realizada entonces, es la misma que se practica en nuestros días en la Sierras de Juárez y de San Pedro Mártir. Durante la temporada de lluvias, el ganado se alimentaba de las hierbas del matorral costero, de pastizales y de forrajes cultivados, y en la temporada seca era conducido a las praderas de las montañas (Meling-Pompa, 1991). Esta actividad provocó que los pastizales nativos fueran sustituidos por pastos europeos (Minnich, 1983) y, posiblemente, que el matorral costero se tornara más atractivo para el ganado al producir la remoción selectiva de algunos arbustos, al promoverse el crecimiento de especies más palatables (Minnich y Franco-Vizcaino, 1998).

Si bien posiblemente los Kumiai influyeron en la distribución del matorral costero, fueron los europeos los que causaron su reducción, debido a que su distribución cubría las tierras bajas, relativamente fértiles (Aschmann, 1973). Sobre estas áreas, los misioneros cultivaron principalmente maíz, trigo y legumbres y cazaron venados, conejos y otros animales de la región (Santiago, 2002). Otros usos de recursos incluyeron al matorral de *Juniperus* en las minas y como combustible para calentar y cocinar (Minnich y Franco-Vizcaino, 1998) y los alisos de las zonas riparias para fabricar ruedas de carretas (Faber y Holland, 1988).

En este periodo las prácticas de uso de incendios fueron tan generalizadas que el gobierno de Arillaga en 1789, pidió a los ciudadanos castigar a quienes prendieran fuego (Minnich, 1988).

Los grandes cambios (siglo XIX)

El siglo XIX se definió por la colonización de tierras, una actividad ganadera ampliamente extendida, pero sobre todo por el comienzo de dos historias muy diferentes (EU y México), pero con consecuencias mutuamente dependientes.

Una vez establecida la misión de San Diego, el Valle del Río Tijuana se convirtió en un campo básicamente ganadero. Entre las rancherías indígenas que pertenecían a la misión de San Diego, figuraba la de Tía Juana, de la que hay constancia desde 1809 (Piñera, 1991).

Con la formación de un México independiente, en 1822 comenzó en la península una política colonizadora mediante disposiciones legales que dieron el carácter de nacionales a los terrenos baldíos. De los primeros cambios que se registraron con estas disposiciones dentro de la cuenca, destaca la concesión de 4,500 hectáreas otorgada a José Bandini a lo largo del arroyo Tecate en 1829 y el título de propiedad de 10,000 hectáreas expedido en 1833 a Santiago Argüello en el valle del río Tijuana (Aguirre, 1987). Otras concesiones incluyeron dos ranchos más pequeños (San Ysidro y Jesús María) y el Rancho Milijó concesionado a Emigdio Ygnacio Argüello, (Piñera y Ortiz, 1985). Las rancherías establecidas de esta

forma cobraron importancia por su cercanía con San Diego, a donde vendían su producción ganadera, incorporándose en el comercio con barcos extranjeros (Piñera y Ortiz, 1985).

Al firmarse el Tratado de Guadalupe Hidalgo en 1848, se crearon nuevos límites entre México y EU, quedando la cuenca dividida en dos y se inician dos historias diferentes en la modificación del paisaje. La del lado de EU, que se manifiesta con la incorporación de los recursos naturales a una economía de alto nivel de desarrollo, y la que se da en el lado mexicano, en la que por su aislamiento del centro del país y el poblamiento disperso, la modificación antrópica del paisaje fue poco significativa.

Durante este periodo, la fiebre del oro y la apertura de valles agrícolas fomentaron la migración masiva desde el este de EU y otros países (de Asia y Europa) y el valle se convirtió en un territorio de bandoleros, robo de ganado y contrabando (Piñera y Ortiz, 1985).

El sistema de reservaciones (concesiones de tierra) fue implantado después de la firma de este Tratado. La implementación de las políticas de reubicación y reeducación de los pueblos indígenas por parte del gobierno de los Estados Unidos, posteriores a las “guerras indias” de exterminio desplazó a los Kumiai (Department of Landscape Architecture, 1989). Por su parte, el sistema misional y las concesiones de grandes extensiones de tierra propiciaron el que algunos clanes indígenas se refugiaron en las sierras y desiertos y se rebelaran constantemente siendo reprimidos por los soldados de los presidios de San Diego, San Vicente o Guadalupe.

Para mediados de los cincuenta, el paisaje se transformó por el inicio de la tecnificación agrícola. La producción de trigo se extendió, superándose la demanda local, por lo que la producción excedente comenzó a exportarse (Olmstead y Rhode, 2004). Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX, ambos lados de la frontera sufrieron un periodo de desatención política y económica, ya que en EU estalló la guerra civil y México atravesó por un periodo

de aguda inestabilidad económica y conflictos internos (Canales, 1996) que desembocaron en la Intervención francesa.

A pesar de esto, después de 1850, la ganadería creció en BC por el aumento en el mercado de carne por la fiebre del oro. En 1857 existían 43 ranchos con 8,620 cabezas. Inclusive los norteamericanos conducían su ganado por las cordilleras de Mexico (Minnich y Franco, 1998). A principios de los sesenta la municipalidad de la Frontera contaba con pequeños ranchos en las antiguas misiones. Habitaban en ella 184 criollos y mestizos y 3,697 indios (principalmente *Yumas*²) (Piñera, 1991). El Rancho de la Tía Juana poseía en 1872, 900 reses y 500 caballos (Aguirre, 1987). Pero en la década de 1860, una serie de inundaciones y sequías devastó a la ganadería, misma que hasta 1870 volvió a recobrase reorientándose hacia la cría de borregos (Olmstead y Rhode, 2004).

El origen de la actual ciudad de San Diego data de 1867³, cuando Alonzo Horton compró 404 hectáreas de tierra junto al mar. Su crecimiento y desarrollo se basó en una economía principalmente de bienes y raíces, impulsada por el tren que conectaba con el este y en el descubrimiento de oro en el área de Julian en 1870 (Mills, 1967).

Hacia 1870, con el *Porfiriato*, la política de conquista territorial de EU hacia México cambió por una de penetración financiera; en BC ésta nueva estrategia se orientó hacia la urbanización (Piñera, 1991). De esta época (1876), data la fundación de la colonia agrícola de Tecate, constituyendo la población más grande de la época del lado mexicano, teniendo como actividades principales a la ya establecida ganadería y a la minería impulsada por la fiebre del oro y el descubrimiento de diversos filones (Santiago, 2002).

² Con este término se referían los misioneros, colonos y rancheros a los indígenas de la región del delta del Colorado, aunque ocasionalmente también lo usaban para el resto de los indígenas de filiación lingüística yumana (kumiai, paipai, cucapá, kiliwa, quechan, etc.).

³ Para los estadounidenses la fundación de San Diego es 1867, para los mexicanos es 1769, cien años de diferencia, lo importante es no perder de vista que el origen de varios poblados fue la fundación de los sitios misionales los cuales, al ser secularizados o abandonados, fueron dados en concesión para establecer ranchos, rancherías y, posteriormente, pueblos y ciudades. ver María del Amparo Ruiz de Burton y Juan Bandini en [www.San Diego Historical Society](http://www.SanDiegoHistoricalSociety.org).

En 1882 el ferrocarril que ya había unido el norte de California con el resto de EU, llegó a San Diego. Su presencia provocó grandes migraciones desde el este y especulación sobre las tierras californianas, misma que se extendió hasta Baja California. Un año después, debido a la promulgación de la *Ley de Colonización en México*, gran parte de la península quedó en manos de extranjeros, quienes abrieron nuevas tierras agrícolas y centros de población a través de fraccionamientos (Piñera, 1991). En esta época, los Argüello comenzaron a fraccionar parte del Rancho Tía Juana. Sin embargo, como en 1889 la compra-venta de terreno se suspendió y los precios se desplomaron, Tijuana creció lentamente (Piñera y Ortiz, 1985b).

En 1886, el área de Tijuana fue descrita por Orcutt (1886) como extensos campos de fragmentos alternados de flores silvestres. Sin embargo, según Minnich y Franco-Vizcaino (1998), debido a que los viajes de Orcutt tuvieron lugar después de la segunda ola de entrada de especies exóticas, fueron éstas las que muy probablemente conformaban sus descripciones. De hecho, Orcutt no mencionó la presencia de pastos nativos y para esta época la agricultura de temporal de avena y trigo ya se había extendido en el Valle de Tijuana modificando la composición florística del área (Minnich y Franco-Vizcaino, 1998).

En 1889 inicia oficialmente la formación urbana de Tijuana al otorgarse un permiso para fundar la Villa Zaragoza. Gran parte del valle mantuvo actividades ganaderas durante casi todo el siglo XIX, ya que San Diego se había convertido en un mercado principal de curtidos y sebos. Sin embargo, en el sur de California, después de 1880, la agricultura comenzó a sobrepasar a la ganadería, favorecida por la presencia del ferrocarril y por el acceso al mercado de EU. Entre 1890 y 1914 la economía de grandes ranchos y producción de granos de California (principalmente trigo) se tornó a una de menor escala, de cultivo de frutos, de riego y de industria de transformación (Olmstead y Rhode, 2004). Aunque la población en la región aumentó, siguió siendo escasa, debido a que el número de indígenas había disminuido fuertemente.

Durante las últimas dos décadas del siglo, el paisaje experimentó una transformación sustancial, tanto por el desarrollo de tecnologías, como por el aumento de la población. En la parte de EU, se modificó el uso del suelo de ganadería a agrícola de riego. En el área de México las actividades comenzaron a transformarse de dependientes de los recursos naturales (ganadería y agricultura), a ser determinadas por procesos económicos, especialmente del sector servicios.

Siglo XX. La Primera guerra mundial y la ley Volstead

En el siglo XX, BC se caracterizó por un gran crecimiento demográfico y un proceso de concentración urbana acelerado. Aunque para 1921 la proporción de población urbana era baja, en 1930 alcanzó el 55%, en 1960 el 72%, en 1980 el 85% (Canales 1996), en 1990 el 91% y para el 2000 el 92% (INEGI, 2005). Este proceso de poblamiento derivó en una apropiación del paisaje rápida, especialmente en las partes bajas y planas de la cuenca, en donde se asienta la ciudad de Tijuana.

Fue a principios de este siglo, cuando se inició el proceso de transformación del uso de suelo, de ganadero y en menor medida agrícola, hacia una forma de apropiación fundamentalmente urbana. Dentro de la cuenca, los patrones de uso, dada su localización fronteriza con EU, estuvieron más determinados por intereses económicos y solución de conflictos políticos, que por las propias limitantes biofísicas de los recursos existentes.

En las primeras décadas del siglo XX hubo cambios en la configuración económica y espacial en ambos lados de la frontera. La terminación del monopolio de la compañía *Commercial Pacific Mail Steamship* en 1905, abrió el puerto de San Diego a todos los barcos mercantes y junto con la apertura de *El Canal de Panamá* en 1914, el área se desarrolló con importantes repercusiones para Tijuana (Piñera y Ortiz, 1985).

El ganado ovino introducido en el siglo XIX se juntaba en agosto, cerca de Tijuana y regresaba en octubre, a veces desde la Sierra San Pedro Mártir (Henderson,

1964), a través de tierras de dominio público o rentadas⁴. Entre 1885 y 1905 se llegó a conducir por esta ruta a casi 30,000 borregos al año, para el mercado de EU (Meling-Pompa, 1991). El pastoreo de borregos se intensificó del lado mexicano en 1910, al ser prohibido en las montañas del sur de California por el *U.S. National Forest* (Minnich, 1988). La agricultura de temporal producía cebada y avena para forraje y cuando la temporada de lluvias era propicia, se cultivaba frijol y maíz (Trava *et al*, 1991).

Con la participación de EU en la primera guerra mundial (1917) y la promulgación de una ley restrictiva se frenó la inmigración europea y asiática y aumentó la demanda de trabajadores mexicanos. En la agricultura se incrementó la producción de algodón (Olmstead y Rhode, 2004). La población norteamericana, impulsada por introducción de la ley seca, decretada en 1919, visitaba Tijuana en busca de diversión, por lo que se desarrollaron los servicios turísticos. Tecate experimentó un desarrollo vertiginoso con el establecimiento de fabricas de whisky y malta (Santiago, 2002). En este contexto, importantes flujos de población del interior del país fueron atraídos hacia la frontera (Canales, 1996). Ese mismo año, se estableció por decreto presidencial, la colonia federal agrícola y ganadera Valle de las Palmas, con una superficie de 17,850 has. (Rodríguez, 1996).

Del lado de EU, San Diego fue elegido sede del Departamento de la División de la Armada, iniciándose con ello una larga historia de establecimiento de campos militares, que demandaron espacio urbano para sus integrantes (Mills, 1967). Campos militares que aún hoy en día conservan grandes extensiones de ecosistemas naturales.

Con la finalidad de resolver el problema de abastecimiento de mercancías a la frontera, dada la falta de comunicaciones con el interior del país, se inició en 1933, la política de zonas libres. Dicha medida tendría un fuerte impacto positivo sobre la economía de Tijuana (Canales, 1996).

⁴ Entre 1885 y 1905 se llegó a conducir casi 30,000 borregos al año, para el mercado de EU (Meling-Pompa, 1991).

En la primera mitad del siglo se inició la construcción de grandes obras de infraestructura como las presas Barret (1919-22) y Morena (ampliada en 1930) en EU; el ferrocarril de Tijuana a Tecate (1909-19) y la Presa Abelardo L. Rodríguez (1936) en México. Paralelamente se inició la Reforma Agraria, con la cual se repartieron las tierras y se empezó a poblar el área (Padilla, 1985) y se abrió el distrito de riego de la Presa Rodríguez, a lo largo de los ríos Tijuana y Alamar (Trava *et al.*, 1991).

La política de zonas libres en Tijuana y la designación de San Diego como sede militar, sirvieron de propulsores económicos durante la década de 1930. Las tasas de crecimiento poblacional fueron de 6.9 y 3.2% respectivamente (INEGI, 2000; SANDAG, 2000), aunque debe considerarse que en esa época San Diego ya rebasaba los 250,000 habitantes, mientras que Tijuana la duplicaba en proporciones de 11,000 a 22,000 habitantes. Asimismo, el ritmo de ocupación territorial de San Diego (333 has./año) fue ocho veces mayor que el de Tijuana (40has./año) (Hiernaux, 1986, Aguilar Méndez, 1992, Gibson, 1998) (Gráfica 1).

Siglo XX. La segunda guerra mundial, la industrialización y el crecimiento urbano

Con la intervención de EU en la Segunda Guerra Mundial (1941-1945), se favoreció una vez más la migración laboral. En San Diego se construyó una importante base militar que benefició a Tijuana con comercio, turismo y mediante la contratación de mano de obra para sostener la producción económica y militar. Esto condujo a la firma de los acuerdos entre México y EU conocidos como *Programa Bracero* (1942-1964) que proveían mano de obra mexicana a la economía de EU (Zenteno y Piñeiro, 1992). Mientras las ciudades crecían, la ganadería comenzó a resurgir, fuera de la producción de leche, tanto en San Diego (Olmstead y Rhode, 2004), como en Baja California (Lorey, 1990) (Gráfica No. 3). La actividad ganadera en los ejidos del norte de Baja California consistía de 2,788 cabezas de ganado vacuno, 1,497 caprinos, 8,006 porcinos y 1,508 equinos (Secretaría de la Economía

Nacional, 1942). Con la actividad generada en la región por la Segunda Guerra Mundial, la década de los cuarenta registró una de las tasas de crecimiento de población históricamente más altas, con 10.8% en Tijuana y 6.6% en San Diego (INEGI, 2000, SANDAG, 2000). Tijuana se extendió espacialmente a un ritmo parecido a la década anterior (40has./año) y San Diego lo redujo a 106.2has./año (Hiernaux, 1986, Aguilar Méndez, 1992, Gibson, 1998) (Gráfica 1).

En los cincuenta la población de San Diego y Tijuana siguió creciendo, incrementando la presión sobre el territorio y Tecate comenzó también a figurar en términos de población y superficie. Se inició entonces un proceso de urbanización-industrialización que desplazó a las actividades primarias como las principales captadoras de mano de obra y de generación de riquezas. También ocasionó la reducción de las áreas de vegetación natural, cediendo su espacio principalmente al desarrollo urbano, a la agricultura y a la ganadería extensiva, ligadas a la demanda del mercado estadounidense.

En EU, la combinación de la política de hipotecas (Housing Administration's Mortgage establecida en 1934), originalmente creada para proteger a los dueños de casas de zonas con poca densidad de población, con facilidades de pago, y el decreto de construcción de carreteras interestatales (Interstate Act, iniciada en 1956), fomentaron la dispersión de la población en suburbios (EPA, 2005) y la agricultura se transformó hacia la producción de viveros de plantas de ornato y flores (Sokolow, 2004). En México, las zonas ganaderas aledañas a Tijuana, cambiaron al cultivo de cereales, hortalizas, vides y frutales al transformarse en *ejidos*. No obstante, una prolongada sequía durante los años cincuenta, obligó a los poseedores de parcelas a venderlas en forma de fraccionamientos (Trava *et al*, 1991). Aparentemente, en esta época aumentó de forma desproporcionada, la cría de cabras (casi 40,000 cabezas) en BC (Henderson, 1964), con el consecuente impacto sobre los ecosistemas (Gráfica 2).

Aunque las tasas de crecimiento de la población disminuyeron, siguieron siendo altas: 9.4% en Tijuana y 6.2% en San Diego (INEGI, 2000, SANDAG, 2000) y el crecimiento espacial de ambas ciudades fue muy diferente. Promovida por la política de

construcción de carreteras en EU, San Diego se expandió a gran escala ocupando 2,409 has/año, mientras que Tijuana mantuvo una ocupación de 121 has/año (Aguilar Méndez, 1992; Gibson, 1998) (Gráfica 1). La urbanización de Tijuana comenzó a rezagarse por presiones de la creciente población que demandaba espacio y aparecieron asentamientos precarios en la periferia (Páez, 2005).

Entre 1940 y 1960, el sector manufacturero de Tijuana se duplicó y aumentó la industria de la construcción, aunque los servicios siguieron siendo más importantes (Zenteno y Cruz, 1992), Tecate estableció industrias cerveceras y vinícolas (Santiago, 2002), se desarrolló la infraestructura de transporte (ferrocarril Sonora-BC y carretera Tijuana-Mexicali, solventando parte del aislamiento de la región con el centro de México, y resurgió la ganadería en ambos lados de la frontera Olmstead y Rhode, 2004 y Lorey, 1990)⁵.

El impulso de las maquiladoras en Tijuana

Posteriormente, la industria estadounidense se reestructuró y con ello culminó el *Programa Bracero* (1964). Miles de trabajadores tuvieron que regresar a México por falta de oportunidades de trabajo en EU y la economía de la frontera fue incapaz de absorberlos. El gobierno mexicano creó entonces el *Programa de la Industrialización de la Frontera* (PIF) en 1965, con el que se permitía a todas las "zonas libres de impuestos" importar materias primas y sin restricciones y crear empresas con 100% de capital extranjero si los productos eran exportados (Zenteno y Cruz, 1992). Como consecuencia de éstas medidas, numerosas plantas, especialmente de ensambladoras o maquiladoras fuertemente integradas con la economía de EU, fueron trasladadas hacia la frontera impulsando la industrialización de la zona (Salas, 1989).

Durante la década de los sesenta continuó en Tijuana el impulso al sector industrial, y se inició otro periodo de construcciones con la canalización del río, la carretera

⁵ La actividad ganadera en los ejidos del norte de Baja California consistía de 2,788 cabezas de ganado vacuno, 1,497 caprinos, 8,006 porcinos y 1,508 equinos (Secretaría de la Economía Nacional, 1942).

transpeninsular y la Presa el Carrizo. Para ésta época, ya sólo el 20% del valle era cultivado (Dedina, 1995). La ganadería de borregos de libre pastoreo disminuyó porque el aumento de la agricultura desalentó la renta de tierras de pastoreo y porque la práctica fue prohibida en 1964 (Meling-Pompa, 1991). Esta década siguió una tendencia hacia la baja en las tasas de crecimiento poblacionales, siendo más notoria en San Diego (2.7%) que en Tijuana (7.2%) (INEGI, 2000, SANDAG, 2000). A pesar de ello, en parte por la inversión en infraestructura en el lecho del Río Tijuana y por el desplazamiento hacia la periferia de los habitantes de esta zona, Tijuana incrementó su ritmo de ocupación del territorio a 408 has/año (Hiernaux, 1986), rebasó los límites del valle y comenzó a ocupar las laderas que la rodeaban, mientras que Tecate creció a 20 ha/año. San Diego por su parte continuó con el impulso de carreteras y suburbanización, y alcanzó una ocupación espacial histórica de 3,225 has/año (Gibson, 1998) (Gráfica 1).

A mediados de los setenta, con la recesión económica en EU, muchas maquiladoras cerraron. La sobrevaloración del peso en esta década provocó que la mano de obra perdiese atractivo en el mercado mundial lo que tuvo un impacto negativo en el desarrollo de Tijuana (Zenteno y Cruz, 1992). A nivel federal en México en 1970, se inició una política de impulso a la ganadería (Programa Nacional Ganadero), cuyo objetivo era abastecer de carne a la población urbana (Challenger, 1988). En Baja California, este programa se reflejó en un aumento explosivo de ganado vacuno, al pasar de 63,044 cabezas en 1950 (Lorey, 1990) a 210,571 en 1980 (INEGI, 1991) y en un aumento del área de pastizales dentro de la cuenca (Gráfica 2 y parte de los fragmentos color amarillo en la Figura 1).

Por estas razones dentro de la cuenca, entre 1970 y 1994, según nuestro análisis, se perdieron cerca 2,500 has de agricultura de riego en la parte de EU, a razón de 102 has/año y los pastizales aparentemente (aunque parte estos pueden ser agricultura en periodo de descanso). Esta información coincide con lo reportado para el Condado de San Diego de pérdida de zonas agrícolas y pastizales de casi 20,000 has entre 1984 y 2002 a razón de poco más de 1,000 has/año, principalmente por desarrollo urbano (California Department of Conservation, 2002). En la superficie

Mexicana de la cuenca, la agricultura de riego estaba concentrada principalmente al Valle de las Palmas y perdió, entre 1972 y 1994, casi 500 ha a razón de casi 23 has/año. Aunque la agricultura de temporal muestra variación en cuanto su extensión, dependiendo de las condiciones climatológicas, nuestros resultados indican que en 1972 existían 7,745 has y para 1994 poco más 8,700 has debido a las lluvias. En resumen, en la cuenca en su conjunto, las agriculturas de riego y de temporal y la ganadería disminuyeron (en 1972 ocupaban casi 9% de la superficie y para 1994 se habían reducido al 7.65%) (Figura 1a, fragmentos color amarillo).

Por otro lado, las tasas de crecimiento de la población de los setenta disminuyeron drásticamente en Tijuana (3%) y aumentaron levemente en San Diego (3.2%) (INEGI, 2000, SANDAG, 2000). Especialmente Tijuana creció a 269has/año (Hiernaux, 1986; Ranfla et al, 1986), rebasando los límites de la cuenca y multiplicando el ya existente rezago en construcción de infraestructura y servicios. Por el contrario, San Diego disminuyó en forma dramática la velocidad de ocupación de su territorio a 80has./año (Gibson, 1998) (Gráficas 1 y 2). El resultado espacial de este crecimiento poblacional concentrado en las tres principales ciudades (San Diego, Tijuana y Tecate) se refleja en la manchas urbana, la cual, dentro de la cuenca creció de 10,524 a 30,806 has entre 1970 y 1994. En la parte Mexicana creció de 6,962 a 22,102 has a razón de 1,262 has/año. Las zonas urbanas más grandes son Tijuana y Tecate. La primera en 1972 concentraba el 78% de su extensión dentro de la cuenca y en 1994, el 87.5%. La segunda esta contenida completamente dentro de la cuenca. El crecimiento urbano en la sección estadounidense de la cuenca, se dio de 3,562 a 8,704 has a razón de 367 has/año. La zona urbana más grande dentro de la cuenca es parte de San Isidro (única considerada dentro de la zona metropolitana de San Diego) que en 1994 abarcaba 3,350 has aproximadamente. Otras zonas urbanas incluyen a Pine Valley y Morena Village) y a muchas de baja densidad (más de 100) (Figura 1b color café).

Durante los ochenta en Tijuana, con la drástica devaluación del peso, los servicios crecieron una vez más, con una contribución mayor a aquella de la industria. La

economía de la maquiladora creció a tasas nunca antes vistas (Zenteno y Cruz, 1992), al pasar de 123 en 1980 a 690 en 1990 (INEGI, 2005) (Gráfica No. 5). Con ello, la población aumentó una vez más a 4.8% (INEGI, 2000), lo que ocasionó una ocupación espacial sin precedente de casi 880 has/año (Ranfla *et al.*, 1986; INEGI, 1990), principalmente sobre áreas con pendientes mayores de 30% e inclusive de 40% (Bringas y Sánchez, 2006). San Diego, aunque disminuyó su crecimiento poblacional a 2.9% (SANDAG, 2000), volvió a aumentar su ocupación territorial a 103 has./año (Gibson, 1998) (Gráfica 1).

Con el Tratado de Libre Comercio (NAFTA), firmado en 1994, México se abrió a corporaciones extranjeras en busca de mano de obra barata. En 2002, NAFTA borró las exenciones especiales de impuestos para maquiladoras. En términos de población, la década de los noventa registró tasas de 4.8% y 1.2% para Tijuana y San Diego respectivamente (INEGI, 2000, SANDAG, 2000). Tijuana creció a un ritmo de 725 has./año y para el 2000 ya se extendía sobre una superficie de 26,045 has (Bringas y Sánchez, 2006, INEGI, 1991). Por el contrario San Diego frenó su crecimiento (SANDAG, 2000) en parte por el inicio de la política de conservación de ecosistemas Multiple Species Conservation Program (MSCP, 2003; Gráfica 1).

Aunque con variaciones a lo largo del tiempo, la densidad de población entre 1950 y 2000, en promedio, siempre fue más elevada en Tijuana que en San Diego, siendo de 42 hab/ha y 12 hab/ha., respectivamente (Gráfica 2). Los patrones de ocupación del espacio, generaron diferentes tipos de riesgos de cada lado de la frontera. Por ejemplo, los incendios en esta región son parte de la dinámica natural que evolutivamente han desarrollado los ecosistemas naturales y requieren de ellos para su permanencia (Keeley, 1984, O'Leary, 1990) (comparación Figura 1a y b, de fragmentos color verde claro).

En California una política de supresión organizada de incendios se inició desde 1900 por una preocupación creciente respecto a la protección de cuencas, ciclos de inundaciones, erosión y daño a la propiedad. La rápida expansión dispersa de San Diego después de la Segunda Guerra Mundial, creó una larga frontera urbana

con ecosistemas naturales, aumentando el riesgo por incendios. Por el contrario, el histórico rezago de urbanización en Tijuana, influyó en la ocupación del territorio más compacta y con menor perímetro entre lo urbano y la vegetación natural que en San Diego (Figura 1b), ya que la población recién integrada busca estar cerca de los servicios. En BC, inclusive hoy en día, los incendios no son controlados y son tradicionalmente provocados por los ganaderos. Según Minnich y Franco-Vizcaíno (2002) el tamaño e intensidad de los incendios es menor que el registrado en San Diego.

A diferencia de San Diego, Tijuana presenta un mayor riesgo a inundaciones, derrumbes y deslaves. Localizada en un valle muy estrecho y con topografía accidentada, y con un crecimiento explosivo de la población y de la maquiladora sin un esquema de planeación, Tijuana se rezagó en la construcción de drenaje y ocupó progresivamente zonas de menor aptitud urbana. Entre 1972 y 1989, la mayor parte del crecimiento se dio sobre pendientes de 20 a 30%, entre 1989 y 1994 sobre pendientes de 30 a 40% y entre 1994-2000 sobre terrenos con 40% de inclinación (Bringas y Sánchez, 2006; Gráfica 1).

CONCLUSIÓN

La biohistoria de la Cuenca del Río Tijuana permite reconocer dos características de la transformación ambiental: a) que es un proceso que invariablemente contiene interacciones humanas y ambientales complejas, donde los usos humanos tienen numerosos impactos sobre la naturaleza cuyas consecuencias pueden revertirse, en diferentes grados, hacia los propios usos de la región y b) las regiones varían mucho según las escalas y los tipos de transformación que hayan sucedido (Turner II, *et al*, 1990; Boyden, 1992). La población en sí y por su número, no necesariamente constituye una causa directa de la degradación ambiental. Es también a través de las modalidades de desarrollo que la población ejerce una acción que deteriora el medio ambiente, al estar determinadas

fundamentalmente por las características de los sistemas productivos y de la ocupación del espacio y no sólo por el número de individuos existentes.

En el caso de la cuenca entre dos países, las causas de la transformación del entorno natural pudieron ser las mismas, pero las transformaciones tienen diferentes expresiones en el uso del suelo como es común en casos estudiados alrededor del mundo (Boyden, 1992; Shugart, 1998).

Las variables que más han determinado la ocupación espacial del hombre en la cuenca, han estado relacionadas con el crecimiento de la población ligado a migraciones, la implementación o ausencia de políticas públicas, ya sea en forma de leyes o de programas (con sus inversiones) y las guerras. En consecuencia se han creado diversos patrones de ocupación del espacio que han generado, además de las externalidades ambientales (problemas de drenaje, contaminación atmosférica, desechos tóxicos) descritas por Herzog (1990), diferentes tipos de riesgos.

La ganadería al ser extensiva, no ha transformado mucho al paisaje espacialmente, salvo en la década de los 70 impulsada por una política federal. Sin embargo, los pastizales parecen constituir una fase previa al desarrollo urbano. La agricultura de riego, por sus requerimientos de infraestructura esta circunscrita a lugares determinados (como el Valle de las Palmas en la porción mexicana de la cuenca). La agricultura de temporal, actividad sólo realizada en México, hace más compleja la dinámica de cambio del paisaje en la cuenca, dado su característica efímera, dependiente de las lluvias y su movilidad espacial. En el aspecto urbano EU ha respondido a las contingencias ambientales provocadas por su crecimiento disperso, crea un programa de reducción de riesgo a incendios vía el aclareo selectivo cerca de las casas y otras medidas de manejo (Gilmer, 1994), frena su crecimiento urbano (Gráfica 1; EPA, 2005) e impulsa un programa de conservación para combatir la pérdida de los ecosistemas naturales y su fragmentación (MSCP, 2003). En México, la centralización, el escaso presupuesto para urbanización otorgado a los municipios y una racionalidad de planeación por sectores económicos, más que una lógica espacial o regional, son algunos de los

problemas de la planeación del uso del suelo (Herzog, 1990). Al nivel estatal no se ha implementado políticas de conservación (áreas protegidas) y aunque se han decretado Programas de Desarrollo Urbano (PDU) y de Ordenamiento Ecológico (OE) (POE, 1995), pocas veces son respetados. Nuevos PDU y OE fueron recientemente publicados con una visión complementaria, y considerando la prevención de riesgos (POE, 2004 y 2005). La actualización de éste estudio será motivo de otra publicación y se podrá evaluar el éxito o fracaso de dichas políticas.

AGRADECIMIENTOS. Agradecemos los comentarios de Rosa Imelda Rojas, Richard Wright y Moisés Santos y a Zenia Saavedra por la edición de los mapas.

LITERATURA CITADA

- Aguilar Méndez, Fernando Antonio (1992), *La Expansión Territorial de las Ciudades de México*, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, Manuscrito.
- Aguirre, Celso (1987), *Breve Historia del Estado de Baja California*, Ediciones Quinto Sol, Mexicali, B.C.
- Aschmann, Homer (1973), "Man's impact on the general regions with Mediterranean climate", en: Di Castri, F. y M. Mooney (eds.), *Mediterranean Type Ecosystems*, Springer-Verlag, New York, pp. 363-371.
- Barbour Michael., Bruce Pavlick, Frank Drysdale y Susan Lindstrom (1993), *California's Changing Landscapes, Diversity and Conservation of California Vegetation*, California's Native Plant Society, California.
- Blackburn C. Thomas y Kat Anderson (comps. y eds.) (1993), *Before the Wilderness, Environmental Management by Native Californians*, Ballena Press, Menlo Park, California.

- Boyden, Stephen (1992), *Biohistory: the Interplay between Human Society and the Biosphere-Past and Present*, MAB, Vol. 8, UNESCO-The Parthenon Publishing Group, Paris, pp. 265.
- Bringas, Nora y Roberto Sánchez, (2006), "Social vulnerability and disaster risk in Tijuana: Preliminary findings", en Clough-Riquelme, Jane y Nora Bringas (eds.), *Equity and Sustainable in the US-Mexico Border Region: Reflections from the U.S. Mexico Border*, Center for US Mexico Studies, University of California, San Diego, pp. 149-173.
- California Department of Conservation (2002), *1984-2002, San Diego County Land Use Summary, Farmland Mapping and Monitoring Program* [http://www.consrv.ca.gov/DLRP/fmmp/pubs/1984-present/SDG_1984_2002.xls]
- Canales, Alejandro (1996), "El Poblamiento de Baja California, 1848-1950". *Frontera Norte*, vol. 7, núm. 13, México, pp. 6-23.
- Challenger, Anthony (1998), *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México, Pasado Presente y Futuro*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México y Agrupación Sierra Madre, México.
- Crespi, Juan (1927), *Fray Juan Crespi, Missionary Explorer on the Pacific Coast, 1769-1774*. Edited by Herbert Eugene Bolton, AMS Press, New York.
- Department of Landscape Architecture, California State Polytechnic (1989), *A management framework for the Tijuana River Valley*, San Diego County, Dept. of Parks and Recreation.
- Dedina, Serge (1995), "The political ecology of transboundary development: land use, flood control and politics in the Tijuana River Valley", *Journal of Borderlands Studies*, vol.X, num.1, pp. 89-110.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2005), *About Smart Growth*, [http://www.epa.gov/smartgrowth/about_sg.htm]

- Faber Phyllis M. y Robert F. Holland (1988), *Common Riparian Plants of California. A Field Guide for the Layman*, Pickleweed Press, California
- Gibson Campbell (1988), "Population of the 100 largest cities and other urban places in the United States: 1790-1990", *Population Division Working Papers*, Num. 27, U.S. Bureau of the Census. Washington D.C., [<http://www.census.gov/population/www/documentation/twps0027.html>]
- Gilmer, Maureen (1994), *California Wildfire Landscaping. Creating Bands of Protection with Plants Managing Native Vegetation Getting Help: Public and Private Resources. How to Comply with the High Fire Zones Law*, Taylor Publishing Company, Dallas, Texas.
- Henderson, D. (1964), *Agricultural and Stock Raising in Baja California*. PhD Dissertation. University of California, Los Angeles.
- Herzog, Lawrence (1990), *Where North Meets South. Cities, Space and Politics on the U.S.-Mexico Border*, Center for Mexican American Studies, University of Texas, Austin, Texas.
- Hierneaux, Daniel (1986), *Urbanización y Autoconstrucción de Vivienda en Tijuana*, Centro de Ecosdesarrollo, México.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (1991), *Censo Agropecuario de Baja California*, AGROS, [cd-rom], México.
- INEGI (2000), *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*, [<http://www.inegi.gob.mx/>]
- INEGI (2005), *Industria Maquiladora de Exportación*, [<http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/cgi-win/bdieintsi.exe/NIVJ150002000300050005#ARBOL?c=1414>]
- Keeley E. Jon y Sterling C. Keeley (1984), "Postfire recovery of California coastal sage scrub", *American Midland Naturalist*, núm. 97, pp. 120-132.
- Lepart Jacques y Max Debussche, "Human impact on landscape patterning: Mediterranean examples", en Hansen, A.J. y F. Di Castri (eds.), *Landscape*

- Boundaries. Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*, Ecological Studies 92, Springer Verlag, 1992, pp. 77-106.
- Lorey David E. (ed.) (1990), *United States Mexico Border Statistics since 1900*, UCLA, Latin American Publications, California.
- Luomala Katharine L. (1978), "Tipai-Ipai" in California", en Heizer R.F, *Handbook of North American Indians*, Sturtevant general editor, Smithsonian Institution, Washington D.C., vol 8, pp. 92-609.
- Meling-Pompa David (1991), "La ganadería en la Sierra San Pedro Mártir", en Franco-Vizcaíno E. y J. Sosa-Ramírez (eds), *El Potencial de la Cordillera Peninsular de las Californias como Reserva de la Biosfera*, Memorias de Congreso, CICESE CIEC09101, Ensenada, Baja California, pp. 14-16.
- Meyer, B. William. y Billie Lee Turner II, "Editorial Introduction of chapter III", en B.L. Turner II, W.C. Clark, R.W. Kates, J.F. Richards, J.T. Matthews y W.B. Meyer, (eds.) (1990), *The Earth as Transformed by Human Action. Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 years*, Cambridge University Press.
- Michel, Susan (2002), The Geography of water transfers and urbanization in Baja and southern California, en Fernández, L Y R.T. Carson (eds) *Both Sides of the Border*. Kluwer Academic Press. Netherlands, pp. 199-234.
- Mills, J. (1967), "San Diego...where California began", *The Journal of San Diego History* vol. 13, num. 4, p 35.
[\[http://sandieghistory.org/journal/67october/began.htm\]](http://sandieghistory.org/journal/67october/began.htm)
- Minnich, Richard (1983), "Fire mosaics in southern California and Northern Baja California", *Science*, 219, pp. 1287-1294.
- Minnich, Richard (1988), "The biogeography of fire in the San Bernardino Mountains of California. A historical study", *Geography*, University of California Press, Vol 28, 120 p.

- Minnich, Richard. y Ernesto Franco-Vizcaíno (1998), "Land of Chamise and Pines. Historical Accounts and Current Status of Northern Baja California's Vegetation, University of California Press", *Botany*, Volume 80, California.
- Minnich, Richard. y Ernesto Franco-Vizcaíno (2002), "Divergence in California vegetation and fire regimes induced by differences in fire management across the U.S.-Mexico Boundary", en Fernandez, L. and R.T. Carson (eds.), *Both sides of the Border*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 385-402.
- MSCP (2003), Multiple Species Conservation Program: County of San Diego Subarea Plan. Natural Community Conservation Planning, San Diego County, San Diego, CA. vi+113 pp.
- Ojeda, Lina (2000), "Landuse and the conservation of natural resources in the Tijuana River Basin", en: Herzog, Lawrence. capítulo 9, *Shared Spaces: Mexico-United States Environmental Future*, San Diego, Center for U.S. Mexico Studies, pp. 211-232.
- Ojeda, Lina, (2002), "Habitat fragmentation in the Tijuana River Watershed (1953-1994)", en: *Tecate Baja California: Realities and challenges in a Mexican Border Community*, ed. Ganster, Paul., Cuamea, Felipe, Castro, José Luis. y A.Villegas, San Diego State University Press. Institute for Regional Studies, of the Californias, pp. 163-176.
- Ojeda, L., G. Bocco, E. Ezcurra e I. Espejel (2007) "Socio-economic dynamics and vegetation change: Land-cover/use transitions (1970-1994) in the binational Tijuana River Watershed" (en prensa).
- Olmstead Alan L. y Paul W. Rhode (2004), "The evolution of California Agriculture 1850-2000", en Seibert, J. (ed), *California Agriculture: Dimensions and Issues. Cooperative Extension. Agricultural & Resources Economics*, University of California at Berkeley, Chapter 1, pp. 1-28. [<http://are.berkeley.edu/extension/giannini/Chapter1.pdf>]

- Páez Frías, Elías (2005), *Procesos en la Estructuración del Espacio Metropolitano: Hacia la Definición de un Modelo de Planeación y Gestión para la Zona Metropolitana Tijuana-Rosarito-Tecate*, B.C, Tesis de Maestría en Arquitectura, Facultad de Arquitectura, UABC, Mexicali, Baja California.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (POE) (1995), *Versión Abreviada del Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California*, 8 de septiembre de 1995, Sección 3, Mexicali, Baja California.
- POE (2004), *Plan Estatal de Desarrollo Urbano de Baja California*, Tomo CXI, No. 43, 08 de octubre de 2004, Mexicali, B. C.
- POE (2005), *Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California*, Tomo CXII, No. 46, 21 de octubre de 2005, Mexicali, B. C.
- Piñera, Ramírez D. (1991), *Ocupación y Uso del suelo en Baja California, de los Grupos Aborígenes a la Urbanización Dependiente*, UNAM-UABC.
- Piñera David, y Jesús Ortiz (1985), *Historia de Tijuana. Semblanza General*, Centro de Investigaciones Históricas UNAM-UABC, Capítulo IV, Baja California.
- Ranfla González, Arturo y Guillermo B. Álvarez de la Torre (1986), "Expansión física, formas urbanas y migración en el desarrollo urbano de Tijuana", *Ciencias Sociales*. Serie 3. Cuaderno 2, Instituto de Investigaciones Sociales, UABC, Baja California.
- Rogers J. Malcolm, (1945) "An Outline of Yuman Prehistory", *Southwestern Journal of Anthropology*, núm. 1, pp. 167-198
- Rogers J. Malcolm (1966), *Ancient Hunters of the Far West*, Copley.
- Salas Alejandra (1989), *Nuestra Frontera Norte*, Editorial Nuestro Tiempo, México, D.F.
- San Diego State University (SDSU) y El Colegio de la Frontera Norte (COLEF) (2005), *Atlas de la Cuenca del Río Tijuana*, San Diego University Press, Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego, California.

- San Diego Association of Governments (SANDAG) (2000).
[\[http://datawarehouse.sandag.org/\]](http://datawarehouse.sandag.org/)
- Santiago G., Bibiana L, "Perfil del origen de la población de Tecate", en Ganster, P., F. Cuamea, J.L. Castro y A. Villegas (comps) (2002), *Tecate, Baja California: Realidades y Desafíos de una Comunidad Mexicana Fronteriza*, pp. 3-17, San Diego, California
- Secretaría de la Economía Nacional, Dirección General de Estadística (1942), *Segundo Censo Ejidal de los Estados Unidos Mexicanos*. 6 de marzo de 1940, Baja California, Territorio Norte, México.
- Serra, Junípero (1955), "Writings of Junípero Serra", Edited by Antoine Tibesar, O.F.M. Vol.1. *Academy of American Franciscan History*, Washington, D.C.
- Shipek Florence (1969), Kumeyaay Socio-Political Structure. *Journal of California and Great Basin Anthropology*, vol. 4 num. 2, pp. 296-303.
- Shipek Florence (1993), "Kumeyaay plant husbandry: fire, water, and erosion control systems", en Blackburn C. T. y K. Anderson (comps y eds), *Before the Wilderness. Environmental Management by Native Californians*, Ballena Press, Menlo Park, California, pp. 379-388.
- Shugart H. Herman (1998), *Terrestrial Ecosystems in Changing Environments*, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Sokolow Alvin (2004), "California's Edge Problem: Urban Impacts on Agriculture", en Seibert, J. (ed), *California Agriculture: Dimensions and Issues. Cooperative Extension. Agricultural & Resources Economics* (2004), University of California at Berkeley, Chapter 12, pp. 289-304.
- Trava Manzanilla, José Luis., Jesús Román Calleros y Francisco A. Bernal (comps.) (1991), *Manejo Ambientalmente Adecuado del Agua. La frontera México-Estados Unidos*, El Colegio de la Frontera Norte.

Treganza Adan (1947), *Notes on the San Dieguito lithic industry of southern California and northern Baja California*, University of California Publications in American Archaeology and Ethnology, núm. 44,.

Turner II, William C. Clark, Robert W. Kates, John F. Richards, Jessica T. Matthews y William B. Meyer, (eds.) (1990), *The Earth as Transformed by Human Action. Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 years*, Cambridge University Press, 1990.

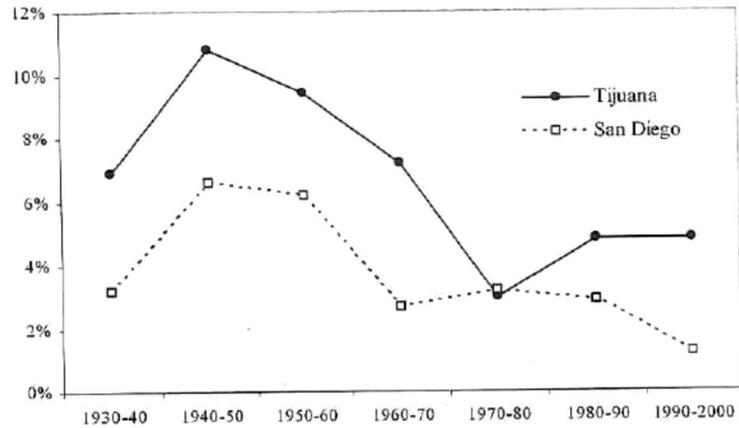
Webster L. Grady y Conrad J. Bahre (2001), *Changing Plant Life of La Frontera. Observations on Vegetation in the US/Mexico Borderlands*, Albuquerque Univ. of New Mexico Press.

Zenteno Quintero, René y Rodolfo Cruz Piñeiro (1992), "Boom in the Midst of the Bust: Well-Being in Tijuana", en Selby, H.A. y H. Browning. *The Sociodemographic Effects of the Crisis in Mexico*. University of Texas at Austin. Chapter Seven.

[<http://lanic.utexas.edu/project/etext/mexico/selby/chap7.html>]

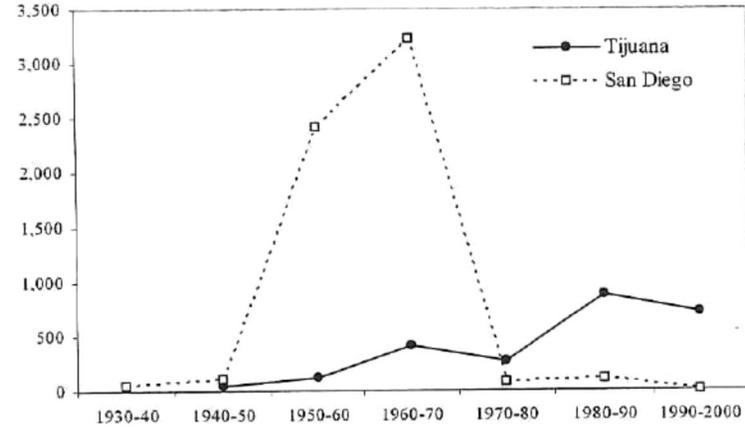
Gráfica No. 1. Comportamiento histórico de población y superficie urbana de Tijuana y San Diego

(a) Tasa de crecimiento de la población de Tijuana y San Diego (1930-2000)



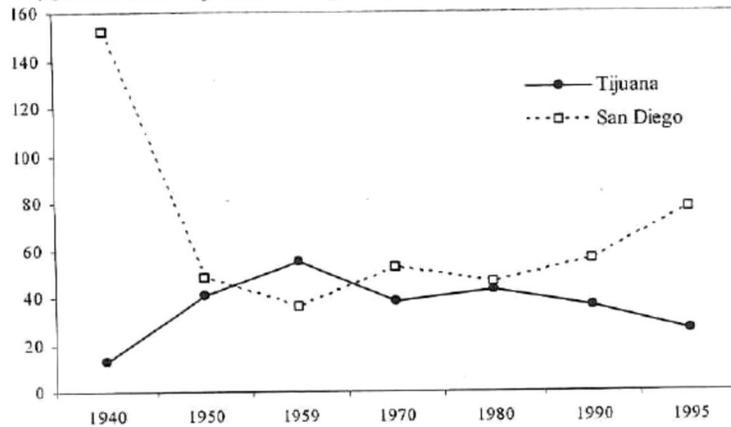
Fuentes: Población INEGI (2000) y SANDAG (2000).

(b) Velocidad de crecimiento de la superficie urbana de Tijuana y San Diego (1930-2000) en has/año



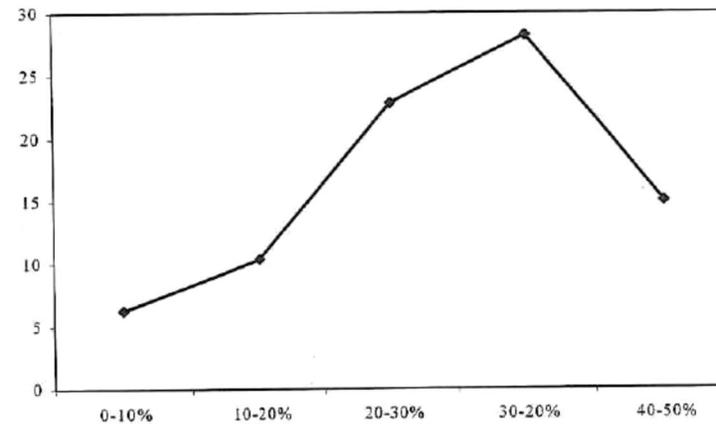
Fuentes: México 1930-50 Aguilar Méndez (1992), 1959 y 1970 Hiemeaux (1986), 1980 Ranfla *et al* (1986) y 2000 Bringas y Sánchez (2006); EU: Gibson (1998) y SANDAG (2000)
Nota: 1940-50 Tijuana es de 1935-50

(c) Densidad de la población de Tijuana y San Diego (1930-2000) en hab/has



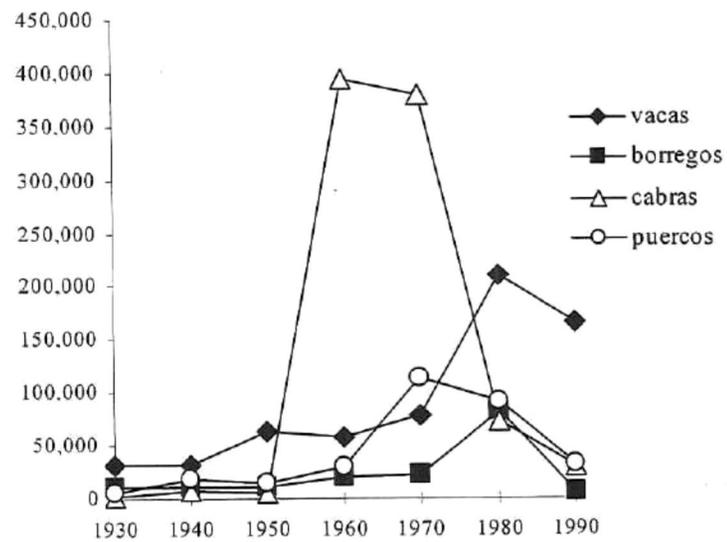
Fuentes: las mismas de las otras gráficas

(d) Tasas de crecimiento urbano por grado de pendientes (1972-2000)



Fuente: Bringas y Sánchez, 2006

Grafica No. 2. Evolución de la ganadería en Baja California (1930-1990)



Fuentes: Lorey (1990) e INEGI (1991)

Land-cover/use transitions in the binational Tijuana River Watershed during a period of rapid industrialization

Ojeda-Revah, L. ^{1*}; Bocco, G. ²; Ezcurra, E. ³ & Espejel, I. ⁴

¹ *Departamento de Estudios Urbanos y de Medio Ambiente, El Colegio de la Frontera Norte, km 18.5 carretera escénica Tijuana - Ensenada, San Antonio del Mar, Tijuana, Baja California, Mex., C.P. 22560.*

² *Centro de Investigación de Ecosistemas, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, Mex., gbocco@oikos.unam.mx*

³ *San Diego Natural History Museum, PO Box 121390, San Diego 92112-1390, California 4 Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California, km 106 carretera Tijuana-Ensenada, Baja California, Mex., CP 22800, ileana@uabc.mx*

** Corresponding author; Fax 52(664) 631 6342; E-mail lojeda@colef.mx*

Abstract

Question: How do differing social, economic, and cultural systems affect the dynamics and trajectory of land-cover/use change on similar, neighbouring ecosystems in a time span when an economic industrialization program was enforced?

Location: Tijuana River Watershed, located in the border between Baja California, Mexico, and California, United States (U.S.).

Methods: We quantified land-use changes between 1970 and 1994 in the Tijuana River Watershed, at the Mexico- U.S. border. Using aerial photographs and geographic information systems (GIS), we elaborated land-cover/use maps and calculated transition-probability matrices to describe natural land-cover changes at the landscape level on both sides of the border.

Results: Land-cover/use transitions are mainly driven by urban development on both sides of the border, but exhibit different patterns on each country. The processes seem to be more complex in the Mexican part of the basin, where itinerant land-use may revert induced grasslands and rainfed agriculture into natural communities, than in the U.S. side, where the transition pathways are few and unidirectional.

Conclusions: Despite the need for an integrated planning and management of binational basins and shared water resources, in practice, these goals may be hampered by different economic and cultural factors triggering land-use change within each country.

Key words: binational watersheds, geographic information systems, land/cover-use change, Mexico–U.S., transition models

Introduction

The study of land-cover and use change (LUCC) processes has become a major topic of environmental research (Houghton 1994; Lee et al. 1995). Its analysis has

been based on the quantification of land-use and its change over time, using different sources and techniques (Ojima et al. 1994, Lambin 1997). LUCC operates at the landscape level through ecosystem fragmentation, which disrupts environmental functions (Forman 1995 and Mas et al. 2004). As semi-natural landscapes become predominant, knowledge of LUCC in human-altered ecosystems will play a growing role in the conservation of natural resources (Noss 1996; Schwartz 1997).

In order to study LUCC patterns and processes, Bürgi et al. (2004) suggested the use of the driving forces concept, and identified five main types: natural, socioeconomic, policies, technology and cultural. They also consider that comparative studies on borders are useful to analyze the effects of regulations, subsidies and political systems and that selected periods must reflect a change in the conductive force potential level.

Binational watersheds are ideal study areas, because they may function as split-plots where most natural variables are similar, but where the contrasting economies and social dynamics may operate differently, imposing divergent pressures on shared natural resources. The study of LUCC patterns in watersheds is of particular relevance because it may affect erosion rates (Sah & Shimizu 1998), hydrologic cycles and water availability (Peters & Meybeck 2000).

In the border between Mexico and United States (U.S.) environmental research with a binational view has grown substantially during the past decade. Most environmental studies have been oriented towards water resources modelling and management (Frisvold & Caswell 2000, Brown 2003, Van Schoik et al. 2004, Cortés et al. 2005). Binational geographic information systems (GIS) have been integrated in the Tijuana River Watershed (SDSU & COLEF 2005), and in the Nogales Watershed (Brady et al. 2002). Other studies have dealt with urban growth and LUCC in Tijuana–San Diego (Herzog 1990), and Ciudad Juárez–El Paso (Peña et al. 2005), with watershed analysis in the San Pedro River Basin (Kepner et al. 2002 and 2004, Miller et al. 2002). Mumme (2003) reviewed and analyzed policy issues

since the 1970s, and concluded that research topics such as natural resource conservation and LUCC deserve more attention.

Urbanization has not been considered a major cause of LUCC as it only accounts for 2% of the world's land surface, but in some areas large-scale urbanization and extended peri-urban settlements fragments the landscapes and threaten ecosystem processes (Lambin et al. 2001). Although landscape patterns metrics have been applied to study urban morphology (Luck & Wu, 2002, Cifaldi et al. 2004, and Seto & Fragkias 2005), most spatial studies are applied to single cities (Jenerette & Wu 2001, Luck & Wu 2002, and Herold et al. 2003), or several cities within one country, but physical processes of LUCC and socioeconomic processes that cause certain space configurations have been understudied (Seto & Fragkias 2005).

In this article we analyze LUCC patterns and transitions during the Border Industrialization Program (1970–1994) in the Tijuana River Watershed (TRW), a binational basin in the Mexico-U.S. border, bridging the states of California and Baja California (Figure 1). We also examine the contrasting patterns observed north and south of the border, and analyze their main driving forces. This study follows up previous research of the TRW bio-history (Ojeda & Espejel 2007), in which the main historical events that shaped land-cover/use patterns and its change were identified. The study period we chose (1970–1994), coincides with the Border Industrialization Program started in Mexico in 1965 (Zenteno & Cruz 1992), which induced accelerated population and industrial growth within the basin, reaching a peak of 20% annual growth in industrial capacity between 1985–1990. Between 1970 and 1994, the number of “*maquiladoras*” (tax-exempt assembly plants of foreign capital located on the Mexican side of the border) increased from 101 to 727. Shortly after 1994, the growth of the maquiladora industry started to dwindle, reaching negative values (-7%) in the 2000–2005 period (INEGI 2005).

The main question we intended to explore with this study was how differing social, economic, and cultural systems affect landscape patterns and LUCC in similar, neighbouring ecosystems, in that special time span when the economy of the region was oriented towards industrialization.

Method

The study area

The TRW is located along the western border between Mexico and the U.S., covering 4 450 km² of which almost three fourths belong to Mexico (Figure 1). Terrain is rolling to hilly, relief amplitude ranges from sea level to nearly 2 000 m at its north-eastern portion. It is part of the California Floristic Province, one of the world's biodiversity hotspots (Myers et al. 2000). Within the basin different varieties of Mediterranean climate occur, characterized by mild winters and dry summers. Arid Mediterranean climate dominates in the lowlands near the sea, where the average annual rainfall is less than 200 mm and the mean annual temperature is 16°C. In the highest sierras a more humid and cooler type prevails, with yearly precipitation reaching 500 mm and mean annual temperature around 10°C (INEGI 1995). Mixed conifer forest, juniper scrub, chaparral, coastal sage scrub, meadows and riparian land-cover naturally inhabit the watershed. Land-use (i.e., man-made) categories include urban development, grasslands, irrigated and rainfed agriculture, and reservoirs (O'Leary 2005).

The watershed falls under the jurisdiction of San Diego County in the U.S., and the Municipalities of Tijuana and Tecate in Mexico. Population growth rates were 3.0% during the 1970s, and 4.8% in the 1980s and 1990s (3.1% between 2000 and 2005) in the Mexican municipalities (INEGI 2000 and 2006), and 3.2% in the 70s, 2.9% in the 1980s, 1.2% in the 1990s (1.4% between 2000 and 2006) in San Diego County (SANDAG 2006). On both sides of the border only 1% of the population is related to primary production activities; in Mexico 41% work in the secondary sector (mainly industry) and 52% in services, while in the U.S. side 16% works in the secondary sector and 83% in services (INEGI 2000, SANDAG 2006).

Computing land-cover change

We worked with land-cover/use maps derived from black and white U.S. Department of Agriculture 1970 Corona Satellite Photographs (1:20 000) for the U.S. part of the basin; black and white 1972 Instituto Nacional de Estadística

Geografía e Informática aerial photographs (1: 50 000) for the Mexican side of the basin, and Nation Oceanographic and Atmospheric Administration 1994 colour aerial photographs for the whole basin.

This study is part of a long-term research, starting in the 1930s and aimed at monitoring trends in LUCC in the basin. For comparison purposes, we adopted the land-cover/use classification developed by O'Leary (2005), lumping together categories that were not discernible in the oldest aerial photographs (Table 1).

Aerial photo-interpretation was carried out by means of a mirror stereoscope and using standard interpretation keys (tone, texture, pattern, shape, and location of land-cover/use polygons as identified on the images) using the central portion of every photograph to avoid lateral distortion. Stereovision helped to understand the relevant relations between land-cover and relief, and thus, to differentiate among visually similar cover types. Every interpreted photograph was manually digitized onto a common-base mosaic (scale 1:50 000), and corrected using control points in a geographic information system (GIS). To ensure geometric consistency, the different layers were overlaid on a digitally-enhanced 1994 SPOT panchromatic image (10 m spatial resolution) and checked thoroughly for consistency. The accuracy of polygon labelling was tested by verifying in the field at least 20% of the interpreted polygons, and corrections were made when needed.

The following landscape analyses were performed on the basis of patch number and area (Forman 1995): (a) Area of each land-cover (S_i); (b) number of patches in each land-cover category (N_i); (c) perimeter shape ratio; i.e., total perimeter for the category (P_i) divided by the perimeter of a circle with the same area; and equal to $P_i/2\sqrt{(\pi S_i)}$; and (d) rate of change in land-cover [$C = (\log S_{i2} - \log S_{i1}) / (t_2 - t_1)$], where S_{i2} is the area of land-cover i at time 2, and S_{i1} is the area of the same land-cover at time 1, t_2 y t_1 are the time dates. Rates of change were calculated both for the area of each land-cover/use category and for the number of its patches, to respectively estimate expansion or retraction of different land-cover/use types, and their fragmentation.

Calculating transition matrices

In order to describe the land-cover/use dynamics, we constructed Markovian transition matrices, considering landscapes as land-cover/use mosaics that can change dynamically, from and towards different land-cover/use categories. The probability that an area with vegetation/land-cover/use belonging to category i may experience a transition into another category j is calculated as the ratio of the area that did change from i to j between 1970 and 1994, divided by the original amount of land-cover category i at the beginning of the study period: $P_{ij} = S_{ij (1994)} / S_{i (1970)}$, where $\sum_i P_{ij} = 1$. Transitions were evaluated in terms of both geometric and thematic consistency. Small differences in polygon area (< 0.02% for the whole basin) originating from tracing errors in polygon boundaries were not taken into account.

Results

The maps in Figure 1 show land-cover/use in 1970-1972 and 1994, and the changes undergone in this period in the TRW. As expected in a basin with the marked elevation changes and coastal-inland climate gradients as our study area, there was a gradient of natural land-cover types from the highest peaks into the lowlands (Fig. 1). In the U.S. side, the highest areas within the basin are occupied by mixed conifer and Jeffrey pine forests. The highlands in the Mexican side are mostly covered by juniper scrub, and on both sides the high elevation valleys and plains harbour mountain meadows. Following down along the elevation gradient, the basin's slopes are covered mostly by chaparral, a particular type of sclerophyllous scrub, and even further down, where the coastal fogs of the Pacific Ocean hit the land, chaparral becomes replaced by coastal sage scrub, which is richer in succulents and herbaceous growth forms. Finally, riparian land-cover is found along intermittent *arroyos* or creeks at different altitudes, driven by moisture and water availability.

The first apparent feature observed in our data is that the complexity of the network of observed transitions is much larger in Mexico, with more transition pathways

between different land-cover/uses than in U.S. side of the basin. All in all, natural land-cover lost 253 km² in the basin, of which 202 km² (80%) were lost in Mexico (Tables 4 and 5). However, 55 km² of natural land-cover were also recovered from abandoned grasslands and agricultural fields, returning chiefly to secondary chaparral, coastal sage scrub, and mountain meadows. Most of this recovery (90%), however, was observed in Mexico, while in the U.S, natural land-cover loss was almost irreversible.

In 1972, urbanization covered 2.4% of the basin; by 1994 it extended over 6.9%. Urban areas increased more than 200 km² in the whole basin, 74.7% of which developed in Mexico, in 85 patches. In the U.S., urban development only contributed with 87 km², but was split into 110 patches (Tables 2 and 3). The perimeter shape ratio of urban patches was also different in each country: 13.8 and 17.0 in 1970 and 1994, respectively, in the U.S.; and 8.3 and 10.7 in Mexico. In the U.S., urban areas expanded at an annual rate of 3.7%, mostly over chaparral, irrigated agriculture, and grasslands (Tables 2 and 4). Urban expansion in Mexico was much faster (5.3%) and expanded chiefly over coastal sage scrub, chaparral, and induced grasslands, but also impacted heavily on other natural land-cover types (Tables 2 and 5). As a sink land-use category, urban development did not undergo further conversions; for all practical purposes it is an irreversible state.

Other land-uses, such as irrigation and rainfed agriculture and grasslands, that covered almost 7.9% of the basin, reduced slightly their area to 7.6% by 1994. Irrigation agriculture decreased in area on both countries, mainly in the U.S., but not so their number of patches, as they increased in the U.S. and were maintained in Mexico (Tables 2 and 3). Grasslands increased their area, but patches decreased in the U.S. Contrastingly, in Mexico grassland area decreased and patches increased (Tables 2 and 3).

Patches increased in almost all land-cover/use types on both sides of the border, with the exception of induced grasslands in the U.S. In Mexico, fragmentation rates on natural ecosystems were much faster, and were especially high in the Juniper

scrub and the coastal sage scrub, while in the U.S. the most severely fragmented natural land-cover type was the chaparral (Table 3).

Discussion

As would be expected in an area where secondary and tertiary economic activities dominate, urbanization accounted for the larger transformations. On both sides of the border grasslands and agriculture were the forerunners of urban development. Within the basin urbanization showed two different patterns. One is the enlargement of existing patches, mainly in the Mexican side, eastwards along the international border, southwards along the Pacific coast, and to the southeast along the Tijuana River. This growth took over grasslands, coastal sage scrub, and riparian zones, interrupting the continuity of these ecosystems between Mexico and the U.S. The second pattern occurred with isolated urban patches scattered developing over riparian habitats and chaparral in Mexico, and widely scattered on the U.S. side over grasslands and chaparral (Fig. 1). The higher perimeter ratio of the urban area in U.S. underscores the higher fragmentation of urban patches on this side.

In the U.S. the more scattered urban pattern was driven by a combination of population growth, a cultural appreciation for suburban life, policies empowering local governments combined with lower taxes in rural areas, and infrastructure construction, mainly highways and services (Ojeda & Espejel 2007). In Mexico a more compact and continuous urban pattern was driven mainly by population growth, especially of migrants in search of work, job creation policies (such as Border Industrialization Program, Zenteno & Cruz 1992), poor infrastructure investment that pushes newcomers to be near the limits of urbanization, and lack of law enforcement preventing illegal land use change (Ojeda & Espejel 2007, Velázquez et al. 2005). Indeed, almost 50% of the city's area has an irregular settlement origin (Alegría & Ordoñez 2005).

The dynamics of the transformation process was much simpler in the U.S. than in Mexico (Tables 4 and 5). The observed differences possibly reflect a series of driving

forces, such as diverging urbanization growth patterns, different grazing practices in each country, the active role played by itinerant rainfed agriculture and induced grasslands in Mexico (which allows the recovery of natural vegetation), and some conservation policies applied in the U.S. that contribute to reduce the number of transformation pathways undergone by natural areas.

On both sides of the border, scrublands were the main source of land-cover change, in part because they cover most of the watershed area, and especially because they dominate in the flat lowlands where development has its higher demand. During our study period, Juniper scrub in Mexico changed mainly towards chaparral—its natural neighbour, which takes over when Juniper cover decreases as a result of wildfires and/or cutting for fuel and for the construction of ranch fences by the local populations (Minnich & Franco-Vizcaíno 1998). Chaparral and coastal sage scrub, the dominant categories in the basin's scrublands, had a more dynamic and diverse contribution to land-cover transitions; transforming to every other land-use type. Quantitatively, however, their reduction was chiefly driven by urban development, which occurred largely at the expense of chaparral in the U.S., and of coastal sage scrub in Mexico. Quantitative and qualitative changes in chaparral composition and structure are caused by *rancheros*, who deliberately burn the scrub to improve browse and livestock access, and by agricultural burns that grow unchecked (Minnich & Franco-Vizcaíno 1998). During our study period, some chaparral and coastal sage scrubs in Mexico were recovered from abandoned agriculture plots and induced grasslands, a process observed only in very small areas in the U.S. (Table 5).

Coastal sage scrub is a unique type of land-cover as it contains a great number of endemic species (Oberbauer 1999, Riemann & Ezcurra, 2005). Besides its diverse conversions to all land-uses, it has been used for cattle grazing since Colonial times, with browse preferences resulting in selective removal of some shrub species, and with the introduction of exotic species to make it more palatable for livestock (Minnich & Franco-Vizcaíno 1998). Burning practices are also common in this land-cover type, and although it is resilient under periodic fire (O'Leary 1990), recurrent intervals of less than five to ten years will degrade it and lead to the dominance of non-native

grasses, often promoted by open-range, transhumant cattle-grazing (Malanson 1984 in Minnich & Franco-Vizcaíno 1998).

In our data set, riparian land-cover appears to have grown substantially between 1970 and 1994. This effect, however, is probably due to the 1992–1993 El Niño phenomenon, when the rainy season almost doubled the long term precipitation average (NOAA 2004) enhancing the development of foliage and biomass along water courses. In spite of this apparent increase in riparian land-cover, urbanization was a major cause of its destruction on both sides of the border. Additionally, in the Mexican portion of the basin, rainfed agriculture expanded over fluvial terraces to benefit from water courses, thus taking over riparian land-cover (Table 5).

Induced grasslands can replace any type of land-cover, and thus play an important role in the landscape. During our study period they expanded mainly over chaparral and coastal sage scrub, or they developed on abandoned agricultural plots (Tables 4 and 5). In Mexico their decrease in area and increase in patch numbers were due either to their abandonment followed by recovery of natural cover in some patches, or to their occupation by urbanization. In the U.S. grassland areas merged as they extended, leading to a reduction in the number of patches (Figure 1). Because induced grasslands form open, highly-disturbed, and biologically-poor sites, they are sought-after by development projects, and constitute one of the early stages leading towards urbanization on both sides of the border.

Irrigated agriculture was less dynamic, but decreased giving space to urban development and grasslands. In Mexico, because of the high cost of irrigation water and of the growing demand of water for urban use, many irrigated agricultural areas retreated to rainfed farming during our study period. In the U.S., reductions in irrigated farmlands were caused by a shift in the production, starting in the 1950s, from field crops to nurseries, flowers, and intense-cultivation farms, including small vegetable producers that benefit from the urban proximity and produce more per acre (Sokolow 2004).

Relying only on rainy seasons, rainfed agriculture played a key role in the dynamics of the Mexican landscape during our study period, but not in the U.S., where it is not practiced. Usually small patches of natural land-cover are cleared for cultivation (mainly oat, barley, and maize, according to INEGI (1995) or to allow the growth of induced grasslands; after a couple of cropping seasons they are abandoned, shifting spatially with time. The shifting of rainfed agriculture occurs because of its reliance on modest and erratic precipitation, marginal soils for agricultural practices, and lack of relatively flat terrains. This type of itinerant agriculture may allow the recovery of natural land-cover as long as the agricultural plot is surrounded by natural patches that allow re-colonization.

According to Velázquez et al. (2005), in Mexico there is "a passive" recovery of natural land-covers due in part to the abandonment of parcels by farmers who migrate to urban areas or to the U.S., or, to small scale conservation actions; and to the socioeconomic conditions in which *ejidos* and communities (common property land) live. In our study area this process was also associated to the spatial shifting of rainfed and induced grasslands cultural practices.

Conclusions

Transition networks were different on each side of the border, and were closely linked to both cultural and political practices during the selected time period which was based on the industrialization by the *maquiladora* economy (Zenteno & Cruz 1992). Because of this, the main change undergone over the entire basin was caused by urban development, although with different patterns on each side of the border, driven by a different combination of social, demographic, cultural and policy factors.

Shifting rainfed agriculture in Mexico, or suburban development in the U.S., are some prime examples of the influence of cultural patterns on natural land-cover change. In political terms, the slack enforcement of land-use plans in Mexico, as compared to U.S., is quite evident.

As a whole, in the U.S. side of the basin, LUCC followed a simpler path, with major changes concentrated on chaparral and irrigated agriculture, being rapidly transformed into urban developments with induced grasslands as an intermediate stage. In the Mexican part of the basin the process was more complex; mostly because of the itinerant practices of rainfed agriculture and grassland management, on the one hand, and of unchecked, badly planned, and very rapid urban development on the other.

In Mexico, rainfed agriculture, which is very dynamic in time and space, played a key role and explained the much more complex LUCC patterns. Grasslands also added complexity and risk into the system dynamics; in Mexico their growth and productivity is governed by burning practices, while in the U.S. burning is not a management tool. The dynamic complexity of the land-use mosaic imposed by Mexican itinerant land-use is perceptible in other types of natural land-cover such as, for example, the exploitation and subsequent recovery of Juniper scrub, or the use of mountain meadows and riparian land-cover for cattle grazing during rainy years. Recovery of natural vegetation occurs mostly in the Mexican side of the border driven by the shifting cultural practice of rainfed agriculture and grasslands. In the U.S. natural protected areas imposed limits to LUCC in some parts of the basin.

Further research may consider the analysis of ongoing LUCC patterns, including the role that shifting rainfed agriculture and induced grasslands may play in the recovery of chaparral and coastal sage scrub in the Mexican side of the basin. In addition, another potential research path could be the development of different scenarios for mid and long-term for both sides of the basin and the basin as a whole.

In conclusion, our research suggests that, despite the need for an integrated planning and management of binational basins and shared water resources, in practice, these goals are hampered by the role played by different factors triggering land-use change within each society. In any case, the challenge remains to build shared approaches and tools for planning and public policy formulation.

Acknowledgments

We thank Zenia Saavedra and José Manuel Madrigal for their technical GIS and cartographic support. We also want to acknowledge the very constructive comments from three anonymous referees.

References

- Alegria, T. & Ordoñez, G. 2005. *Legalizando la ciudad: asentamientos informales y procesos de regularización en Tijuana*. El Colegio de la Frontera Norte, México.
- Brady, L.M., Gray, F., Castaneda, M., Bultman M. & Bolm, K.S. 2002. Critical U.S.-Mexico borderland analysis, twin cities area of Nogales, Sonora. *Proceedings of the First ESRI User Conference*. San Diego, California. <http://qis.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap1006/p1006.htm>)
- Brown, C. 2003. New directions in binational water resources management in the U.S.-Mexico Borderlands. *The Social Science Journal* 40(4): 555-572.
- Bürgi, M., Hersperger, A.M. & Schneeberger, N. 2004. Driving Forces of landscape change –current and new directions. *Landscape Ecol.* 19: 857-808.
- Cifaldi, R. L., Allan, J.D., Duh, J.D. & Brown, D.G. 2004. Spatial patterns in land cover of exurbanizing watersheds in southeastern Michigan. *Landscape Urban Plann.* 66:107-123.
- Cortés, A., Whiteford, S. & Chávez Márquez, M. (coord.). 2005. *Seguridad, agua y desarrollo. El futuro de la frontera México-Estados Unidos*. El Colegio de la Frontera Norte & Michigan State University, México.
- Forman, R. T. T. 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

- Frisvold, G. & Caswell, M. 2000. Transboundary water management. Game theoretic lessons for projects on the U.S.-Mexico border. *Agricultural Economics* 24(1):101-111.
- Herzog, L. 1990. *Where North Meets South. Cities, Space and Politics on the U.S.-Mexico Border*. Center for Mexican American Studies, University of Texas, Austin, Texas.
- Herold M., Goldstein N.C. & Clarke, K. 2003. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modelling. *Remote Sens. Environ.* 86: 286-302.
- Houghton, R.A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *BioScience* 44(5): 305-306.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1995. *Anuario Estadístico*. Baja California. INEGI, Aguascalientes, México.
- INEGI. 2000. *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. INEGI, Aguascalientes, México.
- INEGI. 2005. *Industria maquiladora de exportación*. Banco de Información Económica. INEGI, Aguascalientes, México. <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/bdiesi/bdi.html>.
- INEGI. 2006. *II Conteo Nacional de Población y Vivienda 2005*. INEGI. Aguascalientes, México.
- Jenerette, G. D. & Wu, J. 2001. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona – Phoenix region, USA. *Landscape Ecol.* 16: 611-626.
- Kepner, W.G., Edmonds, C.M. & Watts, C.J. 2002. *Remote sensing and geographic information systems for decision analysis in public resource administration: A case study of 25 years of landscape change in a southwestern watershed*. Report EPA/600/R-02/039, June 2002.

Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory,
Las Vegas, Nevada.

- Kepner, W.G., Semmemns, D.J., Bassett, S.D., Mouat, D.A. & Goodrich, D.C. 2004. Scenario analysis for the San Pedro River, analyzing hydrological consequences of a future environment. *Environ. Monit. Assess.* 94: 115–127.
- Lambin, E.F. 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21(3): 375 - 393.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T.A., Vogel, C., & Xu, J., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11(4):261-269.
- Lee, H., Carr, J.L. & Lankerani, A. 1995. Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global data set. *Biodiversity and Conservation* 4: 128-155.
- Luck, M. & Wu, J. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona USA. *Landscape Ecol.* 17: 327-339.
- Mas, J., Velázquez, A.J., Díaz-Gallegos, R., Mayorga-Saucedo, T., C. Alcántara, Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. & Pérez-Vega, A. 2004. Assessing land use/cover changes/nation wide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of applied earth observation and geoinformation* 5(2004): 249-261.
- Miller, S.N., Hernández, M., Miller, R.C., Goodrich, D.C., Kepner, W.G., Heggem, D.L., Mehaffey, M.L., Kim Devonald, F. & Miller, P. 2002. Integrating

- landscape assessment and hydrologic modeling in land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association* 38(4): 1-15.
- Minnich, R.A. & Franco-Vizcaino, E. 1998. *Land of chamise and pines. Historical accounts and current status of northern Baja California's vegetation.* University of California Press. Botany Volume 80.
- Mumme, S. 2003. Environmental politics and policy in U.S.-Mexican border studies: developments, achievements, and trends. *The Social Science Journal* 40(4): 593-606.
- Myers, N., Mittermeier, R.A. Mittermeier, C.G. da Fonseca, G.A. & Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- NOAA. 2004. *Climate of San Diego California.* Technical Report Memorandum NWS WR-270. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). Washington, D.C.
- Noss, R. F. 1996. 36. Conservation of biodiversity at the landscape level. In: Szaro, R. C. & Johnston D.W. *Biodiversity in managed landscapes. Theory and practice*, pp. 574-589. Oxford University Press, New York.
- Oberbauer, T. 1999. La vegetación del noroeste de Baja California. *Fremontia*. Special Edition, July, pp.16-22.
- Ojeda, L. & Espejel, I. 2007. La cuenca binacional del Río Tijuana: un enfoque biohistórico. *Economía. Sociedad y Territorio* (in press).
- Ojima, D.S., Galvin, K.A. & Turner III, B.L. 1994. The global impact of land-use change. *Bioscience*, 44: 300-304.
- O'Leary, J. 1990. Californian coastal sage scrub. General characteristics and considerations for biological conservation. In: A.A. Schoenherr (ed.) *Endangered plant communities. Proceedings of the 15th annual symposium. Southern California Botanists.* October, 1989. Special Publications No.3, pp. 22-41.

- O'Leary, J. 2005. Vegetation. In: San Diego State University (SDSU) & El Colegio de la Frontera Norte (COLEF). *Tijuana River Watershed Atlas*, pp. 14-15. San Diego University Press. Institute for Regional Studies of the Californias. San Diego, California.
- Peña, S., Fuentes, C. & Forster, C.B. 2005. II-6. Land-use changes in the Paso del Norte Region: A brief History. In: Sandallla, E. (ed) 2005. The U.S. Mexican border environment: Dynamics of human environment interactions. *SCERP Monographs 11*: 325-346. San Diego State University Press.
- Peters, N.E. & Meybeck, M. 2000. Water quality effects on fresh water availability: Impacts of human activity. Water International 25(2): 185-193.*
- Riemann H. & Ezcurra, E. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico. Biol. Conserv. 122:141-150.*
- Sah, B. & Shimizu, E., 1998. Land use planning to avert the migration oriented watershed degradation. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs>.
- San Diego Association of Governments (SANDAG). 2006. Data Warehouse. SANDAG, San Diego, CA. <http://datawarehouse.sandag.org/>*
- San Diego State University (SDSU) & Colegio de la Frontera Norte (COLEF). 2005. *Tijuana River Watershed Atlas*. SDSU & COLEF. San Diego University Press. Institute for Regional Studies of the Californias. San Diego, California.
- Schwartz, M.W. (ed.) 1997. *Conservation in highly fragmented landscapes*. Chapman & Hall, USA.
- Seto, K. & Fragkias, M. 2005. Quantifying spatiotemporal patterns of land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecol.* 20: 871-888.
- Sokolow, A.D. 2004. Chapter 12. California's Edge Problem: Urban Impacts on Agriculture. In: Seibert, J. (ed.) 2004. *California Agriculture: Dimensions and*

Issues, pp. 289-304. Cooperative Extension, Agricultural & Resources Economics, University of California at Berkeley.

Van Schoik, R., Brown, C. Lelea, E. & Connor, A. 2004. Barriers and Bridges: Managing Water in the U.S.-Mexico Border Region. *Environment* 46(1): 26-41.

Velázquez, A., E. Durán, J.F. Mas, D. Bray & Bocco, G. 2005. Situación Actual y prospectiva del cambio de la cubierta vegetal y usos del suelo en México. In: CONAPO. *Más allá de las Metas de Desarrollo del Milenio*, pp. 391-416, México.

Zenteno, R.M. & Cruz, R. 1992. Boom in the midst of the bust: Well-being in Tijuana. Electronic text. In: Selby A. & Browning, H. (eds.) *The sociodemographic effects of the crisis in Mexico*. LANIC E-text Collection, Latin American Network Information Center, University of Texas, Austin, TX. <http://lanic.utexas.edu/project/etext/>.

Table 1. Land-cover/use categories.

| Land-cover/use | Categories |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| Forest | 1. Mixed conifer forest 2. Jeffrey Pine Forest |
| Riparian vegetation | 3. Riparian vegetation |
| Scrubs | 4. Juniper scrub 5. Coastal sage scrub 6. Chaparral |
| Grasses | 7. Mountain meadows 8. Grasslands |
| Agriculture | 9. Irrigated agriculture 10. Rainfed agriculture |
| Water bodies | 11. Reservoirs |
| Urban development | 12. Urban development |

Table 2. Land-cover/use (km²) and rate of change (%) in the Tijuana River Watershed.

| | U.S. | | | Mexico | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| | 1970 | 1994 | rate (%) | 1972 | 1994 | rate (%) |
| Mixed conifer forest | 23.01 | 22.16 | -0.2 | - | - | |
| Jeffrey pine forest | 39.39 | 39.22 | 0.0 | - | - | |
| Juniper scrub | - | - | | 260.67 | 228.52 | -0.6 |
| Chaparral | 879.91 | 846.06 | -0.2 | 1 504.54 | 1 468.43 | -0.1 |
| Coastal sage scrub | 78.62 | 70.80 | -0.4 | 1028.76 | 950.63 | -0.4 |
| Riparian vegetation | 35.35 | 31.03 | -0.5 | 61.63 | 79.65 | 1.2 |
| Mountain meadows | 16.92 | 17.37 | 0.1 | 54.04 | 31.14 | -2.5 |
| Grassland | 45.81 | 58.85 | 1.0 | 139.28 | 132.59 | -0.2 |
| Irrigation agriculture | 52.00 | 27.55 | -2.6 | 39.31 | 34.22 | -0.6 |
| Rainfed agriculture | 0.00 | 0.00 | | 77.45 | 87.26 | 0.5 |
| Urban | 35.62 | 87.04 | 3.7 | 69.62 | 221.02 | 5.3 |
| Reservoirs | 3.94 | 10.20 | 4.0 | 4.84 | 7.39 | 1.9 |
| Total | 1 210.56 | 1 210.29 | | 3 240.14 | 3 240.85 | |

Table 3. Number of patches within different land-cover/use categories at the Tijuana River Watershed.

| | U.S. | | | Mexico | | |
|------------------------|------|------|----------|--------|------|----------|
| | 1970 | 1994 | rate (%) | 1972 | 1994 | rate (%) |
| Mixed conifer forest | 20 | 20 | 0.00 | - | - | - |
| Jeffrey pine forest | 3 | 3 | 0.00 | - | - | - |
| Juniper scrub | - | - | - | 46 | 82 | 2.63 |
| Chaparral | 26 | 38 | 1.58 | 49 | 60 | 0.92 |
| Coastal sage scrub | 8 | 10 | 0.93 | 28 | 46 | 2.26 |
| Mountain meadows | 33 | 33 | 0.00 | 68 | 84 | 0.96 |
| Grassland | 79 | 69 | -0.56 | 240 | 443 | 2.79 |
| Irrigation agriculture | 71 | 73 | 0.12 | 53 | 53 | 0.00 |
| Rainfed agriculture | - | - | - | 79 | 122 | 1.98 |
| Urban | 77 | 110 | 1.49 | 50 | 85 | 2.41 |
| Reservoirs | 15 | 15 | 0.00 | 1 | 2 | 3.15 |

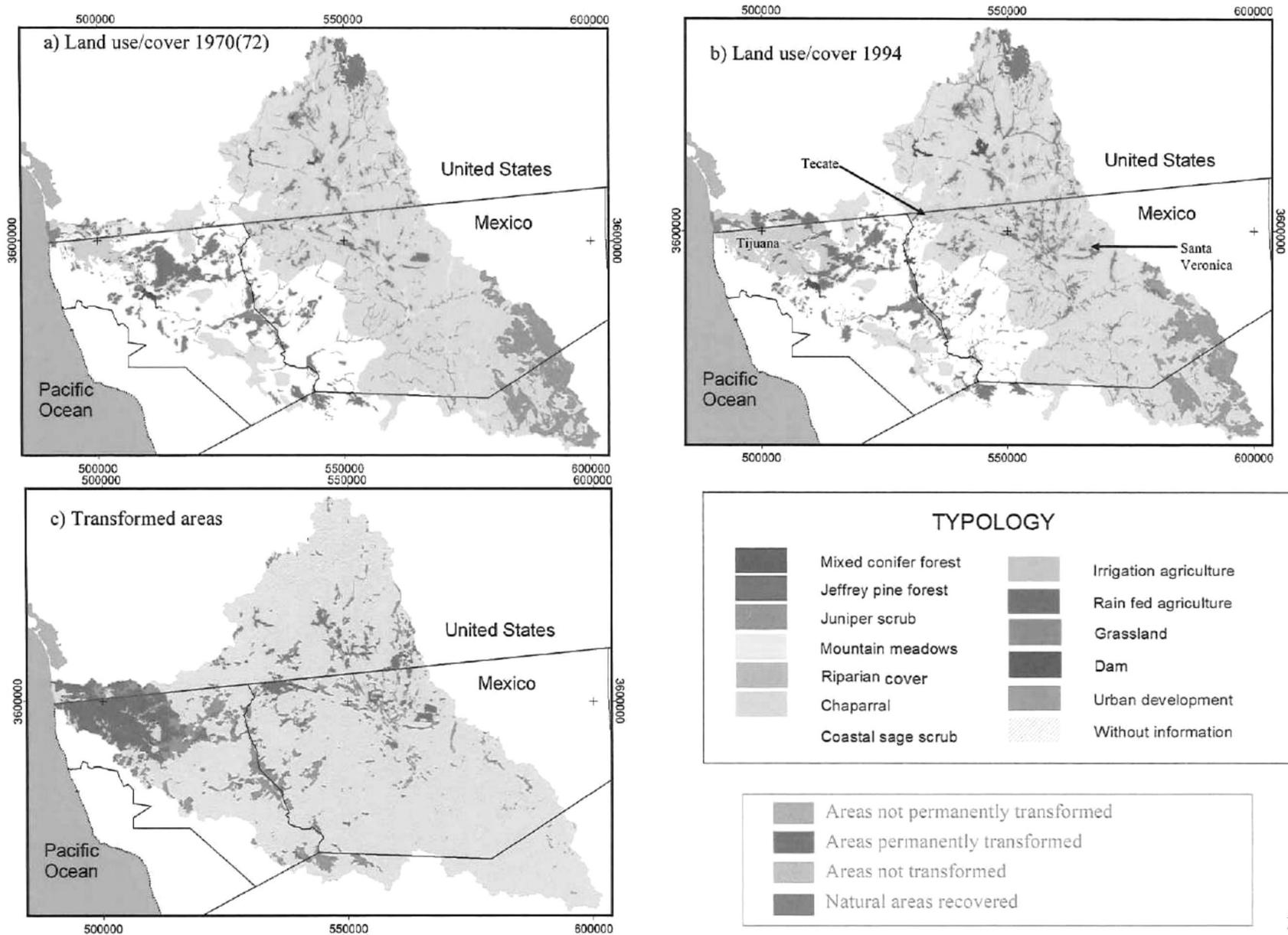
Table 4. Land-cover/use transitions for the U.S. part of the Tijuana River Basin between 1970-1994 in km². The values in parentheses indicate the transition probabilities, and the values in bold characters indicate the diagonal of the transition matrix.

| U.S. 1970-1994 | Mixed conifer forest | Jeffrey pine forest | Chaparral | Coastal sage scrub | Riparian vegetation | Mountain meadows | Grassland | Irrigation agriculture | Urban development | Reservoir |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Mixed conifer forest | 21.70 (0.918) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Jeffrey pine forest | - | 39.22 (1.000) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Chaparral | 1.93 (0.082) | - | 838.66 (0.958) | - | 1.47 (0.041) | - | 1.04 (0.023) | - | - | - |
| Coastal sage scrub | - | - | - | 70.07 (0.901) | - | - | - | - | - | - |
| Riparian vegetation | - | - | - | - | 27.84 (0.781) | - | - | 3.51 (0.069) | - | - |
| Mountain meadows | - | - | - | - | - | 16.76 (1.000) | - | 1.08 (0.021) | - | - |
| Grassland | - | - | 5.54 (0.006) | 5.78 (0.074) | - | - | 38.91 (0.851) | 9.06 (0.178) | - | - |
| Irrigation agriculture | - | - | 2.55 (0.003) | - | - | - | - | 23.52 (0.462) | - | - |
| Urban development | - | - | 27.23 (0.031) | 1.88 (0.024) | 1.20 (0.034) | - | 5.80 (0.127) | 13.68 (0.269) | 35.84 (1.000) | - |
| Reservoir | - | - | 1.16 (0.001) | - | 5.13 (0.144) | - | - | - | - | 3.92 (1.000) |

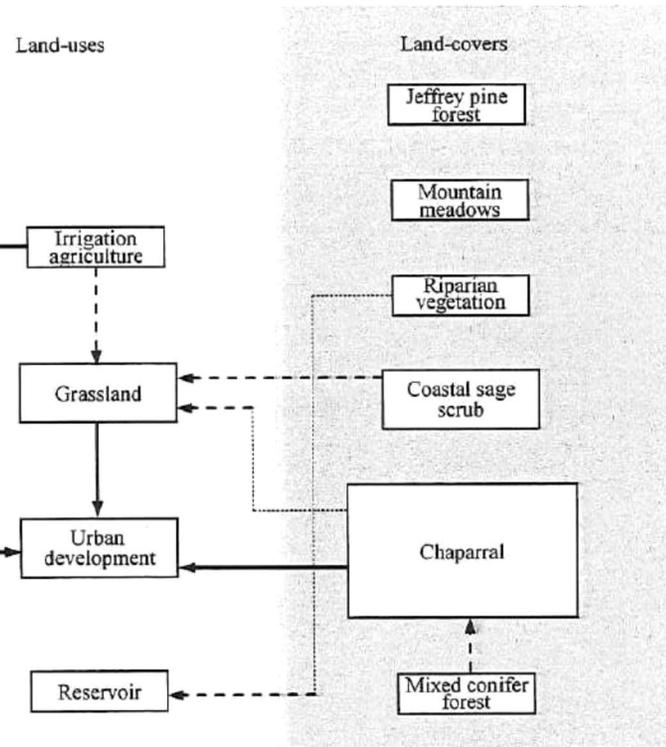
Table 5. Land-cover/use transitions for the Mexican part of the Tijuana River Basin between 1972-1994 in km². The values in parentheses indicate the transition probabilities, and the values in bold characters indicate the diagonal of the transition matrix.

| Mexico 1972-1994 | Juniper scrub | Chaparral | Coastal sage scrub | Riparian vegetation | Mountain meadows | Grassland | Irrigation agriculture | Rainfed agriculture | Urban development | Reservoir |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Juniper scrub | 200.25 (0.769) | 21.98 (0.015) | - | - | 5.94 (0.104) | - | - | - | - | - |
| Chaparral | 55.28 (0.212) | 1391.32 (0.926) | 2.70 (0.003) | 6.76 (0.110) | 5.39 (0.095) | 4.98 (0.036) | - | 1.20 (0.016) | - | - |
| Coastal sage scrub | - | 16.99 (0.011) | 891.58 (0.867) | 7.81 (0.127) | - | 24.68 (0.177) | 1.64 (0.042) | 7.93 (0.103) | - | - |
| Riparian vegetation | 1.43 (0.005) | 13.87 (0.009) | 13.09 (0.013) | 40.23 (0.655) | 2.70 (0.047) | 2.37 (0.017) | 4.64 (0.118) | 2.11 (0.027) | - | - |
| Mountain meadows | 2.15 (0.008) | 2.72 (0.002) | - | - | 25.81 (0.453) | - | - | - | - | - |
| Grassland | 1.40 (0.005) | 27.50 (0.018) | 26.73 (0.026) | 1.51 (0.025) | 14.61 (0.256) | 46.33 (0.333) | 1.49 (0.038) | 13.67 (0.178) | - | - |
| Irrigation agriculture | - | 1.00 (0.001) | 1.48 (0.001) | - | 2.53 (0.044) | 3.97 (0.028) | 17.14 (0.436) | 7.01 (0.091) | - | - |
| Rainfed agriculture | - | 6.69 (0.004) | 11.72 (0.011) | 3.11 (0.051) | - | 18.82 (0.135) | 11.08 (0.282) | 35.98 (0.468) | - | - |
| Urban development | - | 21.04 (0.014) | 79.47 (0.077) | 2.03 (0.033) | - | 38.09 (0.274) | 3.33 (0.085) | 9.00 (0.117) | 69.46 (1.000) | - |
| Reservoir | - | - | 1.50 (0.001) | - | - | - | - | - | - | 4.84 (1.000) |

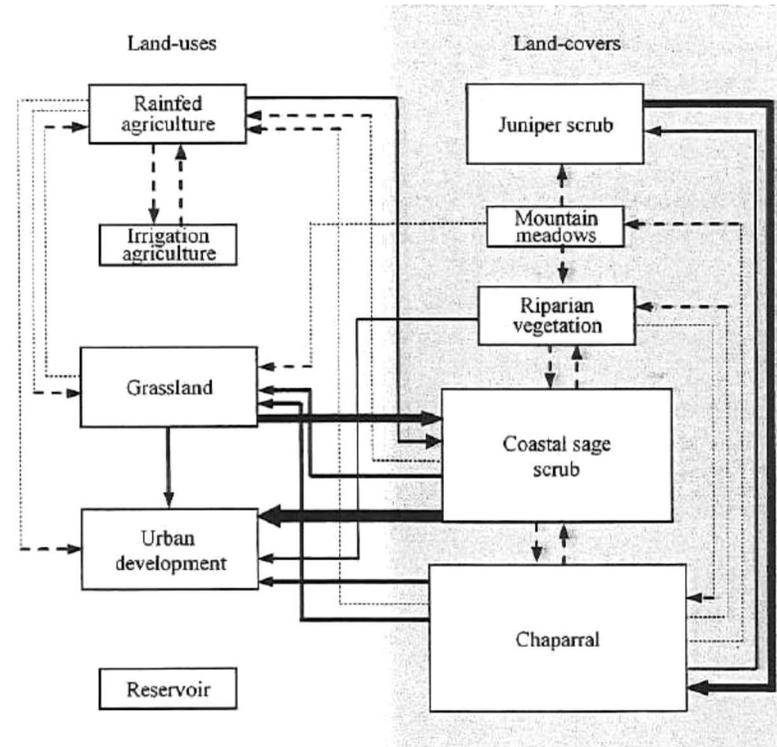
Figure 1. Land-cover/use in 1970(72) and 1994 in the Tijuana River Watershed and transformed areas



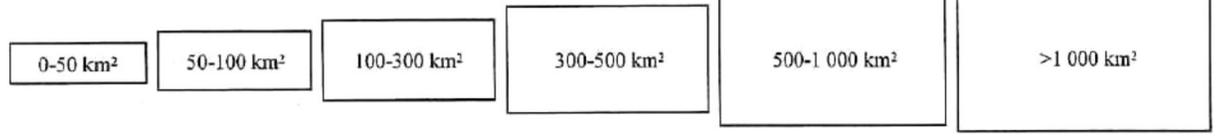
U.S. land cover/use transitions 1970-1994



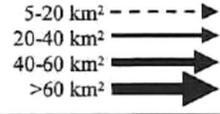
Mexico land cover/use transitions 1972-1994



Land cover/use area



Land cover/use area transformed



Tendencias de ocupación del territorio en la Cuenca del Río Tijuana (1972-1994-2005)

Ojeda Revah, Lina¹, Ileana Espejel², Exequiel Ezcurra³ y Gerardo Bocco⁴

¹Departamento de Estudios Urbanos y de Medio Ambiente, El Colegio de la Frontera Norte, km 18.5 carretera escénica Tijuana - Ensenada, San Antonio del Mar, Tijuana, Baja California, México., C.P. 22560. lojeda@colef.mx

²Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California, km 106 carretera Tijuana-Ensenada, Baja California, México., CP. ileana@uabc.mx

³San Diego Natural History Museum, PO Box 121390, San Diego 92112-1390, California, E.U. eezcurra@sdnhm.org

⁴Centro de Investigación de Ecosistemas, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México., gbocco@oikos.unam.mx

Resumen

Conocer la dinámica temporal y espacial del uso urbano puede ayudar a monitorear y por lo tanto mitigar sus impactos ambientales. A partir de esta idea se realizó un análisis multitemporal (1972, 1994 y 2005) de la estructura y las tendencias de cambio de usos del suelo y coberturas de vegetación (natural, agropecuaria, urbana y cuerpos de agua) en una cuenca binacional entre México y Estados Unidos (Cuenca del Río Tijuana). Para ello, se usaron diversas medidas de ecología del paisaje relacionadas con el área, el número de polígonos, el perímetro y las tasas de cambio de cada categoría y las transiciones entre categorías usando matrices de Markov. Asimismo, se describen los patrones espaciales del uso urbano sobre el territorio, resaltando algunas consecuencias ambientales. El crecimiento urbano se extiende territorialmente siguiendo todos los tipos de procesos de cambio, identificados desde el punto de vista de los modelos de ecología del paisaje y de crecimiento urbano. Es de resaltar el proceso de continuidad urbana en ambos lados de la frontera, el cual conforma una barrera entre los ecosistemas de E.U. y México.

Summary

Understanding urban spatial and temporal dynamics can help monitor and therefore mitigate environmental impacts. A multitemporal land-cover/use (natural, farming, urban and reservoirs) change analysis (1972, 1994 and 2005) was carried out in a binational river basin between Mexico and the United States (Tijuana River Watershed). Several landscape ecology metrics were used regarding area, number of polygons, perimeter, and change rates per category. Markov matrices were constructed in order to analyze transitions between categories. Some urban spatial patterns were described pointing out their environmental consequences. Urbanization grows spatially following all types of change processes identified from a landscape ecology and urban growth models perspective. Urban growth

indicates a trend towards continuity on both sides of the border creating a barrier between the U.S. and Mexico's ecosystems.

Palabras clave: México - Estados Unidos, cuenca binacional, cambio de uso del suelo, patrones espaciales, crecimiento urbano.

Introducción

El estudio de la dinámica de usos del suelo y coberturas de vegetación – abundancia, arreglo y posición espacial que son consecuencia de las actividades humanas–, proporciona información sobre sus efectos en los procesos ecológicos de un territorio (Iverson 1988). Asimismo, el interés de este tipo de estudios es encontrar el patrón espacial de la heterogeneidad en un momento dado, en cómo y por qué el patrón cambia con el tiempo y en cómo afecta a los procesos sociales. Incluso con una resolución de grano grueso, el análisis de los cambios en un territorio dado aporta información sobre la disponibilidad y conservación de recursos naturales y sobre la infraestructura civil y los requisitos e intereses del ser humano en ciertos fragmentos (Grimm *et al.* 2000).

Existen muchos tipos de modelos de cambio de uso del suelo y coberturas vegetales (Briassoulis 2000), que varían en cuanto si son dinámicos o estáticos, deductivos o inductivos y basados en agentes o en píxeles (Verburg *et al.* 2004). De entre ellos, cabe resaltar los basados en técnicas de estadística (regresión logística o logit, análisis multivariado, etc.), superposiciones con Sistemas de Información Geográfica (SIG), matrices de transición de Markov y autómata celular, o combinaciones de los mismos (Yang y Lo 2003, Verburg *et al.* 2004). En todos estos modelos los SIG juegan un papel preponderante ya que permiten la captura, almacenamiento, edición y análisis de datos geográficos de diversa índole.

Los modelos de la ecología del paisaje estudian el cambio de uso de suelo y coberturas de vegetación basándose en estudios empíricos que simulan dichos cambios (Forman 1995). En estos estudios se reconocen cinco tipos de procesos espaciales, con atributos que los distinguen y que producen efectos sobre diversas características ecológicas: (a) perforación, crea oquedades en un

fragmento, (b) disección, subdivisión de un hábitat, (c) fragmentación, rompimiento en fragmentos más pequeños, (d) reducción, disminución en el tamaño de una unidad del paisaje y (e) atrición, desaparición de unidades o elementos del paisaje. Cada uno de estos procesos tiene efectos definidos sobre algunos atributos espaciales. Por ejemplo, el número de fragmentos aumenta con la perforación, la disección y la fragmentación; el tamaño promedio de los fragmentos disminuye con todos menos con la atrición, la conectividad en el área decrece con la disección y la fragmentación y la longitud de frontera aumenta en todos los casos menos en los procesos de reducción y de atrición.

Este tipo de modelos puede enfocarse al estudio de un sólo tipo de uso de suelo, como es el caso del uso urbano. Históricamente la investigación sobre este tema se ha centrado más en identificar aisladamente las fuerzas motrices del crecimiento urbano o en definir sus patrones geográficos, que en relacionar estas variables entre sí (Dietzel *et al.* 2005).

Uno de los modelos propuestos lo presentan Herold *et al.* (2003 y 2005) y Dietzel *et al.* (2005) quienes con múltiples medidas espaciales provenientes de la ecología del paisaje (por ejemplo: contagio, distancia al vecino más cercano, densidad de bordes, índice fractal, número de parches, etc.) construyeron un modelo de crecimiento urbano. Con éste, encuentran que en un primer momento del desarrollo la urbanización transforma a un paisaje homogéneo no-urbano en una mezcla heterogénea de urbano y no-urbano y posteriormente se crea una transición a un paisaje homogéneo urbano. Según estos autores, la expansión urbana comienza con una base histórica que crece y se dispersa a nuevos centros de desarrollo individuales. Este proceso de *difusión* sigue una trayectoria de crecimiento orgánico y hacia afuera y luego transita a la fusión de los centros urbanos individuales. A medida que este patrón de crecimiento conceptual continúa, el sistema avanza hacia un estado saturado, que puede ser considerado como otra base urbana inicial sobre una extensión menos detallada. Las diferencias reflejan que cuantitativamente el crecimiento urbano no es constante en el tiempo ni entre regiones. Algunos factores locales o exógenos (tanto espaciales como temáticos), como la topografía, la infraestructura del transporte, las barreras

del crecimiento o los esfuerzos de planificación, pueden afectar la estructura del crecimiento espacial urbano. Sin embargo, con este modelo no se logra relacionar las variables socioeconómicas con las espaciales ya que los datos de las primeras comúnmente no están disponibles espacialmente, y cuando lo están no son comparables con las bases de datos geográficas.

Un ejemplo particular de estudios de cambio de uso del suelo y cobertura vegetal, enfocado en lo urbano, que intenta relacionar los cambios con el crecimiento de la población es el trabajo realizado por López *et al.* (2001) quienes estudiaron los cambios ocurridos en la ciudad de Morelia y en sus alrededores entre 1960, 1975 y 1990, usando cadenas de Markov de primer y segundo orden. Los resultados indican un gran crecimiento urbano sobre áreas agrícolas, producto de la migración desde las zonas rurales a las zonas urbanas o EUA y crecimiento urbano sobre pendientes con lo que aumenta la vulnerabilidad de la ciudad a riesgos geológicos. Las predicciones que realizaron con las matrices de transición sirvieron para probar cuantitativamente los cambios en los patrones, más no para hacer predicciones, en parte porque no se consideró el cambio en la población, el promedio en el tamaño de la familia y la tasa de construcción de casas habitación. Sin embargo, pudieron predecir, con base en una correlación estadística con el crecimiento de la población, el crecimiento de la mancha urbana.

Todos estos modelos pueden tener una visión administrativa con territorios delimitados políticamente como municipios, estados o países, o una visión ecológica como puede ser un tipo de vegetación, un cuerpo de agua o una cuenca. La cuenca hidrográfica es un territorio delimitado por la naturaleza, esencialmente por los límites de las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce (Dourjeani *et al.* 2002). Las cuencas son comúnmente consideradas como unidades básicas para el estudio de los ecosistemas (Folke 1997), ya que su enfoque resulta conveniente para entender las interrelaciones entre los recursos naturales (clima-relieve-suelo-vegetación), y la forma en que la población que la habita se organiza para apropiarse de ellos (Cotler 2004). Asimismo, es una unidad que plantea a científicos y planificadores la necesidad de adoptar un enfoque holístico (Toledo

2003). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) propone a las cuencas como una alternativa para el análisis de las relaciones hombre-ambiente (Dourjeani *et al.* 2002).

El estudio de la dinámica evolutiva y espacial del uso urbano cobra importancia en sitios donde el crecimiento de ciudades ha sido rápido (Seto y Fragkias 2005) y donde impacta a los ecosistemas que las rodean (Syphard *et al.* 2005). La mayoría de los trabajos a este respecto se concentran en una ciudad en particular (Luck y Wu 2002; Cifaldi *et al.* 2004, López *et al.* 2001 y Seto y Fragkias 2005) y algunos comparan varias ciudades dentro de un mismo país (Seto y Fragkias 2005). Sin embargo, existen pocos estudios que comparen el crecimiento urbano en un territorio binacional y que compartan una cuenca hidrográfica.

De acuerdo con Bocco (2000) todo problema ambiental ocurre en un espacio o territorio y en el caso de la frontera entre México y E.U., la presión sobre recursos relativamente escasos (en especial el agua), la distribución de la población desigual, el ritmo acelerado de su crecimiento, y en especial la falta de planificación urbana y regional, han creado un panorama ambiental caótico, enmascarado detrás de la idea de crecimiento y progreso.

Una cuenca dividida por una frontera con unidades administrativas contiguas, en donde existen dos culturas y economías diferentes, puede ser considerada un caso muy interesante para documentar el proceso de cambio de uso de suelo urbano, ya que inicia su desarrollo como una unidad territorial con ecosistemas similares que con el tiempo es dividida y manejada de dos formas diferentes (Bürgi *et al.* 2004). En trabajos anteriores, Ojeda (2000 y 2002), Ojeda y Espejel (en prensa) y Ojeda *et al.* (en prensa) estudiaron los cambios de uso del suelo y tipos de vegetación en la Cuenca del Río Tijuana (CRT) entre 1970 y 1994; y los eventos históricos y políticas públicas más relevantes que los indujeron, resaltando las diferencias existentes entre las porciones de México y de Estados Unidos (E.U.). Basado en estos trabajos el objetivo principal de este estudio fue describir y analizar los patrones espaciales del uso urbano sobre el territorio de una cuenca binacional en un periodo de 35 años, resaltando las diferencias y similitudes en la estructura

del paisaje y en el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal entre las áreas administradas por México y por E.U. y algunas de sus posibles consecuencias ambientales.

Descripción de la zona de estudio

La CRT se localiza en la esquina occidental de la frontera entre México y E.U. (Figura 1). Cubre una superficie de 4,450 km², de los cuales tres cuartas partes pertenecen a México. La mayor parte de la cuenca presenta una topografía accidentada. Con las partes más altas en los extremos norte y sur, el drenaje confluye en el valle del Río Tijuana, en México, donde se sitúa la ciudad de Tijuana, y termina por drenar hacia el Océano Pacífico, en un estero que ha sido declarado como área protegida en E.U. Las mayores elevaciones se localizan en el extremo noreste en el condado de San Diego alcanzan una altura de 1,964 metros sobre el nivel del mar (msnm). En la parte mexicana, la mayor altitud es de 1,850 msnm y se ubica en el extremo sureste en la Sierra de Juárez. Se trata de una zona semiárida con precipitaciones invernales que varían entre 150 y 500 milímetros (mm) anuales y temperaturas medias anuales de entre 10 y 16° C, siendo las partes más altas las más húmedas y frías y viceversa (SDSU y COLEF 2005). La cuenca está cubierta por diversos tipos de vegetación que albergan un gran número de endemismos (Riemann y Ezcurra 2005). En las partes más elevadas del norte se localizan los bosques (mixtos y de pino); en las planicies de las grandes altitudes del sur habita el matorral de junípero y las praderas de alta montaña. El chaparral es el tipo de vegetación más extendido, se distribuye entre los 700 y los 1200 msnm, seguido del matorral costero, que generalmente habita por debajo de los 900 msnm. La vegetación riparia, flanqueando los cauces de arroyos, varía su extensión proporcionalmente a las corrientes de agua. Los usos del suelo se concentran principalmente en los valles y planicies (SDSU y COLEF 2005).

La cuenca se encuentra bajo las jurisdicciones del condado de San Diego en E.U. y de los municipios de Tijuana, Tecate y Ensenada en México

La zona tiene un gran crecimiento de la población, creció en los municipios mexicanos a una tasa de 3.0% en la década de los 70, y de 4.8% en las de los 80 y 90 (3.1% entre 2000 y 2005) (INEGI 2000 y 2006); y en el condado de San Diego a razón de 3.2% en la década de los 70, 2.9% en la de los 80 y 1.2% en la de los 90 (1.4% entre 2000 y 2006) (SANDAG 2006). A nivel nacional, las tasas de crecimiento poblacional anual entre 1970-2005, fueron de 1.7% en México (INEGI 2005) y de 1.3% en E.U. (U.S. Census Bureau 2005). En ambos lados de la frontera sólo el 1% de la población realiza actividades relacionadas a la producción primaria; en México 41% de la población trabaja en el sector secundario (principalmente industria) y 52% en servicios, mientras que en E.U. el 16% de la población trabaja en el sector secundario y 83% en el de servicios (INEGI 2000; SANDAG 2006).

Al ser los procesos sociales y económicos las fuerzas conductoras de los cambios de usos del suelo, en una cuenca binacional estos procesos aumentan su complejidad y su comparación resulta interesante. En antecedentes a este trabajo, se menciona que el paisaje de la CRT históricamente ha estado compuesto por coberturas vegetales similares en ambos lados de la frontera (Ojeda y Espejel, en prensa). Esto ha sido documentado con fotos e imágenes desde 1956 a 1994 (Ojeda, com. pers, Ojeda *et al*, en revisión) donde se ha visto que en algún momento de su historia conformaban estructuras y dinámicas de cambio parecidas. Conforme la población humana aumentó, se introdujeron nuevos elementos en el paisaje, cambiando su dinámica. Asimismo, la cuenca fue dividida en 1848 artificialmente por dos culturas diferentes, imprimiendo cada una de las características particulares en diferentes momentos de su historia.

El objetivo de este artículo es analizar los cambios de uso de suelo de la CRT en 33 años, enfocándonos al uso urbano sobre las coberturas natural y agropecuaria así como inferir los efectos que tienen dichos cambios.

Metodología

Generación de bases de datos

La construcción de mapas de uso del suelo y vegetación de la CRT correspondientes a tres años diferentes: 1970-72, 1994 y 2005, se realizó utilizando mapas de 1970-72 y 1994 elaborados en trabajos anteriores (Ojeda 2000 y 2002; Ojeda y Espejel 2007 y Ojeda *et al.* 2007), a partir de fotos del U.S. *Department of Agriculture* de 1970 (blanco y negro, 1:20 000) para la parte de E.U. de la CRT; fotos del Instituto Nacional de Estadística e Información (INEGI) de 1972 (blanco y negro, 1: 50 000) para la parte mexicana (en lo sucesivo mencionado sólo como 1972), fotos de la *National Oceanographic and Atmospheric Administration* de 1994 (color, 1: 45 000) para la cuenca completa.

La fotointerpretación de estos dos años se realizó por medio de un estereoscopio de espejos usando claves de interpretación estándares. Los polígonos de usos de suelo y cubiertas vegetales fueron delineados visualmente de acuerdo a diferencias en las imágenes, en tono, color, forma, patrón y textura de los objetos. La estereovisión ayudó a entender las relaciones entre los tipos cubierta vegetal y la topografía y con ello distinguirlos mejor. El mismo procedimiento fue usado para todas las fechas, asegurando su compatibilidad técnica y metodológica. Cada fotografía interpretada fue digitalizada manualmente en un mosaico, y corregida por medio del módulo de entrada del SIG. La consistencia geométrica entre las capas digitales fue asegurada sobreponiéndolas sobre la imagen SPOT pancromática realzada (10m de resolución espacial). Dado que las fotografías tenían diferentes escalas se adoptó una escala común de 1:50,000. Por lo menos 20% de los polígonos interpretados fueron verificados en campo y corregidos (las únicas confusiones se presentaron entre los diversos tipos de bosque templado).

Para el 2005, se usaron una serie de imágenes de alta resolución del sensor ASTER adquiridas en mayo, junio y octubre del 2005 (Figura 1), de resolución espacial de 15 metros. Las bandas espectrales empleadas fueron 3N (infrarojo cercano), 2 (rojo) y 1 (verde). El mapa fue digitalizado en pantalla con la información aportada por el sensor con la técnica de fotointerpretación,

detectando e identificando objetos y patrones por su tonalidad, forma, tamaño, asociación, entre otras características.

Una vez clasificada se realizó la sobreposición de mapas entre el par de imágenes rasterizadas (1972 a 1994 y 1994 a 2005) para detectar el cambio de uso de suelo. Esto produce como resultado un mapa y una matriz de detección de cambio que muestra las combinaciones de cambio de uso de suelo detectadas entre clases y la ubicación espacial del cambio. Todos los mapas fueron construidos unificando a la escala a 1:50 000. Las rutinas de procesamiento de mapas de uso de suelo, tanto la tabulación cruzada como la predicción de escenarios tendenciales, fueron completadas en Arcview 3.2. Las unidades de usos del suelo y coberturas vegetales se definieron de acuerdo a su mejor distinción en la escala de menor resolución, la imagen Aster del 2005. En el Cuadro 1 se muestran las unidades resultantes de la reclasificación de las 12 categorías de paisaje usadas originalmente en los mapas de 1972 y 1994 (Ojeda *et al*, en revisión).

Análisis de datos

Se realizaron diversas medidas de paisaje de acuerdo con Forman (1995) considerando:

[1]

N_i = número de fragmentos por categoría

$$PA_i = P_i/2 \sqrt{(\pi S_i)}$$

Donde,

PA_i = relación perímetro área

P_i = perímetro total de cada categoría

S_i = área por categoría

[2]

$$C_i = (\log S_{i2} - \log S_{i1}) / (t_2 - t_1)$$

Donde,

C_i = tasa de cambio por categoría

S_{i2} = área de la categoría i en el segundo tiempo

S_{i1} = área de la misma categoría en el primer tiempo

t_1 = primer tiempo

t_2 = segundo tiempo

Asimismo, se calculó la tasa de la dinámica de cambio, utilizando matrices de transiciones de Markov y considerando al paisaje como un mosaico de usos del suelo y vegetación que pueden cambiar, desde y hacia diferentes usos del suelo y vegetación. La probabilidad de que un área que pertenece a una categoría i se transforme a otra categoría j se calculó como la fracción del área que cambió de i a j entre el tiempo uno y el dos, dividido por el área original de la categoría i al principio del periodo de estudio:

[3]

$$P_{ij} = S_{ij(t_2)} / S_{i(t_1)}$$

En donde $1 = \sum_i P_{ij}$. Las transiciones fueron evaluadas en su consistencia geométrica y temática. No fueron consideradas las pequeñas diferencias en el área de los polígonos (<0.05% para toda la cuenca) originados de errores de trazado en los límites de los polígonos.

Por último con las probabilidades de transición de 1972 hacia 1994 se proyectó el cambio hacia 2005, con la finalidad de detectar la precisión que ésta pudiera reflejar y se comparó con la imagen de ese año.

Resultados

En la Figura 2 se muestran los mapas de usos de suelo y cobertura vegetal natural de 1972, 1994 y 2005 y en la Figura 3 se resumen los cambios en un modelo de transiciones.

El cambio más drástico fue el ocasionado por el crecimiento urbano. Este se extendía sobre el 2.3% de la cuenca en 1972, sobre el 6.6% en 1994 y para el 2004 ya ocupaba el 10.3%. La superficie urbanizada entre 1972 y 1994 fue casi la

misma que entre 1994 y 2005, pero en éste último periodo, el proceso ocurrió en la mitad de tiempo. La mayor parte del crecimiento urbano en ambos periodos se dio del lado mexicano (80% entre 1972 y 1994 y 86% entre 1994 y 2005, Cuadro 2). El polígono urbano más grande es el de la ciudad de Tijuana en México el cual, en 1972 abarcaba 55.18 km² y para 2005 aumentó a 245.87 km². El número de polígonos de uso urbano aumentó y luego se redujo ligeramente en E.U., mientras que en México aumentó y posteriormente se mantuvo (Cuadro 3). A pesar de que en el 2005, 79.2% de la ocupación espacial urbana se ubicó del lado mexicano, ésta ocupaba el 48.4% de los polígonos urbanos existentes en la cuenca, proporciones que fueron muy semejantes también en 1972 y 1994.

La proporción entre el perímetro y el área de fragmentos urbanos fue de 13.0 en 1972, 14.6 en 1994 y 14.9 en 2005 para E.U.; y de 8.3, 10.8 y 13.1 para México, en los mismos años. Los valores fueron más altos en E.U. que en México.

La agricultura y los pastizales disminuyeron en ambos periodos y en ambos países, pero el decremento ocurrió a una mayor tasa entre 1994 y 2005, consecuentemente el número de polígonos también se redujo. Durante el periodo de 1994 al 2005 en México se dio el 84.5% de la reducción de área y el 93.7% de la disminución de número de polígonos (Cuadros 2 y 3).

La proporción perímetro-área de la agricultura fue de 19.2, 19.9 y 14.4 para E.U. en 1972, 1994 y 2005 respectivamente y de 22.1, 33.3 y 15.3 para México. Esta proporción fue más baja en E.U. que en México. En ambos países aumentó en 1994 y disminuyó en 2005.

El área ocupada por las presas se extendió en 1994 y disminuyó en 2005 (Cuadro 3). El número de presas o represas visibles (polígonos) aumentó y luego disminuyó en E.U. y aumentó en ambos periodos en México (Cuadro 2).

La vegetación natural fue sustituida por otros usos en ambos periodos, aunque a un ritmo mucho menor entre 1994 y 2005, particularmente del lado de E.U. (Cuadro 2). En México el número de polígonos aumentó en el periodo de 1972-1994 y disminuyó en el periodo de 1994-2005, y en E.U. aumentó en ambos periodos (Cuadro 3).

Las diferencias destacables en la dinámica de transiciones de uso del suelo y vegetación entre ambos periodos fueron: a) las mayores dimensiones de las áreas recuperadas por la vegetación natural de la agricultura y pastizales durante el segundo periodo en relación al primero, y b) el aumento de la superficie de las presas durante el primer periodo y su disminución durante el segundo. Resalta también el hecho de que en México los cambios y la superficie recuperada por la vegetación natural fueron de mayores dimensiones, en relación con E.U., y que durante el segundo periodo, las áreas cedidas por las presas fueron ocupadas por agricultura (Cuadro 5 y Figuras 2 y 3).

Si se utilizan las probabilidades de transición de Markov de 1972 hacia 1994 y se proyectan a 2005, los resultados indican, que éstas predicen los cambios mas no las intensidades. En E.U. la vegetación en el mapa de 2005 cambió de dinámica aumentando 34 km² más de lo calculado en la proyección, la agricultura y los pastizales disminuyeron 12 km² más y el crecimiento urbano fue menor por 12 km². En México, la vegetación disminuyó 15 km² menos, la agricultura y los pastizales se redujeron 82 km² más y el crecimiento urbano aumentó 70 km². En ambos países las presas disminuyeron en lugar de aumentar.

Discusión

Los resultados serán discutidos desde dos enfoques. Primero, bajo la visión de la ecología del paisaje con los procesos espaciales citados por Forman (1995) considerando todos los usos del suelo y coberturas vegetales. Y segundo, con el modelo de crecimiento urbano presentado por Dietzel *et al.* 2005 y Herold *et al.* (2005), por ser el uso de suelo que muestra mayor crecimiento dentro de la CRT.

Vegetación natural

Desde un punto de vista de la ecología del paisaje, la vegetación natural siempre constituyó la matriz de la cuenca. A pesar de haberse reducido, en 2005 la vegetación natural aún conservaba un fragmento interconectado de casi 3 700 km², esto es, el 83% de la CRT (Figura 2). En esta matriz identificamos todos los

tipos de procesos espaciales que cita Forman (1995). La perforación ocurrió por el aumento de polígonos de agricultura y pastizales, pero sobre todo urbanos (Figura 2 y Cuadro 3). La disección de la matriz se está dando al unirse muchos polígonos urbanos en forma de franja a lo largo de la frontera (Mapa 2005 de la Figura 2). La fragmentación se observa con mayor claridad en la periferia de los polígonos urbanos y se comprueba con el aumento del número de polígonos y su reducción de área entre 1972 y 1994 (Figura 2 y Cuadros 2 y 3). La atrición resalta en los polígonos naturales embebidos en el uso urbano (Figura 2).

En lo que se refiere a la dinámica de cambio en el periodo 1972-1994, las actividades humanas se expandieron principalmente sobre la vegetación natural. Al respecto Ojeda *et al.* (en prensa) identifican que el matorral costero es el tipo de vegetación más afectado. Durante el segundo periodo (1994 y 2005), la menor superficie deforestada por año junto con la continuidad en la disminución de la superficie agrícola y ganadera sugieren que hubo sustitución entre usos del suelo, esto es, una mayor ocupación urbana sobre las áreas con agricultura y pastizales (Cuadros 4 y 5).

Agricultura y Pastizales

Al igual que en estudios realizados en otros países sobre la ocupación espacial de ciudades, la mayor parte de las zonas de agricultura y pastizales fueron ocupadas por el crecimiento urbano (Seto y Fragkias 2005, Cuadros 4 y 5). Otros pequeños valles aluviales agrícolas, más lejanos a las principales zonas urbanas, crecieron con todo y sus propias pequeñas zonas urbanas. Estos son Carmen Serdán y Vallecitos, cerca del límite sur de la cuenca, el valle aluvial aledaño al Cerro Pedregoso, en el límite este, y Neji, ubicado sobre una depresión coluvial al sur de El Hongo (Figura No. 1).

En el caso del área de agricultura y pastizales, el aumento de su superficie en 1994 particularmente en México se explica por un periodo de lluvias copiosas, que favoreció la agricultura de temporal (Figura 4). Misma que se observa también con la relación perímetro-área, al indicar la existencia de un mayor

número de polígonos pequeños en México que en E.U. A pesar de que las actividades de agricultura y pastizales dentro de la CRT tienden a disminuir, su distribución espacial perfora de manera importante la matriz de vegetación natural. Sin embargo, como Ojeda *et al.* (en prensa) lo mencionan, la agricultura de temporal y los pastizales del lado mexicano presentan un comportamiento itinerante que permite la recuperación de la vegetación natural.

Presas

Las oscilaciones de cobertura de presas y las lluvias están relacionados: en 1972 las presas cubrían un área de 9.6 km² que refleja la escasa lluvia existente (226 mm promedio entre 1966 y 1972, NOAA, 2006) (Figura 4). En 1994 debido a los periodos de abundantes lluvias en los años anteriores (309 mm promedio entre 1989 y 1994, NOAA, 2006), las presas aumentaron su extensión. Aunque 2004-2005 fue un periodo lluvioso, dada la escasa precipitación en los años anteriores (254 mm promedio entre 2000 y 2005, NOAA, 2006), la extensión de las presas se redujo en el 2005 (Figura 2 y 3).

Dinámica urbana

Desde el punto de vista de crecimiento urbano, la dinámica existente dentro de la CRT, coincide con las fases de crecimiento definidas por el modelo de Dietzel *et al.* 2005 y Herold *et al.* (2005), con pocos centros urbanos históricos de partida, hacia un crecimiento con fragmentos aislados, que con el tiempo se incorporan agrandando la mancha urbana central, como se ve en los Cuadro 3 y 4,

Las principales áreas de crecimiento urbano se dieron a lo largo de una carretera (en este caso la carretera libre Tijuana-Tecate). Con ello se está conformando un corredor urbano casi paralelo a la frontera entre México y E.U. Lo urbano también creció de forma fragmentada, hacia el sur de Tecate (Ejido Colonia Nuevo Hindú), en el área de Santa Verónica y el Hongo, y en varias zonas agrícolas que se han desarrollado más lejos de Tijuana. En E.U. el

crecimiento urbano ha sido de forma muy dispersa, sobre territorio de la Reservación India de Campo (Figuras 1 y 2).

La cuenca en su totalidad y en las tres fechas estudiadas, se encuentra en la fase de paisaje heterogéneo de urbano y no urbano que mencionan Dietzel *et al.* (2005) y Herold *et al.* (2005). Sin embargo, si consideramos una regionalización altitudinal, la parte baja de la CRT pasó de un patrón heterogéneo urbano-no urbano (1972) a lo que podría considerarse como un paisaje homogéneo urbano (2005). Las partes más altas en México y E.U. aun se mantienen homogéneas no urbanas. La parte media, a ambos lados de la frontera, es heterogénea entre urbano y no urbano (Figura 2). Sin embargo, cabe mencionar que las áreas de los polígonos urbanos son casi del mismo tamaño en E.U., mientras que en México los polígonos son grandes y pequeños.

Con la relación perímetro-área se puede inferir que, proporcionalmente al área, la longitud de la frontera de lo urbano con otros usos del suelo o vegetación es más grande en la parte de E.U. que en la de México. Sin embargo, en 2005 esta medida es casi la misma en ambos lados de la frontera (Figura 2).

Posibles consecuencias ambientales

Algunas de las consecuencias ambientales resultado del crecimiento de las actividades humanas dentro de la CRT, incluyen la reducción de la biodiversidad, el riesgo de mayor contaminación del agua y la posible reducción en su disponibilidad (Mas *et al.* 2004; Syphard *et al.* 2005). Por ejemplo, estudios realizados en el sur de California (Soulé *et al.* 1992), referentes al efecto de la fragmentación sobre plantas, aves y roedores, indican que dentro de los remanentes las extinciones se dan rápidamente. Los efectos de frontera y pérdida de hábitat acumulativo, seguidos de aislamiento, están correlacionados con la pérdida de especies y rara vez se da una recolonización. Los remanentes de 10 a 100 hectáreas no mantienen sus especies de vertebrados por más de unas cuantas décadas y las plantas también desaparecen por perturbaciones crónicas y acumulativas y por cambios en la frecuencia de los incendios. Dentro de la CRT

en el 2005 ya existían 87 fragmentos menores a las 100 has, aunque éstos sólo conformaban el 0.04% del total de la vegetación.

Como mencionan Bowler (1992) y Crooks (2002), la continuidad urbana en forma de barrera puede reducir la diversidad de especies de mamíferos como resultado de la ausencia de migración a través de grandes áreas urbanas, debido al aumento de depredación por pequeños predadores (mapaches, zorrillos, etc.), cuyos miembros han aumentado gracias a su fácil adaptación a hábitat urbanos y por la reducción de sus depredadores naturales (coyote, gato montés, etc.).

En una ciudad de una zona semiárida los cuerpos de agua, como los arroyos y esteros, mantienen la conectividad ecológica al unir a los ecosistemas de la parte alta de la cuenca con los de la parte baja, formando una unidad (la cuenca misma). Romper estas conexiones tiene repercusiones drásticas en el sistema (Toledo 2003). En la zona de estudio se encontró que tanto el Arroyo Alamar, en México, como el Estero del Río Tijuana, en E.U., han quedado casi totalmente rodeados por uso urbano. De éstos, sólo el Estero del Río Tijuana tiene decreto de protección y aunque ha habido intentos por conservar la vegetación de galería del Arroyo Alamar, éstos no se han concretado. Lo mismo ha sucedido con otros elementos particulares como el Cerro Colorado, el cual ha sido rodeado por asentamientos irregulares, muchos de ellos sobre áreas con pendientes muy acusadas (Bringas y Sánchez, 2006).

Si el crecimiento urbano sigue la misma tendencia que hasta ahora, es muy probable que las presas terminen rodeadas de zonas urbanas. Según Peters y Meybeck (2000) las consecuencias serían el aumento de un proceso de erosión y de riesgo de azolve y la consecuente disminución en la calidad del agua.

Considerando que las actividades secundarias y terciarias son las que más contribuyen a la economía de la región, era de esperarse que las mayores transformaciones dentro de la CRT hayan sido ocasionadas por el crecimiento urbano y es muy probable que esta tendencia continúe. Esto se confirma con el proyecto de ciudad satélite que recientemente fue aprobado para desarrollarse en

El Valle de Las Palmas y que cubrirá, en la parte media de la CRT, 13.4 km² para el 2030⁶.

Conocer la dinámica del uso del suelo a nivel de paisaje en zonas de rápido crecimiento urbano utilizando SIG permitiría tomar decisiones más informadas en el campo de la planificación territorial y crear escenarios que faciliten evaluar espacialmente los impactos que puedan tener diferentes políticas.

Agradecimientos

Rafael Bermúdez por el apoyo técnico en la última fase del trabajo. Este proyecto fue financiado parcialmente por CONACYT-SEMARNAT 2002-CO1-1313.

Referencias bibliográficas

- Bocco, G. 2000. El desarrollo de sistemas de información geográfica en la Frontera norte de México. Boletín del Instituto de Geografía UNAM 42: 40-47.
- Bocco, G., Sánchez, R. y H. Riemann, 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. Frontera Norte 5(10): 53-84.
- Bowler, P.A. (1992) II. Shrublands. In defense of disturbed lands. Restoration & Management Notes 10(2):144-149.
- Briassoulis, H. 2000. Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. Regional Research Institute. West Virginia University. <http://www.rrl.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>
- Bringas, N. y Sánchez, R. (2006) Social vulnerability and disaster risk in Tijuana: Preliminary findings. En Equity and Sustainable Development. Reflections from the U.S. Mexico Border (J. Clough-Riquelme y N. Bringas, eds.), pp. 149-173. Center for US Mexico Studies, University of California, San Diego.

⁶ Frontera. 2007. Ponen en marcha ciudad satélite. 17 de marzo de 2007. Tijuana, México.

- Bürgi, M., Hersperger, A.M. y Schneeberger, N. (2004) Driving Forces of landscape change –current and new directions. *Landscape Ecology* 19: 857-808.
- Cifaldi, R. L., Allan, J.D., Duh, J.D. & Brown, D.G. (2004). Spatial patterns in land cover of exurbanizing watersheds in southeastern Michigan. *Landscape Urban Plann.* 66:107-123.
- Cotler H (comp.). (2004) El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política Ambiental. SEMARNAT-INE. 264 pp.
- Crooks, R. (2002) Relative sensitivities of mammalian carnivores to habitat fragmentation. *Conservation Biology* 16(2): 488-502.
- Dietzel, C., Herold, M. Hemphill, J.J., y Clarke, K.C. 2005. Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: Empirical links to urban theory. *International Journal of Geographical Information Science* 19(2): 175-195.
- Dourjeani A.A., Jouralev y Chávez, G. (2002) Gestión del Agua a nivel de cuencas; teorías y práctica. Documento de trabajo No. 1. Programa Agua, medio ambiente y sociedad. El Colegio de México y Comisión Económica para América Latina.
- Folke, C. (1997) Linking water flows and ecosystem services. A conceptual framework for improved environmental management. En *With rivers to the Sea, Interaction of land activities, fresh water and enclosed coastal seas.* pp. 261-277, *Proceedings Stockholm Water Symposium/EMECS.* Estocolmo, 10-15 de Agosto.
- Forman, R.T.T. (1995) *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions.* Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Grimm, N.B., Morgan J.M., Steward, T., Pickett, A. y Redman, C.L. (2000) Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *BioScience* 50(7): 571-584.

- Herold, M., Hemphill, J., Dietzel, C. y Clarke, K.C. (2005) Remote sensing derived mapping to support urban growth theory. Proceedings of URS2005 conference. Phoenix, AZ, March 2005.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (2000) XII Censo General de Población y Vivienda 2000. INEGI, Aguascalientes, México.
- INEGI (2006) II Conteo Nacional de Población y Vivienda 2005. INEGI. Aguascalientes, México.
- Iverson, L.R. (1988) Land-use changes in Illinois, U.S.A.: The influence of landscape attributes on current and historic land use. *Landscape Ecology* 2(1): 45-61.
- Luck, M. y Wu, J. (2002) A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona USA. *Landscape Ecology* 17: 327-339.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M. y E. Duhau. 2001. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico. *Landscape and urban planning* 55:271-285.
- Mas, J., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, R., Mayorga-Saucedo, T., C. Alcántara, Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. & Pérez-Vega, A. (2004) Assessing land use/cover changes/nation wide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of applied earth observation and geoinformation* 5(2004): 249-261.
- NOAA (2006) Climate of San Diego California. Technical Report Memorandum NWS WR-275. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). Washington, D.C.
- Ojeda, L. 2000. Landuse and the conservation of natural resources in the Tijuana River Basin. en Capítulo 9, Shared Spaces: Mexico-United States Environmental Future (Herzog, L., ed.) pp. 211-232. San Diego, Center for U.S. Mexico Studies.
- Ojeda, L. 2002. Habitat fragmentation in the Tijuana River Watershed (1953-1994). En: Tecate Baja California: Realities and challenges in a Mexican

- Border Community (Ganster, P., Cuamea, F., Castro, J.L. y Villegas, A. eds.) pp. 163-176. San Diego State University Press. Institute for Regional Studies, of the Californias.
- Ojeda-Revah, L., G. Bocco, E. Ezcurra, e I. Espejel. (2007) Socio-economic dynamics and vegetation change: Land-cover/use transitions (1970-1994) in the binational Tijuana River Watershed. *Applied Vegetation Science* (en prensa).
- Ojeda, L. y Espejel, I. (2007) La cuenca binacional del Río Tijuana: un enfoque biohistórico. *Economía. Sociedad y Territorio* (en prensa).
- Peters, N.E. y Meybeck, M. (2000) Water quality degradation effects on freshwater availability: Impacts of human activities. *Water International* 25(2): 185-193.
- Riemann H. y Ezcurra, E. (2005) Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico. *Biological Conservation* 122:141-150.
- San Diego Association of Governments (SANDAG) (2006) Data Warehouse. SANDAG, San Diego, CA. <http://datawarehouse.sandag.org/>
- San Diego State University (SDSU) & Colegio de la Frontera Norte (COLEF) (2005) Tijuana River Watershed Atlas. SDSU & COLEF. San Diego University Press. Institute for Regional Studies of the Californias. San Diego, California.
- Seto, K. y Fragkias, M. (2005) Quantifying spatiotemporal patterns of land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape Ecology* 20: 871-888.
- Syphard, A.D., Clarke, K.C. y Franklin, J. (2005) Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in Southern California. *Ecological Complexity* 2: 185-203.
- Soulé, M.E., Alberts, A.C. y Bolger, D.T. (1992) The effects of habitat fragmentation on chaparral plants and vertebrates. *Oikos* 63:39-47.
- Toledo, A. (2003) Ríos, costas y mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México. SEMARNAT-INE-COLMICH. 114pp.
- Verburg, P.H., Schot, P., Dijst, M. y A. Veldkamp. 2004. Land use change modeling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61(4): 309-325.

Yang, X. y C.P. Lo. 2003. Modeling urban growth and landscape change in the Atlanta metropolitan area. *Int. J. Geographical Information Science* 17(5): 463-488.

Figuras y cuadros

Cuadro No.1 Recategorizaciones de la tipología usada en Ojeda et al. (2007)

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| Bosque mixto | Vegetación natural |
| Bosque de pino Jeffrey | |
| Matorral de Junípero | |
| Chaparral | |
| Matorral costero | |
| Pradera de alta montaña | |
| Vegetación de galería | |
| Pastizal | Agricultura y pastizales |
| Agricultura de riego | |
| Agricultura de temporal | |
| Urbano | Urbano |
| Presas | Presas |

Cuadro No. 2. Superficies, cambios y tasas de cambio de usos del suelo y vegetación en la CRT en km² (1970-72, 1994 y 2005)

| | | | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presas | Total |
|--------|----------------|---------|--------------------|--------------------------|--------|--------|----------|
| US | superficie | 1972 | 1,079.12 | 93.29 | 32.61 | 4.81 | 1,209.83 |
| | | 1994 | 1,040.53 | 86.49 | 72.44 | 10.06 | 1,209.51 |
| | | 2005 | 1,040.30 | 71.53 | 95.46 | 2.14 | 1,209.44 |
| | tasa de cambio | 1972-94 | -0.17 | -0.34 | 3.63 | 3.36 | |
| | | 1994-05 | 0.00 | -1.73 | 2.51 | -14.08 | |
| México | superficie | 1972 | 2,910.52 | 255.11 | 69.56 | 4.84 | 3,240.03 |
| | | 1994 | 2,757.74 | 253.90 | 221.01 | 7.39 | 3,240.03 |
| | | 2005 | 2,701.48 | 172.15 | 362.77 | 3.64 | 3,240.03 |
| | tasa de cambio | 1972-94 | -0.25 | -0.02 | 5.25 | 1.92 | |
| | | 1994-05 | -0.19 | -3.53 | 4.51 | -6.44 | |

Nota: Las ligeras diferencias de algunas cifras se deben a errores de trazado en los límites de los polígonos, mismos que no fueron consideradas las pequeñas diferencias en el área de los polígonos (<0.05% para toda la cuenca).

Cuadro No. 3 Número de polígonos y tasa de cambio por categoría de usos del suelo y vegetación en la CRT (1970-72, 1994 y 2005)

| | | | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presa | Total |
|--------|----------------|---------|--------------------|--------------------------|--------|--------|------------|
| Cuenca | polígonos | 1972 | 34 | 392 | 127 | 17 | 570 |
| | | 1994 | 105 | 618 | 181 | 20 | 924 |
| | | 2005 | 95 | 181 | 177 | 7 | 460 |
| | tasa de cambio | 1972-94 | 5.13 | 0.64 | 1.61 | 0.74 | |
| | | 1994-05 | -0.91 | -11.16 | -0.20 | -9.54 | |
| E.U. | polígonos | 1972 | 8 | 123 | 75 | 16 | 222 |
| | | 1994 | 10 | 122 | 97 | 18 | 247 |
| | | 2005 | 17 | 94 | 94 | 3 | 208 |
| | tasa de cambio | 1972-94 | 1.01 | -0.41 | 1.17 | 0.54 | |
| | | 1994-05 | 4.82 | -2.37 | -0.29 | -16.29 | |
| México | polígonos | 1972 | 29 | 274 | 54 | 1 | 358 |
| | | 1994 | 98 | 505 | 88 | 2 | 693 |
| | | 2005 | 80 | 90 | 88 | 4 | 262 |
| | tasa de cambio | 1972-94 | 5.53 | 0.89 | 2.22 | 3.15 | |
| | | 1994-05 | -1.84 | -15.68 | 0.00 | 6.30 | |

Cuadro No. 4 Transiciones de usos del suelo y vegetación en la parte de E.U. de la CRT (1972-1994 y 1994-2005)

| 1972-1994 | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presas | Total |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
| Vegetación natural | 1,031.62 (0.99) | 8.21 (0.01) | 0.68 - | 0.02 - | 1,040.53 |
| Agricultura y pastizales | 20.36 (0.24) | 62.57 (0.75) | 0.04 - | 0.81 (0.01) | 86.49 |
| Urbano | 22.15 (0.31) | 19.72 (0.27) | 30.57 0.42 | - - | 73.44 |
| Presas | 5.99 (0.66) | 0.09 (0.01) | - - | 3.97 (0.34) | 10.06 |
| Total | 1,080.12 | 93.29 | 31.29 | 4.81 | 1,209.51 |
| 1994-2005 | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presas | Total |
| Vegetación natural | 993.32 (0.95) | 38.60 (0.04) | 0.44 - | 7.95 (0.01) | 1,040.31 |
| Agricultura y pastizales | 33.94 (0.47) | 37.16 (0.52) | 0.24 - | 0.20 - | 71.54 |
| Urbano | 14.34 (0.15) | 10.73 (0.11) | 70.38 0.71 | 0.01 - | 95.46 |
| Presas | 0.10 (0.05) | - - | - - | 2.03 (0.95) | 2.13 |
| Total | 1,041.70 | 86.49 | 71.06 | 10.19 | 1,209.44 |

Nota: los números en paréntesis representan las probabilidades de cambio, los números en negritas, la diagonal de la matriz de transición. Las ligeras diferencias de algunas cifras se deben a errores de trazado en los límites de los polígonos, mismos que no fueron consideradas las pequeñas diferencias en el área de los polígonos (<0.05% para toda la cuenca).

Cuadro No. 5 Transiciones de usos del suelo y vegetación en la parte de México de la CRT
(1972-1994 y 1994-2005)

| 1972-1994 | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presas | Total |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Vegetación natural | 2,706.41 (0.98) | 50.59 (0.02) | 0.69 - | 0.05 - | 2,757.74 |
| Agricultura y pastizales | 99.85 (0.46) | 153.43 (0.23) | 0.61 (0.31) | 0.01 - | 253.89 |
| Urbano | 102.73 (0.46) | 50.01 (0.23) | 68.26 (0.31) | 0.01 - | 221.01 |
| Presas | 1.52 (0.21) | 1.10 (0.15) | - - | 4.77 (0.65) | 7.39 |
| Total | 2,910.51 | 255.13 | 69.55 | 4.84 | 3,240.03 |
| 1994-2005 | Vegetación natural | Agricultura y pastizales | Urbano | Presas | Total |
| Vegetación natural | 2,591.32 (0.96) | 103.79 (0.04) | 4.02 - | 2.32 - | 2,701.45 |
| Agricultura y pastizales | 68.80 (0.40) | 101.49 (0.59) | 0.13 - | 1.75 (0.01) | 172.16 |
| Urbano | 97.22 (0.27) | 48.62 (0.13) | 216.81 (0.60) | 0.13 - | 362.79 |
| Presas | 0.41 (0.11) | - - | 0.05 (0.01) | 3.19 (0.88) | 3.64 |
| Total | 2,757.74 | 253.90 | 221.01 | 7.39 | 3,240.04 |

Nota: los números en paréntesis representan las probabilidades de cambio, los números en negritas, la diagonal de la matriz de transición

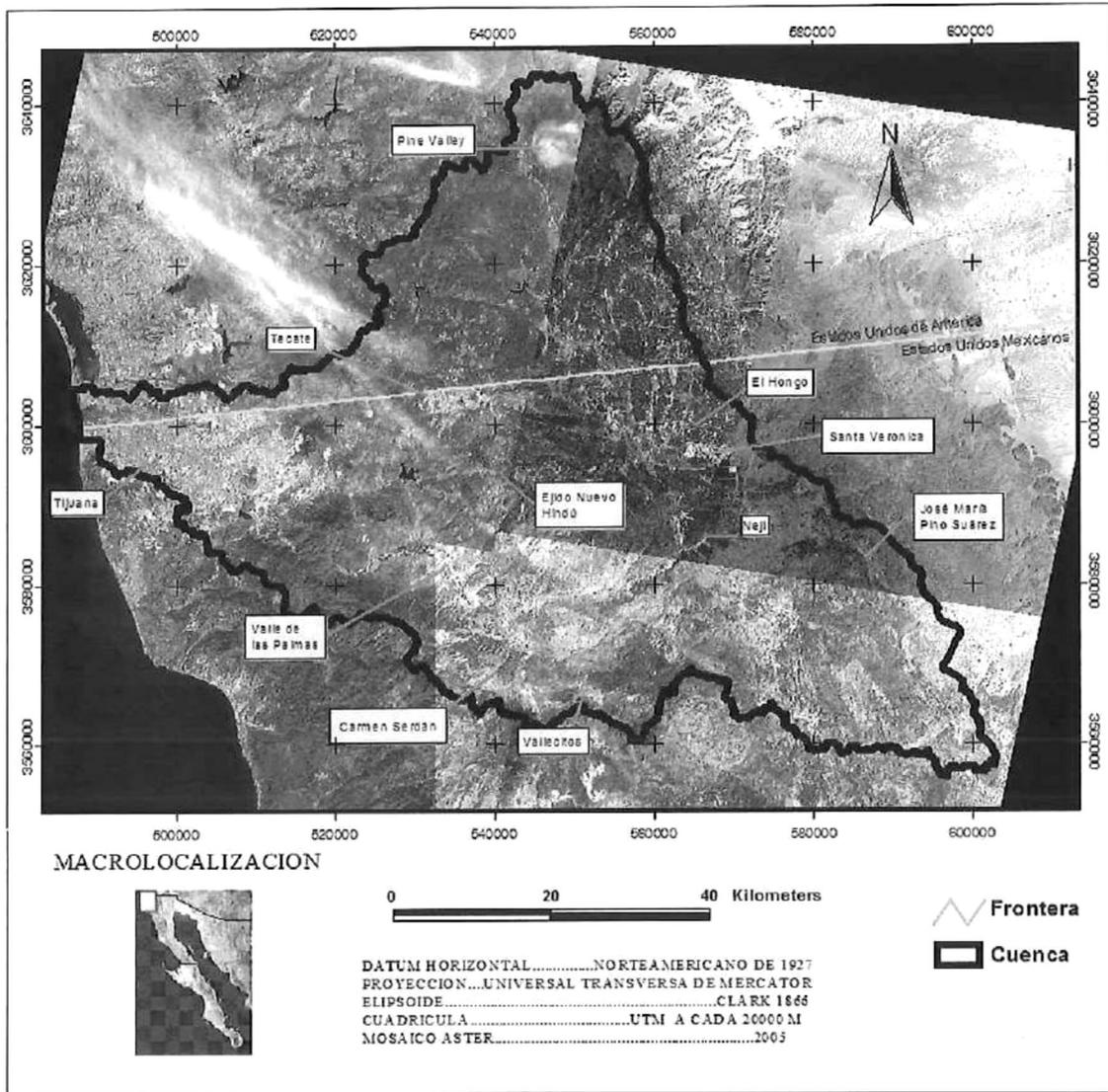


Figura No.1. Cuenca del Río Tijuana y contexto urbano de las ciudades de San Diego, EU y Tijuana, México. Imagen Aster del 2005

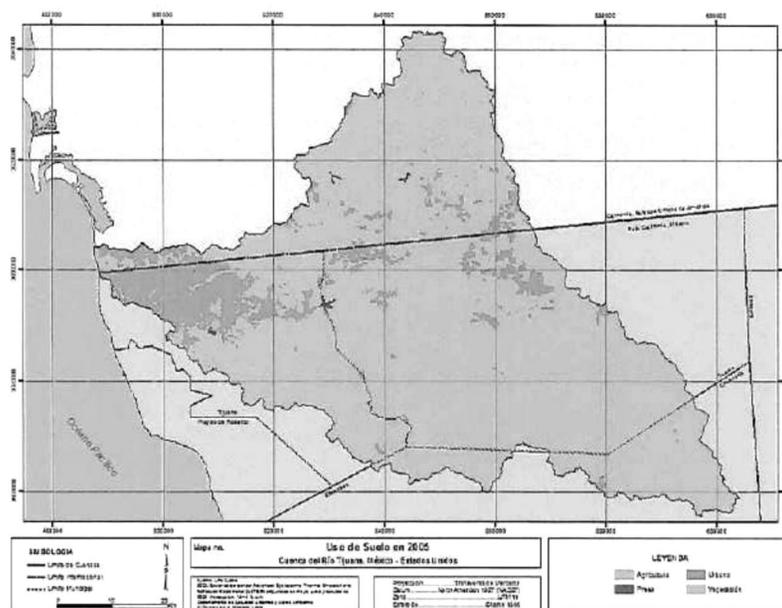
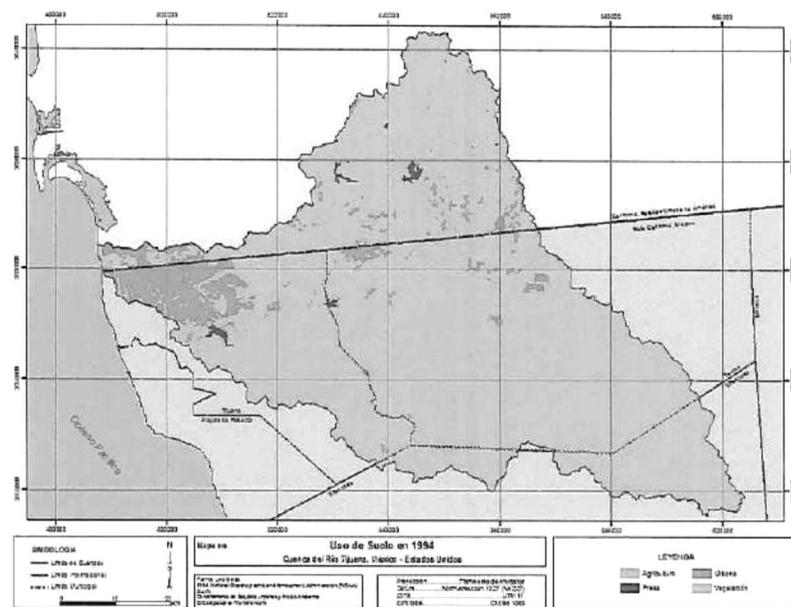
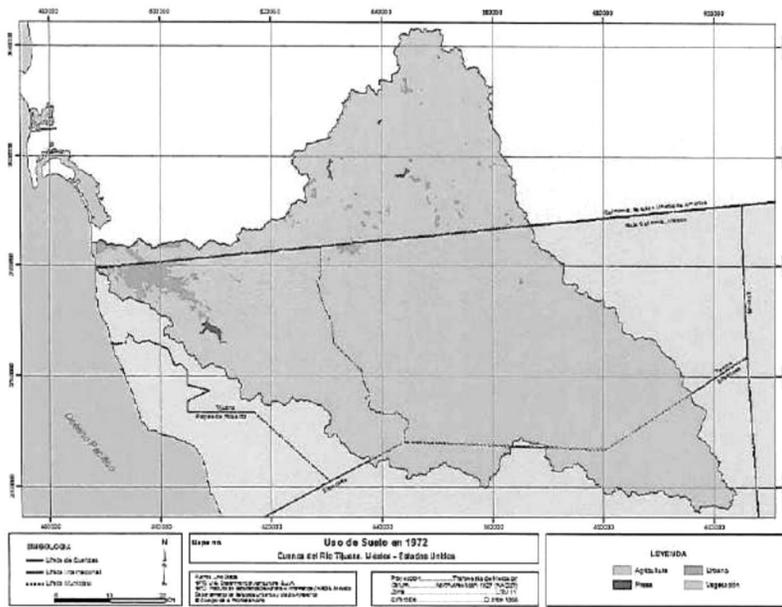
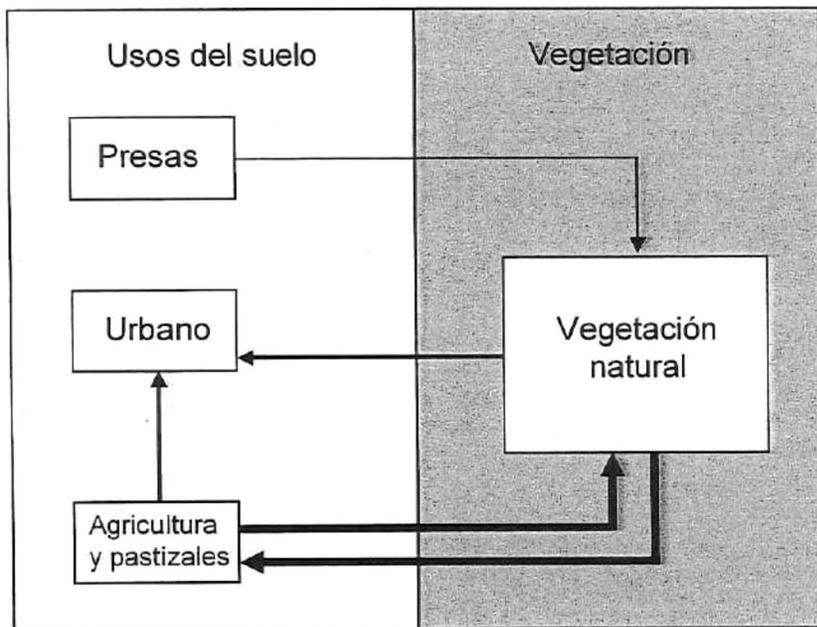


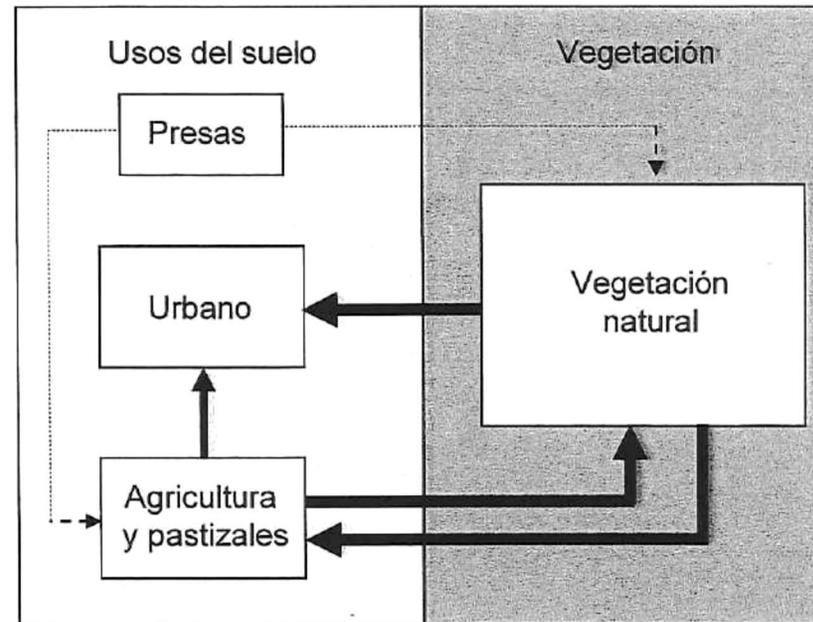
Figura No. 2. Usos del suelo y vegetación en la Cuenca del Río Tijuana (1970-72, 1994 y 2005).

Figura No.3. Transiciones de usos del suelo y vegetación en la Cuenca del Río Tijuana 1994-2005

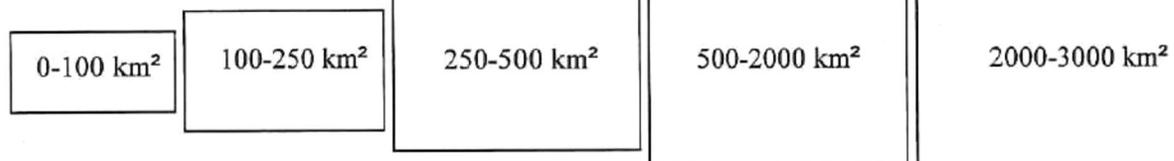
Transiciones de uso del suelo y vegetación
1994-2005 en E.U.



Transiciones de uso del suelo y vegetación
1994-2005 en México



Área ocupada por usos del suelo o vegetación



Área transformada

