



**ZONA METROPOLITANA DE TIJUANA- TECATE- PLAYAS DE ROSARITO,  
BAJA CALIFORNIA: ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE INFRAESTRUCTURA  
VERDE Y SU CONECTIVIDAD FÍSICA**

Tesis presentada por

**Yazmin Ochoa González**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN ADMINISTRACIÓN INTEGRAL  
DEL AMBIENTE**

Tijuana, B.C., México

2014.

# CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Directora de Tesis: \_\_\_\_\_

Dra. Lina Ojeda Revah

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

## **Dedicatoria**

A mi papá Antonio que siempre ha creído en mí y me ha enseñado con su ejemplo la importancia del trabajo y la perseverancia.

A mi mamá Ylda por su dedicación, cariño y apoyo en cada etapa de mi vida.

A mis hermanas Yessi y Eli, con las que compartí la mejor de las infancias.

A mi pequeño sobrino Ian que con su inocencia y alegría ha iluminado algunos días nublados.

A mi tía Mariquita, tío Benjamín y sus hijos Miriam y Quique que siempre han sido parte importante de mi familia.

También quiero hacer un especial reconocimiento a todas aquellas personas que me han brindado su amistad y que me han ayudado en las buenas y en las malas; algunas incluso a pesar del tiempo y la distancia; siempre las llevo en mi corazón.

*Sólo debes hacer lo que amas...*

***Facundo Cabral***

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de estos estudios.

A El Colegio de la Frontera Norte (COLEF) por su capacitación de excelente calidad.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por constituir una parte fundamental en mi formación académica.

A la Dra. Lina Ojeda Revah por aceptar guiarme en el sinuoso camino de la investigación, por prestarme su lógica, conocimientos y experiencia para lograr satisfactoriamente este trabajo, por dedicarme incontables horas de su tiempo, así como por su paciencia y firme apoyo.

Al Dr. Calderón y al Dr. Cesar Peña Salmon por aceptar ser parte de mi comité de tesis y brindarme invaluable conocimientos y comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

A los miembros de la Unidad de Servicios Estadísticos y Geomática (USEG), Francisco Lares y Rafael por su asesoría con los programas de sistemas de información geográfica. En especial a Carlos González que fue mi guía en el trabajo de campo.

A la planta docente de la MAIA porque gracias a ellos aprendí valiosas lecciones sobre la calidad e importancia del trabajo.

A la Dra. Claudia Leyva por sus consejos y por la información que me brindo.



## RESUMEN

Los servicios ecosistémicos indispensables para la vida y para el bienestar humano son afectados por la transformación de la superficie terrestre, en especial en ciudades con alta densidad poblacional y que consumen muchos recursos. Con ello, se incrementa el riesgo de la población ante eventos meteorológicos extremos y se reduce la capacidad de resiliencia para enfrentarlos. En el caso de Zona Metropolitana de Tijuana-Tecate-Rosarito (ZMTTR), una zona con topografía accidentada, alta diversidad, gran número de endemismos y carencia de áreas verdes, los mayores riesgos provocados por el cambio de uso del suelo son deslaves e inundaciones y pérdida de biodiversidad. Con la finalidad de solventar todos estos problemas de forma conjunta, en este trabajo se realiza una propuesta de infraestructura verde (red de áreas verdes). Para ello, con base en una imagen de satélite (2012) se construyó un mapa de usos del suelo y tipos de vegetación, se combinó con (1) áreas con pendientes pronunciadas. (2) cursos de agua y (3) áreas ecológicas únicas y se construyeron diferentes escenarios de conservación. Además se hizo un análisis factibilidad con base en la legislación existente. Los resultados mostraron que se puede conservar gran parte de la vegetación natural sólo con las áreas de riesgo (pendientes > 35 % y cursos de agua) con una buena conectividad física, todo esto con la legislación ya existente. Además al sumar otros criterios como corredores se puede conservar más superficie y aumentar la conectividad física.

Palabras clave: Infraestructura verde, servicios ecosistémicos, Zona Metropolitana Tijuana-Tecate-Playas de Rosarito

## ABSTRACT

The ecosystem services are for human life well-being, but they are affected by land cover change, especially in cities with large population density and intensive resource consumption. In consequence the city's landscape reduces its resilience capacity and population risks increases, especially during extreme meteorological events. This is especially true within settlement distributed along water courses and steep slopes, with lack of green areas and where natural vegetation has been removed (loosing local biodiversity), consequently landslide and floods risk increase, as it occurs at the Tijuana-Tecate-Rosarito metropolitan area. In order to solve at the same time all this problems, this study proposes a green infrastructure plan (Interconnected green areas) for this area. Based in the construction of a land use/cover map using satellite images of 2012, the plan includes the conservation of risk areas of (1) steep slopes, (2) water courses, and (3) and unique ecological, analyzing different scenarios. Results showed that just considering areas in risk (slopes > 35 % and water courses) with a good connectedness, all this support by the legislation. If other criteria are added, like special ecological areas the conservation area and its connectedness increase.

Key words: Green infrastructure, ecosystem services, Tijuana, Tecate, Playas de Rosarito

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Planteamiento del problema.....	7
1.3. Preguntas de investigación.....	8
1.4. Objetivo general .....	9
1.5. Objetivos específicos .....	9
1.6. Justificación .....	10
1.7. Hipótesis inicial .....	11
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL .....	12
CAPÍTULO II. MARCO CONTEXTUAL .....	23
2.1. Localización del área de estudio .....	23
2.2. Aspectos físicos .....	23
2.3. Aspectos biológicos .....	26
2.4. Aspectos poblacionales y económicos.....	27
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	29
3.1. Usos del suelo y tipos de vegetación .....	31
3.2. Pendientes pronunciadas.....	33
3.3. Zonas de amortiguamiento de cursos de agua .....	35
3.4. Áreas de riesgo.....	38
3.5. Lugares ecológicos sobresalientes .....	38
3.6. Construcción de escenarios de infraestructura verde.....	38
CAPÍTULO IV. COMPOSICION Y CONFIGURACION DEL PAISAJE .....	45
CAPITULO V. ESCENARIOS DE CONSERVACION .....	57

5.1. Escenario 1. Conservación de zonas de riesgo (pendientes>35 % y cursos de agua) ...	57
5.2. Escenario 2. Conservación de zonas de riesgo (pendientes>35 % y cursos de agua) y áreas especiales identificadas (mapa 5.2) .....	65
5.3. Escenario 3. Conservación de zonas de riesgo (pendientes>35 % y cursos de agua), áreas especiales identificadas y algunos corredores de vegetación natural (mapa 5.4) .....	72
5.4. Escenario 4. Conservación de zonas de riesgo (pendientes>35 % y cursos de agua), áreas especiales identificadas y algunos corredores que incluyen pastizal inducido (mapa 5.5). .....	72
5.5. Análisis comparativo de los escenarios de infraestructura verde propuestos para la ZMTTR.....	72
CAPÍTULO VI. LEGISLACIÓN.....	82
6.1. Nivel Federal y Estatal.....	82
6.2. Nivel metropolitano y municipal .....	84
CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN.....	88
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES .....	99
BIBLIOGRAFÍA .....	101
ANEXOS .....	114
Trabajo de campo.....	114

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Incremento anual porcentual en el área urbana de Tijuana por la inclinación de la pendiente de 1972-2000 .....	28
Cuadro 3.1. Descripción de los usos del suelo y tipos de vegetación para la ZMTTR.....	32
Cuadro 3.2. Datos sobre el trabajo de campo .....	33
Cuadro 3.3. Clasificación de pendientes .....	35

Cuadro 3.4. Criterios de conservación de los escenarios para la ZMTTR .....	39
Cuadro 3.5. Métricas del paisaje .....	41
Cuadro 3.6. Métricas de composición del paisaje .....	41
Cuadro 3.7. Descripción del índice de cohesión .....	43
Cuadro 3.8. Descripción del índice del vecino más cercano .....	44
Cuadro 4.1. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de los usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR .....	45
Cuadro 5.1. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de áreas de riesgo de la ZMTTR.....	57
Cuadro 5.2. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de áreas ecológicas sobresalientes de la ZMTTR .....	66
Cuadro 5.3. Clasificación de atributos.....	68
Cuadro 5.4. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de las áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua) resaltando los lugares ecológicos sobresalientes.....	70
Cuadro 5.5. Vegetación natural de la ZMTTR. Conectividad del paisaje.....	73
Cuadro 5.6. Porcentaje de superficie que se conservaría por usos del suelo y tipos de vegetación en cada escenario propuesto .....	76
Cuadro 5.7. Vegetación natural a conservar en los escenarios. Métricas del paisaje.....	77
Cuadro 5.8. Porcentaje de vegetación, número de fragmentos mayores a 1,000 ha y tamaño del fragmento más grande que se conservarían en los diferentes escenarios propuestos.....	78
Cuadro 5.9. Índices normalizados sumados para términos comparativos de los escenarios propuestos .....	79
Cuadro A.1. Especies animales que se observaron en el trabajo de campo .....	114

Cuadro A.2. Cuadro A.2. Lugares ecológicos especiales designados por Oberbauer (1999) identificados en campo .....	114
Cuadro A.3. Especies de la ZMTTR que se encuentran en la NOM-059-SEMARNAT-2010 .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Marco teórico-conceptual.....	22
Figura 3.2. Pendiente inadecuada (mayor a 35 %) para asentamientos humanos .....	34
Figura 3.3. Direcciones que puede tomar el drenaje natural (en celdas de mapa <i>raster</i> ).....	36
Figura 3.4. Interpretación de la dirección del flujo de la corriente y su acumulación .....	36
Figura 3.5. Clasificación del orden de drenaje .....	37
Figura 5.1. Suma de índices normalizados de los diferentes escenarios .....	80

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Fragmentos de chaparral mayores a 1,000 ha.....	47
Gráfica 4.2. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha de chaparral .....	49
Gráfica 4.3. Fragmentos de matorral costero mayores a 1,000 ha .....	49
Gráfica 4.4. Matorral costero. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha .....	51
Gráfica 4.5. Vegetación de galería. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha .....	52
Gráfica 4.6. Fragmentos de pastizal inducido mayores a 1,000 ha .....	53
Gráfica 4.7. Fragmentos urbanos mayores a 1,000 ha.....	55
Gráfica 4.8. Urbano. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha .....	56

Grafica 5.1. Porcentaje de superficie conservada en áreas de riesgo por usos del suelo y tipos de vegetación.....	59
Gráfica 5.2. Fragmentos de Chaparral mayores a 100 ha de en áreas de riesgo .....	61
Gráfica 5.3. Chaparral. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha del en áreas de riesgo.....	61
Gráfica 5.4. Fragmentos de matorral costero mayores a 100 ha en áreas de riesgo .....	62
Gráfica 5.5. Matorral costero. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha de en áreas de riesgo .....	62
Gráfica 5.6. Fragmentos mayores a 100 ha de vegetación de galería en áreas de riesgo .....	63
Gráfica 5.7. Vegetación de galería. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha de en áreas de riesgo .....	64
Gráfica 5.8. Vegetación de natural en la ZMTTR. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha .....	74
Gráfica 5.9. Fragmentos mayores a 1,000 ha de vegetación natural en los escenarios .....	81

## ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 2.1. Localización de la ZMTTR .....	25
Mapa 2.2. Altitud de la ZMTTR .....	25
Mapa 4.1. Usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR.....	46
Mapa 5.1. Áreas de riesgo (Pendientes>35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento) por usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR.....	58
Mapa 5.2. Lugares ecológicos sobresalientes de la ZMTTR.....	67
Mapa 5.3. Áreas de riesgo (Pendientes>35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento) resaltando los lugares ecológicos sobresalientes de la ZMTTR .....	71
Mapa 5.4. Vegetación natural en la ZMTTR.....	74

Mapa 5.5. Escenario 1 propuesta de conservación que incluye áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua) para la ZMTTR.....	75
Mapa 5.6. Escenario 2 propuesta de conservación que incluye áreas de riesgo (pendientes >35% y cursos de agua) y lugares especiales para la ZMTTR .....	75
Mapa 5.7. Escenario 3 propuesta de conservación que incluye áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores con vegetación natural para la ZMTTR .....	75
Mapa 5.8. Escenario 4 propuesta de conservación que incluye áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores que incluyen pastizal inducido para la ZMTTR.....	75
Mapa A.1. Trabajo de campo realizado en la ZMTTR .....	115
Mapa A.2. Lugares ecológicos especiales descritos por Oberbauer (1999) identificados en campo en la ZMTTR.....	115
Mapa A.3. Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso en la ZMTTR .....	117
Mapa A.4. Distribución del Águila Real <i>Aquila chrysaetos</i> en la ZMTTR.....	117
Mapa A.5. Distribución del Cóndor de California <i>Gymnogyps californianus</i> en la ZMTTR.....	117
Mapa A.6. Distribución del Murciélago trompudo <i>Choeronycteris mexicana</i> en ZMTTR.....	117
Mapa A.7. Distribución de la Perlita de California <i>Polioptila californica</i> en la ZMTTR.....	118
Mapa A.8. Distribución de la Biznaga Barril Verdosa <i>Ferocactus viridescens</i> y el Meteoro de California <i>Microtus californicus</i> en la ZMTTR.....	118

## INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que obtiene la sociedad de la naturaleza (Balvanera y Cotler, 2011). Estos son de provisión tangibles, como los alimentos y la madera; de regulación, como la modulación del clima y la erosión; culturales materiales o inmateriales, que dependen de percepciones humanas; y de sustento, aquellos procesos ecológicos indispensables para que funcionen los ecosistemas, como la limpieza del aire, entre otros (Balvanera y Cotler, 2011).

Los seres humanos han modificado la superficie terrestre través de la agricultura, la ganadería y los asentamientos humanos (Defries, 2004); en especial en las ciudades de donde hay mayor densidad de población (Qi *et al.* 2004), en donde se estima vive 53 por ciento de la población (GBM, 2013). Estas acciones han disminuido la cantidad y calidad de los servicios ecosistémicos (Defries, 2004), desequilibrado los ecosistemas y aumentado la vulnerabilidad de la población ante fenómenos naturales adversos (Lambin *et al.* 2001). Casi 40 por ciento de la Tierra se convirtió en agrícola y de pastoreo (Enger y Smith, 2004) y aunque sólo 2 por ciento es urbano (Pisanty *et al.* 2009), afecta con más intensidad a la biosfera de forma negativa (Qi *et al.* 2004), porque consume grandes cantidades de recursos (Collins *et al.* 2000) y modifica profundamente el entorno (Qi *et al.* 2004). Por ejemplo, al aumentar la cantidad de superficie de pavimento y cemento se concentra más calor y se incrementan las temperaturas, fenómeno conocido como efecto “isla de calor” (Gill *et al.* 2007). Asimismo, la remoción de la cubierta vegetal produce erosión el suelo y deslaves porque no están las plantas para dar soporte con sus raíces. La impermeabilización de los suelos a través de la pavimentación impide la infiltración de agua en el suelo, (Gill *et al.* 2007). La escorrentía aumenta en zonas pavimentadas y en áreas sin vegetación. Además en las ciudades se modifican los cursos de agua lo que tiene efectos sobre los procesos hidrológicos (Mas-Pla y Bach, 2008).

Estos problemas pueden mitigarse en las ciudades y sus alrededores mediante la implementación de los principios de la infraestructura verde, que tratan de conservar áreas naturales dentro y fuera de ellas (Gill *et al.* 2007), manteniendo su conectividad para permitir el flujo de materia y energía (Forman, 2008) y conservando los servicios ecosistémicos que las áreas naturales producen. Se trata de mantener el equilibrio entre espacios naturales y espacios contruidos, para que tanto las personas como la vida silvestre se vean beneficiados, es decir,



que ambos puedan desarrollarse plenamente. Que las personas tengan sus hogares, escuelas, lugares de trabajo y áreas de recreación y que se mantenga la vida silvestre con hábitats adecuado y áreas de alimentación (Benedict y McMahon, 2006).

La infraestructura verde gracias a los conceptos de ecología del paisaje y planeación es una visión más integral que el estándar urbanístico de crear parques aislados, que no consideran la conectividad de estos para el mejor funcionamiento de los servicios ecosistémicos (Ávila, 2009; Tzoulas *et al.* 2007). Todos importantes para el bienestar humano, en especial porque proporcionan estabilidad y capacidad de resiliencia ante eventos naturales extremos (Andrade *et al.* 2011) en especial en las áreas urbanas.

Un lugar en el que se podrían implementar los principios de la infraestructura verde es la recién decretada Zona Metropolitana de Tijuana-Tecate-Rosarito (ZMTTR) en Baja California, que ha crecido de forma acelerada y con escasa planeación (Venegas y Rojas, 2009). Con ello, se ha causado pérdida y disminución de sus ecosistemas de tipo semiárido, considerados como únicos en el mundo (Myers *et al.* 2000), afectando los servicios ecosistémicos que prestan y, por lo tanto, reduciendo el bienestar de su población. En esta zona el acelerado crecimiento sobre pendientes pronunciadas y cursos de agua naturales (Bringas y Sánchez, 2006) ha aumentado los riesgos a los que está expuesta la población por deslizamientos e inundaciones (Ojeda-Revah y Espejel-Carbajal, 2008). Asimismo, la calidad de vida se ha visto afectada porque no existen espacios verdes adecuados para la recreación (Huizar, 2012; Sierra 2002), importantes para la salud física y mental y para generar lazos entre las personas de la comunidad (Tzoulas *et al.* 2007).

Con la visión de la infraestructura verde, se podrían conjugar diversas políticas ambientales y de salud en la ZMTTR, que ayuden a proteger la integridad de los ecosistemas, y que a su vez logren disminuir los riesgos a los que está expuesta la población y mejoren su calidad de vida.

Una ventaja es que la ZMTTR todavía cuenta con espacios naturales que es posible proteger porque todavía no se desarrolla completamente. Por ello, el objetivo del presente trabajo es encontrar zonas adecuadas para establecer infraestructura verde en áreas que todavía no estén desarrolladas entre las tres ciudades. No para que la ciudad no siga creciendo, sino para que al crecer se reduzcan los riesgos, se mejore la calidad de vida de los habitantes, se ayude a la

conservación de ecosistemas naturales y los servicios ecosistémicos y además se aumente el umbral de resiliencia de la ZMTTR ante perturbaciones (Tzoulas *et al.* 2007).

Dentro de este trabajo se consideran los diferentes usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR, entre los cuales se encuentran el bosque de encino, chaparral, matorral costero y la vegetación de galería, las cuales se consideraron como elementos naturales, también se tomaron en cuenta las zonas de agricultura, pastizal inducido, urbanas y las presas que se consideraron como artificiales. Estos últimos determinan y han modificado el paisaje de la ZMTTR a través del tiempo y que a su vez son importantes para la comprensión de sus múltiples problemas ambientales. En especial el problema de los riesgos asociados a la modificación del paisaje (la pérdida de la vegetación y asentamientos humanos en pendientes y cursos de agua) que se traducen en pérdida de biodiversidad y de recursos humanos y económicos. Así desde la perspectiva de la ecología del paisaje y respaldadas por la legislación que corresponde a la zona, se identificaron áreas de oportunidad para la implementación de proyectos de infraestructura verde, en especial aquellas que implican riesgos para sus habitantes. Estas áreas ayudarán a aumentar la conectividad física de sus componentes, capacidad de resiliencia, área verde por habitante y la calidad de vida de sus pobladores.

Para el desarrollo de la investigación se tomaron en cuenta diferentes conceptos y perspectivas ecológicas que fueron utilizadas en la metodología, en especial la ecología del paisaje. Así mismo estos conceptos fueron utilizados para la interpretación de los hallazgos de la investigación. También se utilizaron en la construcción de la discusión, donde se contraponen con los resultados, con la finalidad de identificar las fortalezas y debilidades de la investigación.

La investigación está organizada en ocho capítulos. El primer capítulo es el marco teórico-conceptual donde se exponen los diferentes beneficios ecosistémicos que ofrecen los espacios con vegetación y que ayudan a mantener el buen funcionamiento de los componentes del paisaje. También se resalta la importancia de mantener los elementos naturales del paisaje como la vegetación y los cursos de agua, como una forma de prevenir riesgos y de aumentar el umbral de resiliencia de las ciudades ante eventos meteorológicos extremos. El segundo capítulo se refiere a las características geográficas de la ZMTTR. En éste se describen los aspectos relacionados con su entorno físico y biológico, y su contexto en términos poblacionales y económicos. El tercer capítulo se describe detalladamente los pasos que se

siguieron para realizar la investigación, e incluye las fuentes de información y las técnicas y herramientas que se usaron. En el cuarto capítulo inician los resultados con la descripción y análisis de los elementos que componen el paisaje de la ZMTTR y como están organizados, es decir, su configuración. En el quinto capítulo se muestran los resultados de los cuatro escenarios de conservación de vegetación, en términos del número, tamaño y posición de los fragmentos para cada tipo de cobertura. También se muestra el análisis de la conectividad física de los elementos naturales para cada escenario. El sexto capítulo estudia la factibilidad legal de la propuesta e incluye la legislación sobre áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua), áreas de conservación, parques y jardines. En el séptimo capítulo de discusión, se hace una confrontación de los conceptos y teorías del marco teórico-conceptual con los resultados obtenidos. El octavo capítulo de conclusiones, se hace un recuento de los principales hallazgos encontrados en la investigación. Finalmente se incluye un anexo sobre el trabajo de campo que se realizó para corroborar los usos del suelo y tipos de vegetación.

### 1.1. Antecedentes

Los servicios ecosistémicos son importantes para el bienestar humano (Andrade *et al.* 2011). Por ello uno de los desafíos que las grandes metrópolis como la ZMTTR tienen, es mantenerlos funcionales y a la vez crear condiciones que garanticen la calidad vida de sus habitantes. Esto requiere planeación con medidas preventivas y correctivas que reduzcan su impacto negativo al ambiente (Jacobi y Rizpah, 2012).

La ZMTTR por su escasa planeación y crecimiento rápido (Rojas, 2009) ha consumido los diferentes ecosistemas que se encuentran a su alrededor y que han significado la pérdida de ecosistemas únicos en el mundo (Myers *et al.* 2000). Así poco a poco se han reducido y transformado el matorral costero, el chaparral, las dunas, las charcas vernaes, la vegetación de galería y el bosque de encinos (Oberbauer, 1999), para dar paso a usos del suelo urbano, pastizal inducido y agricultura generados por las actividades humanas, que como consecuencia provocan pérdida de biodiversidad (Ojeda-Revah, 1999; Ojeda-Revah, *et al.* 2008; Delgadillo, 2002) y amenazan la gran riqueza de especies endémicas la región (Riemann y Ezcurra, 2007). Asimismo, el paisaje se ha fragmentado de forma “perforada”, es decir, que se hacen huecos en medio del paisaje natural, que los hace todavía más propensos a transformarse en urbanos y

por lo tanto, con un mayor riesgo de perder los beneficios que proporcionan los servicios ecosistémicos (Ojeda-Revah, 1999; Farley *et al.* 2012). Esto sucede porque se modifican los flujos de materia y energía, como el ciclo del agua y por lo tanto, hay una descompensación en los procesos. En la ZMTTR por un lado se han establecido asentamientos humanos cerca de cursos de agua y por otro lado, se han canalizado y desviado los cursos de agua, estas acciones afectan la dinámica y la morfología fluviales y en consecuencia disminuye la capacidad de drenaje y, por consiguiente, se aumenta el riesgo de las poblaciones humanas ante inundaciones (Mas-Pla y Bach, 2008), derrumbes, deslaves (Ganster, 2002). Asimismo la región es una zona sísmica, lo que puede agravar los riesgos mencionados anteriormente (Romo, 1996; Mendoza *et al.* 2009; COPLADEM T, 2000).

En particular la ciudad de Tijuana sufrió en 1993 las consecuencias de estos procesos naturales en combinación con el crecimiento desordenado, ya que al presentarse una precipitación mayor de la usual, aumentaron los derrumbes e inundaciones y por lo tanto, los daños materiales y económicos, sobre todo en muchos asentamientos humanos que se encontraban en lugares con fuertes pendientes y con suelos inestables (Romo, 1996). Esto no sucedió en localidades rurales cercanas y en laderas pronunciadas provistas de vegetación (Bocco *et al.* 1993) debido a que los suelos fueron estabilizados gracias a las raíces de las plantas a la vez que permitieron la infiltración de agua en el subsuelo lo que disminuyó la escorrentía (APA, 2013). Además, muchos asentamientos en zonas de riesgo comenzaron como invasiones y por lo tanto, su situación legal de las construcciones no está resuelta (Alegría y Ordoñez 2005). Esto provoca que ante situaciones de emergencia como los eventos meteorológicos extremos las personas no quieran acatar las indicaciones de las autoridades de desalojar sus hogares por el temor de que no puedan regresar a sus hogares y de perder sus posesiones (Bringas y Sánchez, 2006). En el trabajo de Bringas y Sánchez, (2006), se calculó que la superficie de Tijuana susceptible a inundaciones era de 10, 587 m<sup>2</sup> lo que ponía en riesgo a 72, 326 personas. También se estimó que la superficie de asentamientos en pendientes de riesgo era de 9, 386,420 m<sup>2</sup> con una población de 44,288. Y que la superficie de viviendas en áreas susceptibles a derrumbes era de 2, 954,089 m<sup>2</sup> donde habitaban 26, 570 personas (Bringas y Sánchez, 2006). Estas cifras pueden haberse incrementado.

Tijuana se ha caracterizado por atraer un gran número de personas en busca de mejores condiciones de vida, ya sea por su contacto con la frontera de los Estados Unidos o por la oferta de empleos en los diferentes sectores industriales, como las maquiladoras. A estos factores también se le suma el rápido crecimiento la población local. De 1930 a 1970 Tijuana fue una de las ciudades con mayor crecimiento en el mundo, esto sobrepasó la capacidad de las autoridades y la oferta de vivienda en el área. Así desde mediados de la década de 1950 los problemas de vivienda y de servicios han sido grandes preocupaciones para las autoridades, fue también en esta década que los asentamientos comenzaron a situarse en lugares peligrosos como laderas, cañones y los márgenes de los arroyos (Crosby *et al.* 2000). Como consecuencia del rápido crecimiento poblacional, los pocos espacios planos disponibles y del rebase de las capacidades de las autoridades, gran cantidad de asentamientos se construyeron sin la planeación adecuada, Alegría y Ordoñez (2005), estiman que cerca del 57 por ciento de las viviendas de la ciudad tuvieron un origen irregular.

También a causa de la poca planeación, la ZMTTR ha quedado desprovista de áreas verdes necesarias para su población, y las pocas áreas existentes son inaccesibles para la mayoría de sus habitantes debido a su lejanía o incluso por su condición de ser privadas y la mayoría tiene una muy mala calidad y mantenimiento (Huizar, 2012; Sierra, 2002). Tijuana cuenta con menos del 1 por ciento de áreas verdes en su superficie y sólo el 35 por ciento de los habitantes tienen acceso a ellas, a cada persona le corresponden cerca de  $1\text{m}^2$ , muy por debajo de las recomendaciones nacionales e internacionales (Huizar, 2012). En Tijuana la mayoría de los parques son muy pequeños y la mayoría desprovistos de vegetación (Huizar, 2012). En Tecate sólo se cuenta con tres parques públicos y dos de paga (Sierra, 2002).

En los planes de gobierno de la ZMTTR se observa que hace falta tomar en cuenta estrategias que traten de conciliar los intereses económicos y la preservación de la naturaleza, también hay un déficit de información sobre los recursos territoriales que permitan implementar el ordenamiento territorial (Venegas y Rojas, 2009). Esto se pretende subsanar con la implementación de los principios de la infraestructura verde entre las tres ciudades que conforman la ZMTTR. Una crítica a las áreas naturales extensas en los límites urbanos es que tienen conflicto con el crecimiento compacto, pero existen casos de éxito como Portland, Oregón que tiene una red de áreas verdes interconectadas a los sistemas regionales, en el que se siguieron

lineamientos para proteger las áreas naturales, las granjas y los espacios abiertos (Beatley y Manning, 1997).

## 1.2. Planteamiento del problema

Los servicios ecosistémicos que brinda la naturaleza, indispensables para la vida en la Tierra (Enger y Smith, 2004), se deterioran por las acciones humanas que no los consideran para evitar dañarlos. Estos daños pueden traducirse en la disminución y eliminación de los elementos del paisaje, a lo cual se conoce como fragmentación (Bennett y Saunders, 2010). La fragmentación del paisaje natural afecta la capacidad de resiliencia de la ZMTTR (Ojeda-Revah, 1999), donde se ha removido la vegetación de diversas áreas, además de impermeabilizar sus suelos, lo que afecta los ciclos hidrológicos (APA, 2013). Estas acciones empeoran sus problemas de erosión y deslaves (Romo, 1996; Ganster, 2002; COPLADEM PR, 2010), debido a la inestabilidad de sus suelos y la sismicidad del área (Romo, 1996; Mendoza *et al.* 2009; López, 2002; COPLADEM T, 2000). También repercuten en una mayor probabilidad de inundación lluvias extremas (Bocco *et al.* 1993), debido a que se impide la infiltración del agua en el suelo (APA, 2013). Además estas condiciones de riesgo para la población se intensifican por el crecimiento de la ciudad sobre zonas inundables y con pendientes mayores de 40 por ciento, lo que aumenta su vulnerabilidad ante eventos meteorológicos extremos, como ocurrió en el año de 1993, cuando en Tijuana se presentó una precipitación mayor de la habitual lo que resultó en cuantiosas pérdidas tanto económicas como de vidas humanas (Bringas y Sánchez, 2006). Este tipo de pérdidas se habrían podido reducir e incluso evitar con una adecuada planeación mediante el manejo de los procesos hidrológicos y la cobertura vegetal, lo que se constató al observar que en zonas de la ciudad donde había vegetación no se presentaron daños importantes (Bocco *et al.* 1993).

La ZMTTR presenta gran heterogeneidad en cuanto a la capacidad de planeación y gestión en los ayuntamientos que la conforman lo que hace difícil la coordinación entre ellos (Venegas y Rojas, 2009). Esto se ve reflejado en que a pesar de que la ZMTTR se encuentra en la Provincia Florística de Baja California considerada como uno de los 25 *hotspots* de biodiversidad más importantes del mundo que se encuentran amenazados por el rápido crecimiento de la urbanización (Myers *et al.* 2000) con un alto número de endemismo

(Riemann y Ezcurra, 2007), es decir, especies que tienen una distribución muy restringida, no se han emprendido acciones que traten de frenar su destrucción. De la misma forma, tampoco los ayuntamientos correspondientes a los municipios de la ZMTTR se han dado a la tarea de proveer áreas verdes adecuadas, en cantidad y accesibilidad, se estima que los parques existentes cubren menos del uno por ciento de su superficie (Huizar, 2012; Sierra, 2002; COPLADEM PR, 2010) y solo son accesibles al 37 por ciento de la población, cifras que se encuentran muy por debajo de las recomendaciones nacionales e internacionales, además la mayoría son de mala calidad, con poca o nula vegetación y de tamaño muy reducido (Huizar, 2012).

La mayoría de las plantas que se encuentran en las áreas verdes de Tijuana provienen de no están adaptadas a la región y sus necesidades de agua son altas, lo que provoca que se destinen grandes cantidades de agua en donde el recurso escasea (Ojeda-Revah y Álvarez, 2000; GobBC, 2013a).

Esta gran cantidad de problemas podrían mitigarse y evitar que se sigan agravando, si se fomenta la interconexión de sus ecosistemas, mediante la propuesta de infraestructura verde que conserve aquellas áreas que no son aptas para la construcción de asentamientos humanos, es decir, en pendientes pronunciadas y lugares cercanos a cursos de agua. Y también la protección de aquellos lugares que por sus características ecológicas son importantes no sólo para la región sino para el mundo entero (Myers *et al.* 2000).

### 1.3. Preguntas de investigación

La ZMTTR presenta un acelerado crecimiento con problemas de pérdida de cobertura vegetal, que han acelerado la erosión, deslaves e inundaciones, en especial durante eventos meteorológicos extremos. Empero aún cuenta con áreas naturales que pueden utilizarse para aumentar su capacidad de resiliencia, mitigar impactos y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Las interrogantes que surgen respecto a este tema y que guiarán el presente trabajo son: ¿En qué áreas se podría implementar infraestructura verde si se considera la reducción de los riesgos a los que está expuesta la ZMTTR, mediante los siguientes criterios: (1) las áreas con pendientes pronunciadas, (2) los márgenes de cursos de agua en donde este prohibida la

construcción de asentamientos humanos, (3) ecosistemas con características únicas? Y ¿Qué porcentaje de cada ecosistema se conservaría y en qué grado se generaría una mayor conectividad del paisaje?

#### 1.4. Objetivo general

Generar una propuesta de planificación de infraestructura verde en la ZMTTR que ayude a reducir los riesgos al aumentar la capacidad de resiliencia urbana ante eventos meteorológicos extremos, al mismo tiempo que se aumente la superficie y accesibilidad de áreas verdes y se conserven espacios naturales y se mejore la calidad de vida sus habitantes.

#### 1.5. Objetivos específicos

A) Generar un mapa actualizado de tipos de vegetación y usos del suelo de la ZMTTR.

B) Identificar lugares donde la legislación prohíbe la construcción como (1) zonas con pendientes pronunciadas y (2) cursos de agua y sus áreas cercanas, que sean adecuados para implementar infraestructura verde en la ZMTTR:

C) Identificar zonas con ecosistemas únicos con base en la distribución de especies que se encuentran en alguna categoría de riesgo y están protegidas por la NOM 059; la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso designada por la CONABIO (2012) y las áreas que menciona Oberbauer (1999) .

D) Crear escenarios de conservación que consideren los siguientes criterios

1. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua).
2. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua) y lugares especiales.
3. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores con vegetación natural.
4. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores que incluyen pastizal inducido.

C) Medir la conectividad de los diferentes escenarios propuestos y la representatividad de cada ecosistema.



D) Identificar los elementos de la legislación que prohíben la construcción en áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua), las que protegen áreas ecológicas especiales y aquellas referentes a parques y jardines.

## 1.6. Justificación

Los procesos naturales de erosión y deslaves se han intensificado por el deterioro de servicios ecosistémicos en la ZMTTR (Ojeda-Revah, 1999), mediante la reducción de la cubierta vegetal y la impermeabilización de los suelos de por sí existentes por la inestabilidad de sus suelos y la sismicidad de la región (Romo, 1996; Mendoza *et al.* 2009; López, 2002; COPLADEM T, 2000). A su vez se ha aumentado su susceptibilidad en el caso de eventos meteorológicos extremos, como lluvias cuantiosas (Lambin *et al.* 2001). En otras palabras se ha reducido su capacidad de resiliencia o capacidad para soportar perturbaciones y seguir con sus funciones (Folke *et al.* 2010), y por lo tanto, es importante conservar los servicios ecosistémicos para el bienestar humano y para mantener la estructura y función de los ecosistemas.

En las áreas urbanas de la ZMTTR, el crecimiento desordenado sobre áreas de riesgo (Bringas y Sánchez, 2006) ha incrementado la probabilidad de que su población sufra daños tanto económicos como humanos en caso de ocurrir eventos meteorológicos extremos (Lambin *et al.* 2001), al mismo tiempo que se pierde la diversidad y se carece de áreas verdes para realizar actividades de esparcimiento (Huizar, 2012). Tradicionalmente se tiene la visión de que las áreas verdes deben de estar en zonas planas, sin embargo, la ZMTTR tiene una topografía muy accidentada (Ojeda-Revah, 1999) y por lo tanto, cuenta con pocos espacios libres con esta característica, así se dejan de lado muchas áreas que podrían considerarse como áreas verdes y que además ayudarían a controlar problemas de erosión y de inundaciones.

Una propuesta de infraestructura verde para la ZMTTR, que considere la interconexión de zonas que representen un riesgo para la población y la conservación de remanentes de vegetación con características ecológicas especiales, podría contribuir a la continuidad del paisaje entre los tres municipios, antes de que las zonas urbanas crezcan. Dicha continuidad aumentaría la capacidad de resiliencia (Gill *et al.* 2007) de la ZMTTR, lo que le daría un mayor margen para cumplir con sus funciones ante posibles perturbaciones (Folke *et al.* 2010). En especial la continuidad de los componentes del ciclo del agua que permiten el flujo de materia y

energía a otros componentes del paisaje, así como la infiltración del agua en el subsuelo (Ahern, 2002).

Este diseño podría asimismo aumentar la superficie de área verde por habitante; generar microclimas más agradables, promover la salud al reducir las enfermedades asociadas a las vías respiratorias (Sorensen, 1998). Ya que la vegetación limpia el aire al retener las partículas y absorber los contaminantes (APA, 2013). También los terrenos cercanos a los espacios verdes se beneficiarían al aumentar su valor económico (Anaya y Cruz, 2010; Tzoulas *et al.* 2007). Asimismo se mejoraría la imagen de la ciudad y se contribuiría a la conservación de la biodiversidad.

La propuesta de infraestructura verde en la ZMTTR es viable en términos económicos, debido a que al ser de carácter metropolitano se puede acceder al Fondo Metropolitano que es un recurso que proviene de la federación y que se asigna a programas, proyectos, obras de infraestructura u acciones que acrediten su beneficio económico y social dentro del territorio que conforma las áreas metropolitanas (SHCP, 2011). Así mismo no se generarían pérdidas económicas pues la propuesta considerará lugares que no son aptos para asentamientos urbanos, especificados en la legislación, debido a los riesgos que significan por su pendiente pronunciadas y cercanía a las áreas de escurrimientos naturales y, por el contrario, si fueran poblados se tomarían en un riesgo latente.

### 1.7. Hipótesis inicial

La recuperación y conservación de áreas con pendientes mayores al 35 por ciento, cursos de agua y áreas ecológicas especiales permitiría a la ZMTTR contar con infraestructura verde con un alto grado de conectividad física.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Las ciudades son lugares complejos con sus propias reglas de comportamiento y crecimiento, dentro de ellas se llevan a cabo procesos naturales que inciden en las funciones ecológicas globales (Alberti, 2003). Estas albergan una gran concentración de personas y de actividades humanas (Collins, 2000). En las ciudades vive cerca del 53 por ciento de la población mundial y la tendencia de crecimiento sigue aumentando (GBM, 2013), debido a esta condición demandan grandes cantidades de recursos (Alberti *et al.* 2003) principalmente de fuentes externas (Collins, 2000).

Sin embargo, las ciudades son a menudo consideradas como espacios aislados de su entorno, es decir, no se toma en cuenta el paisaje en el que están insertas (Terradas *et al.* 2011) y en consecuencia se alteran los ciclos naturales de los nutrientes o del agua, así como de los recursos naturales.

El componente industrial de las ciudades, la concentración de la población y la falta de vegetación contribuyen a que sean lugares con gran contaminación en agua, suelo y aire. Esto repercute de manera negativa en sus habitantes, en especial en su salud y en su calidad de vida (Maldonado, 2009). Al cambiar los paisaje con vegetación natural, se modifican y se crean nuevos hábitats, se desvían residuos, se incrementa la temperatura por intención o por accidente y se manipulan a las comunidades animales y vegetales (Collins, 2000). Asimismo, en este proceso se dejan pocos remanentes de vegetación y como áreas verdes, que en la mayoría de los casos son insuficientes para cubrir las necesidades de sus habitantes (Huizar, 2012).

Todos los cambios antes mencionados aumentan los riesgos o la probabilidad de ocasionar daños, pérdidas o efectos indeseables en las comunidades y sus bienes. Para que exista un riesgo debe haber un agente perturbador que puede ser provocado por el hombre como la remoción de la vegetación en una pendiente y su corte; o de origen natural como los eventos metereologicos extremos y los riesgos que estan asociados a las actividades de los seres humanos que modifican el paisaje (CENAPRED, 2003).

Los riesgos más comunes cuando hay déficit de vegetación en las ciudades son el incremento del efecto “isla de calor”, en el cual la pavimentación de los suelos promueve el incremento de

la temperatura, que provoca fuertes oleadas de calor en conjunto con otros factores como el calor producido por los humanos, la velocidad lenta del viento e incluso la contaminación del aire (Gartland, 2008).

Asimismo, la modificación del ciclo hidrológico en las ciudades, a través de la impermeabilización de la mayoría de sus suelos con viviendas, caminos o construcciones y otras partes carentes de vegetación, causan poca infiltración del agua, saturación de los suelos y el aumento de la escorrentía (Gill *et al.* 2007). Esto puede traer consigo consecuencias desastrosas como las inundaciones y deslaves ante lluvias inusuales (APA, 2013). Además, la probabilidad de que ocurra un deslave aumenta con la pérdida de la cubierta vegetal en las laderas, que acelera los procesos normales de erosión, porque la remoción de la vegetación con raíces profundas desestabiliza los suelos (APA, 2013; Gill *et al.* 2007). Tanto las inundaciones como los deslaves ponen en riesgo la estabilidad de la población humana (Gill *et al.* 2007) y pueden causar pérdidas de recursos materiales y humanos (Bocco *et al.* 1993).

Las ciudades contribuyen a modificar la interconectividad natural de los componentes del paisaje (Alberti, 2005) y en consecuencia afectan los servicios ecosistémicos que nos brindan (Defries, 2004). A estas alteraciones se le suma su forma particular de crecer mediante pequeños núcleos disgregados que se van extendiendo, situación que incrementa su consumo de espacio. Estos procesos causan una gran fragmentación de los sistemas naturales (Terradas *et al.* 2011), que se traducen en problemas a diferentes niveles del paisaje. Problemas que aumentan los riesgos de pérdida de biodiversidad y la interrupción o desvío del ciclo natural del agua, entre otros. (Bennett y Saunders, 2010).

### **Los servicios ecosistémicos que proveen las áreas verdes**

Los servicios ambientales o servicios ecosistémicos son los beneficios que obtenemos de la naturaleza, indispensables para el buen funcionamiento de la biosfera (Enger y Smith, 2004). Estos servicios pueden clasificarse de diferentes formas (Balvanera y Cotler, 2011; Valdez y Luna, 2011), algunos autores los agrupan dentro de dos categorías como ecológicos o sociales (Figueroa, 2006).

Dentro de los servicios ecosistémicos ecológicos encontramos la modulación de los fenómenos naturales como el clima y la erosión (Balvanera y Cotler, 2011). También estos servicios se traducen en ambientes más saludables, pues la vegetación limpia el agua mediante la captura de los escurrimientos pluviales que permiten la filtración de los contaminantes (APA, 2013). La vegetación también se encarga de purificar el aire, al remover las partículas de materia y absorber los contaminantes por las hojas, a la vez que generan oxígeno limpio (APA, 2013; Tzoulas *et al.* 2007).

Las áreas verdes estabilizan los suelos mediante las raíces de su cobertura vegetal, lo que disminuye la erosión y la escorrentía, a la vez que reduce riesgos a la población humana por deslizamientos e inundaciones (APA, 2013), y permite la filtración de agua en el subsuelo para beneficio de la recarga de los mantos acuíferos incluso en lugares semiáridos (Andreu *et al.* 2012).

La vegetación mitiga las altas temperaturas que provoca el efecto “isla de calor” dentro de las ciudades, gracias a que (1) la evapotranspiración conserva baja la temperatura de la vegetación y del aire, y (2) la sombra mantiene la superficie del suelo fresca al reducir la energía solar que se almacena (Gartland, 2008).

Las áreas verdes también pueden proporcionar refugio para la biodiversidad e incluso corredores para que puedan moverse de un área a otra y puedan acceder a otras zonas que complementen sus hábitos y requerimientos (Benedict y McMahon, 2006; Crooks, 2002).

Entre los servicios ecosistémicos sociales encontramos la provisión de materiales como los alimentos y la madera, que ayudan al hombre a desarrollar sus diferentes actividades. También están los relacionados con la cultura que depende de las percepciones humanas y pueden ser materiales o inmateriales, como los sitios ceremoniales, animales sagrados o la cosmovisión de un pueblo (Balvanera y Cotler, 2011).

Dentro de los servicios ecosistémicos sociales que proporcionan resaltan también los relacionados con (1) la mejora de la salud humana (Tzoulas *et al.* 2007; Naranjo, 2009), (2) el ser espacios idóneos para la recreación (Beatley y Manning, 1997), (3) la promoción de ambientes socialmente saludables (Kuo, 2003), (4) lugares para la educación ambiental (Trestini *et al.* 2007) y (5) la mejora de las condiciones económicas de las áreas cercanas (Chiesura, 2004).

Los beneficios para la salud de la población humana pueden ser tanto mentales como físicos (Tzoulas *et al.* 2007). Las áreas verdes ayudan a mejorar la salud mental de las personas porque el contacto con la naturaleza ayuda a prevenir o reducir el estrés a través de diferentes sensaciones como la recreación de la vista con la observación de los colores del paisaje así como de los animales; los olores silvestres de las flores, el pasto y los árboles; el aire puro y el sol (Naranjo, 2009). También los espacios verdes ayudan a mejorar la salud física porque pueden ser utilizadas para el desarrollo de actividades al aire libre que promuevan el ejercicio y por lo tanto, un estilo de vida más saludable (Tzoulas *et al.* 2007).

Los espacios verdes ofrecen excelentes facilidades para la recreación como los campos de juego y los senderos para caminar y correr. Incluso estos lugares se pueden utilizar para la realización de actividades culturales como los conciertos y obras de teatro al aire libre (Beatley y Manning, 1997).

Las áreas verdes promueven ambientes socialmente saludables porque su buen uso como espacios comunes sirven para fortalecer los lazos entre los residentes y disuadir el crimen, es decir, que ayudan a crear vecindarios sanos y seguros (Kuo, 2003). Del mismo modo pueden ayudar a las personas a crear un vínculo con la naturaleza, mediante la educación ambiental que ayudan a las personas a reconocer las interconexiones entre los elementos bióticos y abióticos del paisaje (Trestini *et al.* 2007).

Los beneficios económicos de las áreas verdes residen en sus valores de belleza paisajística, recreativos e incluso históricos que aumentan el valor de las propiedades cercanas, a la vez que mejoran el atractivo e imagen de la ciudad. Estas condiciones pueden también atraer el turismo y por lo tanto, generar empleos e ingresos (Chiesura, 2004).

Los beneficios que obtenemos de la naturaleza o servicios ecosistémicos son innumerables y están interrelacionados unos con otros, por lo tanto, al afectarse uno de ellos, se estará afectando otros al mismo tiempo. Todos los servicios son importantes para el bienestar humano, porque proporcionan estabilidad y capacidad de resiliencia ante eventos naturales extremos (Andrade *et al.* 2011).

## **La ecología del paisaje y su relación con los servicios ecosistémicos**

Desde la visión de la ecología del paisaje la cantidad y calidad de los servicios ecosistémicos se ve afectada por el cambio de uso del suelo (Defries, 2004), que modifica la estructura, tamaño, forma e interconectividad natural de los componentes del paisaje (Alberti, 2005).

La ecología del paisaje es una perspectiva científica transdisciplinaria que se encarga de estudiar la disposición espacial de los elementos que componen el paisaje y cómo funcionan, es decir, se encarga tanto de la estructura como de la funcionalidad del paisaje (Vila *et al.* 2006), esta disciplina aporta principios con bases científicas que sirven para la planeación del paisaje mediante el reconocimiento de los patrones y procesos que se llevan a cabo a diferentes escalas en el paisaje (Ahern, 2007).

El paisaje es un mosaico de ecosistemas o usos de suelo con características comunes en un área (Benedict y McMahon, 2006), tiene tres características: estructura, función y cambio (Forman, 1995a). La estructura o el patrón es el arreglo espacial de los elementos presentes, es decir, la configuración de los diferentes usos del suelo. La funcionalidad es el flujo de materiales, especies y personas a través del patrón, y el cambio es la dinámica o transformación del patrón a través del tiempo (Forman, 2008).

La unidad de análisis del paisaje es el mosaico (Forman, 1995a), compuesto por fragmentos, corredores y matriz (Forman y Godron, 1986). Los fragmentos son porciones de hábitat rodeadas por otro, de características diferentes (Vila *et al.* 2006). Los corredores son fragmentos alargados que forman una línea continua (o casi continua) que interconecta diferentes elementos del paisaje (Forman, 1995b; Bennet, 1999). Pueden ser de coberturas naturales o artificiales. Por un lado, los corredores que están conformados por elementos naturales se les llaman corredores biológicos. Este tipo de corredores facilitan el flujo de materia y energía a través del paisaje, como los arroyos y las pendientes (Bennet, 1999) y esto a su vez permite el buen funcionamiento de ciclos importantes como el agua y los nutrientes (Forman, 1995a; Forman, 1995b). Y por otro lado, los corredores artificiales se componen por coberturas creadas por el hombre como las carreteras que conectan zonas urbanas. Estos pueden representar barreras para algunas especies y también pueden interrumpir la continuidad de procesos ecológicos importantes (USDA, 2004; Forman 1995b). Finalmente la matriz es el elemento dominante mejor conectado. La identificación de la matriz no es siempre fácil de establecer. La superficie, la forma, el número y la disposición de

los elementos del paisaje condicionan de forma clave su realidad y dinamismo, así como sus perspectivas futuras (Vila *et al.* 2006).

En los paisajes, la conectividad es el grado en el que se facilita o impide el movimiento de diferentes especies a través de sus fragmentos (Tischendorf, 2014), y el grado en que fluye la materia, energía e información, a través de ellos. La conectividad es el resultado de la interacción entre la estructura y función (Leitão *et al.* 2006). Un bajo nivel de conectividad entre los elementos del paisaje puede causar una gran mortalidad de individuos durante la dispersión a través del paisaje en comparación con a las que se encuentran bien conectadas (Bennett y Saunders, 2010), así como el funcionamiento no adecuado de los ciclos naturales como el del agua, entre otros (Forman, 1999b).

Existen dos tipos de conectividad (1) conectividad física o *connectedness* en donde los fragmentos comparten el borde y (2) conectividad funcional o *connectivity* en la cual, aunque los fragmentos no están conectados físicamente, el movimiento de especies entre los fragmentos es posible. Estos términos son a menudo utilizados sin distinción en la literatura (Tischendorf, 2014).

La conectividad física está relacionada con la estructura del paisaje, mientras que la conectividad funcional tiene que ver tanto con los componentes estructurales del paisaje, como con los comportamientos que caracterizan a una especie determinada (Bennett, 2004). Por lo tanto, estos dos tipos de conectividad no tienen una relación directa, así una buena conectividad física podría no corresponder a una buena conectividad funcional (Forman y Godron, 1986). En especial porque cada especie tiene necesidades y hábitos diferentes, como los grandes mamíferos carnívoros para los cuales un fragmento urbano podría constituir una barrera en comparación con los zorrillos que no son tan sensibles a los paisajes fragmentados (Crooks, 2002; Crooks y Soule, 1999).

La mejor estrategia para mantener la conectividad física y funcional es enlazar áreas aisladas con corredores con vegetación, riberas, rutas de animales y senderos, sin embargo, también se puede aumentar la conectividad funcional con lo que en inglés se denominan *stepping stones*, que son una serie de pequeñas áreas aisladas, pero muy cercanas, que pueden ser utilizadas por los animales para moverse de un lugar a otro, aunque pueden estar inmersas en hábitats no tan seguros o adecuados (Forman, 2008).

Tanto los corredores, como los *stepping stones* son elementos fundamentales para aquellas especies que no se restringen a un sólo tipo de fragmentos, ya que el paisaje puede representar



un mosaico de usos del suelo con diferente calidad, que pueden ser habitables o no para diferentes especies (Bennett y Saunders, 2010).

Los cursos de agua junto con la vegetación de galería son considerados como corredores indispensables para la hidrología de un lugar (Novotny, Ahern y Brown, 2010). La vegetación de galería cumple un papel importante como moderadora de flujos, es decir, como zonas de amortiguamiento, ya que generalmente se encuentra cuenca abajo. Un ejemplo es la escorrentía que puede transportar exceso de nutrientes o sedimentos y al pasar por la vegetación de galería esta funge como un amortiguador que mitiga sus efectos negativos mediante la infiltración de sedimentos, control de la erosión y regulación de la temperatura del agua. Así la vegetación de galería ayuda a evitar que los efectos dañinos de la escorrentía pasen a otros componentes del paisaje (Ahern, 2002).

El paisaje se encuentra inserto dentro de un régimen de perturbaciones que pueden ser de origen natural, como los huracanes y las lluvias intensas, de origen humano como la remoción de la vegetación, los cortes en laderas y la desviación de los cuerpos de agua o bien puede ser una combinación de las dos (Manson *et al.* 2009). Una perturbación es definida como un evento repentino y discreto en el tiempo que puede cambiar la estructura del ecosistema (Pickett y White, 1985 tomado de Calderón-Aguilera *et al.* 2012) y está relacionada con su capacidad de resiliencia. Como resiliencia se entiende la medida de persistencia de un sistema y su habilidad de absorber los cambios y disturbios pero manteniendo las relaciones entre sus componentes y seguir con sus funciones (Folke *et al.* 2010). Por un lado, si la perturbación sobrepasa la capacidad de resiliencia del sistema este cambiará su estructura y no podrá regresar a su estado anterior. Y por otro lado, si la perturbación se encuentra entre el umbral de resiliencia del sistema, este podrá regresar a su estado de equilibrio (Folke *et al.* 2010). Si aplicamos estos conceptos al paisaje la estructura y conectividad de los elementos naturales del paisaje son los que le brindan su capacidad de resiliencia ante eventos naturales extremos como las lluvias intensas y cuando estos elementos se van desconectando es cuando la capacidad de resiliencia disminuye.

Debido a que a menudo la variable ecológica dominante en la reconfiguración del paisaje y responsable de sus consecuencias funcionales es la sociedad humana (Forman, 1995a), a través del cambio de uso del suelo (Alberti, 2005), especialmente en las áreas urbanas (Pisanty *et al.*

2009), es indispensable su manejo para evitar la separación y aislamiento de los elementos del paisaje que causan su baja conectividad o fragmentación (Ahern, 2007).

### **La infraestructura verde como alternativa para mantener la estabilidad y conectividad del paisaje**

Una forma de mantener la conectividad de los componentes del paisaje es mediante la conservación de áreas con vegetación dentro y fuera de las zonas urbanas y no menos importante la interconexión entre ellas (Gill *et al.* 2007; Pinheiro *et al.* 2006). Con ello, se puede lograr mejorar el funcionamiento de los servicios ecosistémicos y conferir mayor capacidad de resiliencia a las áreas urbanas (Tzoulas *et al.* 2007). Esta visión conocida como infraestructura verde va más allá de la idea de sólo crear parques aislados (Ávila, 2009), y propone establecer *una red interconectada de áreas naturales y otros espacios abiertos que conservan los valores y funciones de los ecosistemas naturales que proveen una amplia gama de beneficios a las personas y a la vida silvestre* (Benedict y McMahon, 2006). Con ella, se pueden aprovechar los espacios de oportunidad que tienen la mayoría de los paisajes para planear nuevas áreas con vegetación que provean múltiples funciones y que se encuentren conectadas entre sí, de forma física (Ahern, 2007). La infraestructura verde considera las áreas verdes tradicionales como los parques y los camellones y las áreas para la conservación de la biodiversidad como las Áreas Naturales Protegidas (ANP).

Para las áreas verdes destinadas para la conservación de la biodiversidad es importante tomar en cuenta muchos factores, ya que los fragmentos y su biota son fuertemente influenciados no sólo por la distancia a la que se encuentran de otros hábitats similares, sino también por su posición dentro del paisaje, los tipos de usos que los rodea y como estos tienen influencia sobre el movimiento de los organismos y sobre la continuidad de los ciclos naturales (Bennett y Saunders, 2010).

También el tamaño y la conectividad entre fragmentos naturales de un ecosistema es considerada fundamental, debido a que pueden afectar la existencia, abundancia y distribución de algunas especies dentro de ellas, en especial la de los mamíferos carnívoros que son muy vulnerables a la fragmentación del paisaje (Crooks, 2002; Crooks y Soule, 1999) que para sobrevivir necesitan de grandes áreas (Woodroffe y Ginsberg, 1998). Además la ausencia de grandes

depredadores es un indicador de la diversidad de los fragmentos, pues tienen un efecto tipo domino sobre los demás eslabones que conforman las relaciones ecológicas de un ecosistema (Crooks y Soule, 1999).

De esta manera, un fragmento en el que no está una especie puede ser un indicador de que en un fragmento de tamaño similar a este o más pequeño dicha especie también estará ausente. Esta ausencia se puede deber a que el fragmento es tan pequeño que no alcanza a cumplir con el área mínima que requiere un individuo, una unidad reproductiva o una población autosuficiente lo que se conoce como ámbito hogareño (home range) (Bennet y Saunders, 2010).

Finalmente, en el presente trabajo se propone un nuevo tipo de área verde que considere la conservación de la vegetación como una estrategia para la reducción de riesgos mediante la utilización de lugares con pendientes pronunciadas y cursos de agua en donde está prohibida la construcción de asentamientos humanos y así proporcionar al paisaje mayor conectividad y resiliencia. Ambas áreas se encuentran respaldadas por la legislación a través de diferentes planes, programas y reglamentos que prohíben la construcción en estos lugares y algunos proponen que sean lugares para la conservación de la vegetación (POEBC, 2001; IMPLAN, 2008; POEBC, 2010a; POEBC, 2010b; IMPLAN, 2010; COPLADEM T, 2011; IMPLAN, 2013).

Los lugares en pendientes pronunciadas son considerados dentro de un apartado especial en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tijuana 2009-2030 en donde se prohíbe su modificación mediante corte, extracción de material o la eliminación de la vegetación existente en él o en la base del mismo. Mientras que los cursos de agua están protegidos por la Ley de Aguas Nacionales (CEUM, 1992), en donde sus lechos y áreas aledañas se destinan para áreas de conservación de la vegetación y para proteger la recarga de los mantos acuíferos, de igual forma el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Primo Tapia de Playas de Rosarito B. C considera estas áreas para conservación (PDUCP PT, 2007- 2030).

Las áreas aledañas a los cursos de agua suelen ser la vegetación de galería. Esta no debería considerarse como algo separado, ya que juntos los cursos de agua y la vegetación de galería tienen un papel fundamental dentro del paisaje (Ahern, 1991; Aher, 2002).

De acuerdo con el modelo matriz-fragmento-corredor de Forman y Godron (1986) tanto las pendientes pronunciadas como los cursos de agua y la vegetación de galería son corredores

naturales (Bennet, 1999). Por un lado, las pendientes forman franjas continuas de vegetación que unen diferentes partes del paisaje y por lo tanto, constituyen corredores naturales (Bennet, 1999). Y por el otro, los cursos de agua y la vegetación de galería son también corredores naturales que se extiende a través del paisaje e interconectan diferentes áreas (Ahern, 2002).

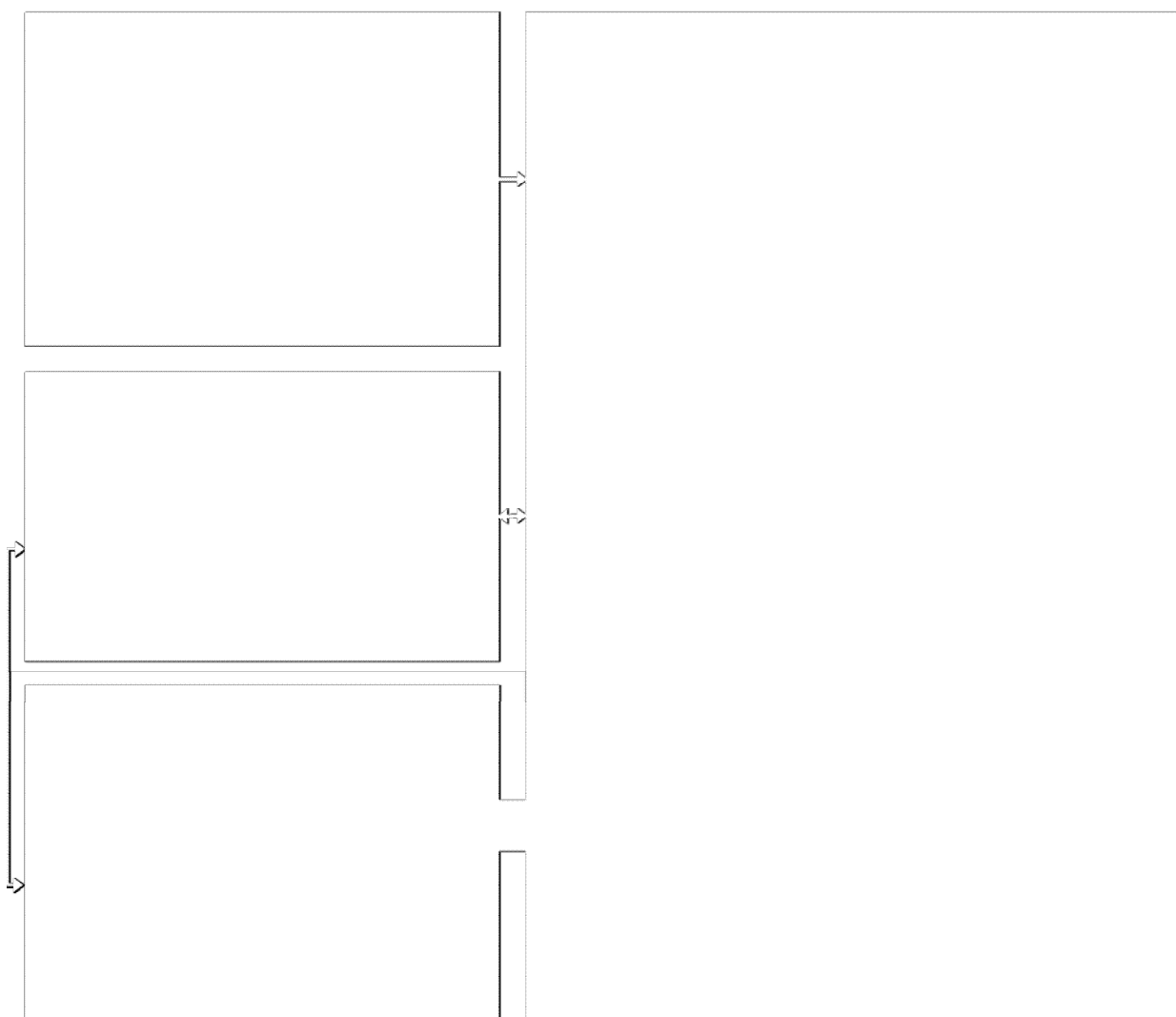
Los cursos de agua y la vegetación de galería son indispensables para la interconexión de los elementos del paisaje, es inherente a estas áreas la conectividad física y funcional que da soporte al movimiento de materia y organismos, en especial, porque permiten el flujo del agua que transporta materia y energía a otros componentes del paisaje, así como la infiltración del agua en el subsuelo (Novotny, Ahern y Brown, 2010). La vegetación de galería suele encontrarse en la cuenca abajo y por lo tanto, recibe flujos y materiales de procesos que se realizaron en la cuenca arriba. La vegetación de galería actúa como un área de amortiguamiento que ayuda a regular los flujos, mediante infiltración de los sedimentos, control de la erosión y regulación de la temperatura del agua y así logra evitar que se dañen otros componentes del paisaje como los cursos de agua, que suelen estar junto a este tipo de vegetación (Ahern, 2002). Al evitar que excesos de sedimentos y nutrientes lleguen a los cursos de agua, se evita que el exceso de nutrientes cause una baja de oxígeno en el agua y provoque la muerte de los organismos que necesitan este recurso como los peces e insectos que viven en los ríos y humedales (Chislock *et al.* 2013), también se evita que el exceso de nutrientes cause la proliferación de bacterias anaerobias o de algas nocivas y se modifiquen las relaciones ecológicas de los ecosistemas acuáticos (Misra, 2007; Chislock *et al.* 2013). Sin embargo, si los flujos sobrepasan la capacidad de amortiguamiento de la vegetación de galería pueden dañarla (Ahern, 2002).

Forman (1995a) sostiene que la vegetación de galería es indispensable en cualquier parte del mundo porque las funciones que proveen no pueden ser generadas por otro elemento del paisaje. Estas áreas son fundamentales ya que proveen conectividad y soportan múltiples usos y funciones. Además la vegetación de galería soporta vegetación distintiva de planicies de inundación adaptadas al suelo, hidrología y disturbios característicos de las zonas cercanas a cursos de agua y se les considera también como zonas de ecotono o transición (Ahern, 2002).

Las ciudades y sus áreas aledañas son excelentes candidatos para la recuperación y restauración de los cursos de agua, pues en estos lugares el ciclo del agua se ha modificado dramáticamente con consecuencias como la reducción de la infiltración y recarga de los mantos acuíferos, escasez de

agua e incremento de las inundaciones (Novotny, Ahern y Brown, 2010). Además se ha demostrado que este tipo de proyectos tienen una gran aceptación en los sitios que se han implementado debido a que no se intenta transformar o controlar todo el paisaje sino que se enfoca a proteger áreas sensibles que han sido perturbadas por el hombre (Ahern, 2002), esta misma aceptación podría darse en el caso de la protección de la vegetación en pendientes pronunciadas.

Figura 1.1. Esquema general del marco teórico- conceptual



Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO II. MARCO CONTEXTUAL

### 2.1. Localización del área de estudio

La ZMTTR localizada al Noroeste de BC, México, está conformada por tres municipios: Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito. Colinda al Norte con Estados Unidos y al Oeste con el Océano Pacífico. Comprende 139,864.44 ha (1.68 % del estado) (Venegas y Rojas, 2009) (Mapa 2.1), que se distinguen en su mayor parte por tener una topografía muy accidentada (Ojeda-Revah, 1999)(Mapa 2.2).

### 2.2. Aspectos físicos

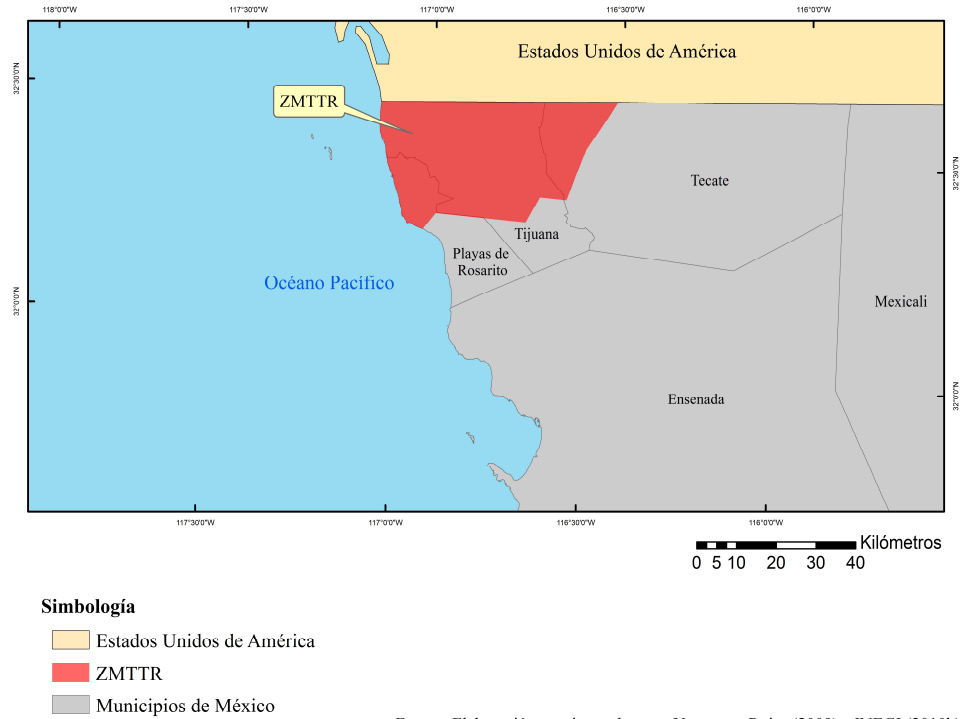
El clima es tipo mediterráneo con lluvias en invierno Cs (según la clasificación de Köppen modificada por García, 2004), templado con verano cálido, y temperaturas entre 10° y 22°C. Las áreas con mayor humedad y temperaturas más frescas son las cercanas a la costa, mientras que las alejadas son más secas y cálidas. Lluvia en promedio 273mm anualmente y en Tecate hasta 500mm (H. Ayuntamiento de Tijuana, 1994; COPLADEM T, 2011; COPLADEM PR, 2008). La ZMTTR sufre de carencia de agua, por los escasos cuerpos de agua superficial y poca precipitación (GobBC, 2013a). El Río Tijuana, el principal de la zona, tiene corrientes estacionales que escurren por cañones que provocan erosión, azolvamiento de drenajes e inundaciones (Romo, 1996).

La geomorfología de la ZMTTR está compuesta por formas muy heterogéneas de lomeríos, mesetas, mesetas con lomeríos, llanuras y valles intermontanos (H. Ayuntamiento de Tijuana, 2003). La línea de costa está a 200 msnm y se conforma por mesetas y lomeríos suaves. El relieve más alto de la ZMTTR, está a un promedio 500 msnm y se compone por montañas y cerros. Los principales cursos de agua son el Río Tijuana, el arroyo Alamar, el Río Tecate y el arroyo Rosarito (IMPLAN, 2012).

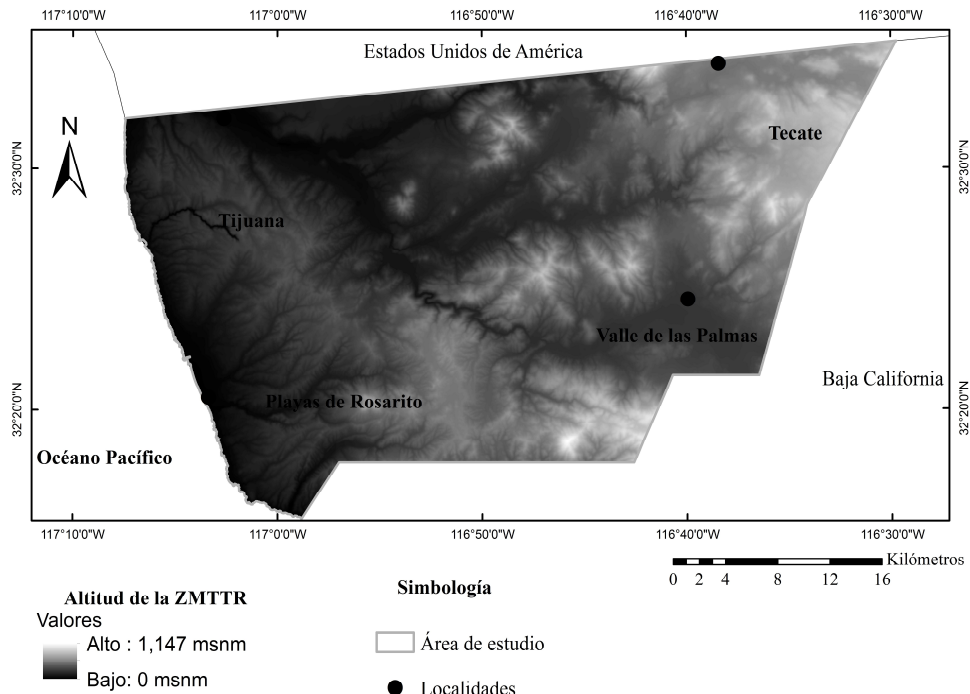
El área presenta suelos inestables y susceptibles a deslizamientos, que se saturan rápido de agua y son fáciles de inundarse, pueden provocar hundimientos y cuarteaduras en construcciones; se erosionan fácilmente, con alta permeabilidad, pero baja retención del agua, por lo que al removerse la vegetación presentan problemas de infiltración de agua, lo que favorece la escorrentía superficial y la erosión del suelo (INEGI, 1988, 2004; FAO, 2001;

COPLADEM T, 2011; SEMARNAT, 2012). Asimismo, esta zona es susceptible a sismos porque está en una región de convergencia de las placas Norteamericana y Pacífico (Mendoza *et al.* 2009; López, 2002), lo que agrava los problemas de deslizamientos (Romo, 1996). Tecate presenta la menor actividad sísmica de la ZMTTR, aunque la falla de San Andrés también puede afectarlo (COPLADEM T, 2000).

Mapa 2.1. Localización de la ZMTTR



Mapa 2.2. Altitud de la ZMTTR





### 2.3. Aspectos biológicos

La ZMTTR se localiza dentro de la provincia florística de Baja California, misma que presenta una rica diversidad de especies y muchos endemismos (Riemann y Ezcurra, 2007). Los principales tipos de vegetación que se desarrollan naturalmente en el área son matorral costero, chaparral abierto, dunas, charcas vnales, vegetación de galería y bosque de encinos (Oberbauer, 1999).

El matorral costero es parcialmente caducifolio, de menos de 1m de altura (Rzedowski, 1978). La planta dominante del matorral costero en los cerros de la costa es el chamizo *Adenostoma fasciculata* en las vertientes con exposición sur; acompañado de *Malosma laurina*, *Ceanothus verrocusus*, *C. greggii* y *Ornithostaphylos oppositifolia*, en cambio en las laderas con exposición norte dominan *Ceanothus oliganthus* junto con *Heteromeles arbutifolia*, *Comerostaphylos diversifolia*, *Xylococcus bicolor* y *Rhus ovata* (Minnich y Vizcaino, 1999).

En la zona costera desde el norte hasta el Cañón de Rosarito hay matorral costero con plantas suculentas que incluyen el cacto de terciopelo *Bergerocactus emoyi*, el nopal *Opuntia littoralis* y la biznaguita *Mamillaria dioica*. Otras plantas comunes son el girasol de San Diego *Viguiera laciniata*, el chamizo blanco *Artemisia californica*, el lentisco *Malosma lauriana*, el saladito *Rhus integrifolia*, la encelia *Encelia californica* y *Cordyanthus orcuttii* (Oberbauer, 1999).

El chaparral es una comunidad arbustiva densa, más o menos caducifolia, que a menudo pierde las hojas por un período menor a 30 días (Rzedowski, 2006). La altura promedio varía entre 5 cm hasta 3 m. La especie dominante más común es *Adenostoma fasciculatum*; otras especies frecuentes son *Ceanothus spp.*, encino *Quercus sp.*, *Eriogonum fasciculatum*, manzanitas *Arctostaphylos spp.*, ramón *Cercocarpus spp.*, toyón *Heteromeles arbutifolia* y *Yucca whipplei* (Rzedowski, 1978).

Las charcas vnales son humedales estacionales de aguas poco profundas, en la temporada fría suelen tener agua y en la mayor parte de la período cálido estan completamente secas. Su tamaño oscila entre 3 a 50 m de diámetro y su profundidad desde 10 a 60 cm. Estos lugares son habitat de especies unicas (Zedler, 1987).

La vegetación de galería se encuentra cerca de los arroyos costeros con un estrato arbóreo donde las especies comunes son álamos *Populus fremontii*, sauces *Salix sp.* (Oberbauer, 1999)

y alisos *Platanus racemosa*. En el estrato arbustivo se pueden encontrar *Malosma laurina* y los lentiscos *Rhamnus crocea* y *Rhus integrifolia* (Rzedowski, 1978).

Los bosques de encinos son una comunidad vegetal formada por especies de encino *Quercus sp.* que pueden alcanzar desde los 2 metros hasta los 30 y se distribuyen desde el nivel del mar hasta los 3,100 msnm. Varían de totalmente caducifolios a totalmente perennifolios, pueden formar masa puras o ser una mezcla de varias especies (Rzedowski, 2006).

La costa tiene matorral costero con plantas suculentas. El Valle de las Palmas tiene charcas vernaes sobre una terraza cubierta de mezquites y cactáceas. La vegetación de galería está cerca de arroyos (Delgadillo, 2002). Todos estos ecosistemas albergan gran variedad de animales (GobBC, 2013b; Alaníz, 2002), entre los que destacan la Boa rosada *Lichanura trivirgata*, la serpiente cascabel moteada *Crotalus mitchellii*, el meteoro de california *Microtus californicus*, el Murciélago trompudo *Choeronycteris mexicana*, el Cóndor de california *Gymnogyps californianus* y el Águila real *Aquila chrysaetos* por encontrarse bajo la protección de la Norma Oficial Mexicana 059.

#### 2.4. Aspectos poblacionales y económicos

En 2004 se reconoció a la ZMTTR como “unidad geográfica, económica y social, para efectos de planear y regular de manera conjunta” (POEBC, 2004). Su población alcanzó en el 2010, 1, 751,430 habitantes (INEGI, 2010a), lo que representa 55 por ciento de la población del estado (Venegas y Rojas, 2009), de la cual 89 por ciento se concentra en Tijuana, 5.77 y el 5.18 por ciento en Tecate y Playas de Rosarito el respectivamente (INEGI, 2010a). Aunque las tasas de crecimiento de Tijuana, Tecate y Rosarito disminuyeron de 2000-2010 (2.56, 2.65 y 3.63 respectivamente) con relación al periodo 1990-2000 (4.94, 4.19 y sin información<sup>1</sup>), estas aún son mayores a las del promedio del país de 1.4 por ciento (INEGI, 2013). Tijuana y Tecate crecieron rápidamente de 1990-2000 (INEGI, 2005) y Playas de Rosarito comenzó a crecer más al separarse de Tijuana en 1995 (COPLADEM PR, 2010).

El crecimiento acelerado en unión con la topografía abrupta de la ZMTTR y el desfase de las capacidades de las autoridades respecto a la alta demanda de vivienda fueron algunos de los

---

<sup>1</sup> Hasta 1995 Playas de Rosarito se convirtió en municipio, antes pertenecía a Tijuana.

factores que provocaron que gran parte ciudad tuviera un origen irregular (cerca del 57 %) (Alegría y Ordoñez 2005). El número de asentamientos humanos y su superficie aumentó en lugares de riesgo con pendientes pronunciadas conforme pasaron los años (Bringas y Sánchez, 2006) (cuadro 2.1). En la década de los años 70 la ocupación de viviendas en pendientes mayores al 35 por ciento era baja, sin embargo, su área siguió incrementándose hasta tener un incremento de más del 50 por ciento (Bringas y Sánchez, 2006) (cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Incremento anual porcentual en el área urbana de Tijuana por la inclinación de la pendiente de 1972-2000

Inclinación de la pendiente en porcentaje (%)	Incremento porcentual en área			
	1972-1989	1989-1994	1994-2000	1972-2000
<b>0-10</b>	5.26	8.94	0.21	6.33
<b>10-20</b>	7.91	12.93	0.17	10.36
<b>20-30</b>	16.54	18.65	0.06	22.83
<b>30-40</b>	13.45	33.82	0.08	28.16
<b>40-50</b>	8.45	20.16	1.00	14.95

Fuente: Tomado de Bringas y Sánchez (2006).

Las condiciones biofísicas en la ZMTTR y las alteraciones producidas por el crecimiento urbano desordenado en zonas no seguras para los asentamientos humanos provocan que gran parte del paisaje sea vulnerable a erosión severa, inundaciones y deslizamientos de tierra durante las tormentas (Ojeda-Revah, 1999; Ganster, 2002; COPLADEM PR, 2010), riesgos que aumentan por ser una zona sísmica. Se estimó que el número de personas que viven en pendientes mayores al 30 por ciento es de 33, 544 (Bringas y Sánchez, 2006).

### CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

La propuesta de infraestructura verde para la ZMTTR se realizó con base en la construcción y combinación de capas de usos del suelo y tipos de vegetación, pendientes mayores al 35 por ciento, zonas de amortiguamiento a lo largo de cursos de agua y características ecológicas sobresalientes. Para la demarcación de la ZMTTR se utilizó el polígono propuesto por Venegas y Rojas (2009) porque aunque hay una declaratoria oficial de la ZMTTR (POEBC, 2004), ésta no define las coordenadas geográficas de la zona. A dicho polígono se le modificó la línea de costa con base en la imagen satelital. Las capas fueron construidas con la herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcGis 10.2, y se integraron mediante superposición. Según el caso se usaron archivos tipo *raster* y vectorial<sup>2</sup>. Primero se hizo el mapa de usos del suelo y tipos de vegetación. Luego se realizaron cuatro diferentes escenarios para la conservación de la vegetación que incluyen los siguientes criterios:

1. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua)
2. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua) y lugares especiales
3. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores con vegetación natural
4. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores que incluyen pastizal inducido

Para cada escenario se midió la conectividad física de la vegetación mediante el programa FRAGSTATS versión 4 (McGarigal, Cushman y Ene, 2012).

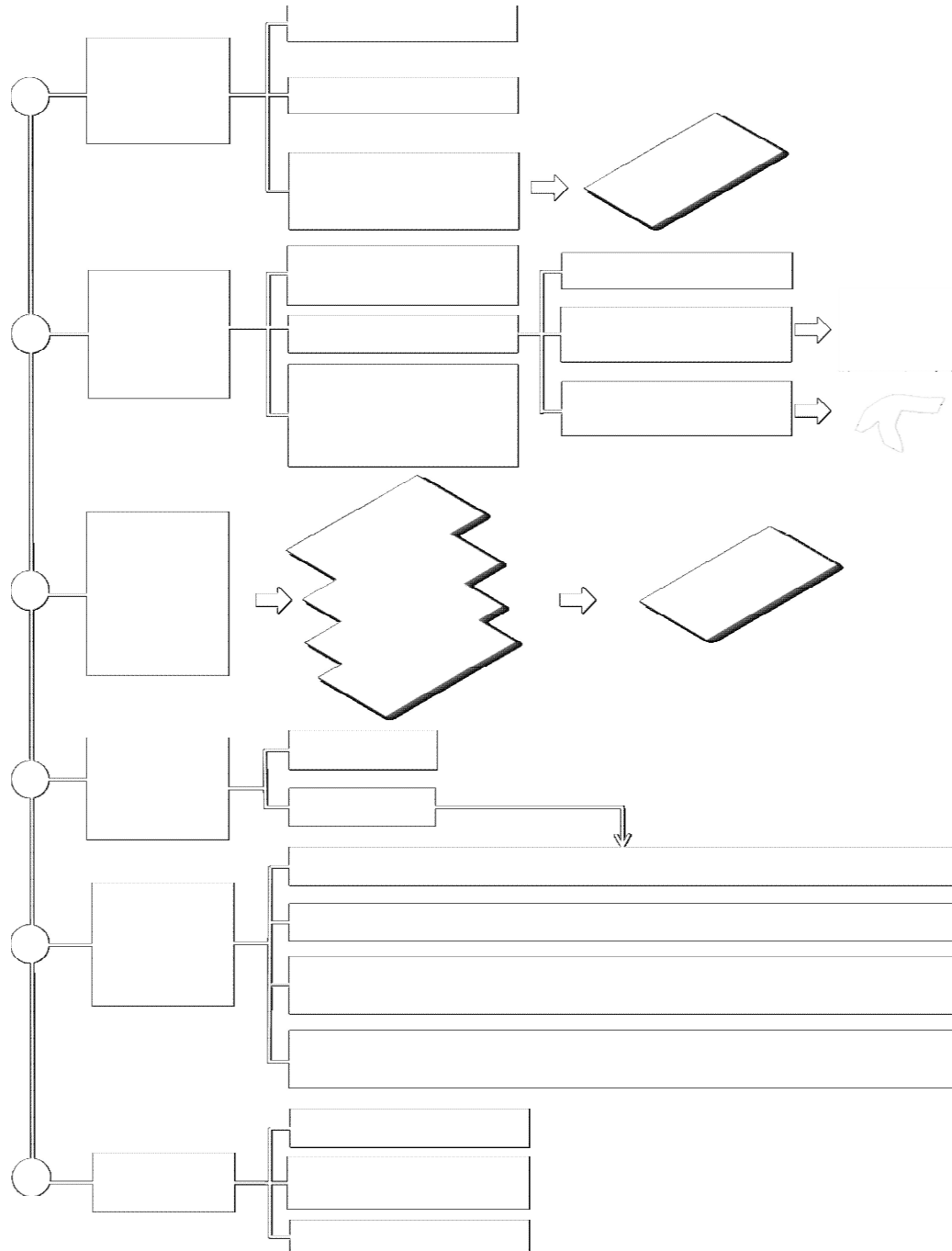
Finalmente se hizo una revisión de la legislación correspondiente a la ZMTTR que prohíbe la construcción en áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua), las que protegen

---

<sup>2</sup> Los archivos *raster* son datos gráficos estructurados que cuantifican el espacio en una malla de celdas con distribución y forma uniforme. Cada celda puede tener información de una o más variables. Los archivos vectoriales son datos gráficos que representan el espacio con puntos, líneas y áreas geográficas (Demers, 2009).

áreas ecológicas especiales y aquellas referentes a parques y jardines. En la figura 3.1 se muestra un esquema de la metodología que se siguió.

Figura 3.1. Metodología para el análisis y propuesta de infraestructura verde



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Usos del suelo y tipos de vegetación

Con el objetivo de conocer el estado actual del área para determinar el potencial de un sistema de infraestructura verde para la ZMTTR a escala de paisaje, se inició con la construcción de un Mapa de usos del suelo y tipos de vegetación reciente, que consistió en las siguientes etapas:

El mapa se construyó con dos imágenes provenientes del satélite SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*), una del 31 de Diciembre de 2012 y la otra con fecha del 21 Enero de 2013, ambas con escala de 1:50,000 con una resolución de 30 metros. Las imágenes fueron proporcionadas por la Estación de Recepción México de la constelación Spot (ERMEXS) que administra la Secretaria de Marina (SEMAR) y la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Para su interpretación, las imágenes requirieron de un tratamiento de tres pasos. Primero, se unieron para cubrir la totalidad de la zona de estudio, esto es, la ZMTTR. Segundo, con la finalidad de obtener una mayor resolución de trabajo (de hasta 5 metros) se re-muestrearon con sus respectiva imagen pancromática multi-espectral que fue proporcionada también por ERMEXS. Finalmente, para resaltar las diferencias de los usos de suelo se hizo una composición de falso color RGB (Bandas *Red Green Blue*) 1, 2, 3. De esta forma, en el RGB 1, 2 ,3 las áreas urbanas y aquellas con suelo desnudo resaltan por tener un color blanco y aquellas en donde la vegetación es más densa se denotan de color rojo (IGN, 2013).

La digitalización de los usos del suelo y tipos de vegetación se realizó por interpretación visual y manualmente en pantalla, corroborando datos con *Google Earth* y con el mapa del 2005 de la Cuenca del Río Tijuana (Ojeda-Revah, *et al.* 2008). Se usó la clasificación de uso del suelo y tipos de vegetación descrita en O'Leary (1995) y modificada por Ojeda (1999), adaptada a la región (cuadro 3.1). No se incluyeron las charcas vernaes por ser pequeñas y por la estacionalidad de las mismas. Cabe aclarar que debido a que la delimitación entre el matorral costero y el chaparral es una zona de transición o ecotono con un gran dinamismo de especies, resulta difícil discernir un límite claro entre ambos (Ojeda-Revah, 2002), por ello, se identificaron puntos en el mapa en el que se tuviera certeza del tipo de vegetación que era y posteriormente se trazó una línea divisoria justo en medio de ellas y siguiendo la topografía.

Cuadro 3.1. Descripción de los usos del suelo y tipos de vegetación para la ZMTTR

Cobertura	Símbolo	Definición
<b>Bosque de encino</b>	BE	Comunidad vegetal formada por especies de Encino <i>Quercus</i> sp. que pueden alcanzar desde los 4 metros hasta los 30.
<b>Chaparral</b>	CHAP	El chaparral es una comunidad arbustiva densa, más o menos caducifolia, que a menudo pierde las hojas por un período menor a 30 días. La altura promedio varía entre 5 cm hasta 3 m. La especie dominante más común es <i>Adenostoma fasciculatum</i> .
<b>Matorral costero</b>	MC	El matorral costero es parcialmente caducifolio, de menos de 1m de altura. Algunas plantas dominantes son chamizo <i>Adenostoma fasciculata</i> , <i>Malosma laurina</i> , <i>Ceanothus verrocous</i> , <i>C. greggii</i> y <i>Ornithostaphylos oppositifolia</i> , <i>Heteromeles arbutifolia</i> , <i>Comerostaphylos diversifolia</i> , <i>Xylococcus bicolor</i> y <i>Rhus ovata</i> . La dominancia de plantas cambia dependiendo de su distribución altitudinal.
<b>Vegetación de galería</b>	VG	Se desarrolla en los márgenes de ríos y arroyos, siempre en condiciones de humedad. Se suele componer de arbustos y árboles. Las alturas de estos se distinguen de los elementos que los rodean.
<b>Agricultura de riego</b>	AR	Considera los diferentes sistemas de riego para el mantenimiento de los cultivos.
<b>Agricultura de temporal</b>	AT	El ciclo de sus cultivos depende del agua de lluvia.
<b>Pastizal inducido</b>	PI	Se compone por pastos (gramíneas) que se desarrollan luego de eliminarse la vegetación original o en áreas agrícolas abandonadas.
<b>Presas</b>	P	Depósito artificial de agua situado en el cauce de una corriente natural con objeto de almacenar parte del caudal que transporta la corriente.
<b>Urbano</b>	U	Establecimiento de un conglomerado demográfico, con el conjunto de sus sistemas de convivencia, en un área físicamente localizada, considerando dentro de la misma los elementos naturales y las obras materiales que lo integran

Fuente: Elaboración propia con base en Ojeda-Revah; INEGI, 2005; Arango, 2002; Palacio, 2000; CEUM, 1993; Rzedowski, 1978, Rzedowski, 2006; Minnich y Vizcaíno, 1999.

El mapa obtenido fue corregido con trabajo de campo, verificando la asignación de usos del suelo y tipos de vegetación del 20 por ciento del total de polígonos identificados, en el cuadro 3.2 se muestra el plan que se siguió para el trabajo de campo. Se utilizó el programa Oruxmaps v5.5.14 para trazar la ruta de los recorridos con su georeferencia correspondiente. De los lugares

visitados se tomaron fotos y datos descriptivos (ver Anexo 1 sobre el trabajo de campo realizado).

Cuadro 3.2. Datos sobre el trabajo de campo

Fecha	Recorrido	Lugares específicos que se revisaron
<b>5 de Feb. 2014</b>	Sur de Playas - Cerro Colorado- Arroyo Alamar en la parte que no está canalizado	Matorral costero que quedó entre el pastizal inducido y la urbanización Vegetación de galería
<b>6 de Feb. 2014</b>	Sur de Playas de Rosarito- Mesa redonda- a un lado del Cerro El Coronel	La división entre el matorral costero y el chaparral. El polígono de vegetación que INEGI clasifica como bosque de encino y que es parte de la región terrestre prioritaria Santa María- El Descanso designada por la CONABIO.
<b>6 de Feb. 2014</b>	Tecate y Valle de las Palmas	Estado del matorral costero y el chaparral, dentro de la zona urbanizada y fuera de ella. Los lugares con características ecológicas sobresalientes descritos por Oberbauer (1999).

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo.

La corrección de los polígonos del Mapa de usos del suelo y tipos de vegetación se hizo con la herramienta topología<sup>3</sup>. Las reglas de topología que se seleccionaron fueron *Must no overlap* y *Must no have gaps*, para identificar aquellas partes del archivo con polígonos superpuestos y en donde hay espacios vacíos entre ellos. Con base en el archivo generado de la topología se editó el mapa para corregir los errores.

### 3.2. Pendientes pronunciadas

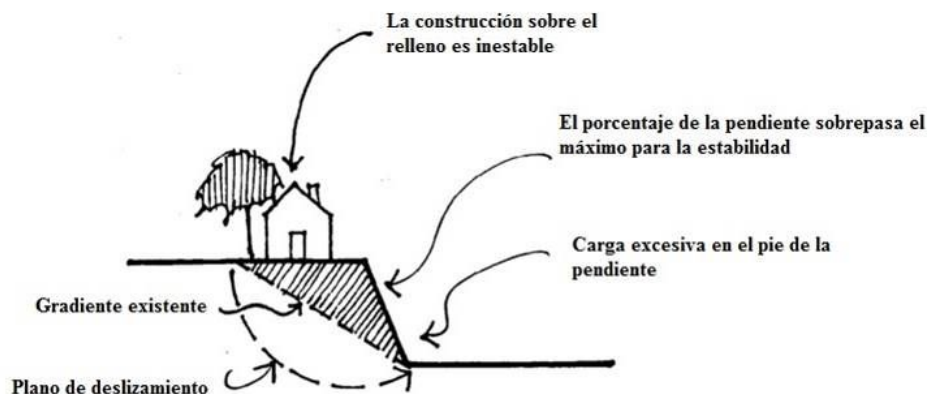
La construcción de cualquier otro tipo de edificación en lugares con pendientes pronunciadas (mayores al 35 %) (figura 3.2) no se considera apta por el riesgo que se genera a sufrir un derrumbe (APA, 2013). Por esta razón varios reglamentos y planes que tienen injerencia en la

<sup>3</sup> La topología define cómo las entidades de puntos, líneas y polígonos comparten una geometría coincidente (Esri, 1995-2012).



ZMTTR restringen el uso de estos espacios para la construcción de asentamientos humanos (POEBC, 2010a; IMPLAN, 2010; POEBC, 2010b; POEBC, 2001; COPLADEM T, 2011; IMPLAN, 2013; IMPLAN, 2008).

Figura 3.2. Pendiente inadecuada (mayor a 35 %) para asentamientos humanos



Fuente: Tomado de APA (2013).

Los riesgos pueden aumentar por acciones como; (1) hacer cortes en las laderas sin un apoyo y sin el drenaje adecuado, (2) la carga excesiva que generan las construcciones sobre el suelo, (3) la remoción de la vegetación con raíces profundas que desestabiliza los suelos, (4) la adición de agua por irrigación o el paso de aguas residuales que aumenta la inestabilidad de los suelos (APA, 2013). Ante estas situaciones el PMDU T (2009-2030) considera un apartado especial para el manejo de taludes en donde prohíbe cualquier corte o extracción de material que comprometa la estabilidad del talud, así como eliminar la vegetación existente en él o en la base del mismo.

Con base en lo anterior se consideró fundamental la identificación de los lugares con pendientes pronunciadas de la ZMTTR. Para ello, se construyó un mapa *raster* de las pendientes mayores a 35 por ciento, utilizando los Modelos Digitales de Elevación (MDE), escala 1:50,000, en formato *bil* del INEGI (2014), correspondientes al área de estudio y se unieron con la herramienta *merge* del ArcGis. Con el mapa resultante, se calculó la pendiente en grados usando la herramienta *slope* (opción *degree*), y reclasificando los intervalos de pendientes de

forma manual con la herramienta *Classify*, de acuerdo con los valores presentados en el cuadro 3.3. La información resultante se convirtió a formato vectorial con la herramienta *raster to polygon* para combinarla después con otras capas de información.

Cuadro 3.3. Clasificación de pendientes

Porcentaje de pendiente	Tipo	Aptas para asentamientos humanos
0-5	Plano	Sí
5-12	Ligeramente ondulado	Sí
12-18	Ondulado	Sí
18-24	Fuertemente ondulado	Sí
24-35	Escarpado	Sí
35-44	Fuertemente escarpado	No
44-100	Montañoso	No

Fuente: Modificado de CCAD, 2011 y MMA, 2004.

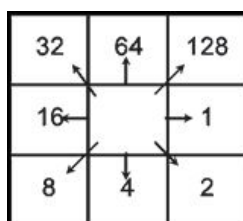
Finalmente se seleccionaron sólo aquellas pendientes mayores al 35 por ciento y se exportaron para crear una nueva capa de información.

### 3.3. Zonas de amortiguamiento de cursos de agua

Se construyó una capa de información de cursos de agua de la ZMTTR con la finalidad de identificar las áreas que pueden representar riesgo por la afluencia hídrica que pueden llegar a tener en época de lluvias, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (CEUM, 1992). Estas áreas de riesgo también son usadas por varios planes y programas que tienen injerencia en la ZMTTR (POEBC, 2010a; IMPLAN, 2010; POEBC, 2010b; POEBC, 2001; COPLADEM T, 2011; IMPLAN, 2013; IMPLAN, 2008), en los que se les destina para áreas de conservación de la vegetación y para proteger la recarga de los mantos acuíferos (PDUCP PT, 2007- 2030) y evitar su contaminación (IMPLAN, 2012).

La construcción de la capa de información de los cursos de agua requirió de cuatro pasos: determinar la dirección del flujo, calcular el flujo acumulado (red hídrica), determinar órdenes de drenaje y establecer zona de amortiguamiento. Para conocer la dirección del flujo de las corrientes, se utilizó el mapa del MDE en formato *raster* con la herramienta *flow direction*, que determina ocho posibles direcciones (Salas, 2011) que se reflejan en las celdas con diferentes números, que indican la acumulación del flujo (figura 3.3).

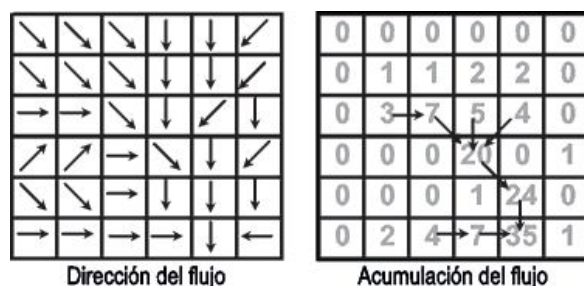
Figura 3.3. Direcciones que puede tomar el drenaje natural (en celdas de mapa *raster*)



Fuente: Salas (2011).

Posteriormente se calculó el flujo acumulado aguas abajo con la herramienta *flow accumulation*, que aplica un peso a cada celda e indica el número de celdas que fluyen hacia otras celdas contiguas (figura 3.4). De esta forma, las celdas con gran acumulación de flujo denotan el curso de las corrientes o red hídrica (Salas, 2011). La información generada fue comparada con la Red Hidrográfica 1:50,000 de INEGI (2010) y se encontró que los resultados fueron muy similares. Cabe aclarar que no se usó el archivo de INEGI (2010) debido a que estaba en formato vectorial y para el proceso se necesitaba un archivo tipo *raster*.

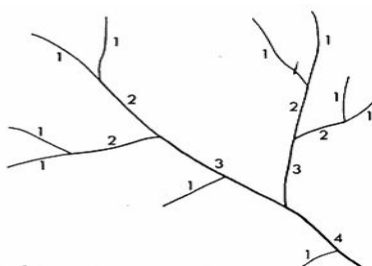
Figura 3.4. Interpretación de la dirección del flujo de la corriente y su acumulación



Fuente: Salas (2011).

Los órdenes de drenaje se obtuvieron aplicando la herramienta *stream order* al mapa *raster* de la red hídrica, de acuerdo con el método desarrollado por Strahler (1957). Este método ayuda a jerarquizar la red de drenaje que subdivide los cursos de agua que integran la red de drenaje en función de su magnitud (Cabral, 2011). En esta clasificación los órdenes de los cursos toman el valor del número de segmentos de la red que confluyen en ellos. De esta forma a los órdenes 1, no fluye ningún orden; los órdenes 2 están formados por la confluencia de cursos de orden 1; los 3, por la confluencia de órdenes 2 y así sigue la secuencia hasta llegar al orden de mayor confluencia (figura 3.5). El mapa *raster* de los órdenes de drenaje se convirtió a formato vectorial y se seleccionaron los órdenes de mayor afluencia; los 4, 5 y 6 para crear una nueva capa.

Figura 3.5. Clasificación del orden de drenaje



Fuente: Strahler (1957).

Por último, las áreas de amortiguamiento para cada archivo vectorial de los órdenes 4, 5 y 6 se obtuvieron con la herramienta *buffer* o de amortiguamiento. Se utilizó una distancia de 10 metros de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (CEUM, 1992). Las zonas de amortiguamiento se ampliaron en las áreas donde la vegetación de galería era más extensa, tomadas del mapa de usos del suelo y tipos de vegetación, con la finalidad de ayudar a dar una mayor conectividad, permitir una mayor infiltración de agua al suelo, mantener la calidad y cantidad de los servicios ecosistémicos y también como una forma preventiva, ya que estas áreas tienen una gran probabilidad de inundarse (APA, 2013).

### 3.4. Áreas de riesgo

Para obtener las áreas de riesgo dentro de las ZMTTR, se combinó el mapa de pendientes pronunciadas y el mapa de zonas de amortiguamiento de cursos de agua con la herramienta *merge*, ya que estas dos variables constituyen las áreas en que no se recomienda la existencia de los asentamientos humanos por los riesgos que representan de inundaciones y deslaves.

### 3.5. Lugares ecológicos sobresalientes

Para la realización del mapa de sitios con características ecológicas sobresalientes, se buscó la información existente en materia de distribución de poblaciones o comunidades con características únicas, protección de áreas por contener alta biodiversidad, y distribución de especies amenazadas.

Una vez identificada la información, se realizó la superposición de las tres capas encontradas: Primero la distribución de algunas especies de plantas en zonas especiales descritas por Oberbauer (1999) (cuadro 5.2), mismas que se identificaron en campo (mapa 5.2). Segundo, la región terrestre prioritaria Santa María-El Descanso (Arriaga *et al.* 2000) designada por la Comisión Nacional para Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2012) (mapa 5.3). Tercero, la distribución de especies con datos de CONABIO (2012) que se encuentran protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010 que incluyen; el murciélago trompudo *Choeronycteris mexicana*, el cóndor de California *Gymnogyps californianus*, el águila real *Aquila chrysaetos*, el meteoro de California *Microtus californicus*, la perlita californiana *Polioptila californica* y la biznaga barril verdosa *Ferocactus viridescens* (cuadro 5.3) (SEMARNAT, 2010) (Mapa 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8). Finalmente, se identificó el área en la que todas estas capas de información coinciden.

### 3.6. Construcción de escenarios de infraestructura verde

Se construyeron cuatro escenarios con la finalidad de medir la superficie que se podría conservar y la representatividad de los ecosistemas que la componen, así como el grado en que aumenta la conectividad física (cuando un fragmento comparte su borde con otro fragmento) y también para analizar sus fragmentos.

Para los escenarios se utilizaron los siguientes criterios (cuadro 3.4): (1) zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento y vegetación de galería); (2) áreas especiales identificadas (La región prioritaria Santa María- El descanso (CONABIO, 2012) y las áreas de Oberbauer (1992) identificadas en campo; (3) Corredores, el primero que se encuentra alrededor de la zona urbanizada de Tijuana y Playas de Rosarito con un área de amortiguamiento de 1,000 m a cada lado y el segundo que rodea la zona urbana de Tecate con una zona de 150 m de amortiguamiento a cada lado. Los corredores siguen la idea de cinturones verdes o *Green belt* que han sido propuesta por varios personajes como Raymond Urwin y F. J. Osborn como una forma de mantener el ordenamiento territorial y la conectividad física de los espacios verdes (Llanos y Almandoz, 2008). (4) El escenario cuatro es similar al escenario 3, pero también se tomaron en cuenta las áreas de pastizal inducido que quedaron dentro de los corredores, porque pueden ser susceptibles de programas de restauración, esto con la finalidad de observar que tanto aumenta la conectividad.

Cuadro 3.4. Criterios de conservación de los escenarios para la ZMTTR

Escenario	Criterios que considera
1	Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua)
2	Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua) y lugares especiales
3	Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores con vegetación natural
4	Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), lugares especiales y corredores que incluyen pastizal inducido

Fuente: Elaboración propia.

A todos los mapas se les quitaron las áreas urbanas (herramienta *erase*). Se les agregaron las carreteras y caminos y los nombres de las localidades.

### 3.7. Análisis de la composición, configuración y conectividad actual y de los escenarios propuestos

El análisis del paisaje y de conectividad del estado actual del paisaje y de los diferentes escenarios de conservación que se proponen como infraestructura verde para la ZMTTR se hizo mediante las métricas del paisaje del modelo de Forman y Gordon (1986) de matriz-fragmento-corredor. La identificación de los elementos del paisaje se realizó con los siguientes criterios:

Matriz: Elemento dominante del paisaje ya sea cobertura natural o artificial.

Fragmentos: porciones de un uso de suelo que se encuentra rodeado por otro diferente. Están conformados por los diferentes tipos de vegetación y usos del suelo de la ZMTTR, ya sean naturales; como el matorral costero, el chaparral, la vegetación de galería y el bosque de encino o artificiales como la agricultura de riego, la agricultura de temporal, el pastizal inducido, las presas y el urbano.

Las métricas del paisaje que se utilizaron fueron composición y configuración (cuadro 3.5).

Las métricas de composición se refieren a las características asociadas con la diversidad y abundancia de los tipos de fragmentos dentro del paisaje, pero sin considerar la ubicación o localización espacial de estos. Las métricas de configuración si consideran la localización espacial de los fragmentos en el paisaje y la relación de cómo se distribuyen los fragmentos respecto a otros, es decir, que estas métricas tratan de medir la conectividad (McGarigal, Cushman y Ene, 2006).

Para la ZMTTR, las métricas de composición se calcularon para el análisis de las coberturas que conforman los usos del suelo y tipos de vegetación, en las áreas de riesgo identificadas (pendientes > 35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento) y para los lugares ecológicos sobresalientes de la ZMTTR. Las métricas de configuración se calcularon para los 4 diferentes escenarios de propuesta de conservación mediante el programa FRAGSTATS 4 (McGarigal, Cushman y Ene, 2012). El análisis no incluye las métricas de conectividad funcional pero si las de conectividad física (cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Métricas del paisaje

Característica	Métrica
<b>Composición</b>	Número de fragmentos
	Área de cobertura
	Porcentaje del fragmento más grande
<b>Configuración</b>	Índice de conectividad (radio:1000 m)
	Índice de cohesión

Fuente: Elaboración propia con base en McGarigal, Cushman y Ene (2012).

Los índices de composición permiten analizar la ZMTTR en función de su superficie, porcentaje respecto del total, densidad e identificar el polígono más grande y su importancia, en el cuadro 3.6 se detallan los rangos de medición de estas.

Cuadro 3.6. Métricas de composición del paisaje

Símbolo	Descripción	Rango
<b>CA</b>	Área de cobertura: Superficie de la cobertura en hectáreas	$\geq 0$
<b>PLAND</b>	Porcentaje de cada clase dentro del área total	$0 < \text{PLAND} \leq 100$
<b>NP</b>	Número de fragmentos: Número de polígonos de cada cobertura	$\geq 1$
<b>LPI</b>	Porcentaje del fragmento más grande	$0 < \text{LPI} \leq 100$

Fuente: Elaboración propia con base en McGarigal, Cushman y Ene (2012).

Se midió la conectividad para cada escenario mediante los índices de cohesión (cuadro 3.7) y del vecino más cercano (cuadro 3.8), con la finalidad de ver el comportamiento de la conectividad en ellos. Con el propósito de hacer más sencillo el análisis de conectividad se reclasificó la capa de áreas de riesgos en cuatro categorías vegetación natural, agricultura, pastizal inducido y urbano. Dentro de la categoría vegetación natural, se incluyeron las



coberturas de bosque de encino, chaparral, matorral costero y vegetación de galería, porque son componentes naturales del paisaje que permiten el flujo de materia y energía.

La conectividad no se puede medir directamente, por esta razón se utilizaron el índice de cohesión y el índice del vecino más cercano, que corresponden a las métricas de configuración del paisaje, ambas métricas analizan la distribución de los fragmentos en el paisaje y la distancia que hay entre ellos (McGarigal, Cushman y Ene, 2012; Esri, 1995-2012). Estos índices permiten medir el grado de conectividad que hay entre la vegetación natural de la ZMTTR, en términos de continuidad o proximidad de los fragmentos de una misma clase, evalúan si hay un patrón de distribución de los fragmentos (Esri, 1995-2012).

El índice de cohesión mide la conectividad física de los fragmentos analizados, calculando que tan agrupados están los fragmentos, es decir, que tan cerca están unos de otros (cuadro 3.7). A mayor cohesión, mayor conectividad entre fragmentos (Pauchard *et al.* 2006). Cabe mencionar, sin embargo, que este índice se refiere a la conectividad física y no a la funcional. Mientras más grande sea el valor indica que hay un mayor número de fragmentos agregados y por lo tanto, permite el flujo de materia e información a través del paisaje, sin embargo, también aumenta la probabilidad para que un organismo pueda moverse de un fragmento a otro o conectividad funcional (Pauchard *et al.* 2006).

Para medir la cohesión de los fragmentos de vegetación natural de la ZMTTR, se utilizaron todos los fragmentos de vegetación natural de la ZMTTR como una sola categoría y luego se convirtió a *raster*. Con este mapa se obtuvo el índice de cohesión usando el programa FRAGSTATS 4 (McGarigal, Cushman y Ene, 2012).

Cuadro 3.7. Descripción del índice de cohesión

Índice de cohesión	
$COHESION = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}^* \sqrt{a_{ij}^*}} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \cdot (100)$	<p><math>p_{ij}^*</math> = perímetro del fragmento ij en términos del número de celdas.</p> <p><math>a_{ij}^*</math> = área del fragmento ij en términos del número de celdas.</p> <p><math>Z</math> = total del número de celdas en el paisaje.</p>
<p>Descripción: igual a 1 menos la suma del perímetro del fragmento (en términos del número de celdas) dividido entre la suma del perímetro de los fragmentos por la raíz cuadrada del área del fragmento (en términos del número de celdas) multiplicado por todos los fragmentos en el paisaje, dividido entre 1 menos 1 entre la raíz cuadrada del total de número de celdas en el paisaje, multiplicado por 100 para convertirlo en porcentaje.</p>	

Fuente: Tomado de McGarigal, Cushman y Ene (2012).

El índice del vecino más cercano mide la distancia del centro del polígono a su vecino más cercano y luego promedia todas las distancias de los vecinos más cercanos. Este se expresa como la relación entre la distancia media observada y la distancia media esperada. La distancia esperada es la distancia media entre vecinos en una distribución aleatoria hipotética. Si el índice es menor que 1, el patrón es agrupado; si el índice es mayor que 1, la tendencia es hacia la dispersión (cuadro 3.8). El índice utiliza la prueba estadística z, en donde la hipótesis nula es que no existe patrón de distribución, esta prueba utiliza distintos niveles de significancia (Esri, 1995-2012). Se obtiene con el módulo de *Spatial statistics* de ArcGis 10.2, que funciona con los archivos tipo vectorial.

Cuadro 3.8. Descripción del índice del vecino más cercano

Índice del vecino más cercano		
$ANN = \frac{\bar{D}_O}{\bar{D}_E}$	ANN = Índice del vecino más cercano	
	DO = Es la distancia media observada entre cada elemento y su vecino más cercano.	
$\bar{D}_O = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$	DE = Es la distancia media esperada el elemento dado en un patrón al azar.	
	di=Distancia entre el elemento i y su vecino más cercano	
	n=Número total de elementos.	
$\bar{D}_E = \frac{0.5}{\sqrt{n/A}}$	A=Es el área mínima que contiene a todos los elementos.	
$z = \frac{\bar{D}_O - \bar{D}_E}{SE}$	$SE = \frac{0.26136}{\sqrt{n^2/A}}$	El valor de la prueba estadística se calcula con estas fórmulas.
Descripción: si es menor a 1, es que los elementos se encuentran agregados y si es mayor a 1 los elementos se encuentran de forma dispersa.		

Fuente: Elaboración propia con base en Esri (1995-2012).

## CAPÍTULO IV. COMPOSICION Y CONFIGURACION DEL PAISAJE

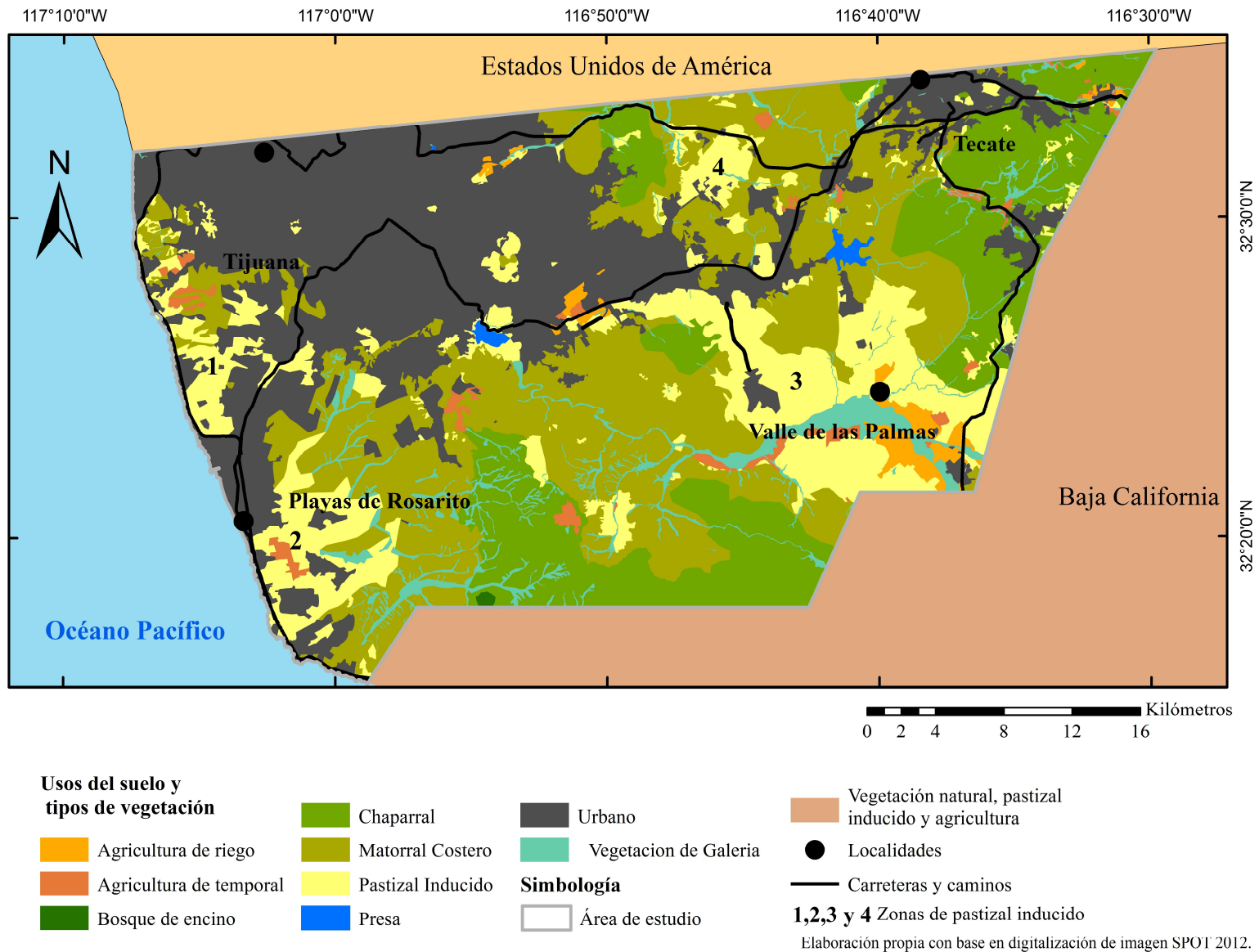
Con una superficie de 139,864.44 ha, la ZMTTR a pesar de albergar más de una tercera parte con áreas urbanas, aún conserva casi la mitad de su superficie con ecosistemas naturales con diferentes grados de conservación. Los ecosistemas mejor representados en términos de superficie son el matorral costero, seguido del chaparral y de la vegetación de galería (cuadro 4.1, mapa 4.1). Sin embargo, como se observa en el Mapa 4.1, la zona urbana está compuesta de muchos fragmentos, que se conectan entre sí por carreteras donde se distribuyen muchos pequeños fragmentos urbanos. Este tipo de configuración espacial del uso urbano ha fragmentado la continuidad original de los tipos de vegetación naturales. El estado fragmentado de la vegetación natural aumenta por la presencia del pastizal inducido en cuatro grandes zonas: (1) entre Tijuana y Rosarito; (2) al sur de Rosarito a lo largo de la carretera y aparentemente sobre cañadas; (3) entre Tijuana y el Valle de las Palmas y (4) entre Tijuana y Tecate. Sin embargo, hacia Playas de Rosarito se puede observar una mayor continuidad y extensión de las coberturas naturales y con pocos fragmentos de pastizal inducido (mapa 4.1).

Cuadro 4.1. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de los usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR

	Cobertura	Superficies (ha)	% de la ZMTTR	Número de fragmentos
<b>Natural</b>	Bosque de encino	84.44	0.06	1
	Chaparral	22,895.18	16.37	36
	Matorral Costero	40,400.47	28.89	72
	Vegetación de Galería	6,118.45	4.37	109
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>69,498.64</b>	<b>49.69</b>	<b>218</b>
<b>Artificial</b>	Agricultura de riego	1,853.88	1.33	28
	Agricultura de temporal	1,738.29	1.24	47
	Pastizal Inducido	21,902.16	15.66	152
	Presa	410.06	0.29	4
	Urbano	44,461.42	31.79	62
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>70,365.81</b>	<b>50.31</b>	<b>293</b>
<b>TOTAL</b>	<b>9</b>	<b>139,864.44</b>	<b>100</b>	<b>511</b>

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 4.1. Usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR



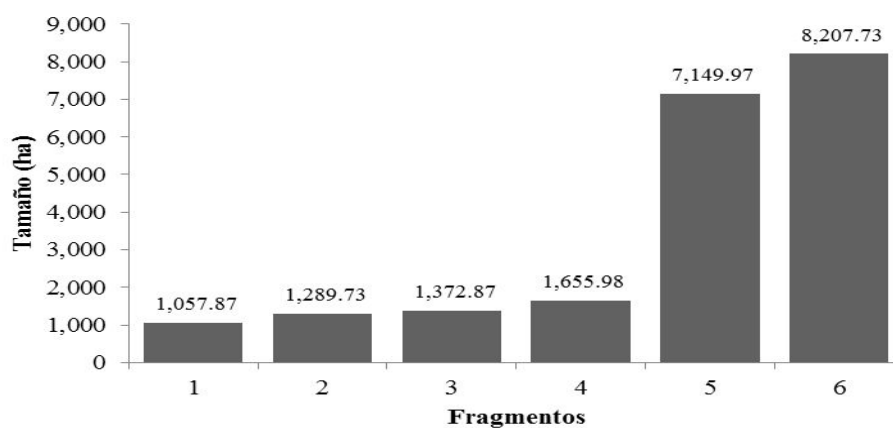
#### 4.1. Bosque de encino

En la parte sur de Playas de Rosarito solamente se encuentra un pequeño fragmento de 88 ha con características únicas que corresponde a un bosque de encino, que además se localiza dentro de la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso designada por la CONABIO (Arriaga *et al.* 2000) (cuadro 4.1, mapa 4.1).

#### 4.2. Chaparral

El chaparral es la segunda cobertura natural con mayor extensión en la ZMTTR (16 %) y se distribuye en 36 fragmentos, de los cuales seis son grandes (mayores a 1,000 ha) y representan 90 por ciento de toda su superficie y el resto son menores a 100 ha (cuadro 4.1, gráficas 4.1 y 4.2, mapa 4.1).

Gráfica 4.1. Fragmentos de chaparral mayores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.

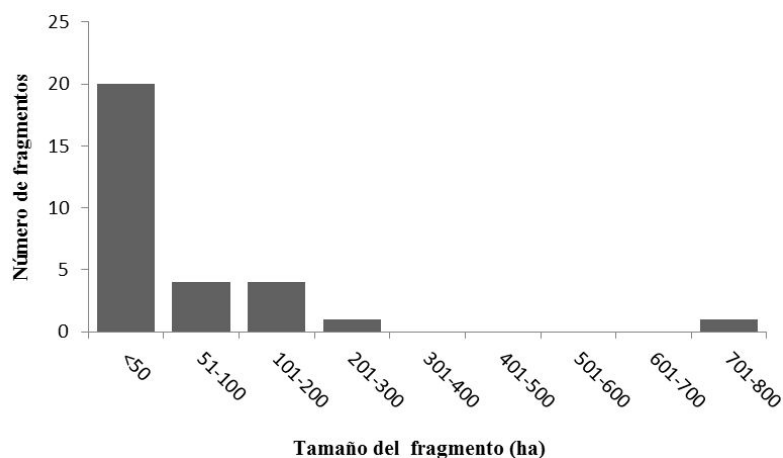
Los grandes fragmentos (mayores a 1,000 ha), de mayor a menor se localizan en (mapa 4.1):

- (1) Fragmento al noroeste de la ZMTTR, cerca de la zona urbana de Tecate, se extiende desde la frontera hasta casi llegar al Valle de las Palmas.
- (2) Fragmento en la parte continental de Playas de Rosarito hacia el Rancho San Andrés, una parte de este fragmento corresponde a la Región Terrestre Prioritaria Santa-María El Descanso. Este fragmento tiene un gran potencial para conservación ya que dentro de él no hay usos urbanos y en su mayoría se encuentra rodeado por coberturas con vegetación natural.
- (3) Fragmento cerca del anterior dividido por una zona de vegetación de galería.
- (4) Fragmento que se localiza entre Tijuana y Tecate, dentro del cual hay varios polígonos de pastizal inducido que están causando su fragmentación, casi una tercera parte de su borde está en contacto con la zona urbana de Tijuana, lo que puede causar el cambio de su cobertura a una artificial.
- (5) Fragmento dentro de Tecate que limita con la frontera de Estados Unidos, en algunas partes tiene contacto con áreas urbanas, sin embargo, no representan más de un cuarto de su borde.
- (6) Fragmento entre Playas de Rosarito y Valle de las Palmas (cerca del fragmento 2, es decir, hacia el Rancho San Andrés).

Es importante resaltar que los fragmentos 2,3 y 6 están divididos por vegetación de galería y por lo tanto componen una sola zona de vegetación natural continua que corresponde al 44.10 por ciento de la superficie total del chaparral. Además dicha área se encuentra en la parte más alejada a la urbanización.

Todos los fragmentos mayores 100 ha (12 fragmentos) (gráfica 4.2) representan casi la totalidad de su extensión del chaparral (98 %) en la ZMTTR. El resto de los fragmentos son en su mayoría muy pequeños (menores a 50 ha).

Gráfica 4.2. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha de chaparral

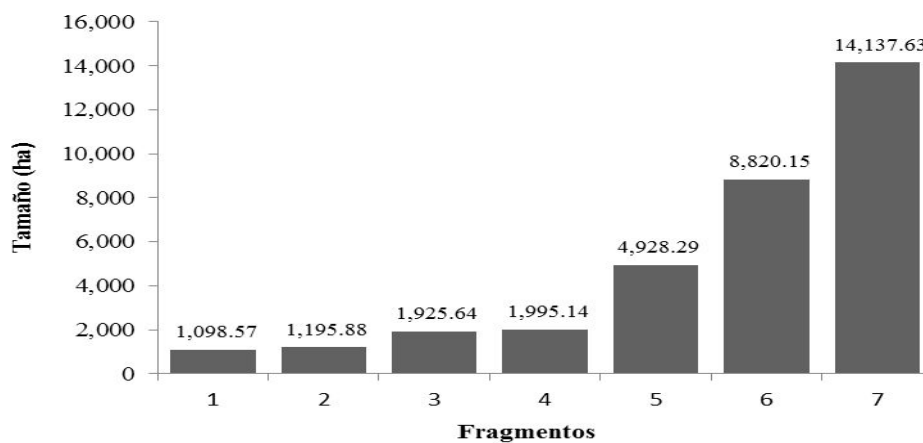


Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Matorral costero

El matorral costero es la cobertura natural que cuenta con mayor superficie en la ZMTTR, abarcando casi una tercera parte. De un total de 72 fragmentos, siete son ( $> 1,000$  ha) y albergan a cerca del 85 por ciento de su propia superficie (cuadro 4.1, gráfica 4.3, mapa 4.1).

Gráfica 4.3. Fragmentos de matorral costero mayores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.



Los grandes fragmentos, de mayor a menor se localizan en (mapa 4.1):

(1) Fragmento entre la zona urbana de Tijuana y Tecate, dentro del cual se encuentra la presa El Carrizo. Este fragmento comparte una gran cantidad de su borde con zonas urbanas y de pastizal inducido lo que pone en riesgo su permanencia, además dentro de este hay una zona urbana que está causando su fragmentación.

(2) Fragmento en Playas de Rosarito, hacia la costa limita con grandes áreas de pastizal inducido, hacia el norte con el área urbana de Tijuana y dentro de él hay varios fragmentos urbanos y de pastizal inducido lo fragmentan disminuyendo su calidad y cantidad, sin embargo, en la parte oeste y sur colinda con vegetación natural.

(3) Fragmento que limita hacia el oeste y sur con el anterior, sólo separado por la vegetación de galería, aunque también colinda con áreas urbanas y de pastizal y tiene dentro de él, dos fragmentos urbanos que causan su fragmentación.

(4) Fragmento en la parte sureste de la ZMTTR en Playas de Rosarito, cerca de la mitad de su borde está en contacto con las coberturas artificiales urbanas y de pastizal inducido, el resto está en contacto con coberturas de vegetación natural.

(5) Fragmento en la parte sur de Valle de las Palmas, en su mayoría está rodeado por vegetación natural, pero cerca de una cuarta parte de su borde colinda con pastizal inducido, lo que pone en riesgo su permanencia.

(6) Fragmento en la parte sureste entre el área urbana de Tijuana y Playas de Rosarito, más de la mitad de su superficie está rodeada por áreas urbanas y de pastizal inducido y dentro de este fragmento hay una zona urbana que lo perfora.

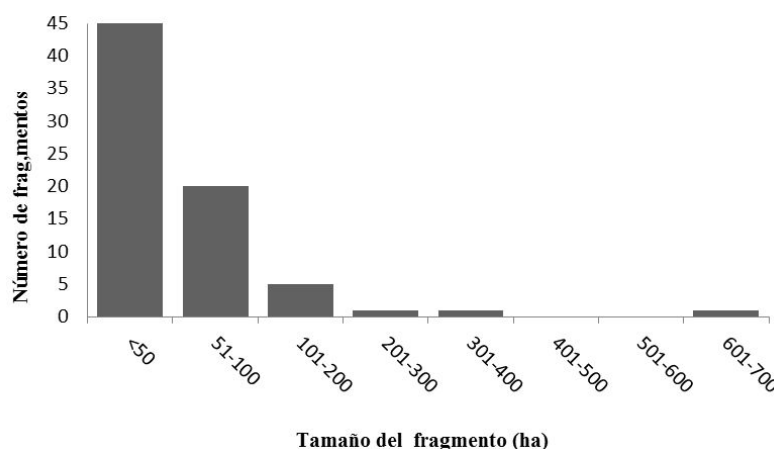
(7) Fragmento localizado en Valle de las Palmas, rodeado casi en un 75 por ciento por vegetación natural y el restante por agricultura de temporal y pastizal inducido.

Cabe destacar que los fragmentos 2,3 y 4 sólo están divididos por la vegetación de galería y por lo tanto constituyen una zona continua de vegetación natural.

Si se suman los fragmentos mayores a 100 ha (14 fragmentos) (gráfica 4.3 y 4.4), se observa que contienen casi la totalidad del matorral costero (97.43 %), lo que indica que gran parte de su área no está fragmentada. El resto de los fragmentos pequeños son en su mayoría menores a

50 ha. En general los fragmentos menores a 100 ha se pueden encontrar embebidos entre zonas urbanas y áreas de pastizal inducido (gráfica 4.4).

Gráfica 4.4. Matorral costero. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha



Fuente: Elaboración propia.

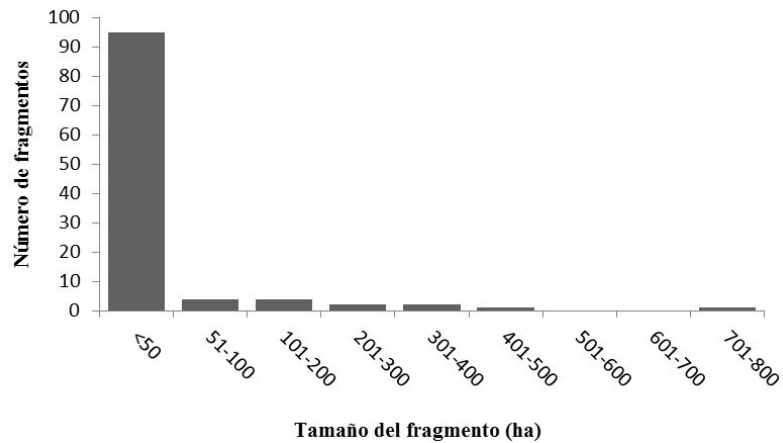
#### 4.4. Vegetación de galería

La distribución de la vegetación de galería está asociada con los cursos de agua y por lo tanto se distribuye a lo largo de ella, aunque de forma interrumpida siguiendo la topografía en 109 fragmentos (mapa 4.1).

Este tipo de vegetación casi ha desaparecido en las cercanías de la zona urbana de Tijuana, a excepción por la pequeña parte del Alamar que todavía queda sin canalizar y por lo que contiene, aunque modificado el Parque Morelos. Hacia Playas de Rosarito, el drenaje natural hacia la costa no se conecta con la playa, debido a que toda esa área se encuentra sumamente urbanizada. En el Valle de las Palmas este tipo de vegetación se encuentra rodeada de grandes porciones de pastizal inducido lo que disminuye su calidad y pone en riesgo su existencia.

La vegetación de galería sólo cuenta con un fragmento mayor a 1,000 ha, que representa el 81 por ciento del total de su cobertura y se extiende desde el sur de la presa Abelardo L. Rodríguez hasta el Valle de las Palmas y en su mayoría está rodeado por vegetación natural. Sin embargo, cerca del 30 por ciento de su borde lo comparte con pastizal inducido. El resto son muchos fragmentos pequeños conectados por los drenajes naturales (gráfica 4.5).

Gráfica 4.5. Vegetación de galería. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5. Agricultura

La agricultura (de riego y de temporal) es muy poca, apenas y llega al tres por ciento de la ZMTTR y no cuenta con ningún fragmento mayor a 1,000 ha, pero tiene tres fragmentos mayores a 200 ha (mapa 4.1)

Los fragmentos, de mayor a menor se localizan en:

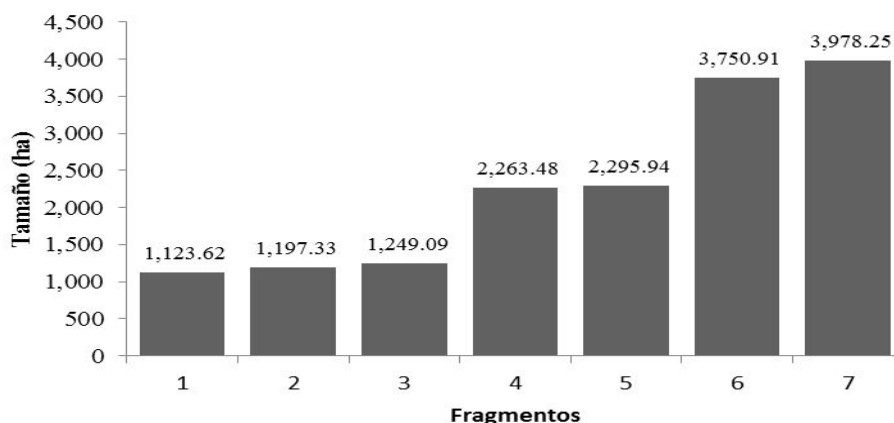
- (1) Fragmento de agricultura de riego en el Valle de las Palmas, comparte cerca de la mitad de su borde junto a la vegetación de galería y el restante con el pastizal inducido.
- (2) Fragmento de agricultura de riego en el Valle de las Palmas, muy parecido al anterior, sólo que comparte una pequeña parte de su borde con agricultura de temporal.
- (3) Fragmento de agricultura de temporal en Playas de Rosarito, rodeado casi en su totalidad por pastizal inducido y cerca del 3 por ciento por zonas urbanas.

El resto de los fragmentos se encuentran distribuidos cerca de los cursos de agua en el Valle de las Palmas, otros cerca de la costa entre zonas de pastizal inducido y matorral costero en Tijuana. Y otros cerca de los cursos de agua en Tecate.

#### 4.6. Pastizal inducido

El pastizal inducido es la segunda cobertura artificial con mayor superficie después de las zonas urbanas y representa el casi 16 por ciento del área de estudio (cuadro 4.1). Dicha cobertura cuenta con siete fragmentos mayores de 1,000 ha (gráfica 4.6, mapa 4.1).

Gráfica 4.6. Fragmentos de pastizal inducido mayores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.

Los grandes fragmentos, de mayor a menor se localizan en:

- (1) Fragmento en Valle de las Palmas, que causa mucha presión en una zona contigua de vegetación de galería y sobre matorral costero y chaparral.
- (2) Fragmento en Playas de Rosarito, se extiende desde la costa hasta la parte continental, limita con áreas de matorral costero y vegetación de galería.
- (3) Fragmento cerca del fragmento 1 sólo dividido por una zona de vegetación de galería (parte del único fragmento mayor a 1,000 ha), lo que hace a esta porción muy susceptible a cambiar a pastizal inducido
- (4) Fragmento en Valle de las Palmas debajo de la parte más extensa de vegetación de galería

(5) Fragmento en la pared suroeste de la ZMTTR, en Valle de las Palmas, que junto con los fragmentos 1, 3 y 4 generan gran presión en la vegetación de galería, ya que se encuentran de manera continua sólo interrumpidos por dicha cobertura

(6) Fragmento cerca de la costa entre el área urbana de Tijuana y Playas de Rosarito, comparte su borde con dos fragmentos de matorral costero (<80 ha).

(7) Fragmento entre las áreas urbanas de Tijuana y Tecate, se encuentra rodeado por matorral costero al cual está fragmentando.

El resto de los fragmentos se distribuyen a lo largo de las carreteras, cerca de las áreas agrícolas en el Valle de las Palmas y cerca de las áreas urbanas rumbo a la costa en Playas de Rosarito. Algunos se encuentran entre las zonas urbanas de Tijuana y Tecate.

Todos los grandes fragmentos de pastizal inducido representan focos rojos para las coberturas de vegetación natural que se encuentran cerca, por ello es importante tomarlos en cuenta a la hora de la elección de espacios para la conservación.

#### 4.7. Presas

En la ZMTTR, se encuentran tres presas, la Abelardo L. Rodríguez en Tijuana rodeada en su mayoría por zonas de pastizal inducido por áreas urbanas. La presa El Carrizo rumbo a Tecate que se encuentra cerca del matorral costero y las Auras en Tecate que comparte su borde con chaparral (mapa 4.1).

#### 4.8. Urbano

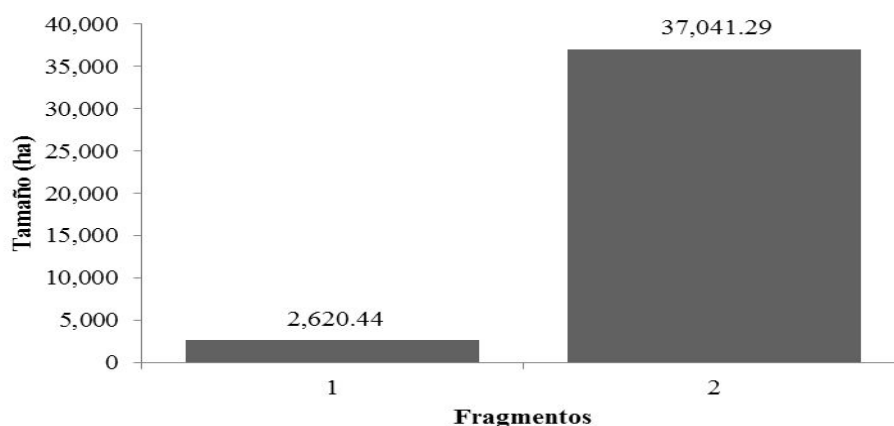
Las áreas urbanas son las que presentan mayor extensión y fragmentos más grandes en la ZMTTR, con una superficie que representa casi 32 por ciento, distribuida en 62 fragmentos (cuadro 5.1). Cuenta con dos fragmentos mayores a 1,000 ha (gráfica 4.7, mapa 4.1).

Los fragmentos más grandes, de mayor a menor se localizan en:

(1) Fragmento (el más grande) que representa la zona urbana continua desde Tijuana hasta Playas de Rosarito, representa 30 por ciento de la superficie total. Cerca de una cuarta parte de su borde está en contacto con la frontera con Estados Unidos, dos cuartas con vegetación natural y el resto de su borde está rodeado tanto por agricultura como por pastizal inducido.

(2) Fragmento que representa la zona urbana de Tecate con casi 2 por ciento del área de estudio, está rodeado en su mayoría por vegetación natural y dentro de él hay pocos fragmentos de vegetación de galería y de pastizal inducido.

Gráfica 4.7. Fragmentos urbanos mayores a 1,000 ha

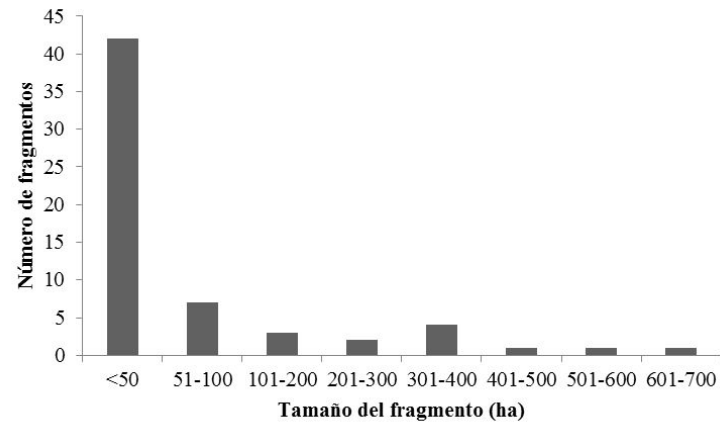


Fuente: Elaboración propia.

La suma de los fragmentos mayores a 1,000 ha (2 fragmentos) y mayores a 100 ha (11 fragmentos) (gráfica 4.7 y 4.8), contienen casi la totalidad de las áreas urbanas (97.56 %), lo que indica que la mayoría de las zonas urbanas están distribuidas en fragmentos grandes (>1,000 ha) y medianos (>100 ha). El resto de los fragmentos son menores a 100 ha (49 fragmentos).

Un gran número de fragmentos pequeños (29 fragmentos) se distribuyen a lo largo de las principales carreteras que conectan a las tres principales zonas urbanas y a estas con el Valle de las Palmas perforando los fragmentos de vegetación natural.

Gráfica 4.8. Urbano. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO V. ESCENARIOS DE CONSERVACION

### 5.1. Escenario 1. Conservación de zonas de riesgo (pendientes > 35 % y cursos de agua)

Las áreas de riesgo incluyen las pendientes pronunciadas mayores al 35 por ciento, los cursos de agua con áreas de amortiguamiento (10 m) junto con la superficie de la vegetación de galería. Esto último debido a que la vegetación de galería indica en donde están las áreas de inundación. Conforman casi una quinta parte de la superficie de la ZMTTR y están compuestas principalmente por vegetación natural, matorral costero y chaparral. Aunque en proporciones muy pequeñas también presentan agricultura de temporal (cuadro 5.1).

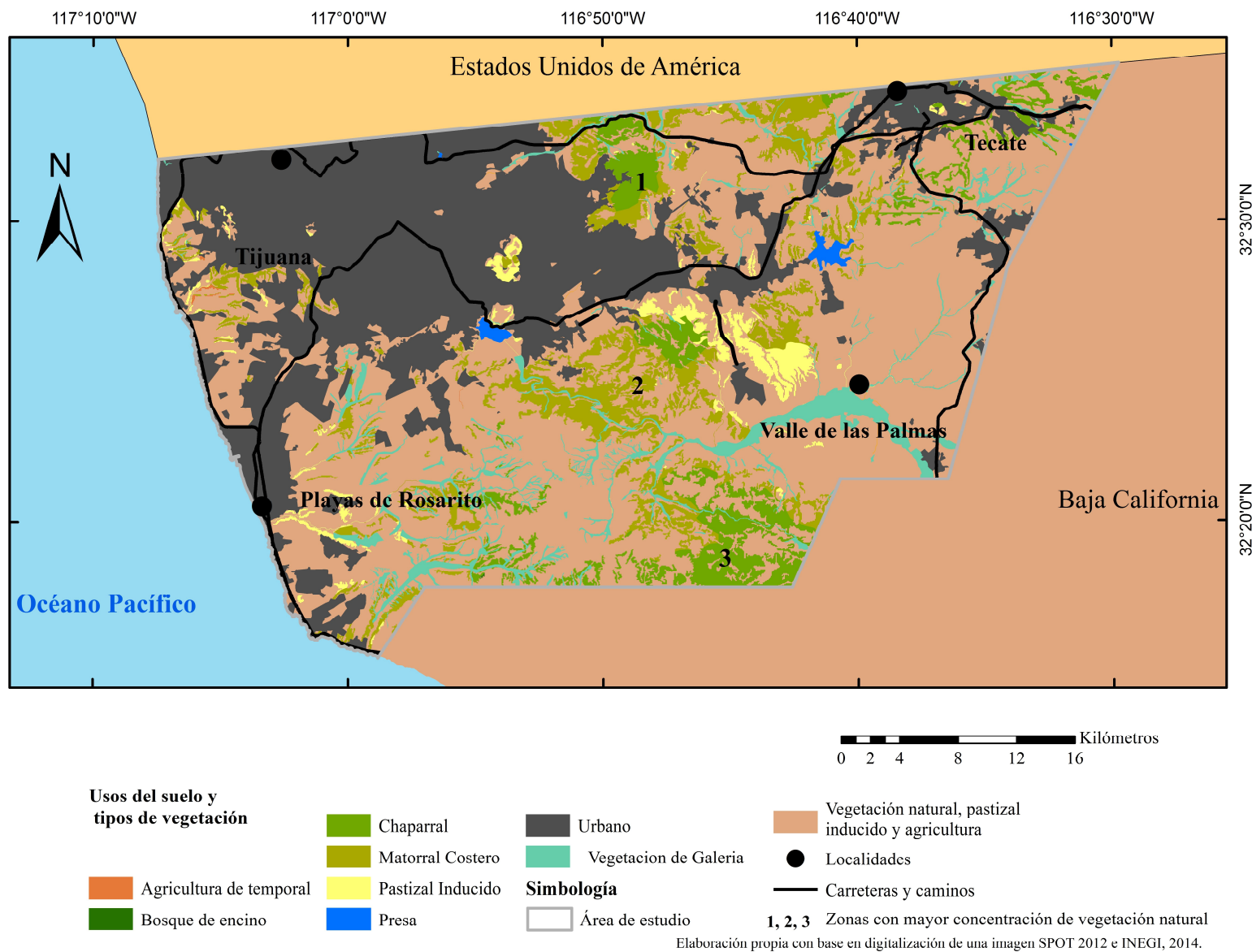
Cuadro 5.1. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de vegetación en áreas de riesgo de la ZMTTR

	Cobertura	Superficies (ha)	% de área de riesgos	% de la ZMTTR	Número de fragmentos
<b>Natural</b>	Bosque de encino	3.48	0.01	0.00	1
	Chaparral	6,927.96	25.47	4.95	241
	Matorral Costero	11,465.08	42.15	8.20	558
	Vegetación de Galería	6,118.18	22.49	4.37	111
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>24,514.69</b>	<b>90.13</b>	<b>18</b>	<b>911</b>
<b>Artificial</b>	Agricultura de riego	15.73	0.06	0.01	20
	Agricultura de temporal	52.25	0.19	0.04	43
	Pastizal Inducido	2,616.34	9.62	1.87	325
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>2,684.33</b>	<b>9.87</b>	<b>1.92</b>	<b>388</b>
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>27,199.02</b>	<b>100.00</b>	<b>19.45</b>	<b>1,299</b>

Fuente: Elaboración propia.



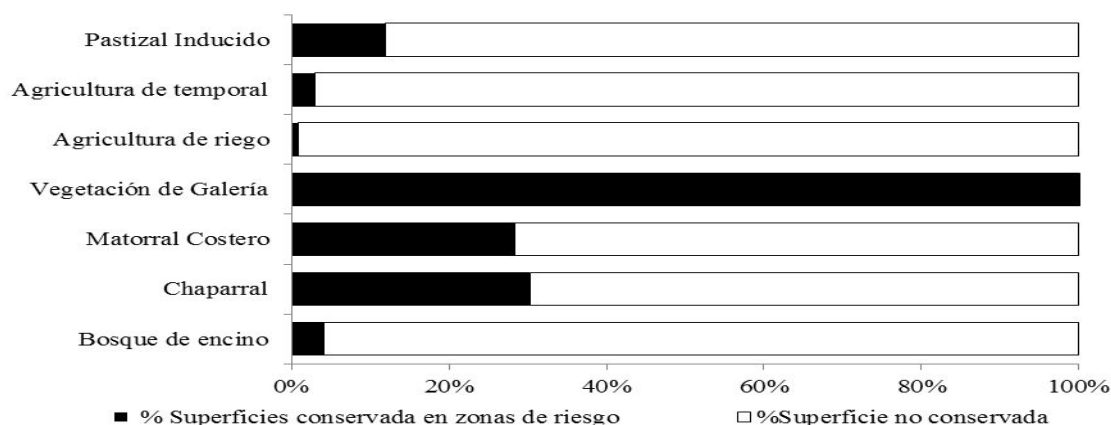
Mapa 5.1. Áreas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento) por usos del suelo y tipos de vegetación de la ZMTTR



En el Mapa 5.1 (en números negros), se observa que la vegetación natural en zonas de riesgo que tiene una mayor superficie se concentra principalmente en tres partes; (1) al norte entre las zonas conurbadas de Tijuana y Tecate, (2) al sureste de la Presa Abelardo L. Rodríguez y (3) al suroeste del Valle de las Palmas.

La gráfica 5.1 muestra que si se considera la vegetación natural existente en las zonas de riesgo como infraestructura verde de forma preventiva (pendientes pronunciadas y cursos de agua), se puede conservar el total de la vegetación de galería, una tercera parte del matorral costero y del chaparral y solo cuatro por ciento del bosque de encino. Toda la vegetación de galería sería para conservación, porque ésta se incluyó dentro de las áreas de riesgo por ser áreas de inundación y por su importancia para la infiltración de agua en el subsuelo. Finalmente sólo 12 por ciento de la superficie de pastizal y casi cuatro por ciento de la de agricultura (fundamentalmente la de temporal) se localiza en zonas de alto riesgo.

Grafica 5.1. Porcentaje de superficie conservada en áreas de riesgo por usos del suelo y tipos de vegetación



Fuente: Elaboración propia.

El pastizal inducido tiene poca representatividad dentro de las áreas de riesgo, sin embargo, representa un punto de presión para las coberturas con vegetación natural que se encuentran cerca. De igual manera la agricultura cuenta con poca superficie en las áreas de riesgo debido a las dificultades de realizar esta actividad tanto en áreas con pendiente pronunciada como en

cursos de agua, en especial para la agricultura de riego, en otras palabras, la agricultura de temporal es la que tiene una mayor superficie en áreas de riesgo (cuadro 5.1).

Se examinaron la localización y distribución de los fragmentos de los usos del suelo de la ZMTTR que se encuentran en áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua).

#### 5.1.1. Bosque de encino

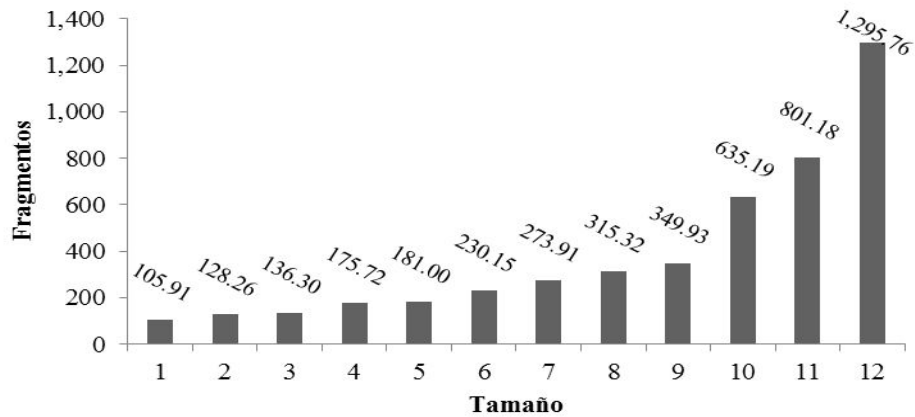
La superficie en riesgo contiene solo una muy pequeña fracción de la cobertura total del bosque de encino en la ZMTTR, rodeado de vegetación natural (mapa 5.1).

#### 5.1.2. Chaparral

El chaparral sólo cuenta con un fragmento mayor a 1, 000 ha (gráfica 5.2), que representa casi 19 por ciento del chaparral en áreas de riesgo y el casi 6 por ciento de su distribución total en la ZMTTR. Dicho fragmento se localiza hacia el sur de Valle de las Palmas, rodeado por vegetación natural (mapa 5.1)

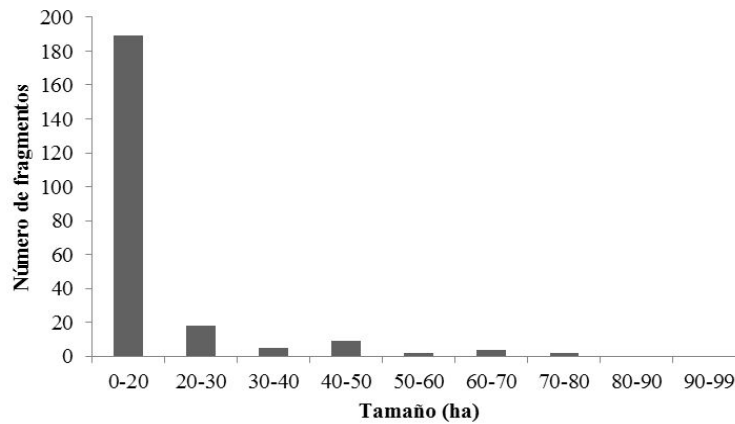
Todos los fragmentos de chaparral en zonas de riesgo mayores a 1000 ha (una >1,000 ha y 11 >100 ha) contienen más de la mitad en áreas de riesgo y corresponde al 20.22 por ciento de la ZMTTR. En cuanto al gran número (229) de fragmentos menores a 100 ha que existen (gráfica 5.3), la mayoría se encuentran cerca de las áreas urbanas de Tijuana y Tecate.

Gráfica 5.2. Fragmentos de Chaparral mayores a 100 ha de en áreas de riesgo



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5.3. Chaparral. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha del en áreas de riesgo



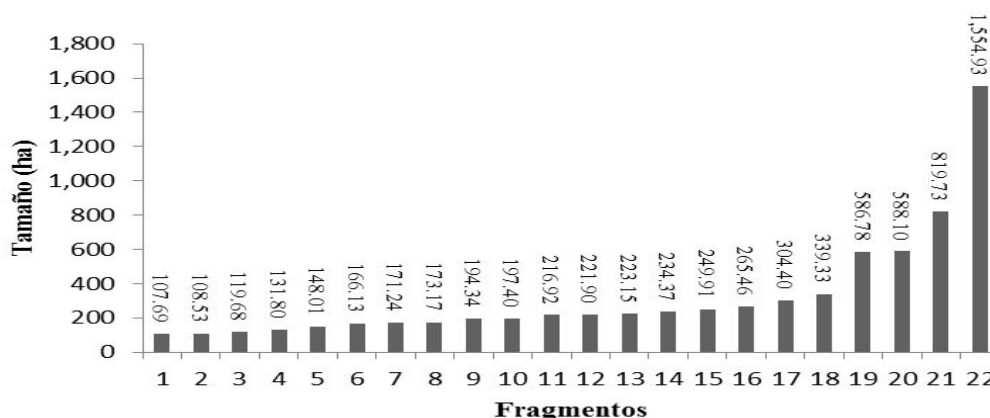
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3. Matorral costero

El matorral costero en áreas de riesgo tiene sólo un fragmento mayor a 1,000 ha (gráfica 5.4), que se encuentra en Valle de las Palmas, tiene menos del 10 por ciento de su borde en contacto

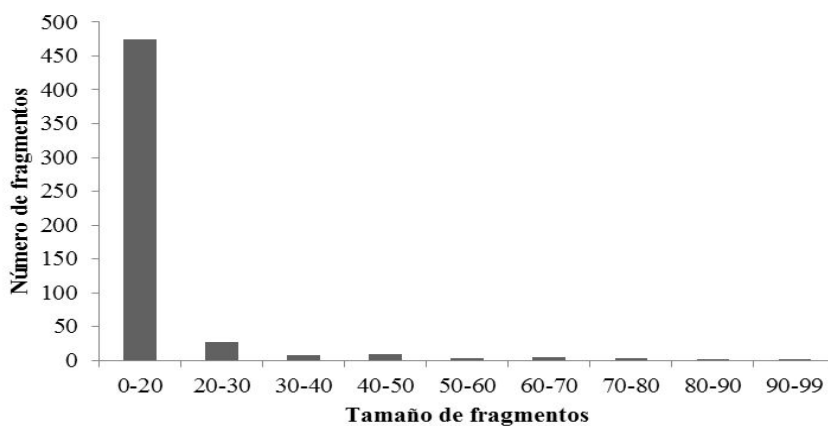
con áreas urbanas, representa casi 14 por ciento del matorral costero en áreas de riesgo. Si además se consideran los fragmentos mayores a 100 ha, el área que se podría conservar aumenta a 62.13 por ciento representa casi 18 por ciento de la superficie total del matorral costero. Existe un gran número de fragmentos pequeños menores a 100 ha (gráfica 5.5), en total son 536 destacan los que se encuentran cerca de la costa en Tijuana ya que están sumamente amenazados por el crecimiento urbano (mapa 5.1).

Gráfica 5.4. Fragmentos de matorral costero mayores a 100 ha en áreas de riesgo



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5.5. Matorral costero. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha de en áreas de riesgo

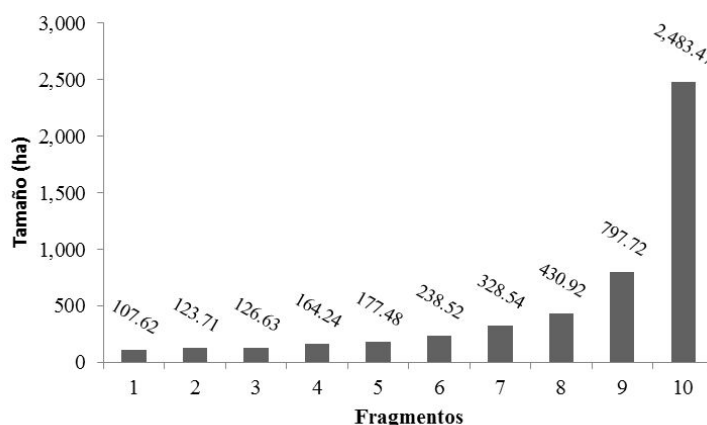


Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.4. Vegetación de galería

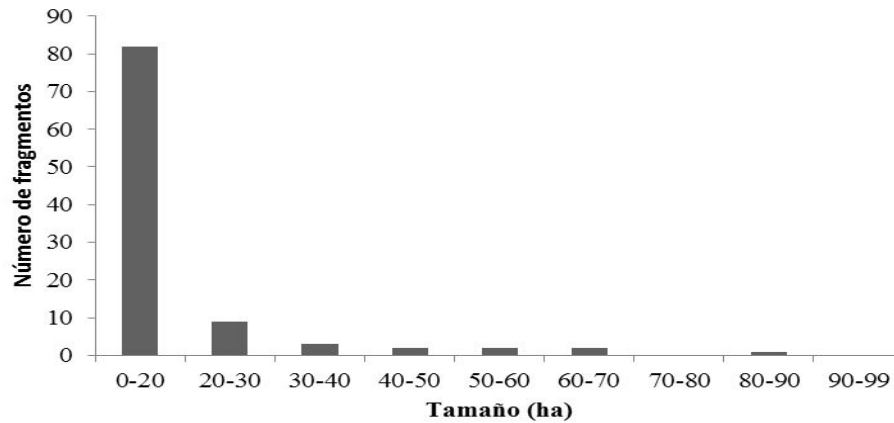
Todos los fragmentos de vegetación de galería se encuentran en áreas de riesgo, debido a que se consideraron como parte de las zonas de riesgo, sin embargo, sólo hay un fragmento mayor a 1,000 ha en el Valle de las Palmas, rodeado en una buena porción por agricultura de riego y de temporal y por grandes zonas de pastizal y pequeñas áreas urbanas que amenazan su estabilidad. Este gran fragmento representa casi 41 por ciento de la vegetación de galería en áreas de riesgo, si se toman también los fragmentos mayores a 100 ha (gráfica 5.6), el área en zonas de riesgo aumenta a casi 82 por ciento. Entre los fragmentos menores a 100 ha (gráfica 5.7) de la vegetación de galería destaca la parte del Alamar que no está canalizada. Este fragmento de vegetación de galería es muy importante conservarlo porque es de los pocos que se encuentran dentro del área urbana de Tijuana (mapa 5.1).

Gráfica 5.6. Fragmentos mayores a 100 ha de vegetación de galería en áreas de riesgo



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5.7. Vegetación de galería. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 100 ha de en áreas de riesgo



Fuente: Elaboración propia.

Los grandes fragmentos se localizan en:

- (1) Fragmento que se extiende desde en la parte continental de Playas de Rosarito hasta valle de las palmas, este fragmento tiene cerca de un tercio de su borde en contacto con pastizal inducido y lo restante con vegetación natural.
- (2) Fragmento en contacto con la frontera con Estados Unidos, se encuentra entre la zona urbana de Tijuana y Tecate, cerca de un cuarto de su borde lo comparte con áreas urbanas. Dentro de este fragmento se pueden encontrar zonas de pastizal inducido.
- (3) Fragmento que se encuentra en la parte sur de Playas de rosarito, la mayor parte de su borde está en contacto con vegetación natural.
- (4) Fragmento que se localiza muy cerca al fragmento tres y está totalmente rodeado de vegetación natural.

Los fragmentos menores a 100 ha de vegetación de galería son 110 y se encuentran distribuidos principalmente en el sur hacia Playas de Rosarito y Valle de las Palmas. La mayoría de estos están rodeados de coberturas naturales.

## 5.2. Escenario 2. Conservación de zonas de riesgo (pendientes > 35 % y cursos de agua) y áreas especiales identificadas (mapa 5.2)

Para este escenario se identificaron lugares ecológicos sobresalientes mismos que se agregaron a las áreas de riesgo. A continuación se describen los lugares ecológicos sobresalientes que se identificaron en la ZMTTR.

Las áreas de lugares ecológicos sobresalientes se construyeron con información de diferentes escalas que incluye: la distribución de especies que se encuentran en alguna categoría de riesgo y están protegidas por la NOM 059; la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso designada por la CONABIO, las áreas que menciona Oberbauer (1999) identificadas en campo y el pequeño fragmento del Bosque de encino. Por la combinación de diferentes escalas la información generada es un poco limitada. Tanto la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso, las áreas designadas por Oberbauer (1999) identificadas en campo y el fragmento de bosque de encino tienen una información más sólida y por ello se les dio mayor peso. Y la distribución de las especies en la NOM- 059 se usaron de forma indicativa.

La vegetación natural con características ecológicas sobresalientes cubre 27 por ciento de la ZMTTR y está representada en su mayoría por el matorral costero y el chaparral. Más de la mitad de la superficie total del matorral costero en la ZMTTR tiene características ecológicas sobresalientes y el chaparral está en una situación similar (casi 56.66 %) de su propia distribución. Las áreas ecológicas sobresalientes con pastizal inducido y la agricultura representan 7 por ciento de la ZMTTR, sin embargo, el pastizal se encuentra muy ampliamente distribuido causando la fragmentación de las coberturas naturales (cuadro 5.3).



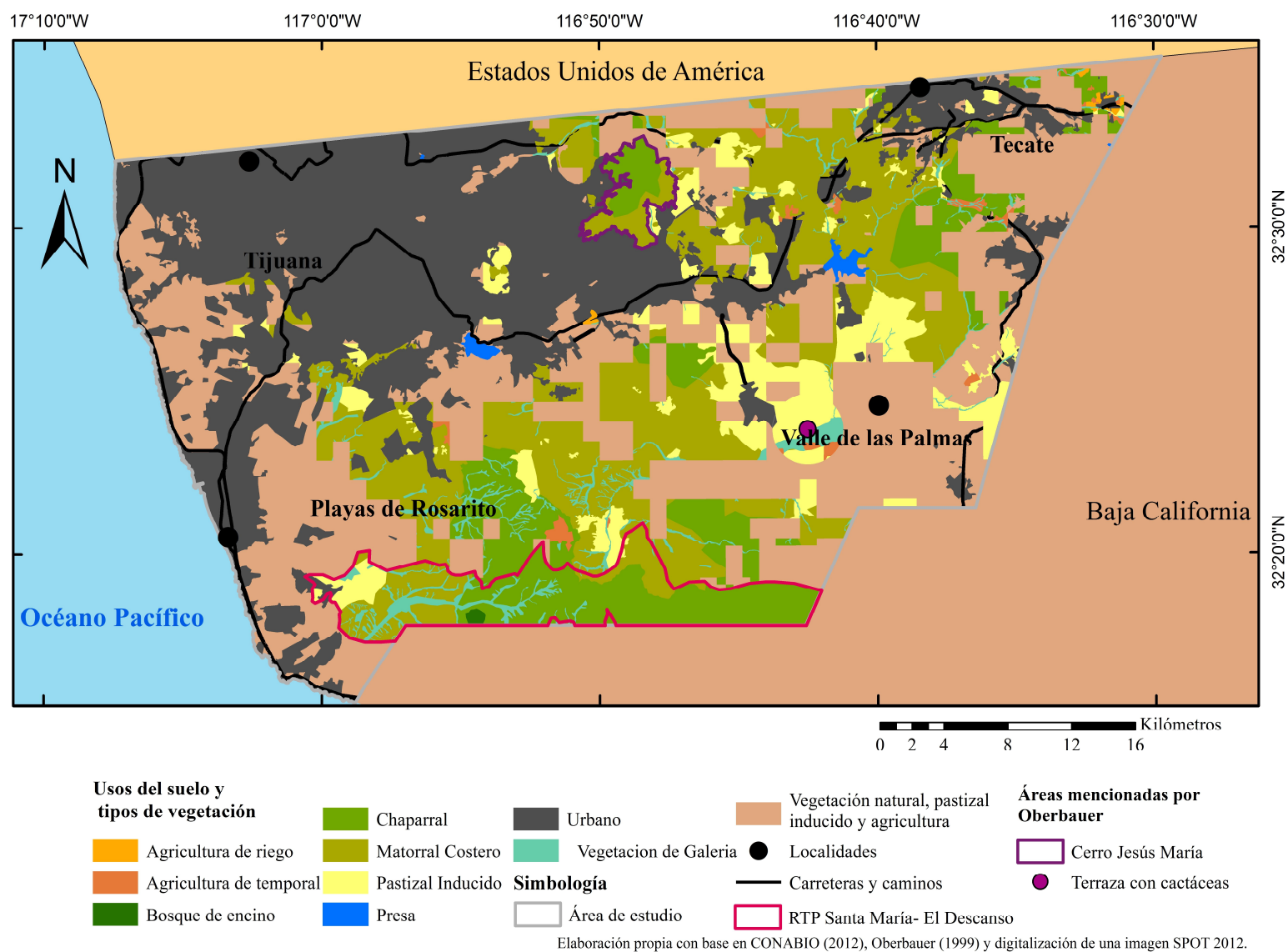
Cuadro 5.2. Superficie y porcentajes de fragmentos de áreas ecológicas sobresalientes de la  
ZMTTR

	Cobertura	Superficies (ha)	% de área lugares ecológicos sobresalientes	% de la ZMTTR
<b>Natural</b>	Bosque de encino	84.54	0.16	0.06
	Chaparral	12,973.33	25.20	9.28
	Matorral Costero	25,744.37	50.01	18.41
	Vegetación de Galería	3,097.59	6.02	2.21
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>41,899.83</b>	<b>81.39</b>	<b>29.96</b>
<b>Artificial</b>	Agricultura de riego	127.72	0.25	0.09
	Agricultura de temporal	634.49	1.23	0.45
	Pastizal Inducido	8,702.76	16.91	6.22
	Urbano	114.76	0.22	0.08
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>9,579.73</b>	<b>18.61</b>	<b>6.85</b>
<b>TOTAL</b>	8	51,479.56	100	30.04

Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte de las áreas ecológicas sobresalientes se encuentran distribuidas principalmente en dos lugares (1) hacia la parte continental de Playas de Rosarito y que se extiende hacia el Valle de las Palmas y (2) entre la zona urbana de Tijuana y Tecate que se extiende hasta la presa El Carrizo, estas áreas están separadas fundamentalmente por pastizal y carreteras (mapa 5.2).

Mapa 5.2. Lugares ecológicos sobresalientes de la ZMTTR



Para la construcción del escenario 2 sólo se eligieron de entre las áreas ecológicas especiales la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso, las áreas de Oberbauer (1999) identificadas en campo y el fragmento del bosque de encino. Cabe aclarar que la Región Terrestre Prioritaria Santa María- El Descanso, cuenta con algunas zonas de pastizal y áreas urbanas, mismas que no se tomaron en cuenta para la construcción del escenario, además es sólo una parte de la RTP Santa María- El Descanso la que se encuentra dentro de la ZMTTR.

El escenario 2 cuenta con dos fragmentos mayores a 1,000 ha que constituyen poco más del 34 por ciento de la vegetación natural total. Si se le suman los fragmentos menores a 1,000 ha se alcanza a cubrir más del 40 por ciento de la vegetación natural total en la ZMTTR.

Para el escenario 2 en particular, se hizo un cruce de las capas de áreas ecológicas especiales, pendientes y zonas de amortiguamiento de cursos de agua, con la finalidad de identificar aquellas áreas en las que coinciden los atributos de riesgos con las áreas ecológicas especiales. Así se identificaron áreas que tienen un atributo, otras en las que coinciden dos y lugares en los que convergen hasta tres atributos (cuadro 5.3).

Cuadro 5.3. Clasificación de atributos

Un atributo	Dos atributos	Tres atributos
Pendientes	Pendientes y lugares ecológicos especiales	Pendientes, cursos agua y lugares ecológicos especiales
Cursos de agua	Cursos de agua y lugares ecológicos especiales	

Fuente: Elaboración propia.

Se encontró que a escala de la superficie de la ZMTTR, solo en porciones muy pequeñas del paisaje coinciden más de dos atributos en una misma área. Sin embargo, a escala de los escenarios de conservación propuestos, se encuentra que la coincidencia de la combinación de dos atributos (pendientes pronunciadas con lugares ecológicos especiales, cursos de agua y lugares ecológicos especiales) cubre poco más del 50 por ciento del área.

La superficie en donde coinciden tres de estos atributos aunque solo conforma poco más del 1 por ciento del área propuesta para conservación debe ser considerada como prioritaria porque

tiene un alto valor al ser área de riesgo con cursos de agua y pendientes pronunciadas, además de ser un lugar ecológico sobresaliente.

Más de la mitad del total de las áreas de riesgo (cuadro 5.4) son además lugares ecológicos sobresalientes y representan cerca del 10 por ciento de la ZMTTR. Las áreas que combinan áreas de riesgo y lugares ecológicos sobresalientes, es un criterio que puede ayudar a en la toma de decisiones para la elección de áreas de conservación.

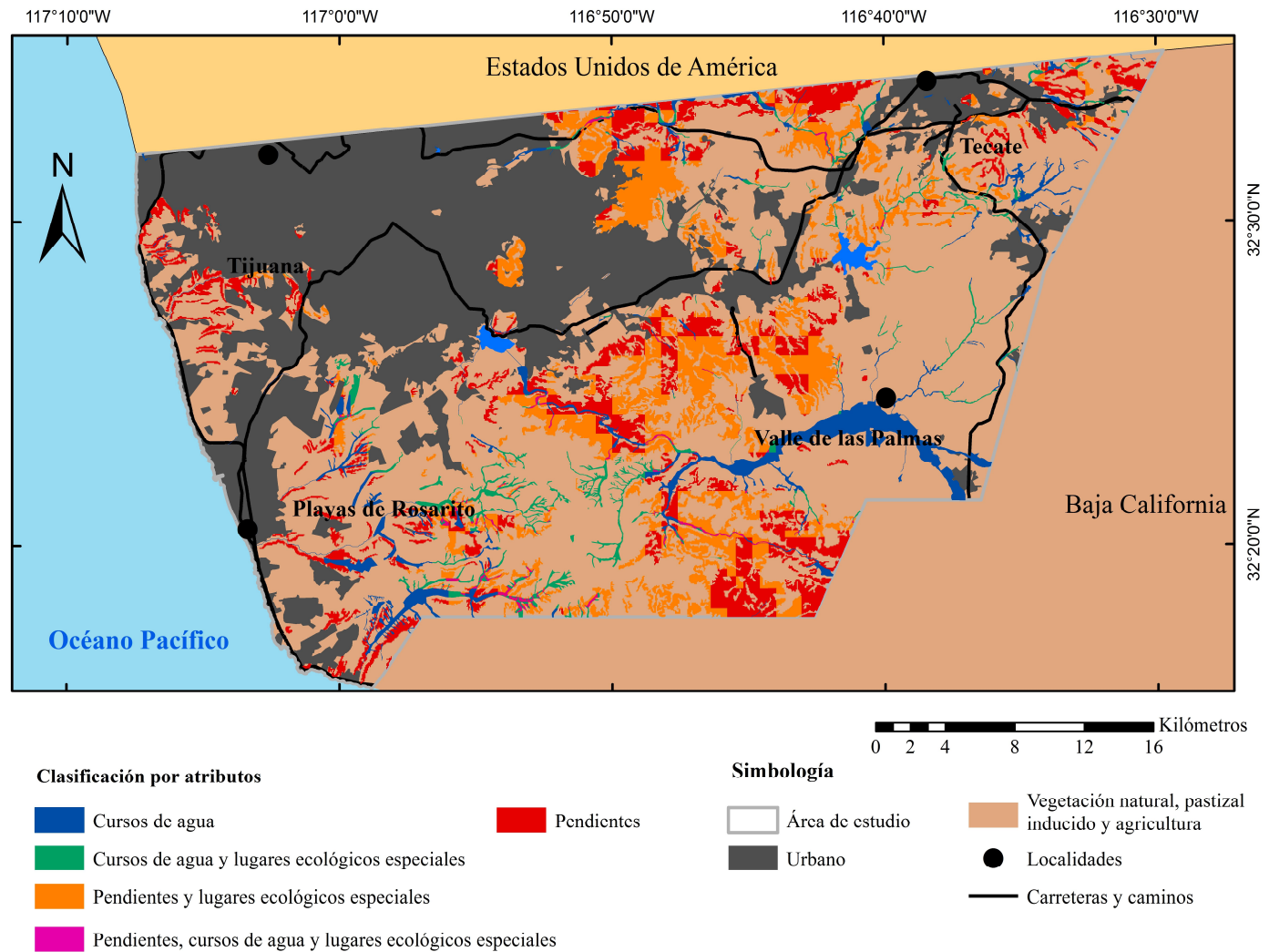
Se observa en el Mapa 5.4 que las áreas con mayor superficie y que se encuentran más agregadas son las pendientes pronunciadas, mientras que las áreas con menor superficie y que están más disgregadas corresponden a los cursos de agua.

Cuadro 5.4. Superficie, porcentajes y número de fragmentos de las áreas de riesgo (pendientes pronunciadas y cursos de agua) resaltando los lugares ecológicos sobresalientes

	Cobertura	Superficies (ha)	% de cruce de áreas	% del área total
<b>Pendientes pronunciadas con:</b>				
	Chaparral	3,222.31	11.68	2.30
	Matorral costero	4,878.47	17.68	3.49
	Agricultura	40.89	0.15	0.03
	Pastizal inducido	1,252.45	4.54	0.90
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>9,394.12</b>	<b>34.05</b>	<b>6.72</b>
<b>Cursos de agua</b>				
	Vegetación de Galería*	3,948.44	14.31	2.82
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>3,948.44</b>	<b>14.31</b>	<b>2.82</b>
<b>Pendientes pronunciadas y lugares ecológicos especiales con:</b>				
	Bosque de encino	3.48	0.01	0.00
	Chaparral	3,698.3	13.40	2.64
	Matorral costero	6,536.99	23.69	4.67
	Vegetación de Galería*	387.04	1.40	0.28
	Agricultura	0.32	0.00	0.00
	Pastizal inducido	1,297.9	4.70	0.93
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>11,924.03</b>	<b>43.22</b>	<b>8.53</b>
<b>Cursos de agua y lugares ecológicos especiales con:</b>				
	Chaparral	1.35	0.00	0.00
	Matorral costero	29.16	0.11	0.02
	Vegetación de Galería*	1,888.32	6.84	1.35
	Agricultura	6.27	0.02	0.00
	Pastizal inducido	6.46	0.02	0.00
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>1,931.56</b>	<b>7.00</b>	<b>1.38</b>
<b>Pendientes pronunciadas, cursos agua y lugares ecológicos especiales con:</b>				
	Chaparral	2.89	0.01	0.00
	Matorral costero	5.92	0.02	0.00
	Vegetación de Galería*	385.28	1.40	0.28
	Pastizal inducido	0.09	0.00	0.00
	<b>SUBTOTAL</b>	<b>394.18</b>	<b>1.43</b>	<b>0.28</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>27,592.33</b>	<b>100.00</b>	<b>19.73</b>

Fuente: Elaboración propia.\*Cabe aclarar que los cursos de agua están combinados con la vegetación de Galería.

Mapa 5.3. Áreas de riesgo (pendientes > 35 % y cursos de agua con zonas de amortiguamiento) resaltando los lugares ecológicos sobresalientes que contienen en la ZMTTR



5.3. Escenario 3. Conservación de zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), áreas especiales identificadas y algunos corredores de vegetación natural (mapa 5.4)

Esta propuesta considera conservar áreas con vegetación natural en zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), áreas especiales y algunos corredores de vegetación natural. Cabe mencionar que los corredores se construyeron con la finalidad de ver como aumentaba la conectividad, aunque para definir corredores existen herramientas específicas más adecuadas.

El escenario 3 tiene dos fragmento mayores a 1,000 ha que representan más del 40 por ciento de la vegetación natural y casi 26 por ciento de la superficie de la ZMTTR. Los fragmentos menores son 245 y constituyen 7.09 por ciento de la vegetación natural total.

5.4. Escenario 4. Conservación de zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), áreas especiales identificadas y algunos corredores que incluyen pastizal inducido (mapa 5.5).

Propone la conservación de las áreas con vegetación natural en zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua), áreas especiales y corredores que incluyen pastizal inducido.

Este último escenario incluyó las áreas con pastizal inducido en las zonas de amortiguamiento de los corredores, con la finalidad de aumentar la conectividad y proponer estas áreas para restauración. Sólo cuenta con un fragmento mayor a 1,000 ha (33,767.15 ha), que comprende a más del 48 por ciento de la vegetación natural existente y más del 27 de la superficie de la ZMTTR. Los fragmentos menores (237) cubren más del siete por ciento de la propuesta de conservación.

5.5. Análisis comparativo de los escenarios de infraestructura verde propuestos para la ZMTTR

En este apartado se analiza el grado de conectividad de la vegetación natural en la ZMTTR mediante tres formas: (1) índice conectividad, (2) índice de cohesión y (3) número y tamaño de fragmentos existente, para probar que se puede mantener la conectividad en las áreas que se proponen para conservación como se mencionó en la hipótesis. Con el propósito de tener un valor comparativo primero se midió la conectividad que actualmente tiene el paisaje considerando tres categorías: la vegetación natural (integrada en una sola) y luego se procedió a analizar cuatro escenarios diferentes de niveles de conservación.

- (1) Estado actual del paisaje de la ZMTTR
- (2) Escenario 1. Considera la conservación de vegetación natural que se encuentra en zonas de riesgo (pendientes >35 % y cursos de agua).
- (3) Escenario 2. Este incluye la vegetación natural en zonas de riesgo junto con áreas especiales (la RTP Santa María- El descanso, las zonas designadas por Oberbauer (1999) y el fragmento de bosque de encino).
- (4) Escenario 3. Las categorías que lo componen son: la vegetación natural en zonas de riesgo más las áreas especiales y corredores que consideran sólo la vegetación natural.
- (4) Escenario 4. El último está compuesto por la vegetación natural en zonas de riesgo junto con áreas especiales y corredores que consideran también las zonas de pastizal inducido como áreas que podrían restaurarse.

El índice de cohesión para la vegetación natural en la ZMTTR es de casi el cien por ciento (cuadro 5.5), que indica que los fragmentos se encuentran muy agregados. Así mismo el índice del vecino más cercano, muestra que la distribución en agregada.

Con base en estos índices y el mapa 5.4 se puede deducir que en la ZMTTR muchos fragmentos se encuentran agregados en partes diferentes y que hay varios fragmentos que se encuentran muy aislados y a una distancia considerable de otros.

Cuadro 5.5. Vegetación natural de la ZMTTR. Conectividad del paisaje

Cobertura	Cohesión (% )	Vecino más cercano
<b>Vegetación natural</b>	99.99	0.72

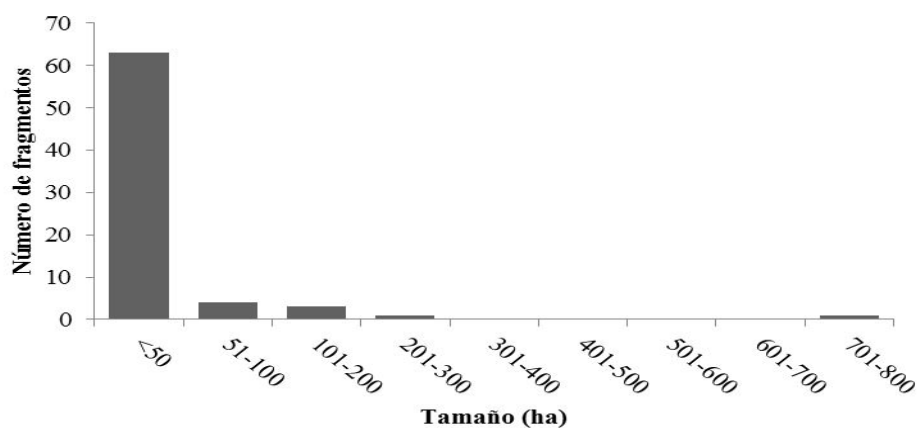
Fuente: Elaboración propia.

La vegetación natural en la ZMTTR cuenta con un fragmento mayor a 1,000 ha que concentra 96 por ciento de su extensión total (67,021.85 ha) está compuesto por la zona sur oeste de Playas de Rosarito y se extiende hasta Valle de las Palmas y continúa hasta Tecate. El resto de



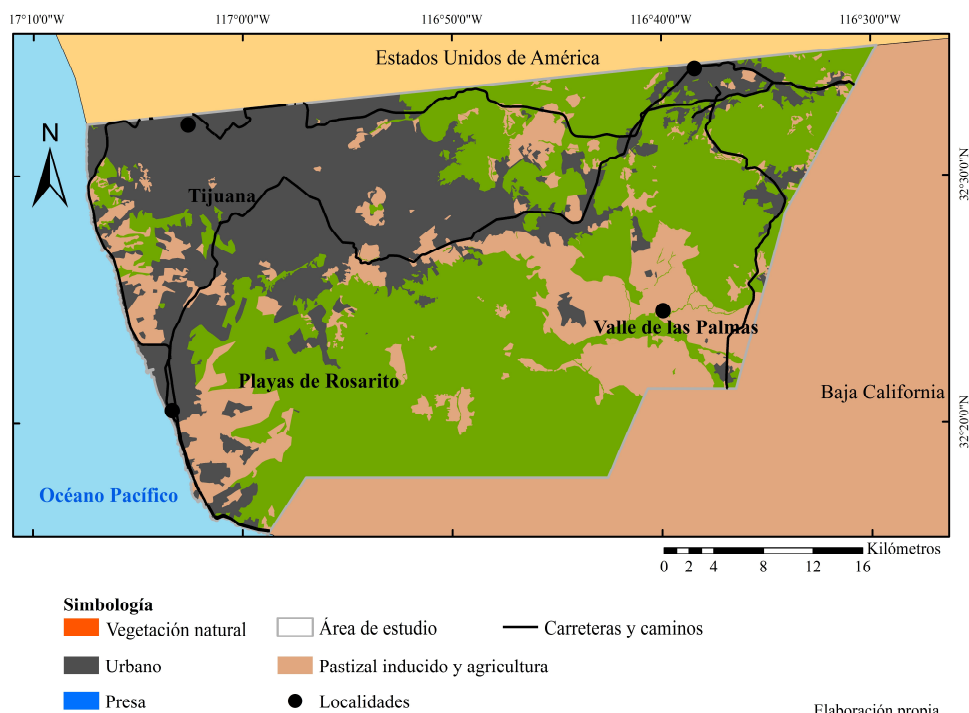
la vegetación natural está distribuido en 72 fragmentos más pequeños (gráfica 5.8). El fragmento más grande entre estos es de 862 ha.

Gráfica 5.8. Vegetación de natural en la ZMTTR. Histograma de tamaño de fragmentos menores a 1,000 ha



Fuente: Elaboración propia.

Mapa 5.4. Vegetación natural en la ZMTTR



Elaboración propia.



































































































