



Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Filosofía y Letras

Colegio de Geografía

DINÁMICA AMBIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE DE 1985-2016

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

Aldo Ayala López

ASESOR:

Mtro. José Mauricio Galeana Pizaña

Ciudad de México, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis queridos padres, Balbina López Piña y Juan Ayala Miranda.

Al Mtro. José Antonio Carbajal Medina, por inspirarme a ser un explorador más de la Geografía.

Al Mtro. José Mauricio Galena Pizaña, “humilde profesor” gracias por su inquebrantable entusiasmo en la enseñanza de la Geografía, por desplegar el misterioso pergamino de los Sistemas de Información Geográfica, tesoro místico de la disciplina y de una generación, pero sobre todo, le agradezco por dar orientación y sentido y ser parte de este proyecto de investigación.

A María José, cómplice, compañera y fuente de inspiración, gracias cariño.

Agradezco a Mónica, Giovanna, Alma, Ana Karen, Leslie, Alejandra, Oscar, Erick y Jairo por su tolerancia, tiempo, dedicación y comentarios en este proyecto.

A mis sinodales: la Mtra. Franco González Angélica Margarita, la Dra. Salmerón García Olivia, al Dr. Navarro Moreno Jesús Abraham y al Mtro. Espinoza Rodríguez José Manuel; gracias por su tiempo, entusiasmo, comentarios finales y por ser parte clave de la formación académica que recibí; este proyecto de investigación es un legado suyo.

Gracias a aquellas personas que de forma involuntaria han permitido que mire a través de sus hombros, sin el trabajo de ellas y ellos este documento no tendría sustento.

Por último, pero no menos importante, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la población que le da vida, por el privilegio de la educación que recibí y por formar al ser humano que soy.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 La Sierra de Guadalupe y la periferia urbana de la Ciudad de México	4
1.1. Procesos de urbanización en la Ciudad de México	5
1.2. Periferia norte del Área Urbana de la Ciudad de México	10
1.3. Programas de conservación ecológica en la Sierra de Guadalupe.....	11
Capítulo 2 Naturaleza y medio ambiente	15
2.1. La Geografía y su situación con el medio ambiente	16
2.2. Espacio geográfico, territorio y paisaje.....	20
2.2.1. Espacio geográfico.....	20
2.2.2. Territorio	21
2.2.3. Paisaje	22
2.3. Teoría del Geosistema (análisis integral del paisaje)	24
2.4. El paisaje montano.....	32
2.5. La cartografía en la representación del espacio geográfico.....	34
Capítulo 3 Los sensores remotos en el análisis del paisaje	37
3.1. Precursores de la Teledetección	38
3.1.1. La constelación Landsat como fuente de información	41
3.2. Elementos físicos de la percepción remota	43
3.2.1. Fuentes de energía o iluminación	44
3.2.2. Interacción con el medio (caracterización espectral del paisaje)	51
3.2.3. Resolución de un sistema sensor.....	56
3.3. Preprocesamiento y ajuste.....	59
Capítulo 4 Método y resultados	60
4.1. Sistema natural abiótico	61
4.2. Sistema natural biótico	64
4.3. Calibración y reflectancia	66
4.4. Clasificación y transformación.....	70
4.5. Dinámica del paisaje	82
Conclusión.....	93
Referencias.....	96

Índice de figuras

Figura 1.1	Evolución de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	9
Figura 1.2	Programas de conservación ecológica en la Sierra de Guadalupe.....	14
Figura 2.1	Estructura básica del geosistema.....	26
Figura 3.1	Cronología de la constelación Landsat.....	41
Figura 3.2	Onda electromagnética.....	44
Figura 3.3	Bandas del espectro electromagnético.....	46
Figura 3.4	Atmósfera y partículas de dispersión.....	49
Figura 3.5	Ventanas atmosféricas.....	49
Figura 3.6	Distorsión del espectro electromagnético.....	50
Figura 3.7	Energía electromagnética y su medio.....	51
Figura 3.8	Reflexión especular (a) y difusa (b).....	52
Figura 3.9	Firmas espectrales; 1 agua, 2 vegetación y 3 suelo.....	55
Figura 3.10	Campo de visión instantáneo o IFOV.....	57
Figura 3.11	Resolución espectral y radiométrica.....	58
Figura 4.1	Estrategia metodológica.....	60
Figura 4.2	Morfo-estructura y delimitación del geosistema Sierra de Guadalupe.....	63
Figura 4.3	Proceso de calibración vista en color verdadero.....	68
Figura 4.4	Imágenes normalizadas.....	69
Figura 4.5	NDVI.....	73
Figura 4.6	Uso de suelo urbano derivado del NDVI.....	74
Figura 4.7	Identificación de las fracciones de cobertura y enmascaramiento.....	77
Figura 4.8	Procesamiento del sub-modelo de segregación espectral automatizada.....	77
Figura 4.9	Imágenes que muestran las coberturas fraccionales.....	78
Figura 4.10	Geofacies del geosistema Sierra de Guadalupe, en perspectiva temporal.....	81
Figura 4.11	Dinámica de la cobertura forestal de la Sierra de Guadalupe 1985-2016.....	87
Figura 4.12	Dinámica ambiental del geosistema Sierra de Guadalupe 1985-2016.....	91
Figura 4.13	Dinámica ambiental en hectáreas.....	92

Índice de cuadros

Cuadro 1.1	Suelo de Conservación por delegación.....	13
Cuadro 1.2	Áreas Naturales Protegidas en Suelo de Conservación.....	13
Cuadro 2.1	Elementos que integran el medio natural.....	16
Cuadro 2.2	Sistema de clasificación del paisaje (estructura taxonómica).....	26
Cuadro 3.1	Características técnicas del programa Landsat.....	40
Cuadro 3.2	Características técnicas del sensor TM.....	42
Cuadro 3.3	Información consultada de la constelación Landsat.....	42
Cuadro 3.4	Propiedades de las bandas que conforman el espectro electromagnético.....	46
Cuadro 4.1	Geofacies y sus características.....	80
Cuadro 4.2	Ejemplo de la tabla de análisis por pixel.....	84
Cuadro 4.3	Lógica del vector promedio.....	84
Cuadro 4.4	Conjunto de variables donde se simplifica el vector promedio a lógica de vector... ..	85
Cuadro 4.5	Dinámica de la cobertura forestal de la Sierra de Guadalupe en ha de 1985-2016.....	85
Cuadro 4.6	Síntesis de la dinámica ambiental de las unidades de paisaje.....	90

Introducción

El mapa es un producto científico y fuente de información geográfica, al ser la representación abstracta del espacio geográfico, requiere de cualidades métricas, cualitativas y cuantitativas que le de credibilidad al contenido y sea de utilidad en la toma de decisiones respecto a la preservación o aprovechamiento de los recursos.

El suelo, como recurso espacial, se convierte en la base del desarrollo de ciudades, campos agrícolas o de servicios ambientales que sustentan la necesidad de espacio cultural. De acuerdo con la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (2003), el recurso suelo es la base de la construcción social, política y económica de los grupos humanos. Como concepto de uso, refiere a la ocupación y tipificación de una porción específica de la superficie, ya sea por su capacidad agrológica o por su potencial de desarrollo de infraestructura urbana; por lo tanto sus habitantes conforme a sus necesidades modifican o crean la estructura y la funcionalidad urbana de una ciudad.

La periurbanización es un proceso en el que se incorporan espacios adicionales al polígono urbano de alguna ciudad, por medio de la urbanización dispersa (Aguilar, 2009). El desarrollo del Área Urbana de la Ciudad de México¹ (AUCM) se ha caracterizado por ser la mayor concentración urbana de México y el núcleo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Dentro del complejo urbano se encuentra la Sierra de Guadalupe (SG), que es un ambiente montañoso localizado al interior de la cuenca hidrográfica de México. Por su ubicación, resulta ser un centroide que recibe la influencia de las carreteras que articulan a la Ciudad de México² (CDMX) con los estados norte y centro de México (Cedillo *et al.*, 2007).

¹ El concepto AUCM como espacio ocupado por infraestructura urbana que lleva el nombre de la ciudad central.

² Por medio del "ACUERDO GENERAL DEL PLENO DEL CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL POR EL QUE SE CAMBIA LA DENOMINACIÓN DE DISTRITO FEDERAL POR CIUDAD DE MÉXICO EN TODO SU CUERPO NORMATIVO" (DOF, 05 de febrero de 2016).

Santos *et al.*, (2009), afirman que a pesar de las restricciones que han establecido las administraciones locales y federales para disminuir el cambio de uso de suelo dentro de la SG, con frecuencia, estas normativas no logran cumplirse, debido a la presión demográfica expuesta por el establecimiento de asentamientos humanos regulares (AHR) o irregulares (AHI).

La dinámica periurbana genera procesos de deforestación, degradación y cambio de uso de suelo, a causa del establecimiento de asentamientos humanos sobre las laderas y valles fluviales, así como la explotación de minas a cielo abierto dentro del sistema montañoso, que en combinación con las características morfoestructurales y climáticas del lugar, hacen del ambiente montañoso SG un lugar dinámico y de riesgo, debido al manejo inadecuado de los recursos naturales (Cedillo *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2009).

La SG alberga un sistema natural dentro del cual ocurren una serie de procesos que proporcionan un conjunto de bienes y servicios ambientales que beneficia a la ZMCM. De acuerdo con la *Gaceta Oficial del Distrito Federal* (agosto, 2002) los principales servicios ambientales³ proporcionados por la SG son:

- ❖ La regulación del clima y el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales.
- ❖ La captación, escurrimiento e infiltración de agua.
- ❖ La generación de oxígeno.
- ❖ El control de la erosión, así como la generación, conservación y recuperación de suelos.
- ❖ La captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes.
- ❖ La protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y las formas de vida.
- ❖ Es un área donde se desarrollan diversas actividades de recreación y educación ambiental.

³ Los servicios ambientales son “Los que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales” (Capítulo II, ARTÍCULO 7, XXIX, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable en: DOF, 2003).

Los cambios de uso de suelo asociados a los procesos de urbanización, son actividades humanas que modifican los elementos físicos de un lugar, por lo que las observaciones de este fenómeno permiten identificar las zonas en las que se vulnera la calidad de los servicios ambientales, por ello el monitoreo mediante el uso y tratamiento de información obtenida por los sensores remotos representa un método funcional en el análisis de la dinámica de los cambios de uso de suelo.

En este documento se muestra el potencial de la Geografía dado por los Sistemas de Información Geográfica y la Percepción Remota, a partir de la manipulación y generación de información se propone un modelo cartográfico que recree la dinámica ambiental de la Sierra de Guadalupe. El potencial multitemporal de la Teledetección permite visualizar diversos tiempos de la corteza terrestre; por otro lado, la condición temporal de los sensores remotos utilizados ha delimitado la línea de investigación en una temporada de 31 años, entre 1985-2016.

La hipótesis de esta investigación afirma que la distribución de la cobertura vegetal de la SG ha interactuado con el desarrollo del AUCM y con los distintos programas de conservación ecológica que regulan el área, de tal forma que las coberturas vegetales cercanas al límite urbano son las que han recibido una mayor presión, debido al cambio de uso de suelo originado por el establecimiento de infraestructura urbana.

El objetivo principal de la presente investigación es analizar la dinámica ambiental del geosistema Sierra de Guadalupe a partir de las geofacies obtenidas de imágenes Landsat de 1985-2016. Los objetivos particulares de la investigación son: definir el geosistema Sierra de Guadalupe; identificar a partir de las propiedades espectrales de la escena las geofacies pertenecientes al geosistema SG; efectuar un análisis multitemporal de las unidades de paisaje; recrear la evolución multitemporal del dosel; modelar la dinámica ambiental originada por la interacción de la AUCM sobre la SG.

Capítulo 1

La Sierra de Guadalupe y la periferia urbana de la Ciudad de México

Este capítulo describe el contexto histórico y regional del Área Urbana de la Ciudad de México y la interacción que mantiene con la Sierra de Guadalupe. Para ello el capítulo se divide en tres subcapítulos; en el primero se abordan los procesos de urbanización de la Ciudad de México en una perspectiva histórica y la importancia de los conceptos ciudad, urbanización, Zona Metropolitana de la Ciudad de México y área urbana; en el segundo se desarrolla la interacción paisajística de la periferia norte del Área Urbana de la Ciudad de México con el sistema montañoso Sierra de Guadalupe y los conflictos ambientales que resultantan; en el último se aborda el contenido de los distintos aparatos legales que procuran la regulación de uso de suelo del complejo montañoso.

1.1. Procesos de urbanización en la Ciudad de México

El desarrollo físico de la Ciudad de México ha modificado las condiciones ambientales de la cuenca de México, su organización ha dependido de los factores físicos del territorio, la ocupación inicial, los flujos migratorios y el desarrollo tecnológico que propició el incremento demográfico de la ciudad (Ezcurra, 2010).

Teóricamente, una ciudad se forma cuando las sociedades humanas son capaces de construirlas y desarrollarlas; por lo tanto, es una porción específica del territorio, con un límite aparente (Vinuesa y Vidal, 1991). La ciudad es una unidad que interactúa directa e indirectamente con la región de la cual forma parte (Bazant, 2010), como un sistema abierto, en el que se interrelacionan los elementos abióticos, bióticos y culturales propios de la región (Zarate y Rubio, 2005). A partir de las redes de comunicación, la ciudad de mayor jerarquía encabeza su desarrollo por los vínculos que establece sobre otras ciudades y poblados, las cuales se entrelazan unos a otros en dirección hacia la ciudad principal (Weeks, 2010).

Los procesos de urbanización son definidos por Vinuesa y Vidal (1991) como transformaciones consecuencia del crecimiento demográfico en un periodo de tiempo y espacio, donde la sociedad se reorganiza en un territorio que no era urbano y durante el reordenamiento social pasa a serlo. El crecimiento de una ciudad se visualiza por la expansión del área urbana, la explosión demográfica y la necesidad de vivienda (Bazant, 2010).

El desarrollo urbano es un proceso que se caracteriza por ocupar el suelo no urbano por medio de la edificación de inmuebles habitacionales, mercantiles, culturales y de infraestructura urbana. Los factores que benefician al proceso de urbanización (causas) son los focos de atracción económica, el centro político, la concentración de economías externas de aglomeración, la proximidad de materias primas y disponibilidad de mercados, que en conjunto determinarán la centralidad de una ciudad y sus respectivas áreas de influencia (*Ibíd.*).

El siglo XX representa un periodo de inmigración acumulada en la cuenca de México debido a la alta densificación de población en la ciudad, lo cual intensificó el desarrollo urbano. El fenómeno centrífugo de cambio de uso de suelo de la ciudad se expresa por la expulsión radial de la actividad industrial y la migración intermetropolitana que impulsó el desarrollo de asentamientos humanos en los municipios contiguos que forman la ZMCM, en otras palabras, el área urbana se expandió debido a la rentabilidad de uso de suelo (Gutiérrez *et al.*, 2005).

Vinuesa y Vidal (1991) afirman que el suelo urbano tiende a bajar de precio entre más lejos se encuentre del centro político y económico de la ciudad, por ello las zonas periféricas estarán disponibles a un menor precio, este fenómeno de revalorización del territorio se ajustan a los sistemas de libre mercado, con lo que se genera una segregación social del espacio.

La expansión urbana de la Ciudad de México se ha manifestado como un proceso no uniforme, dado que el suelo (materia prima de cualquier proceso de urbanización) sobre el que se construye el área urbana, se ajusta a factores como: el tamaño y la estructura de la ciudad, accidentes fisiográficos, medios de comunicación, sistema de tenencia de la tierra, valor del mercado del suelo de la periferia inmediata y los límites políticos administrativos (Vinuesa y Vidal, 1991; Aguilar, 2008). La llanura aluvial se convirtió en el patrón a seguir del desarrollo urbano, este fenómeno se evidencia a finales del siglo XX donde el 96% del área urbana se desarrolló sobre formaciones lacustres, el resto de los establecimientos urbanos se desarrolla sobre las laderas de los complejos montañosos de la cuenca de México (Gutiérrez *et al.*, 2005; Fernández y Garza, 2011).

La Ciudad de México es una unidad que al aumentar de dimensiones, no sólo modificó la estructura de las pequeñas localidades, sino a los estratos ambientales inmediatos (Santos *et al.*, 2013). La ciudad es un producto social en el que se genera un espacio urbano a partir de los intereses de los distintos agentes sociales que revaloran el recurso suelo, en cierta medida, se reconstruye el espacio en función de los intereses y necesidades de los agentes sociales (Vinuesa y Vidal, 1991).

Sheinbaum (2011; 21-22) reconoce tres procesos de crecimiento urbano, los cuales son:

- ❖ La ampliación de poblados rurales: producto de la expansión de colonias por medio de ventas de suelo agrícola.
- ❖ El surgimiento de asentamientos humanos irregulares: ocupación o invasión ilegal del suelo agrícola de propiedad colectivo o ejidal, consecuencia del crecimiento demográfico de la comunidad o de colonias cercanas, dicho proceso es considerado como “crecimiento hormiga”.
- ❖ La urbanización difusa: por la venta de predios comunales a población de clase media, se localiza en zonas cercanas a poblados rurales.

El término metropolitano se utilizó por primera vez en Estados Unidos en 1952 para renombrar a ciudades de gran dimensión en zonas estadísticas metropolitanas (Garza, 2003). Arias (2003), define a un Área Metropolitana (*Statistical Metropolitan Areas*), como una forma de entender los procesos de expansión urbana en el marco técnico, político y administrativo que engloba el crecimiento urbano no compacto y discontinuo de una ciudad.

Es indispensable diferenciar los conceptos área urbana y zona metropolitana, la primera es una unidad territorial físicamente continua que no necesariamente ocupa toda una unidad política administrativa sino la porción apropiada por infraestructura urbana, usualmente es conocida como “mancha urbana”, sin embargo, resulta difícil de definir (Unikel, 2000). Una zona metropolitana es aquella unidad espacial continua por distintas unidades políticas administrativas (municipios y estados), que en conjunto guardan una serie de características estadísticas como: la aglomeración humana, la alta concentración de mercado laboral, la residencia de trabajadores dedicados a actividades no agrícolas y una alta interrelación entre las unidades que la forman. El fenómeno metropolitano lo forma una sola ciudad, que se expande de forma radial sobre los núcleos próximos, con ello se construye un espacio geográfico continuo (Vinuesa y Vidal, 1991).

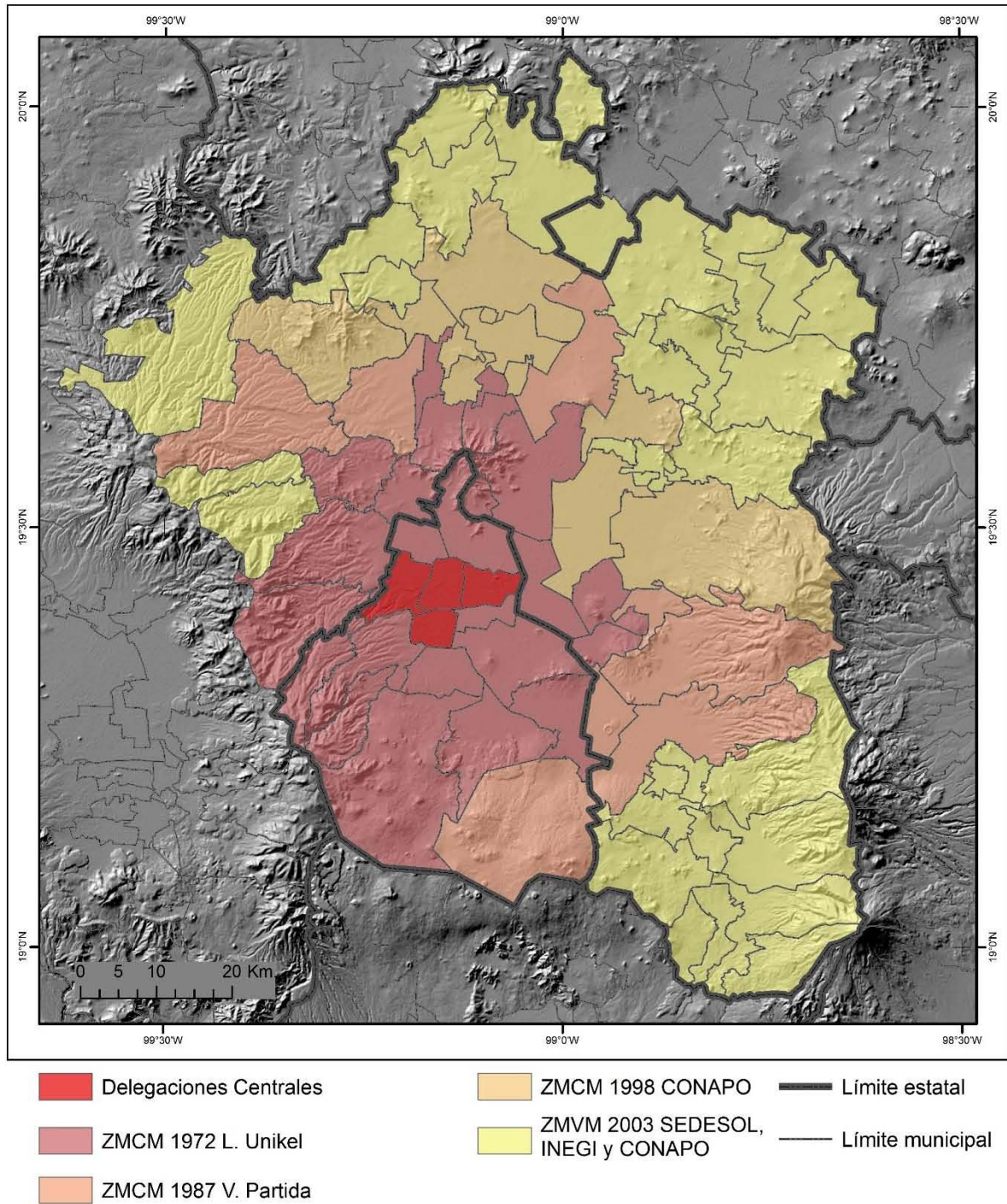
Unikel definió los límites de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México⁴ (ZMCM) en 1972, compuesta por todo el Distrito Federal (a excepción Milpa Alta) y 12 municipios del Estado de México; en 1987 Virgilio Partida reclasifica a la ZMCM e integra a la delegación Milpa Alta y siete municipios del Estado de México; en el año 1998 la CONAPO suma 10 municipios; en 2003 SEDESOL, INEGI y CONAPO renombran a la ZMCM como Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), compuesta por la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca perteneciente al estado Hidalgo (Connolly y Cruz, 2004; SEDESOL, *et al.*, 2005).

El proceso evolutivo del concepto ZMCM muestra la dinámica del área urbana que la conforma, dado que su evolución es una representación estadística de los procesos de urbanización en el que las entidades políticas administrativas se acoplan al Área Urbana de la ciudad central. Es evidente que la ZMCM no muestra de forma precisa el patrón de desarrollo del área urbana, no obstante la segunda queda contenida en la primera mediante una expresión estadística, en el que las delegaciones y municipios forman un espacio homogéneo y continuo en función de la dinámica demográfica y por lo tanto del crecimiento del área urbana (figura 1.1).

La figura 1.1 muestra el desarrollo radial de la ZMCM que termino por rodear a un conjunto de medios montañosos, el proceso metropolitano se adapta a la fisiografía de la cuenca de México, esta interacción termina por ser uno de los principales elementos que modelen la estructura del área urbana de la Ciudad de México.

⁴ Si bien el nombre oficial de este complejo metropolitano es Zona Metropolitana del Valle de México en las posteriores menciones se utilizara el nombre establecido por Unikel en 1972, referido a Zona Metropolitana de la Ciudad de México, puesto que no es un valle si no una cuenca hidrográfica (Tapia y López, 2002; Unikel, 2000; García *et al.*, 2006).

Figura 1.1 Evolución de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.



Fuente: Connolly y Cruz, 2004; SEDESOL, et al., 2005.

1.2. Periferia norte del Área Urbana de la Ciudad de México

La periferia urbana se define como una conjunto espacial que forma parte y ha existido durante el proceso constructivo de una ciudad, modifica el estado natural y tradicional del lugar por una estructura urbana, surge de la expansión centrífuga que redistribuye las actividades de la población urbana mediante el proceso interurbano de una ciudad que se expulsa los usos de suelo de menor renta a la periferia, debido al establecimiento de áreas de mayor renta dentro de la ciudad central; de este modo, los servicios terciarios desplazan al uso residencial e industrial hacia la periferia. El paisaje periférico no es una unidad aislada de la ciudad central, es parte de su realidad histórica y la estructura contemporánea que la forma resulta de su desarrollo (Arias, 2003).

La periferia del área urbana se describe a nivel social como una zona de conflicto sujeta a un conjunto de intereses específicos de los actores y grupos de gobierno. El principal proceso de ocupación del suelo periférico de la ciudad está determinado por el uso habitacional, el cual se divide en dos: los asentamientos irregulares y los legalizados. El primero suele apropiarse de espacios poco protegidos, sobre los accidentes fisiográficos que terminan por degradar el medio contiguo; no obstante, los asentamientos sujetos a procesos legales tienen impactos de igual o mayor magnitud, dado que se desarrollan sobre extensiones mayores y tienden por lo general a modificar el espacio de la periferia de la ciudad en un menor tiempo (Pérez, 2012).

La periferia norte del área urbana de la Ciudad de México se encuentra articulada por un tejido vial que conecta a la región centro con la región norte del país; por lo que la infraestructura urbana ha seguido el patrón de desarrollo vial que ha rodeado a la Sierra de Guadalupe, en consecuencia, aísla a un conjunto de espacios naturales con distintas categorías de conservación como; el Parque Estatal Sierra de Guadalupe y el Suelo de Conservación Ecológica.

Cuando los procesos de expansión urbana alcanzan un accidente topográfico la traza urbana tiende a adaptarse a la fisiografía del lugar y el límite del área urbana se asemeja a las curvas de nivel (Vinuesa y Vidal, 1991). La dinámica urbana de la Ciudad de México ha terminado por rodear la Sierra de Guadalupe, el desarrollo urbano genera una serie de modificaciones regionales y locales debido al consumo de recursos, sin embargo, el más afectado es el suelo, ya que a partir de los cambios de uso de suelo se manifestará el desplazamiento de infraestructura urbana sobre los componentes naturales próximos.

1.3. Programas de conservación ecológica en la Sierra de Guadalupe

A partir del siglo XX, distintos órdenes de gobierno empezaron a generar políticas en materia ambiental, por lo que se revaloró el suelo, no sólo por su valor dentro del mercado, sino por su importancia ecológica; de esa forma, ya no se ve a la periferia de la Ciudad de México como reserva para la especulación urbana (Pérez, 2012). La Sierra de Guadalupe (SG) fue definida, tanto por el Gobierno de la capital del país y del Estado de México como una zona de importancia ecológica, por lo que se han establecido normas para regular las actividades humanas en relación a la vocación natural del suelo, dado que su principal objetivo es inhibir el cambio de uso de suelo (GDF, 2002; Gaceta, Edo-Mex, 2013).

En 1923 se declaró a la SG como “Zona de Protección Forestal”, sin embargo, no fue hasta el año de 1976 que se creó el concepto Parque Estatal Sierra de Guadalupe, localizado dentro de los municipios Tlalnepantla de Baz, Ecatepec de Morelos, Coacalco de Berriozábal y Tultitlán. El límite de la poligonal se definió a partir de la cota 2350 m.s.n.m. (Gaceta, Edo-Mex, 2013). No obstante, tras el reconocimiento de las autoridades estatales sobre la presencia de nuevos asentamientos humanos densificados dentro de la poligonal propuesta en 1976, el perímetro se actualizó en el año 2013 (figura 1.2).

De acuerdo con Sheinbaum (2011), el Plan Director para el Desarrollo Urbano del Distrito Federal en 1978, estableció las bases para definir el Suelo de Conservación. En 1982 el reglamento de Zonificación del Distrito Federal determinó la delimitación del suelo de la Ciudad de México en zonas urbanizadas, de reserva territorial y de amortiguamiento. En 1987, el Programa Director para el Desarrollo Urbano del Distrito Federal, introdujo los conceptos de Área de Conservación Ecológica y Área de Desarrollo Urbano (DOF, 1987). La Ley del desarrollo Urbano del Distrito Federal de 1996 clasificó el territorio en; Suelo Urbano (SU) y Suelo de Conservación (SC). Por lo que se modificó el término Área de Conservación Ecológica por Suelo de Conservación (SC), en el que se incluye a espacios destinados a la producción agropecuaria, piscícola, forestal, agroindustrial y turística, además de poblados rurales (DOF, 1996).

El Programa General de Ordenamiento Ecológico (PGOEDF; GDF, 2000) determinó las dimensiones del Suelo Urbano (SU) y Suelo de Conservación (SC). El primero cuenta con una extensión de 61,082 ha equivalente al 41% de la superficie de la entidad mientras que el segundo representa 88 442 ha lo que es igual al 59% de la superficie total (cuadro 1.1). De las casi 89 000 ha que forman el suelo de conservación de la Ciudad de México la mayoría pertenece a una estructura jurídica de propiedad social. El PGOEDF (2000) zonificó a los polígonos que componen el Área Natural, ya sea por declaratoria federal o estatal en: Parque Nacional, Zona sujeta a Conservación Ecológica, Áreas de Protección de Recursos Naturales (o Zonas de Protección Forestal), Parque Urbano y área de protección de flora y fauna silvestre. Al norte de la capital se localiza el Parque Nacional El Tepeyac, la Zona Sujeta a Conservación Ecológica Sierra de Guadalupe así como la Zona de Conservación Ecológica la Armella (cuadro 1.2; figura 1.2).

Cuadro 1.1 Suelo de Conservación por delegación.

<i>Delegación</i>	<i>Suelo de Conservación por delegación (ha)</i>	<i>Suelo de Conservación por delegación (%)</i>
<i>Total</i>	<i>88,442</i>	<i>100</i>
<i>Cuajimalpa</i>	<i>6593</i>	<i>7.5</i>
<i>Álvaro Obregón</i>	<i>2735</i>	<i>3.1</i>
<i>Magdalena Contreras</i>	<i>5199</i>	<i>5.9</i>
<i>Tlalpan</i>	<i>26,042</i>	<i>29.4</i>
<i>Xochimilco</i>	<i>10,548</i>	<i>11.9</i>
<i>Milpa Alta</i>	<i>28,464</i>	<i>32.2</i>
<i>Tláhuac</i>	<i>6,405</i>	<i>7.2</i>
<i>Iztapalapa</i>	<i>1,218</i>	<i>1.4</i>
<i>Gustavo A. Madero</i>	<i>1,238</i>	<i>1.4</i>

Fuente: (GDF, 2003).

Cuadro 1.2 Áreas Naturales Protegidas en Suelo de Conservación.

<i>Nombre y Tipo</i>	<i>Superficie en el SC (ha)</i>	<i>Delegación</i>	<i>Propiedad</i>	<i>Administración</i>
<i>El Tepeyac (PN)</i>	<i>105</i>	<i>GAM</i>	<i>Nacional</i>	<i>CONAM-SEMARNAT</i>
<i>Sierra de Guadalupe (ZSCE)</i>	<i>633.7</i>	<i>GAM</i>	<i>Nacional</i>	<i>GDF-SMA</i>
<i>La Armella (2) (ZCE)</i>	<i>193.4</i>	<i>GAM</i>	<i>Nacional</i>	<i>GDF-SMA</i>

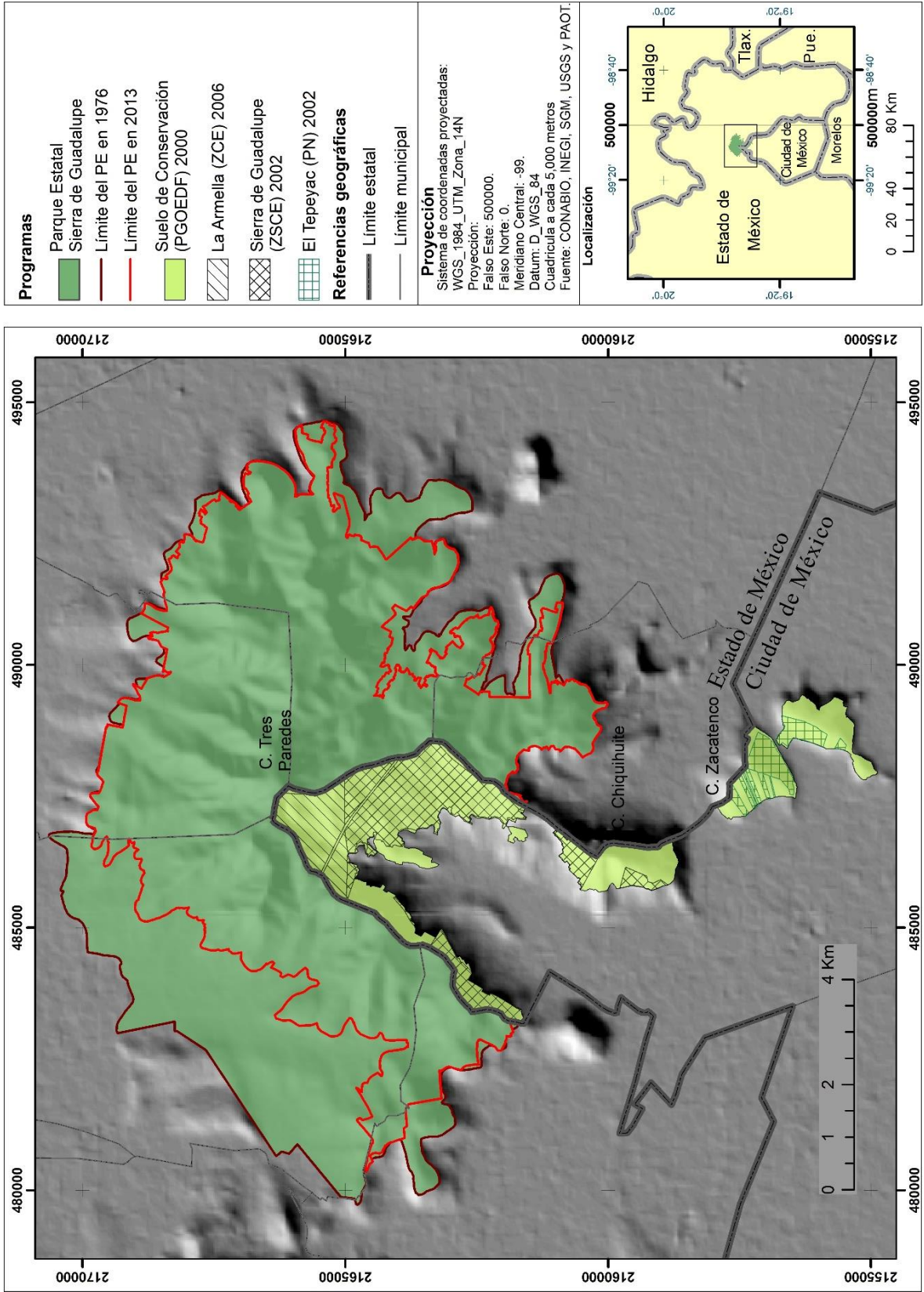
Fuente: (Sheinbaum, 2011).

(ZCE) Zona de Conservación Ecológica.

(ZSCE) Zona Sujeta a Coacervación Ecológica.

(PN) Parque Nacional.

Figura 1.2 Programas de conservación ecológica en la Sierra de Guadalupe.



Capítulo 2

Naturaleza y medio ambiente

En este capítulo se desarrolla la base teórica que define al medioambiente desde conceptos y métodos geográficos. Esta primera parte del contenido metodológico se desglosa en cinco subcapítulos, en el primero se abordan los conceptos naturaleza y medio ambiente además de la importancia de la Geografía dentro de la ciencia medioambiental; en el segundo se mencionan los conceptos espacio geográfico, territorio y paisaje los cuales resultan ser términos claves en el análisis ambiental; en el tercero se plantea la teoría del geosistema y su importancia como modelo teórico cartografiable del sistema territorial; en el cuarto se describen los elementos del paisaje de montaña y su importancia como unidad geográfica; y en el último se ejemplifica el papel de la cartografía temática en la modelación del espacio geográfico.

2.1. La Geografía y su situación con el medio ambiente

La naturaleza, la ecología y el medio ambiente se encuentran sujetos a múltiples significados propios del proceso social de percibir e interpretar, usar e interrelacionarse con las entidades no humanas. Los conceptos referentes a la naturaleza son construidos y conceptualizados de formas distintas, con base en los procesos sociales, contextos materiales, instituciones sociales, nociones morales, prácticas culturales e ideologías particulares (Ulloa, 2001).

Se define al medio natural como una formación evolutiva, por lo tanto, acumulativa, originada por un conjunto de fuerzas de creación y de destrucción propios de los fenómenos naturales que han existido desde siempre, pueden ser violentos o pausados. El ser humano, como otro elemento más del todo natural, ha creado una serie de momentos históricos en los que modificó de forma progresiva el orden de la naturaleza, por lo tanto, el estado actual de la superficie terrestre. Cada periodo del medio natural es único y representa una de las múltiples realidades de su historia. De esta forma, la naturaleza se presenta como un todo, como un conjunto de elementos y fenómenos que el ser humano conoce en el proceso de creación de bienes materiales (Bassols, 1982; Romero y Maskrey, 1993). Los elementos que integran el medio natural se componen de diversos fenómenos que interactúan entre ellos (cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Elementos que integran el medio natural.

1)	El relieve: montañas, valles, depresiones y llanuras útiles al ser humano en su vida y economía
2)	Todo tipo de minerales producto de la evolución geológica
3)	Los climas, que encierran fenómenos diversos
4)	Las corrientes fluviales, tanto subterráneas como superficiales, así como las masas oceánicas y lagos
5)	El suelo que es la capa exterior de la corteza terrestre, donde se desarrolla la vegetación y las actividades humanas
6)	La cobertura vegetal en sus distintos estratos
7)	Los animales terrestres y acuáticos

Fuente: Bassols, 1982.

Los recursos surgen de los elementos que integran a la naturaleza, con el potencial de utilizarse para satisfacer las necesidades de las sociedades en un momento específico. Visto desde una perspectiva contemporánea, se incluyen aquéllos que permiten mejorar la calidad de vida de los seres humanos y de otros organismos, por lo tanto, los servicios ambientales, espacios con fines recreativos y científicos, además de elementos aislados de la naturaleza como la biodiversidad, agua y suelo, son recursos indispensables de la humanidad (Bassols, 1982).

Esta relación sin escisión entre sistema natural y sistema social reconstruyen la realidad de la naturaleza en una sola. Dicho en otras palabras, los elementos de la naturaleza pasan a ser recursos al momento de ser apropiados por alguna sociedad humana ya sea de forma tangible o intangible. Son así, estos dos subsistemas integrados e interrelacionados los que en conjunto forman un sistema mayor, considerado como medio ambiente (Carrasco, 2006).

Miller (1994; 1996) define al medio ambiente o ambiente como un término que envuelve a todas las condiciones y factores externos, orgánicos e inorgánicos, materia y energía que interactúan con cualquier organismo o forma de vida. El ambiente es una unidad compleja y dinámica, donde los componentes biofísicos de la corteza cambian no solo por su naturaleza, sino por la relación que el ser humano establece en la apropiación de su territorio, por lo tanto surge de un conjunto de transformaciones espaciales naturales o artificiales. En síntesis, el medio ambiente es naturaleza apropiada por el ser humano (Sosa, 2012).

González y Arcia (1994) definen al medio ambiente como un sistema abierto de formación histórica, producto de las relaciones bilaterales dadas entre la sociedad, los recursos naturales y el medio natural. Este sistema está compuesto de elementos bióticos, abióticos y socioeconómicos, que inicia cuando el ser humano, en su actividad y el proceso de producción material modifica los componentes de la naturaleza para satisfacer sus necesidades, ejercer ciertos impactos en determinado espacio-tiempo geográfico. El proceso de apropiación de los elementos de la naturaleza determina los cambios bióticos y abióticos reversibles e irreversibles sobre el territorio.

Las actividades humanas sobre el medio natural terminan por generar una degradación en mayor o en menor medida, como un sistema de causalidad unidireccional, perceptible mediante impactos recíprocos entre el sistema natural y la construcción social (Reboratti, 2011). El impacto ambiental surge como una consecuencia en el uso, aprovechamiento y transformación del espacio (Craig *et al.*, 2007). La dinámica medioambiental es una consecuencia de los procesos desencadenados por las sociedades industriales, mediante el deterioro de los bosques, la pérdida de biomasa, cambio de uso de suelo y uso irracional de combustibles, pero sobre todo de los hábitos colectivos que representan el principal detonante de los impactos medioambientales (Phlipponneau, 2001).

La ciencia medioambiental es definida como un saber interdisciplinario que utiliza conceptos e información de múltiples disciplinas, tanto de las ciencias naturales como de las ciencias sociales, con el objetivo de analizar la interacción de los múltiples sistemas y formas de vida que conforman el medio ambiente (Miller, 2002). El medio ambiente requiere de un método que integre dialécticamente, epistemológica e históricamente al conjunto de ciencias, teorías, prácticas, técnicas y saberes de múltiples formaciones. Sin embargo, las prácticas interdisciplinarias han mostrado en el transcurso de la historia ciertas dificultades en el plano metodológico, para ello el paradigma del medio ambiente tiende a proporcionar orientación y sentido a las investigaciones ambientales. Se puede decir que el medio ambiente es lo que se trata y las disciplinas como tratarlo (Bertrand, 2007).

Etimológicamente la palabra Geografía proviene de los vocablos griegos “γῆ” *geo* (Tierra) y “γραφία” *grapho* (imagen, escritura o representación) que significa descripción o representación de la Tierra. El conocimiento geográfico ha resultado ser parte del estudio de la superficie terrestre, a partir del desglose de la distribución de los hechos y fenómenos (Vargas, 2012). Desde el quehacer geográfico descrito en la antigua Grecia hasta su institucionalización, la ciencia geográfica se ha destacado como una disciplina destinada al entendimiento de la superficie terrestre, a partir de la descripción y representación cartográfica que engloba el concepto espacio (Schlögel, 2007; Ortega, 2000).

La Geografía desde sus orígenes se ha encontrado ligada al término espacio, concepto que a partir del siglo XX se ha estudiado en dos tendencias dentro de la disciplina. En la primera, el quehacer geográfico se enfoca en la explicación de la naturaleza, a partir de la interacción causal que establecen los factores físicos (relieve, suelo, clima y vegetación) que la conforman, a partir de la percepción del paisaje o conjunto visual y en la segunda tendencia se considera al ser humano, como individuo y sociedad, que transforma y construye el espacio en una materialización social (Vargas, 2012).

De acuerdo con Ortega (2000) para Immanuel Kant, la Geografía corresponde al conocimiento de la ubicación y el mundo es el sustento o escenario donde se formulan las experiencias humanas. A partir de ello se plantea que la Geografía es una ciencia de interrelaciones en el que la sociedad construye el espacio a partir de la valoración de los elementos naturales y las relaciones dadas entre la especie humana y el suelo. Por lo tanto, la Geografía resulta ser un ciencia bien situada en el estudio del medio ambiente, esta condición se debe a la posición estratégica que ocupa al tener una noción general sobre los componentes naturales, los procesos de apropiación del territorio, la generación de recursos y bienes materiales sobre un contexto espacial (Frolova y Bertrand, 2007).

El pensamiento geográfico en el ámbito del medio ambiente, es conocido en la literatura internacional como Geografía Ambiental. El adjetivo ambiental termina por matizar los límites o diferencias con los campos biofísicos y socioculturales, cuya relación final es de carácter interdisciplinario (Bocco y Urquijo, 2013); en el ámbito interdisciplinario la Geografía se convierte en un interlocutor, encargado de preestablecer el contenido cartografiable (Philipponneau, 2001). La Geografía contemporánea con la integración de diversos métodos científicos y cartográficos se perfila como una ciencia práctica en la disciplina ambiental (Ortega, 2000). El estudio del medio ambiente debe componerse de forma integral para evitar cualquier tipo de visión ideológica que fomente un desprecio hacia la naturaleza o algún grupo humano (Artunduaga, 2009).

2.2. Espacio geográfico, territorio y paisaje

Independientemente de las escuelas, corrientes de pensamiento, momento histórico, posturas y autores, se busca hacer una conceptualización de cada uno de los términos estructurales del pensamiento geográfico. De acuerdo con Gurevich (2005) los tres conceptos fundamentales en la Geografía son: espacio geográfico, territorio y paisaje.

2.2.1. Espacio geográfico

El espacio geográfico (o espacio) es una porción específica de la superficie terrestre representada a diversas escalas, ya sea, global, continental o regional. Resulta ser una forma temporal y única dada por las relaciones que establecen los individuos de una sociedad en un tiempo y espacio determinado (Zarate y Rubio, 2005).

El espacio geográfico es una categoría abstracta, que parte del proceso de apropiación de la naturaleza por una sociedad, resulta de la interacción del desarrollo de la vida, la acción social y el trabajo humano, en otras palabras, surge de la producción y reproducción social que se presenta en una escala global o local (Sánchez, 2007). Como construcción social, es obra de múltiples agentes individuales y colectivos que manifiestan en su actuar el arreglo espacial del territorio, por lo tanto, puede estudiarse en sus distintas manifestaciones en forma de paisaje (Mateo, 1984; Maza, 2015).

El espacio geográfico es un término que parte de una vieja tradición francesa, representa la materialización del objeto de estudio de la Geografía; no es un contenedor estático, se compone de un conjunto de correlaciones dadas entre la materialización individual o colectiva, en la que el ser humano construye de forma vivencial una estructura dinámica, socializada y sujeta a valores y conceptos tangibles e intangibles sobre el uso y perspectiva del espacio (Vargas, 2012; Reboratti, 2011; Ortega, 2000; Ortega, 1998; Tobler, 1970).

2.2.2. Territorio

El territorio es la porción del espacio geográfico ocupado por un grupo social que ejerce un cierto poder sobre los recursos, como porción de la superficie terrestre representa las relaciones históricas dadas entre la naturaleza y las sociedades humanas que se integran e influyen en el escenario natural mediante la apropiación, venta, transformación y conservación del mismo (Gurevich, 2005; Storey, 2012). Peña (2011) afirma que la organización de un espacio resulta de la forma de apropiación social de los recursos contenidos en lugar.

El territorio es considerado como una delimitación del espacio geográfico con un volumen ajustado a los límites establecidos sobre la superficie terrestre, en su interior alberga componentes ambientales correspondientes a la litosfera, hidrosfera y atmósfera. De cierta forma, el ser humano tiene acceso a las esferas geográficas y al contenido de la biosfera, con ello ejerce una acción humana mediante el proceso de producción social o territorialización, limitado por el significado cultural de las actividades (Sánchez, 1991). El territorio es una unidad tridimensional (con cuerpo y volumen) que alberga elementos ambientales de distintos géneros como rasgos físicos, bióticos y actividades humanas, que en combinación rigen elementos materiales y energéticos que le de funcionalidad a las actividades humanas (García y Muñoz, 2002).

El territorio, en palabras de Sosa (2012), es un sistema abierto estructurado en una red que articula las relaciones dadas entre los seres humanos y los elementos bióticos y abióticos que forman en conjunto un lugar organizado en el proceso de representación, apropiación y construcción, en el que cada grupo humano establece una relación sociedad-naturaleza que hace de los territorios espacios de origen natural transformados por el trabajo, la cultura, las contradicciones humanas y labores de carácter vivencial. Por lo tanto, es resultado de la interacción de una población con el espacio, que representa parte de su identidad (Sánchez, 2007).

2.2.3. Paisaje

Etimológicamente la palabra paisaje proviene del vocablo latín “*pagus*” (territorio, país, campo, distrito o pueblo), que dio origen al término francés “*pays*”, que derivó en “*paysage*” (referente al territorio utilizado). El concepto dentro de la perspectiva geográfica surge a finales del siglo XIX, relativo a desiertos, glaciares u otros espacios de interés para los estudios geomorfológicos (Morláns, 2005).

La morfología del paisaje surge de una manifestación histórica heredada por el cambio natural o por la acción humana (Martínez, 2009), sus componentes evidencian los procesos que favorecen o condicionan la actuación humana sobre su espacio, de forma recíproca los seres humanos intervienen en la formación de nuevos paisajes (García y Muñoz, 2002; Strahler, 2005).

Todas las unidades paisajísticas agrupadas forman mosaicos, su distribución corresponde a la correlación dada entre ellas. El paisaje, al ser la porción visible del espacio geográfico, muestra la estructura de un sistema territorial, integrado por una combinación dinámica e inestable de elementos geográficos perceptibles (físicos, biológicos y antrópicos) que interactúan dialécticamente entre sí en una secuencia jerárquica. Cada estructura espacial o unidad del paisaje está relacionada a una escala (García Romero, 1998; Panadera, 1973). Las unidades de paisaje son discontinuidades homogéneas y lógicas del espacio geográfico, por lo tanto, son perceptivamente diferenciables, lo que permite clasificarlas taxonómicamente en unidades de acuerdo a una escala cartográfica (Panareda, 1973; Muñoz, 2012).

El paisaje es un método de observación histórica de la agrupación y organización de los elementos geográficos cartografiados. Se les pueden nombrar de acuerdo al conjunto de elementos predominantes en su estructura, por lo que su uso resulta cómodo a manera que se plantee por medio de un adjetivo que le dé sentido, paisaje geomorfológico, paisaje rural, paisaje urbano, entre otros. En cada paisaje interactúan una serie de factores culturales y tecnológicos propios de su tiempo (Sánchez, 2007; Martínez, 2009; Bertrand, 1968).

De acuerdo con Morláns (2005), cualquier elemento de la superficie terrestre modificada o no por las sociedades humanas en distintos grados configura un paisaje; como tal, refleja la realidad ambiental que expresa la historia de los procesos biológicos y antrópicos que se desarrollan sobre él. En consecuencia, un paisaje es una combinación de la dinámica vertical e inestable de elementos físicos, biológicos y culturales que guarda una expresión horizontal cartografiable.

El término paisaje fuera de la configuración geográfica contemporánea, de forma común, suele referirse a reproducciones gráficas reducidas o enmarcadas en modo físico o simbólico, su significado es esencialmente escenográfico relacionado a diversos contenidos visuales como un espectáculo, panorama o desde la artealización⁵ [*sic.*] de un lugar vivencial, contemplado y percibido. En la actualidad este concepto ha incursionado en la cotidianidad pragmática de las perspectivas turísticas y de proyectos administrativos (Martínez, 2009; Bertrand, 2008).

Roger (2007) afirma que sólo hay paisaje cuando hay una mirada de por medio, de tal modo, es una expresión cultural de quien lo genera inconscientemente y de quien lo interpreta conscientemente. Para Serrano (2012) los paisajes más alejados lo son si existe un explorador que lo perciba o un satélite que lo monitoree, y en consecuencia se obtenga una imagen o visión de él.

Con ello se distinguen dos enfoques paisajísticos, el paisaje recreado (representado) y el paisaje real (geográfico). El primero es un producto de percepción y recreación artística, su contenido pasa al colectivo social por medio de interpretaciones metafísicas y de valores ideológicos. El paisaje real se encuentra compuesto por elementos naturales y humanos que se distribuyen y relacionan de forma horizontal y vertical sobre el espacio geográfico, es identificable por las distintas unidades del paisaje que la configuran en un mosaico espacialmente definido, como tal, dan sentido a la interpretación de la estructura y dinámica que permiten la comprensión del sistema territorial (Serrano, 2012).

⁵ Término que hace referencia a la percepción y recreación artística de la naturaleza (Bertrand, 2008; Beruete, 2016).

2.3. Teoría del Geosistema (análisis integral del paisaje)

El geosistema es un modelo teórico una forma de análisis de paisaje, surge de la conceptualización de la epidermis de la superficie terrestre. No es una abstracción de la naturaleza sino una delimitación del espacio geográfico en forma de sistema abierto que recibe la entrada de energía solar y gravitacional (Berutchachvili y Panadera, 1977; Frolova y Bertrand, 2006).

En 1970 Bertrand retoma los enfoques ecológicos, sistemáticos y paisajísticos de Troll (Ibarra, 1993; Gómez, 2000) para postular el método de análisis integral paisajístico; el cual resulta ser una perspectiva teórica en el que el territorio es visto como una realidad diferenciada en unidades espaciales. El esquema geográfico sistemático surge de las nociones básicas de la teoría general de los sistemas (Rubio, 1996; Ibarra, 1993). Los sistemas son un conjunto de elementos interactuantes entre sí (Bertalanfy, 2006), de acuerdo con González y Arcia (1994) efectuar un análisis sistémico en Geografía supone elaborar una síntesis de la realidad, que permite evaluar los cambios en los componentes del medio ambiente.

Esta perspectiva considera a las actividades antrópicas como componentes territoriales que se expresa en el paisaje por medio del uso de suelo y la distribución de la cobertura vegetal. El método parte de cuatro fases o etapas sucesivas, cada una se apoya de la fase anterior, dichas etapas son: Inventario geoecológico; estructura taxonómica corológica; análisis integrado del paisaje; síntesis estructural y dinámica del paisaje (Muñoz, 1998).

El inventario geoecológico es la primera etapa en que se reconocen los componentes (abióticos, bióticos y culturales) del territorio, desde una perspectiva vertical, se analizan las variables independientes y dependientes que delimitan las unidades territoriales (Jiménez y Moreno, 2002).

La estructura taxonómica corológica es una división de unidades de paisaje que parte del inventario geoecológico, donde el acomodo jerárquico de los mismos permite ordenarlos en múltiples escalones que revelen el acomodo de la estructura del espacio geográfico (Mateo, 1984). Resulta apropiado delimitar a las unidades

de paisaje por medio de un dominio físico, con la finalidad de reducir la incertidumbre de los límites, no obstante, no se considera como un fin sino como una aproximación de la realidad geográfica. El sistema taxonómico permite localizar los paisajes en la perspectiva temporal y espacial en función de su escala, para ello se localiza a los elementos morfoestructurales y climáticos como las unidades superiores, mientras que las organizaciones biológicas y sociales representan a los elementos inferiores (Bertrand, 2007).

De acuerdo con García y Muñoz (2002) las unidades de mayores dimensiones espaciales representadas a pequeña escala cartográfica, parten de componentes macroestructurales abióticos y las unidades de mayor escala cartográfica son definidas por compuestos mesoestructurales de orden biótico y antrópico (cuadro 2.2). La clasificación se define por un orden de menor a mayor escala, además del peso relativo de los componentes geoecológicos, el sistema taxonómico es un instrumento metodológico que permiten relacionar el plano vertical con el plano horizontal (Forman, 1995).

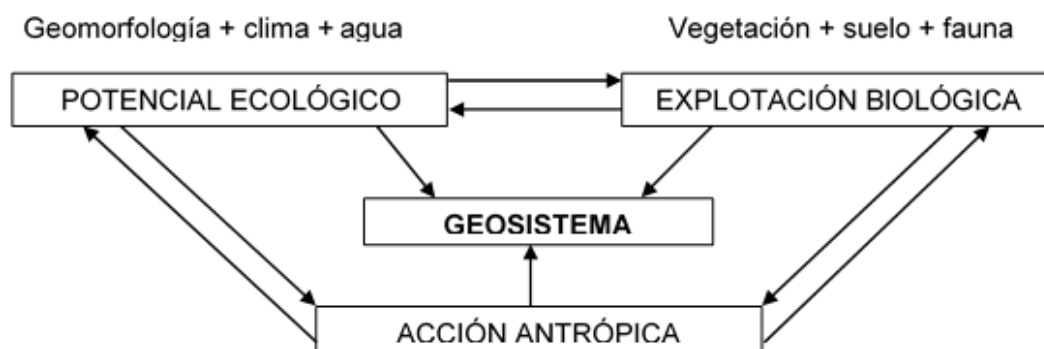
El análisis integral del paisaje es la tercera fase donde se analizan los geosistemas identificados. El planteamiento básico de esta fase metodológica parte del postulado teórico de que a cada geofacie le corresponde una unidad de paisaje evidente, que en conjunto representan de forma horizontal el estado del geosistema (Muñoz, 1998; García y Muñoz, 2002). El geosistema se integra por las geofacies correlacionadas del sistema territorial (García Merino, 1998). La delimitación del geosistema está dada en función de los límites de intercambio de substancia y energía indispensables para mantener su funcionamiento (González y Arcia, 1994).

De acuerdo con Bertrand (2007) el geosistema surge de la interacción entre el potencial ecológico y un cierto tipo de explotación biológica propia de las actividades humanas, la interrelación de este conjunto de variables hace del geosistema una unidad dinámica que no presenta necesariamente una gran homogeneidad fisionómica, sin embargo, su estado de clímax se alcanza cuando hay un cierto tipo de estabilidad. La explotación biológica se compone de las siguientes variables: vegetación, suelo y fauna (figura 2.1).

Cuadro 2.2 Sistema de clasificación del paisaje (estructura taxonómica).

Unidad de paisaje	Escala espacio-temporal		Elementos del medio que definen las categorías
	Nivel	Superficie	
Zona	I	Millones de Km^2	Grandes fajas climáticas y biomas del planeta que se manifiesta por el reparto de la superficie emergida del planeta que forman las megaestructuras
Dominio	II	Miles de Km^2	Climas regionales y grandes masas vegetales relativos a grandes accidentes orográficos de dominios macroestructurales
Región Natural	III-IV	Decenas a cientos Km^2	Macroestructuras individualizadas tectónicamente y definidas accesoriamente por el clima regional con condiciones hidrológicas, geomorfológicas y biogeográficas originales
Geosistema	IV-V	De una a decenas de Km^2	Complejo definido por un matiz regional que incluye una combinación entre el potencial ecológico, la explotación biológica y las acciones humanas
Geofacie	VI	Cientos de m^2	Paisaje definido por la forma del relieve, tipo de climas, componentes naturales y explotación humana (uso de suelo)
Geotopo	VIII	Decenas de m^2	Microtopografía y elementos biogeográficos (complejo biotopo-biocenosis), subordinados por un microclima

Fuente: Gracia, 1998; Bertrand, 2007.

Figura 2.1 Estructura básica del geosistema.

Fuente: González y Arcia, 1994.

Los componentes básicos del geosistema son tres y establecen una dinámica articulada que determina el estado del mismo (Bertrand, 2007), que son:

- ❖ Componentes abióticos (litomasa, hidromasa y aereomasa).
- ❖ Componentes bióticos o biomasa (fitomasa y zoomasa).
- ❖ Componentes antrópicos.

El geosistema es un modelo que representa las formas de apropiación espacial, en él se logra explicar dos coberturas espaciales: 1) los distintos tipos de uso de suelo y 2) los límites territoriales representados en un área específica en función de las condiciones naturales; desde el análisis geográfico, es una unidad espacial que forma tipos permanentes del medioambiente (González y Arcia, 1994).

Bertrand (2007) afirma que no se puede dar una explicación directa a la relación de una sociedad con un geosistema, ya que no se puede caracterizar la antropomasa; sin embargo, la metodología de análisis permite evaluar los impactos económicos y sociales en el complejo territorial. El método parte del reconocimiento de las geofacies, identificadas como usos de suelos y cobertura vegetal en distintos momentos, que sirve de base para evaluar las actividades sociales dentro de los geosistemas.

Las geofacies se distinguen por evidenciar la dinámica ambiental, por medio del cambio de uso de suelo y vegetación; a partir de este proceso, los geosistemas se clasifican en función de la evolución de sus componentes. Con base en este criterio se reconoce a los geosistemas en biostasia y en rextasia. Los geosistemas en biostasia se caracterizan por el potencial ecológico constante, en tres categorías: un tipo residual (estable), un tipo de tránsito (pérdida de biomasa o suelo) y un tipo de acumulación (sedimentario), se considera a la biostasia cuando el potencial ecológico y la explotación biológica se mantienen en equilibrio, debido a una actividad geomorfológica escasa y por una actividad social inexistente sobre la vegetación y suelos. La rextasia corresponde a la ruptura del equilibrio entre el potencial ecológico y la explotación biológica del geosistema, originado por una

dominante geomorfogénesis o inadecuada actividad humana sobre el territorio (*Ibíd.*).

Los elementos visuales básicos del paisaje son la forma y el color. Se aprecia la forma por medio de las estructuras topográficas relevantes, mientras que el color se asocia a los usos de suelo y la cubierta vegetal (Moreno y García, 1996). Existen dos puntos de vista metodológicos en el análisis paisajístico, que son las interpretaciones horizontales y verticales (Mérida, 1996). La estructura del geosistema se compone de los tipos de distribución espacial que a la vez mantienen una relación tanto en el plano vertical como horizontal, conocidas respectivamente como geohorizontes y geofacies:

- ❖ Geohorizonte (criptosistema): son estructuras verticales homogéneas que se sobreponen entre sí, delimitan y forman los umbrales energéticos del geosistema, geofacies y otras unidades de paisaje se caracteriza por su fisionomía y por la manifestación en la repartición de las masas (García y Muñoz, 2002). Desde la perspectiva ambiental, el geohorizonte proyecta de forma horizontal el acomodo de las geofacies sobre la superficie terrestre (Gómez, 2000).
- ❖ Geofacie (fenosistema): representa la estructura horizontal del geosistema. Representa la porción emergente de las relaciones establecidas por los diferentes geohorizontes de un momento específico. Es una unidad con una escala perceptible con expresión local y única, producto de las combinaciones internas del relieve, pendiente, tipo de roca, clima e hidromasa. Por lo tanto, son variedades del paisaje que representan en conjunto un mosaico que forma la superficie interior del geosistema, en él se distingue un potencial ecológico y una explotación biológica. En conjunto las geofacies representan una estructura dinámica que determina el arreglo ecológico y biológico del territorio (Bertrand, 2007).

La geofacie es percibida por el ser humano como un escenario variado y complejo de la cual se puede observar la forma, textura, tamaño, sombras, grado de nitidez, patrones, situaciones y rasgos asociados a un cierto orden espacial

(García y Muñoz, 2002); esta observación en perspectiva horizontal dentro de la Geografía contemporánea, se lleva a cabo sobre plataformas aéreas o satelitales que captan y clasifican los elementos y componentes del territorio en unidades de paisaje mediante las cualidades ópticas de la superficie terrestre observada (Biondi *et al.*, 2004; Mérida, 1996).

El relieve, los suelos, la vegetación y los usos de suelo, son una expresión de la relación dada entre distintas geoesferas (litosfera, la atmósfera y la biosfera), que al ser elementos que se encuentran en la zona de contacto, resultan ser componentes perceptibles del paisaje. De tal conjunto de elementos la vegetación, al formar parte de la llamada cobertura de suelos (usos de suelo) o carpeta superficial, se encuentra visible sobre otros elementos climáticos, geológicos y edáficos. Todos los componentes del medio en distintos grados son factores que conforman la correlación de los distintos tipos y estratos de vegetación (García y Muñoz, 2002).

Las morfoestructuras son factores como la altitud, orientación y composición litológica que crean un escenario asociado a un tipo de vegetación específica. El clima condiciona los parámetros pluviométricos y la humedad requerida por un tipo de vegetación específica. Las mesoestructuras configuran a los componentes abióticos y bióticos, en mediana magnitud la disponibilidad de humedad, tipos de suelo (PH, textura, humedad e infiltración), biocenosis (relaciones internas de las comunidades vivas) y antropomorfismos (destrucción o perturbación en el uso de la cobertura vegetal); todos estos elementos intervienen sobre la vegetación y usos de suelo (García y Muñoz, 2002; Strahler, 2005; Sala y Batalla, 1996)

García y Muñoz (2002) reconocen dos tipos de cambio de uso de suelo de fuerte impacto sobre el paisaje; el cambio de uso de suelo por modificación, indica un variación o aclareo de cobertura forestal; y el cambio de uso de suelo por conversión, representa una sustitución de la superficie forestal por uso de suelo urbano o pastizal para ganado, lo que indica una destrucción biológica irreversible.

La vegetación es un componente visible del paisaje que se encuentra estrechamente relacionada con el ser humano, se integra en un mosaico de comunidades biológicas donde cada unidad corresponde a una combinación particular de especies. El estudio geográfico de las comunidades vegetales se analiza por medio de su distribución horizontal; la caracterización de la vegetación debe contener aspectos cuantitativos y cualitativos indispensables para el inventariado de la cobertura vegetal (*Ibíd.*).

Los bosquetes son geofacies con una biogénesis remanente de antigua vegetación climática, por otro lado, los pastizales corresponden a geofacies menos desarrolladas que ocupan sitios humanizados e inestables (*Ibíd.*).

La organización del espacio ha cambiado en menor o en mayor grado por la acción humana, visto desde una perspectiva geográfica los elementos más significativos se expresan en los usos de suelo y las modificaciones de las organizaciones vegetales (García Romero, 1998).

González y Arcia (1994) identifican dos grandes grupos de geosistemas; los seminaturales/naturales y antropizados:

- ❖ Dentro de los geosistemas seminaturales/naturales se encuentra la categoría de geobiocenosis (naturaleza no afectada por la sociedad socioeconómica regida por factores naturales) y la geobiocenoideas (componentes naturales modificados en estructura y función por la sociedad sin ser un espacio antrópico).
- ❖ Los espacios antropizados llegan a ser considerados como un tipo de geosistema único, que se encuentra marcado por la tecnoantroposenosis⁶, que es el aprovechamiento socioeconómico con expresión horizontal por medio de la construcción social.

⁶ Para Danilova (2014), el término tecno o tecnoesfera corresponde a los componentes de una realidad artificial que comprende una capa o esfera dentro del sistema terrestre, por otro lado, Medina (2001), se refiere al término antroposenosis como aquel espacio exclusivamente humano, por lo que el concepto tecnoantroposenosis, corresponde a espacio compuesto por infraestructura humana.

El concepto del geosistema es una abstracción, mientras que el estado es la caracterización del espacio a través del tiempo, que parte de una realidad objetiva (Bertrand, 2007). Para reconocer el estado del geosistema es necesario identificar los distintos estratos vegetales de las comunidades, dado que, los paisajes perturbados corresponden a comunidades vegetales deterioradas por la dinámica cultura o natural (Romero y Muñoz, 2002; Bertrand, 1966).

La síntesis estructural y dinámica del territorio es la última etapa del método integral del paisaje, consiste en tratar de forma sintética y cartográfica los objetivos generales del análisis geosistémico; delimitar el geosistema y sus umbrales, evaluar los procesos y patrones relacionados para definir especialmente el desplazamiento de las unidades de paisaje (Muñoz Jiménez, 1998).

Los geosistemas, desde el punto vista geográfico, son unidades espaciales delimitadas que evidencian tipos de medio ambiente, muestran las afecciones del mismo, así como premisas que permiten tomar medidas de restauración, protección y conservación (Bertrand, 2007). El concepto geosistema es incluyente en el complejo territorial natural y en los modos de producción que una sociedad determinada establezca con su medio, por lo que la relación del sistema natural y sistema social, se caracteriza de forma espacial por el arreglo de las fuerzas productivas; por lo tanto, se establece al geosistema como una estructura de origen natural modificada por el trabajo social (Bertrand, 2007; Mateo, 1984; Martínez, 1999).

2.4. El paisaje montano

La montaña por antonomasia es un sistema espacial que parte de un hecho topográfico con alto potencial geomorfológico. El relieve es el elemento más visible e influyente de un territorio, condiciona la fachada de elementos bióticos y sociales. El sistema montañoso parte de la suma de sus elementos abióticos, biológicos y sociales; los desniveles y las rugosidades son consecuencia del legado geológico que revela el estado y orden físico geográfico, por ello es un paisaje genéticamente diferenciado de otras estructuras, representa un patrimonio geomorfológico, que alberga comunidades vegetales típicas del lugar además de ser una fuente de servicios ambientales (Martínez de Pisón, 2000; Muñoz y Sanz, 1995; Serrano, 2012).

La montaña representa una zona de contacto donde circula un conjunto de materia y energía entre la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera, cuya principal fuente de energía proviene de la energía solar y potencial que surge del interfaz terrestre de máxima rugosidad e inestabilidad, es una consecuencia de las protuberancias del volumen montañoso que se expresa en la composición de la aereomasa, las dinámicas fluviales, las capas de derrubios y la cobertura vegetal (Bertrand, 2007; Serrano, 2012).

De acuerdo con Lugo-Hubp (2011: 272), la montaña es una elevación natural de la superficie terrestre, en comparación con las formaciones contiguas, su elevación oscila entre 200-300 metros (m) con respecto a su base. La sierra es una montaña alargada o un grupo de montañas con divisoria de aguas principal. Estos sistemas montañosos resultan de los mecanismos y fuerzas a escala planetaria conocido como tectónica de placas, por lo que una montaña o cadena montañosa está en el sitio con el aspecto orográfico que geológicamente les corresponde por su edad, tipología de roca, desplazamiento de placas, mecanismos de emplazamiento, modelo de erosión y faces orogénicas acumuladas a las que se ha encontrado sujeta (Martínez, 2000; Tarbuck *et al.*, 2005). Los rasgos geomorfológicos son los que hacen que la montaña sea definida con características específicas del lugar como el clima, el tipo de suelo, la cubierta vegetal, el régimen

hidrológico, la dinámica fluvial y la forma de apropiación de sus diversos elementos (Muñoz y Sanz, 1995), es esta organización vertical en pisos de montaña uno de los referentes geográficos más significativos que dirige la vocación del suelo (Serrano, 2012).

Las estructuras montañosas se han encontrado constantemente sujetas a valores culturales que limitaron el aprovechamiento de sus recursos. A pesar de ello en la segunda mitad del siglo XX, grandes complejos montañosos se han ajustado a las dinámicas de aprovechamiento masivo de recursos como la explotación forestal, minera, uso agrícola y expansión urbana. La reciente colonización de sus laderas deteriora de forma irreversible su composición de los servicios ambientales imprescindibles para las poblaciones periféricas. Es evidente que gran parte del desarrollo económico se ha pagado con patrimonio paisajístico y cultural. El frenético desarrollo de la economía moderna ha perturbado los espacios y sentidos de la montaña (Martínez, 2000).

La ciudad, en el proceso de expansión, desplaza a los elementos naturales por infraestructura urbana, no obstante, el área urbana se encuentra condicionada por los accidentes geográficos (relieve y escorrentía) que limiten su desarrollo, es decir, el relieve, aunque se encuentre cubierto por infraestructura urbana, tiende a manifestarse por su volumen en forma de pendiente, desniveles, orientación de las laderas y condiciones meteorológicas que configuran la distribución de los usos de suelo que decida la sociedad que la apropie (García Merino, 1998).

2.5. La cartografía en la representación del espacio geográfico

La investigación en el pensamiento geográfico parte de dos conceptos que son: el contenido y la forma (estrategia). El contenido hace referencia al proceso de investigación que incluye el planteamiento del problema, hipótesis y teoría. La forma es la representación metodológica cuyas técnicas evidencian el nuevo conocimiento mediante un lenguaje espacial, propio de la cartografía temática, que formaliza el contenido geográfico de la investigación. En otras palabras, la forma se encuentra respaldada por los objetivos y las posiciones teórico-conceptuales del contenido representadas en un proceso para la generación de un mapa (Propin, 2003).

La cartografía para Robinson *et al.*, (1987) es un conjunto informativo, que surge del interés del ser humano por entender la organización espacial o entorno del cual forma parte, a partir de una esquematización visual. La cartografía parte del procedimiento matemático con lo que se puede obtener una representación real de los fenómenos concretos y abstractos que componen el espacio geográfico (Maza, 2015; Caire, 2002). Propin (2003) afirma que el conocimiento geográfico se formaliza mediante el proceso de cartografización⁷ [*sic.*].

Los mapas, son instrumentos que muestran las relaciones espaciales de los elementos que conforman el medio geográfico (Robinson *et al.*, 1987). Si bien existen múltiples conceptos de mapa geográfico, la definición de K. Salitchev (1979), distingue a un mapa geográfico de otras formas de representación terrestre como: globo terráqueo, imagen satelital o fotografía aérea. K. Salitchev define un mapa geográfico como:

“Una representación reducida, generalizada y matemáticamente determinada de la superficie terrestre, sobre un plano, en el cual se interpreta la distribución, el estado, y los vínculos de los distintos fenómenos naturales y socioeconómicos, seleccionados y caracterizados con la asignación concreta del mapa” (Salitchev, 1979).

⁷ Término referente a levantamiento, representación, procesamiento, edición y elaboración cartográfica (Propin, 2003).

Para Robinson *et al.*, (1987) todos los mapas contienen dos elementos fundamentales de la realidad: localizaciones (posición en el espacio) y atributos de las localizaciones (tipo de cualidad o magnitud). Desde el punto de vista espacial, un mapa es una abstracción de la realidad, una fuente de información expresada en un lenguaje gráfico referente a una porción de la superficie terrestre (Carrascal, 2007; Robinson *et al.*, 1987).

El mapa resulta ser un documento que representa al espacio geográfico, permite mostrar la estructura del territorio como si fuera una mirada aérea teórica que revela la disposición de los lugares a partir de una reducción de forma generalizada del fenómeno de interés, muestra lo que la exploración en planta no logra; no obstante, parte de un conocimiento constante del campo (Mérida, 1996) o de la exploración dada por los sensores remotos (Bertrand, 2007) y de otras tecnologías como los navegadores GPS⁸ (Muñoz, 2011). Los mapas geográficos son una obra científica y artística, sus cualidades le permiten acercarse a la Geografía con la tecnología, el humanismo y el arte (Sánchez, 2007).

Dentro de la cartografía se pueden reconocer dos tipos de mapas, los cuales son descritos por Gómez Escobar (2004) como: carta topográfica y carta temática:

- ❖ La carta topográfica resulta ser un inventario de los elementos naturales y humanos que conforman el territorio, por lo general se elaboran por autoridades gubernamentales y suelen ser la fuente de información geográfica base de otros mapas (Robinson *et al.*, 1987).
- ❖ La carta temática o metacartografía representa de forma convencional características abstractas o concretas de los fenómenos, sociales y naturales que conforman el espacio geográfico. Por medio de signos y símbolos cualitativos o cuantitativos se obtiene una expresión gráfica y una leyenda que explique los fenómenos reales o materiales a representar. El mapa temático parte del mapa topográfico, el cual aporta la escala y otros

⁸ GPS por sus siglas en inglés “*Global Positioning System*” o “Sistemas de Posicionamiento Global”, que hace referencia al conjunto de datos disponible de una constelación satelital, navegadores terrestre y su respectiva ubicación (Pinto, 2012).

elementos básicos en la investigación temática, que en conjunto se mezcla con múltiples fuentes de información como otros materiales cartográficos, observaciones en campo, información estadística/censal, encuestas, muestreo, fotointerpretación e imágenes satelitales (Gómez Escobar, 2004). Un mapa temático es una especie de ensayo geográfico que refleja las distribuciones espaciales particulares (Robinson *et al.*, 1987)

El término temático alude a la realidad representada en el mapa, de tal forma que serán denominados por su contenido y forma de investigación como: agrícolas, ambientales, biogeográficos, geomorfológicos, poblacionales, entre otros (Propin, 2003). Los mapas temáticos representan variables específicas del territorio y cada fenómeno relacionado en la superficie terrestre representa una variable o atributo.

La automatización se ha convertido en una herramienta innovadora que ha permitido establecer herramientas cartográficas en el análisis de las variables espaciales. La interacción entre los Sistemas de Información Geográfica⁹ (SIG) y la Percepción Remota (PR) generan un conjunto de conocimientos científicos relevantes para el estudio de la relación que establecen los grupos humanos con la corteza terrestre.

El SIG es una herramienta híbrida de análisis espacial que expresa de forma abstracta la realidad a partir de la generación de modelos¹⁰ que permite encontrar patrones territoriales (Quintero, 2009). En Francia durante la segunda mitad del siglo XX, el concepto paisaje evolucionó a partir de la validez y precisión de los instrumentos técnicos sistematizados como lo son las imágenes satelitales y la cartografía automatizada. La Geografía en el ámbito medioambiental se convierte en la ciencia que identifica patrones y procesos territoriales a partir del conocimiento cartografiable del espacio geográfico (Philipponneau, 2001).

⁹ Es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y representación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos (NCGIA, 1990).

¹⁰ Todo modelo es una abstracción de la realidad, donde no existe bueno o malo, dado que su calidad depende de la credibilidad de las variables (Quintero, 2009).

Capítulo 3

Los sensores remotos en el análisis del paisaje

En este capítulo se abordan las propiedades de los sensores remotos. Esta segunda parte del contenido metodológico de la investigación se divide en tres subcapítulos; en el primero se muestra una síntesis histórica de los sensores remotos; en el segundo se exploran las bases teóricas y metodológica de la Percepción Remota además de las propiedades ópticas de la superficie terrestre y las características del sistema sensor; y en el tercer subcapítulo describe el preprocesamiento de la información capturada por el sistema sensor.

3.1. Precursores de la Teledetección

La ciencia de la teledetección inicia en Francia con el uso de la cámara fotográfica durante el siglo XIX. La primera captura aérea de la superficie terrestre se dio a bordo de un globo aerostático en 1858, a cargo de Gaspar Felix Tournachon, quien fotografió la ciudad de París con la finalidad de obtener un plano de urbano, sin embargo, Aimé Laussedat fue el primero en diseñar fórmulas matemáticas con las cuales consiguió una captura fotográfica de la superficie terrestre en una proyección ortográfica, debido a su labor es considerado el fundador de la fotogrametría. A pesar de los múltiples intentos para obtener imágenes aéreas con ayuda de cometas y globos aerostáticos, estos mostraban un gran inconveniente puesto que no podían planear una ruta al depender de la dirección de los vientos (Campbell y Wynne, 2011).

Los hermanos Wright fueron los primeros en capturar imágenes desde un avión, no obstante, estas capturas no fueron destinadas para la cartografía (Estes y Cosentino, 1989; Khorram *et al.*, 2012). Las fotografías aéreas utilizadas para el mapeo de la superficie terrestre fueron practicadas y descritas por el italiano Cesare Tardivo, quien a partir de 1910 publica una serie de artículos sobre la captura e interpretación de las tomas aéreas (Shepher, 2004).

En la primera guerra mundial que se empleó la primera cámara fotográfica diseñada específicamente para la observación terrestre desde una plataforma aérea. Después de la Primera Guerra Mundial surgieron una serie de compañías dedicadas a la ingeniería fotogramétrica y al desarrollo de patentes de películas multicapas. Durante la Segunda Guerra Mundial investigadores de los laboratorios Kodak lograron desarrollar la fotografía infrarroja, su objetivo era reconocer los camuflajes militares. Al finalizar la guerra se empleó parte de la tecnología alemana como los Cohetes V2, los cuales sirvieron de base para posteriores proyectos satelitales; esta tecnología evidenció la capacidad de observar a la superficie terrestre cuando científicos y militares estadounidenses capturaron una imagen a partir de un vuelo suborbital de un misil V2 (Campbell y Wynne, 2011).

La era de las plataformas espaciales

El 4 de octubre de 1957 es puesto en órbita el primer satélite artificial llamado Sputnik 1, este artefacto representó las bases para la búsqueda de información terrestre desde el espacio. Las primeras plataformas espaciales no contaban con grandes instrumentos de observación de la Tierra y no fue hasta la década de 1960 cuando los satélites empezaron a mostrar su eficiencia para el análisis de la superficie terrestre, con el fin de localizar las posiciones estratégicas, observar las condiciones atmosféricas, localización de los incendios forestales y el control de los recursos naturales (Erickson, 1992).

La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) fundada el 1 de octubre de 1958, ha cumplido un papel fundamental en el desarrollo de programas de observación terrestre por medio de plataformas satelitales (Aguirre, 2009). En la década de 1960 la NASA inició la operación del programa NIMBUS; entre sus múltiples objetivos a cubrir, se encontraba la creación y evaluación de sensores pasivos y activos para el mapeo de los recursos (Szekielda, 1988).

La constelación Landsat y la observación de la superficie de la Tierra

En julio de 1972 se lanzó el satélite ERTS 1 (*Earth Resource Technology Satellite*) o Landsat 1, en enero de 1975, fue lanzado el satélite Landsat 2 y en mayo de 1978 entro en servicio Landsat 3 con la finalidad de remplazar a la plataforma ERTS 1. Los sensores montados dentro de los tres primeros satélites Landsat se caracterizaron por llevar a bordo tres cámaras de televisión y un equipo de barrido multiespectral, con lo que lograron captar longitudes de onda correspondientes al espectro de luz visible e infrarrojo cercano (Erickson, 1992). La plataforma Landsat 4 entró en servicio en julio de 1982 y en marzo de 1984 fue lanzado el satélite Landsat 5. Estos dos satélites llevaban a bordo un sensor multiespectral TM (*Thematic Mapper*), con la capacidad de capturar seis bandas multiespectrales y una banda en infrarrojo térmico con la finalidad de analizar los paisajes geográficos o rasgos geológicos (Erickson, 1992).

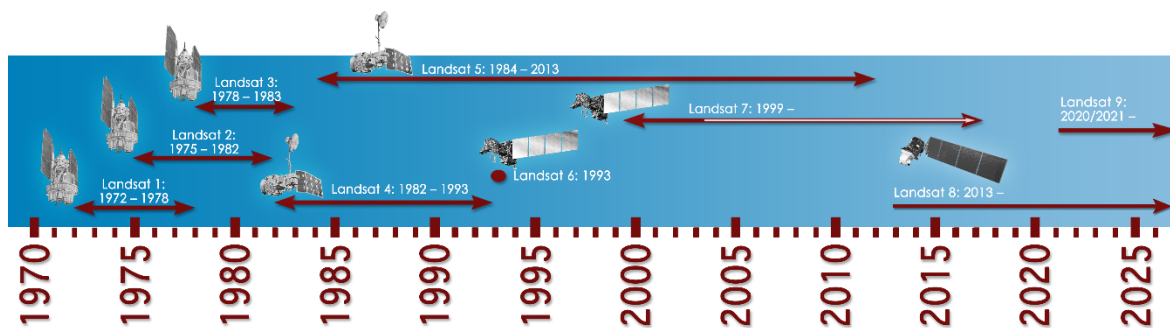
El 6 de octubre de 1993 se lanzó el satélite Landsat 6, sin embargo, el lanzamiento falló. El satélite Landsat 7 fue lanzado el 15 de abril de 1991, lleva a bordo el instrumento de observación terrestre ETM + (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). El satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero del 2013, es la octava misión del programa y se denominó "*Landsat Data Continuity Mission*" (LDCM), a bordo de esta plataforma se encuentran el escáner multiespectral OLI (*Operational Land Imager*) y el sensor térmico infrarrojo TIRS (*Thermal Infrared Sens*). La captura de una escena por parte de los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8, se da a la misma hora cada 16 días y en una área de 185 Km² (Geological Survey, n/d). El programa Landsat ha modificado la forma de generar datos cartográficos, convirtiéndose en una fuente de información geográfica desde 1972 (cuadro 3.1; figura 3.1).

3.1 Características técnicas del programa Landsat.

Satélite	Puesta en orbita	Sensor	Resolución en m ²	Altura Km	Temporalidad (días)
Landsat 1	25/Jul/1972	RBY	80	917	18
		MSS	80		
Landsat 2	22/ene/1975	RBT	80	917	18
		MSS	80		
Landsat 3	5/mar/1983	RBY	40	917	18
		MSS	80		
Landsat 4	16/jul/1982	MSS	60	705	16
		TM	30		
Landsat 5	1/mar/1984	MSS	60	705	16
		TM	30		
Landsat 6	5/oct/1993	ETM	30 (Multi-espectral)	705	16
			15 (Pancromática)		
Landsat 7	15/abr/1991	ETM+	30 (Multi-espectral)	705	16
			15 (Pancromática)		
Landsat 8	11/feb/2013	OLI	30 (Multi-espectral)	705	16
			15 (Pancromática)		
		TRS	100 (Infrarrojo térmico)		

Fuente: en: <http://landsat.usgs.gov>

Figura 3.1 Cronología de la Constelación Landsat.



Fuente: en: <http://landsat.usgs.gov>

3.1.1. La constelación Landsat como fuente de información

La constelación Landsat representa una fuente de información básica en el ámbito de la Geografía debido a los parámetros temporales, espectrales, espaciales y radiométricos, que ofrecen los sensores TM (cuadro 3.2) y OLI. La selección correcta de la fecha de análisis minimiza los efectos de los cambios fenológicos del bosque (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003). La fenología se considera como el estudio de los cambios estacionales del desarrollo vegetal y la decadencia de la misma, su importancia en Percepción Remota radica en la dinámica fisiológica que modifica las características espectrales de las muestras radiométricas de algún conjunto vegetal en específico (Campbell y Wynne, 2011); por ello se recomienda fijar la fecha de estudio en una estación fenológica, con la finalidad de homogenizar al conjunto de variables (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003).

En este caso de estudio se seleccionaron 6 imágenes de la constelación Landsat, entre el periodo de enero-marzo, dado que en este tiempo la precipitación es escasa y el patrón fenológico interanual disminuye, por lo que los tipos de vegetación se encuentran en una tenencia decreciente, por lo tanto, los estratos herbáceos y arbustivos tendrán un menor vigor fotosintético que los bosques; a partir estas cualidades se descargaron un conjunto de imágenes, cinco pertenecientes al sensor TM y una imagen del sensor OLI (cuadro 3.3). El alcance

temporal de la constelación Landsat, ha delimitado el análisis del objeto de estudio en un periodo comprendido de 1985-2016.

Cuadro 3.2 Características técnicas del sensor TM.

Modo espectral	Espacial (m ²)	Resolución espectral (Micras)	Resolución Radiométrica	Resolución Temporal	
Multiespectral	30	Banda 1 (azul)	0.45 – 0.52	8 Bits	16 días
		Banda 2 (verde)	0.52 – 0.60		
		Banda 3 (rojo)	0.63 – 0.69		
		Banda 4 (infrarrojo cercano 1)	0.76 – 0.90		
		Banda 5 (infrarrojo cercano 2)	1.55 – 1.75		
		Banda 7 (Infrarrojo medio)	2.08 – 2.35		
Termal	120	Banda 6 (infrarrojo térmico)	10.04 -12.5		

Fuente: NASA, n.d.

Cuadro 3.3 Información consultada de la constelación Landsat.

Nombre (MTL)	Sensor	Fecha de captura
L5026046_19850131	TM	31 de enero de 1985
L5026046_19900318	TM	18 de marzo de 1990
L5026046_19950228	TM	28 de febrero de 1995
L5026046_20000109	TM	09 de enero del 2000
L5026046_20100205	TM	05 de febrero de 2010
L8026046_20160121	OLI	21 de febrero de 2016

Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

3.2. Elementos físicos de la percepción remota

El término Percepción Remota (*Remote Sensing*) fue acuñado en 1960 por Evelyn Pruitt, una geógrafa de la Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos de América, en referencia a cualquier medio de observación a distancia de la superficie terrestre (Khorram *et al.*, 2012).

Se define a la Percepción Remota (PR) o Teledetección como la ciencia que permite obtener información de la superficie terrestre sin hacer contacto con ella, a partir de la captura de la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie Terrestre, la cual es captada por un sensor (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003). De acuerdo con Lira, (2009), la ciencia de la Percepción Remota se compone de los siguientes elementos:

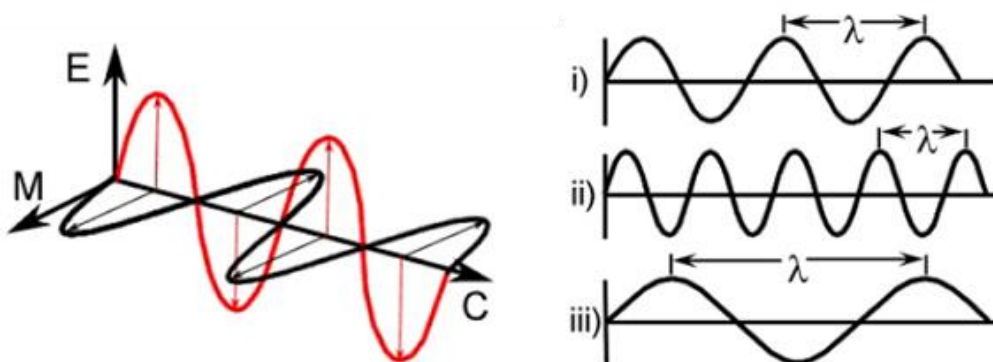
- ❖ Fuente de iluminación: radiación emitida por una fuente sobre una escena. Ésta a la vez se divide en dos: sistemas pasivos y activos, los primeros perciben la energía emitida o reflejada de una fuente externa natural sobre el que no se tiene control, los segundos emplean una fuente de iluminación propia que emite sobre la escena.
- ❖ Paisaje: comprende el medio perceptible de la superficie terrestre.
- ❖ Escena: área donde se enfoca la observación.
- ❖ Sensor remoto: dispositivo que captura la energía electromagnética de una escena.
- ❖ Plataforma: base donde se monta el sensor remoto permitiéndole obtener información de un paisaje.
- ❖ Sistema de procesamiento: conjunto de elementos que procesan cualitativa y cuantitativamente la Información obtenida por el sensor, para su clasificación e interpretación.
- ❖ Apoyo en campo: análisis directo de varios puntos selectos de la escena.

3.2.1. Fuentes de energía o iluminación

De acuerdo con Chuvieco (1995) se designa dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda de origen solar y terrestre que forman parte del funcionamiento de los sensores pasivos. La radiación electromagnética emitida o reflejada por la materia es considerada como un movimiento ondulatorio. Una onda es un término físico que indica una perturbación o vibración procedente de una fuente, que propaga energía a través del espacio y tiempo. Las ondas pueden ser electromagnéticas, mecánicas y de materia (Kirkpatrick y Francis, 2006).

La onda electromagnética (radiación) es una perturbación constituida por la combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del tiempo y el espacio en forma de energía de una fuente de emisión a otra de recepción (Máximo y Alvarenga, 2006). James Clerk Maxwell afirmó que si un campo magnético existente en cierto espacio, se ajusta a una variación en el tiempo, tal variación se hará aparecer en el lugar como un campo eléctrico inducido, y de forma inversa, si un campo eléctrico existente en cierto espacio se ajusta a una variación en el tiempo, tal variación se hará aparecer en el lugar como un campo magnético inducido (Levin, 1999). Por lo tanto, una onda electromagnética se encuentra constituida por un campo eléctrico y magnético que se propagan de forma, periódica y perpendicular entre sí (figura 3.2).

Figura 3.2 Onda electromagnética (der) donde "E" corresponde al campo eléctrico, "M" al campo Magnético y "C" al vector del haz de luz. En la izquierda se muestra tipos de la longitud de onda.



Fuente: Levin, 1999.

Los cuatro componentes básicos de las ondas electromagnéticas son: la longitud, la frecuencia, la amplitud y la velocidad de onda (Máximo y Alvarenga, 2006; Khorram *et al.*, 2012):

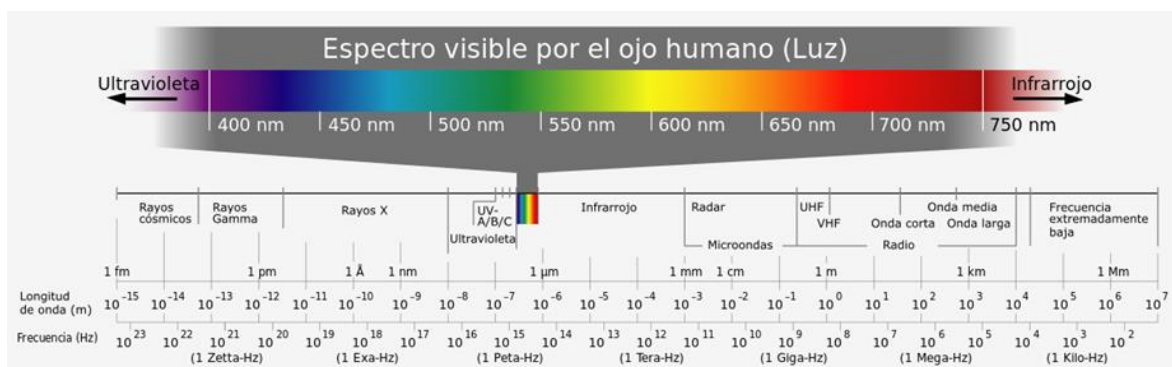
- ❖ Longitud de onda (λ): distancia recorrida por la onda durante un intervalo de tiempo τ y velocidad v de propagación, expresada como la distancia entre dos crestas o valles sucesivos.
- ❖ Frecuencia de onda (f): es el número de oscilaciones que una onda efectúa en un determinado intervalo de tiempo, en otras palabras es el número de crestas de una onda que pasa por un punto en un periodo específico, es decir, λ es inversamente proporcional a f (figura 3.2), por lo que una alta frecuencia obtendrá una longitud de onda corta λ y viceversa. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), o ciclos por segundo.
- ❖ Amplitud de onda: se refiere al pico máximo que alcanza una cresta con respecto al punto medio de la onda. Por lo general se expresa en Watts por metro cuadrado.
- ❖ Velocidad de onda (c): es una constante de 3×10^8 m/s, usualmente referida como velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas difieren en función de su longitud y frecuencia, con base en ello se clasifican en conjuntos o bandas con características semejantes, (cuadro 3.4; figura 3.3). El agregado ordenado de múltiples bandas es conocido como espectro electromagnético (Chuvienco, 1995; Elachi y Zyl, 2006). Si bien existe una gran variedad de longitudes de ondas, la fisionomía del el ojo humano sólo puede captar un pequeño rango del espectro electromagnético (figura 3.3), a lo que se le denomina espectro visible, entre un umbral de $0.4 \mu\text{m}$ (azul) y $0.7 \mu\text{m}$ (Rojo) de la longitud de onda (Lira, 2009).

Cuadro 3.4 Propiedades de las bandas que conforman el espectro electromagnético.

Bandas	Longitud	Propiedades
Rayos gama	< 0.03 nm	Radiación absorbida en la alta atmósfera no viable para su aplicación en PR
Rayos x	0.03 – 30 nm	Completamente absorbible por la alta atmósfera, no viable para su aplicación en PR
Región ultravioleta	0.03 – 0.4 μm	Radiación absorbible en la alta atmósfera no viable para su aplicación en PR
Región Visible	0.4 – 0.7 μm	Energía reflejada de la Tierra
Región del infrarrojo (IR)	0.7 – 100 μm	Parte de la relación entre la materia y la energía incidente, transmisible en las ventanas atmosféricas
Banda reflejada del IR	0.7 – 3.0 μm	Refleja la radiación solar incidente que no contiene las propiedades térmicas de los materiales
Banda térmica del IR	3 – 5 μm 8 – 14 μm	Es una de las principales ventanas atmosféricas en la región térmica
Región de las micro ondas	0.1 – 100 cm	Es un conjunto de longitudes de ondas que puede atravesar nubes, niebla, lluvia y vegetación
Radar	0.1 – 100 cm	Forma activa de detección de micro ondas
Radio	>100 cm	Porción más larga del espectro electromagnético

Fuente: en: <http://landsat.usgs.gov>

Figura 3.3 Bandas del espectro electromagnético.

Fuente: en: <http://landsat.usgs.gov>

Radiación y atmósfera

La radiación electromagnética detectada por un sensor remoto pasivo sigue una trayectoria del Sol a la atmósfera, de la atmósfera a la superficie y de la superficie a la atmósfera, hasta llegar al sensor remoto. La interacción dada entre los componentes que forman la aereomasa (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua entre otros) y distintas partículas en suspensión, hacen que la radiación electromagnética al entrar en contacto con la atmósfera modifique su longitud de onda (Aguirre, 2009).

Los fenómenos físicos conocidos como dispersión, absorción y refracción son los que surgen de la interacción dada entre la aereomasa y la energía electromagnética. La atmósfera se comporta como un gran filtro a distintas longitudes de onda, por lo tanto, las bandas tienen interacciones específicas que limitan o magnifican la posibilidad de estudiar un fenómeno específico mediante la observación remota (Moran y Morgan, 1997; Wallace y Hobbs, 2006).

La dispersión es un proceso en el que la radiación electromagnética direcciona su recorrido y longitud de manera natural al entrar en contacto con los gases atmosféricos y otras partículas en suspensión (polvo, humedad y productos de la combustión) que provienen tanto de causas naturales como humanas. El tipo de dispersión depende de la abundancia de partículas, del tamaño de la partícula interactuante y de la cantidad de atmósfera por la cual viaja la longitud de onda (Wallace y Hobbs, 2006; Kidder y Haar, 1995). Existen tres procesos de dispersión, los cuales son: dispersión de Rayleigh, Mie y dispersión no selectiva.

La dispersión de Rayleigh (figura 3.4) es un proceso que ocurre en la alta atmósfera (9-10 Km) donde los aerosoles y gases como el Oxígeno (O_2) y el Nitrógeno (N_2) causan la reflexión de la radiación solar entrante sobre las bandas visible y ultravioleta. A medio día la trayectoria de la luz solar es relativamente corta y directa, por lo que la longitudes de onda correspondientes al ultravioleta y azul son dispersadas por lo gases de la alta atmósfera, de tal forma que el color del cielo adquiere un tono azul. Por otro lado, en los atardeceres la luz procedente del Sol recorre una mayor distancia en la atmósfera, por lo que las bandas correspondientes

al color rojo e infrarrojo cercano son las que logran atravesar una gran cantidad de gases atmosféricos, a causa de ello, los atardeceres y amaneceres muestran el cielo de color naranja a rojo conforme al horizonte (Moran y Morgan, 1997; Wallace y Hobbs, 2006; Kidder y Haar, 1995).

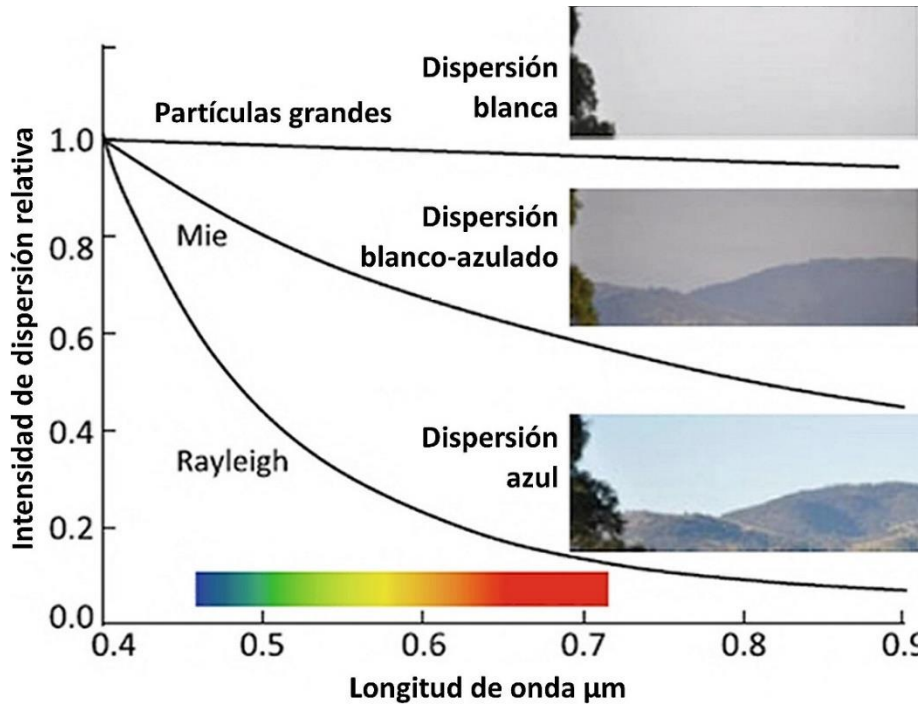
La dispersión de Mie, se presenta por la interacción entre el espectro electromagnético que incide con partículas atmosféricas como los aerosoles y gotas de agua en suspensión (figura 3.4). Se presenta cuando las partículas tienen una dimensión similar a la radiación electromagnética incidente, influye principalmente en el espectro visible de onda larga (verde y rojo). Se presenta en la troposfera entre 0 y 5 Km de altura, donde abundan este tipo de partículas (Chuvieco y Hute, 2010; Moran y Morgan, 1997).

La dispersión no selectiva ocurre cuando las partículas son más grandes que la longitud de onda de la radiación dispersada (figura 3.4). Las partículas que tienden a generar este fenómeno son las gotas de agua y partículas grandes de polvo, que terminan por cobrar un color blanquecino en forma de bruma. Todas las longitudes de ondas visibles y cercanas a ellas se encuentran dispersas por igual, por lo tanto, la luz resultante tiende a adquirir tonalidades grises (Chuvieco y Hute, 2010).

A diferencia de la dispersión, la absorción atmosférica resulta de una transformación de energía electromagnética en energía calorífica (Richards, 2012), al entrar en contacto con ciertos componentes atmosféricos como el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono (Lillesand y Kiefer, 1994; Moran y Morgan, 1997).

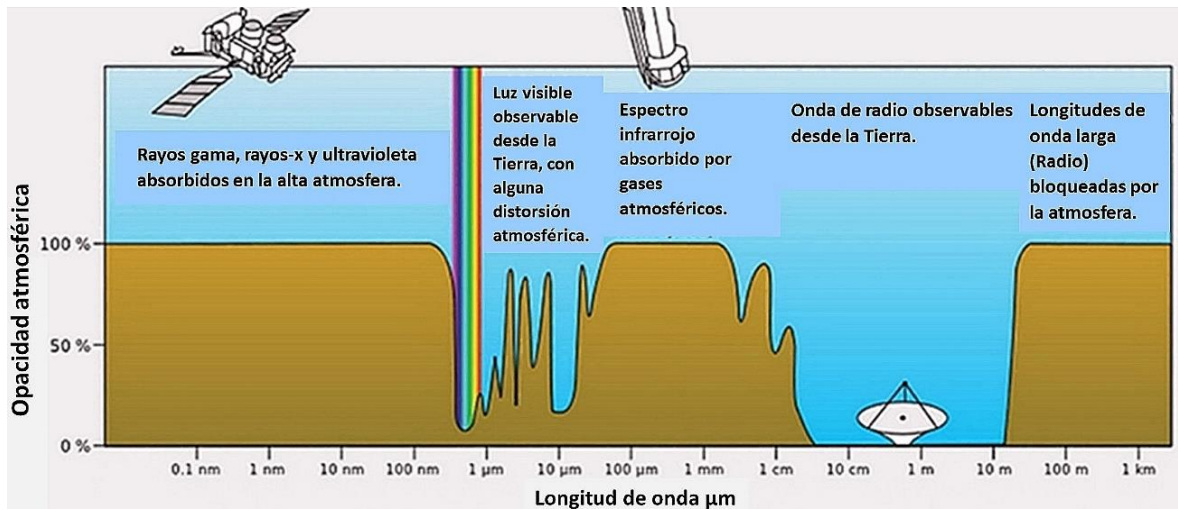
La atmósfera no es completamente transparente ante la radiación electromagnética, dado que de forma selectiva permite la entrada y salida de radiación en función de la longitud de onda y de las condiciones meteorológicas del momento, por lo que las regiones del espectro electromagnético que logran transmitirse a través de la aereomasa se denominan ventanas atmosféricas (figura 3.5). Las ventanas atmosféricas son fenómenos ópticos condicionados por los procesos de absorción y dispersión (Aguirre, 2009), no obstante, este fenómeno debe de considerarse al momento de seleccionar el sensor y el objeto de estudio.

Figura 3.4 *Atmósfera y partículas de dispersión.*



Fuente: Richards, 2012.

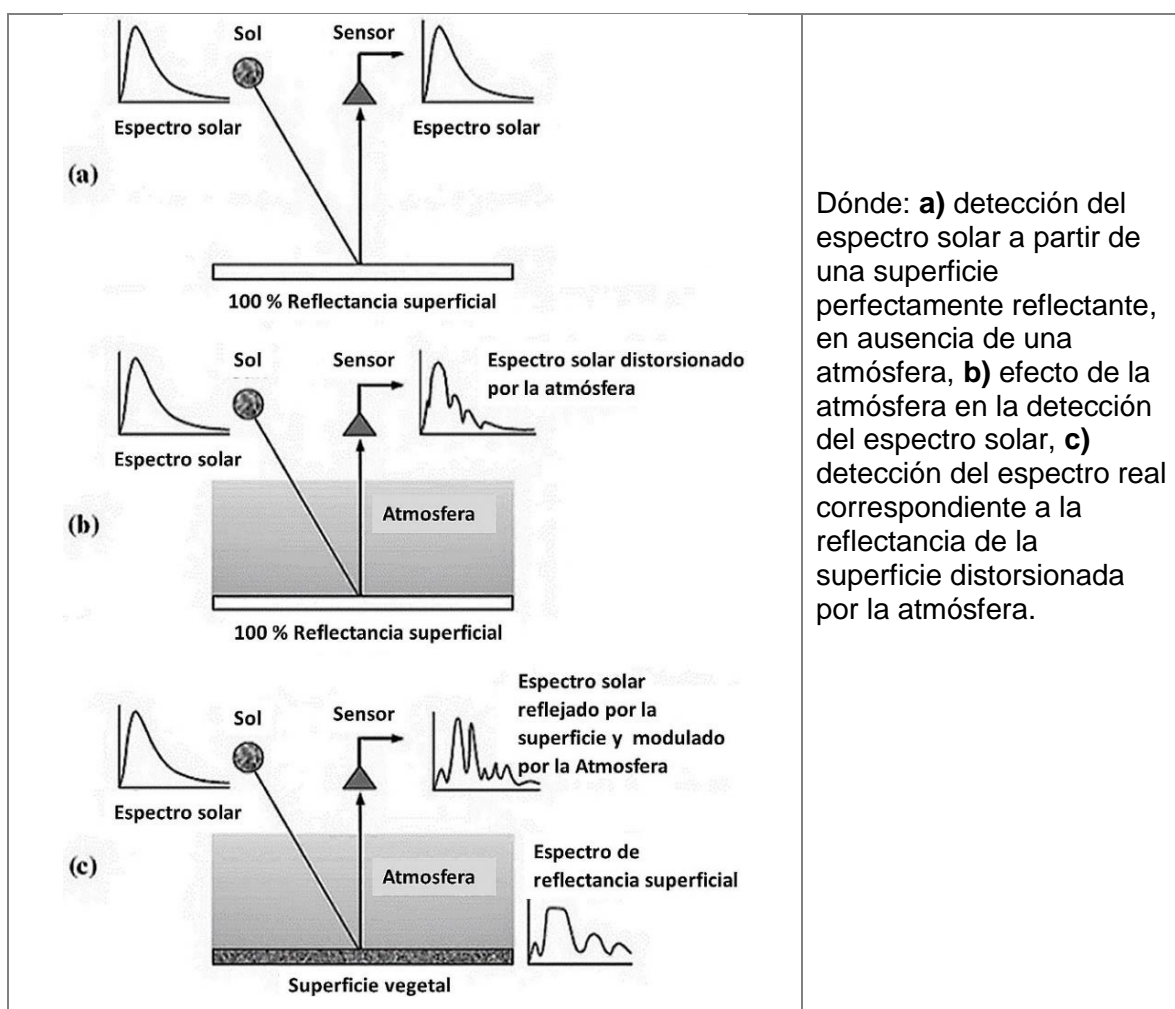
Figura 3.5 *Ventanas Atmosféricas.*



Fuente: NASA, s.f.

La interacción entre atmósfera y espectro electromagnético generan un conjunto de errores al momento del escaneo de información; en primera, los errores modifican la distribución relativa del brillo de una imagen en una determinada banda que resulta ser diferente a la verdadera en la superficie. En segundo lugar, el brillo de un solo pixel de una banda puede ser distorsionada en comparación con el carácter de reflectancia espectral de la región correspondiente a la superficie del suelo. Ambos tipos son una consecuencia de la interacción electromagnética con el ambiente (Richards, 2012). Los sensores pasivos capturan el dominio óptico del espectro o espectro solar, modulado por la influencia del ambiente, por lo tanto, la reflectancia capturada de la Tierra por un sensor, tendrá información de la superficie terrestre como de la atmósfera interactuante (figura 3.6).

Figura 3.6 Distorsión del espectro electromagnético en la interacción con la materia superficial.



Dónde: **a)** detección del espectro solar a partir de una superficie perfectamente reflectante, en ausencia de una atmósfera, **b)** efecto de la atmósfera en la detección del espectro solar, **c)** detección del espectro real correspondiente a la reflectancia de la superficie distorsionada por la atmósfera.

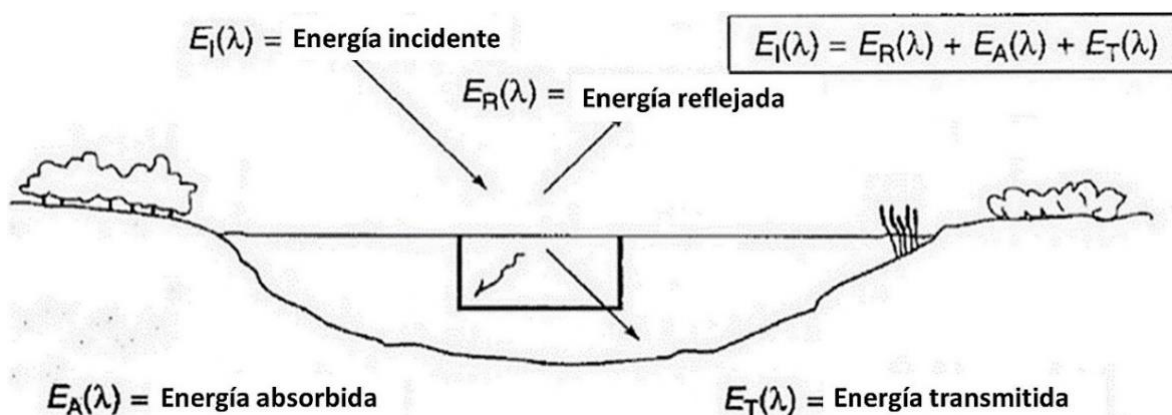
Fuente: Richards, 2012.

3.2.2. Interacción con el medio (caracterización espectral del paisaje)

La energía electromagnética en función de su longitud de onda y de la superficie incidente, presenta tres interacciones posibles que son: reflexión, absorción y transmisión (figura 3.7). Tal interacción se da a partir del principio de conservación de la energía en el que se puede explicar la relación entre un objeto cualquiera, la energía electromagnética incidente $[E_i(\lambda)]$, la energía reflejada $[E_R(\lambda)]$, la energía absorbida $[E_a(\lambda)]$ y la energía transmitida $[E_t(\lambda)]$ (Richards, 2012).

$$E_i(\lambda) = E_R(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$$

Figura 3.7 Energía electromagnética y su medio.



Fuente: Lillesand y Kiefer, 1994.

La energía reflejada contiene propiedades espectrales respecto a la superficie y geometría que la refleja. En función de su geometría implica el tipo de rugosidad del objeto reflejado y en consecuencia el tipo de reflexión (figura 3.8); la reflexión especular se refiere a la energía incidente en una superficie de geometría plana por lo que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia que no modifica la longitud de onda al actuar como un espejo; la reflexión difusa se desarrolla sobre superficies rugosas donde la energía incidente se refleja de manera uniforme en todas las direcciones, por lo tanto, es la que interesa, debido a que refleja información sobre el tipo de superficie (Richards, 2012; Lillesand y Kiefer, 1994).

Figura 3.8 Reflexión especular (a) y difusa (b).



Fuente: Richards, 2012.

La radiancia es una medida de energía electromagnética que es reflejada o es emitida por un área en particular (m^2) y con un ángulo estereorradián en dirección hacia el sensor, se expresa en vatios por metro cuadrado por ángulo sólido (Mather y Koch, 2011). Se almacena en unidades de números digitales (ejemplo, van de cero a 255 en una resolución de 8 bytes). Campbell y Wynne, (2011) definen el brillo capturado en un rango de números digitales como la radiancia, el registro responde a valores de las unidades físicas observadas.

La reflectancia superficial es una medida de fracción de la energía radiante proveniente del Sol, que se refleja en la superficie de la Tierra. Se define como un cociente entre la energía incidente y reflejada de forma especular y difusa, se encuentra referida a un factor de escala que usualmente van de cero a 10 000, donde los datos más altos representan los objetos de mayor reflectancia, mientras que los objetos cercanos a cero corresponden a aquellos de menor reflectancia, agua y sombras topográficas (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003).

El color que adquiere un cuerpo con respecto a la energía incidente es en función de la absorción y reflexión que tenga el objeto sobre las distintas ondas electromagnéticas. Por ejemplo, un objeto de color azul absorbe una menor cantidad de esa banda, por lo tanto en el proceso de reflexión se emite el azul y en una menor cantidad otras bandas que previamente fueron absorbidas. La nieve refleja prácticamente toda la energía electromagnética que recibe, en consecuencia, el color blanco es una combinación de las ondas electromagnéticas que refleja, mientras que el agua absorbe casi todas las longitudes de onda en especial las cercanas al infrarrojo y ondas largas (Chuvieco, 1995).

El estudio de la percepción remota parte del análisis de la radiación reflejada o emitida por Tierra detectada por un sensor, los patrones de dispersión responden a la composición química de los distintos materiales de la superficie terrestre; y la modulación electromagnética de la reflectancia de cada objeto se le conoce como firma espectral (figura 3.9). La composición de la superficie vista por medio de una imagen digital surge del análisis de la firma espectral de la superficie, cualidad que revela los enlaces químicos y la estructura tridimensional de la materia que la componen (Lira, 2009).

Las características propias de la firma espectral permiten identificar o diferenciar superficies. Utilizar las interacciones entre la información detectada por los sensores remotos y los patrones de las firmas espectrales figura la base teórica de la representación cartográfica del espacio geográfico por medio de la Percepción Remota (Campbell y Wynne, 2011; Bertrand, 2007).

Los tipos básicos de reflectancia de la superficie terrestre son la vegetación sana (puede variar en especies), los suelos desprovistos y el agua (Lillesand y Kiefer, 1994). De acuerdo con Chuvieco (1995), la reflectividad de las hojas depende del estado fenológico, condiciones de humedad, características morfológicas de la planta (forma, altura, perfil, grado de cobertura del suelo) y la situación geográfica de la comunidad (pendiente, orientación y asociación con otras especies).

La reflectividad del agua es escasa, alcanza su punto máximo en el espectro visible, absorbe la energía correspondiente a la banda de onda larga; si el agua contiene partículas en suspensión o disolución, aumenta su capacidad reflectante (Aguirre, 2009). La firma espectral de los suelos desprovistos de vegetación es muy homogénea a distintas longitudes de onda, muestra un ligero aumento de reflectividad, hacia las longitudes de onda larga, depende de la composición química del suelo, textura, humedad y estructura (Chuvieco, 1995).

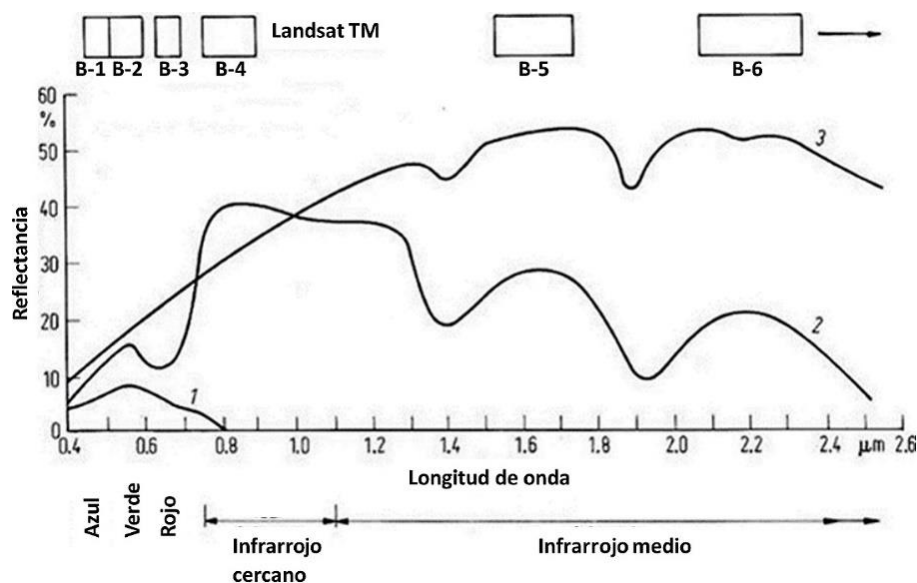
Las hojas vegetales en su estructura celular contiene pigmentos fotosintéticos, clorofila y carotenoides, que en combinación con el agua absorben longitudes de onda específicas entre el rango de 0.54 y 0.67 μm ; sin embargo, dentro de este

rango posee un local de reflexión cercano a $0.55 \mu\text{m}$ (Verde), en otras palabras, el efecto absorbente en el color verde es menor, por lo tanto, la vegetación sana es percibida a simple vista de color verde. La estructura interna de las hojas se encuentra formadas por cavidades o espacios porosos y esponjosos que difunden, dispersan y absorben la energía incidente, por lo tanto, el rango del espectro correspondiente al infrarrojo cercano es reflejado, lo que representa una característica óptica que revela el estado de la vegetación sana. Debido a ello, en una combinación RGB¹¹ de una imagen Landsat TM donde: R=Banda 4 (infrarrojo cercano); G=Banda 3 (rojo); y B=Banda 2 (verde), la vegetación sana adquiere un color rojo (Lillesand y Kiefer, 1994; Aguirre, 2009). La reflectancia dada en la región del espectro visible se encuentra controlada por los pigmentos fotosintéticos de las hojas, en la región del infrarrojo cercano se encuentra controlada por estructura celular de la hoja, mientras que en el infrarrojo medio la reflectancia está controlada por la absorción del contenido de agua.

De acuerdo con Chuvieco (1995), el sensor remoto montado en una plataforma espacial o aérea es incapaz de capturar información de una sola hoja, dado a que requiere de un conjunto de individuos vegetales que formen masas de vegetación (dosel, matorrales o pastizales) y en consecuencia sean almacenadas en un pixel. Sin embargo, interfieren otras características geográficas de la escena capturada por el sensor, como el ángulo de elevación solar, sombras topográficas que detecta el sensor, propiedades del suelo, geometría de la cubierta vegetal y el estado fenológico. La identificación de los estratos vegetales parte de la reflectancia, donde los pastizales tendrán una mayor reflectancia que los bosques de hoja ancha y los bosques de coníferas (Campbell y Wynne, 2011).

¹¹ El termino RGB proviene de las palabras inglesas *Red*, *Green* y *Blue*, los cuales son los colores primarios que en combinación aditiva representan la gama de colores del espectro visible. El compuesto RGB combina tres imágenes en tonos de grises con la finalidad de generar una visualización a color (Chuvieco, 1995).

Figura 3.9 Firmas espectrales; 1 agua, 2 vegetación y 3 suelo.



Fuente: Richards, 2012.

A partir de ello, se puede identificar a la superficie nativa modificada por un cambio de cobertura forestal a pastizal en dos imágenes de tiempo distinto, lo que refleja un cierto proceso de cambio de uso de suelo (Thompson, 2012). La vegetación nativa o de superficies modificadas por el ser humano representan variables evidentes de la superficie terrestre, el trato de la información indirecta por medio de la PR se basa en la dependencia espectral, espacial y temporal de la reflectividad de la cubierta; sin embargo, algunas limitaciones como la disposición de información, la nubosidad y la topografía llegan a limitar las ventajas de la observación remota (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003).

Las propiedades de una imagen digital permiten realizar un conjunto de pruebas e interpretaciones que el ojo humano es incapaz de ejecutar, por lo que, la segmentación temática de las unidades de paisaje tiende a ser objetiva al utilizar las propiedades radiométricas y espectrales de la imagen (Khorram *et al.*, 2012; Chuvieco, 1995; Lira, 2009).

Formato raster

Una imagen digital o raster está compuesta por un conjunto de píxeles (*picture elements*) organizados en una matriz. Un píxel es la unidad mínima identificable de una imagen digital (López y Caselles, 1990). De acuerdo con Muñoz (2011), una fuente de información en formato raster se caracteriza por:

- ❖ Cada píxel se define por un número de fila y columna, la imagen se encuentra referida por un sistema de coordenadas que se sitúa en la celda superior izquierda de la cuadrícula.
- ❖ El área de cada píxel define la resolución espacial de los datos.
- ❖ El valor de cada píxel define el tipo de objeto, fenómeno o estado que se encuentra en una localización particular. El tono o brillo de cada valor representa un número digital que en conjunto forman un arreglo matricial o estructura numérica de la escena en una imagen digital (Lira, 2009).
- ❖ Los datos pueden ser enteros, reales o alfanuméricos, contenidos en una tabla adjunta.

3.2.3. Resolución de un sistema sensor

La resolución de un sistema sensor se define como la capacidad de diferenciar los elementos de la superficie observada. En PR se emplea el término de resolución más un adjetivo que le acompañe para referirse a una característica de captura del sensor (Tristán *et al.*, 2008).

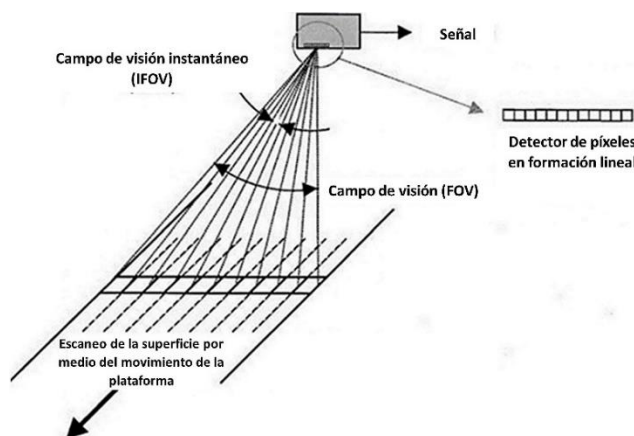
Resolución espacial

Se llama resolución espacial a la capacidad de un sistema sensor de identificar los detalles de la superficie dentro de una imagen. Se encuentra definida por la distancia de la plataforma con respecto a la superficie terrestre y del campo de visión instantáneo (*Instantaneous Field of View* IFOV) del sensor que establece el tamaño de la unidad mínima de superficie detectada (Elachi y Zyl, 2006).

El IFOV (figura 3.10) es la sección angular medida en radianes que depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor, en combinación a cierta altitud de la superficie terrestre de observación. El detalle a esta área se denomina resolución espacial del sensor, en otras palabras, la resolución espacial es una consecuencia de la relación del IFOV con la altura de la plataforma-sensor (Sobrino, 2001).

La dimensiones de la muestra o pixel se define como la capacidad de un sensor para distinguir la superficie en el plano espacial; por lo tanto, es una consecuencia de la resolución espacial (López y Caselles, 1990). De acuerdo con Jensen (2007), la resolución nominal de un sistema de sensor se define como la dimensión en metros de IFOV proyectada hacia la superficie. Por lo general se describe a la resolución espacial nominal como la dimensión en área de la muestra (Tristán *et al.*, 2008). Distintos sensores remotos tendrán diferentes resoluciones de captura en función de sus características técnicas-orbitales (Lira, 2009).

Figura 3.10 Campo de visión instantáneo o IFOV.



Fuente: Richards, 2012.

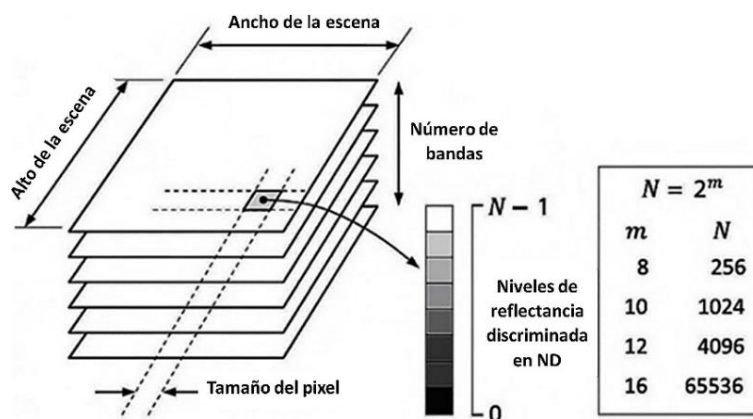
Resolución espectral

Es la capacidad de un sensor de captar distintos canales espectrales, depende del dispositivo de filtro óptico para discriminar el número de bandas y la longitud de las mismas. Existen escáneres multispectrales e hiperespectrales que permiten discriminar las diferencias ópticas de la superficie (Eachi, 2006). La alta capacidad espectral de un sensor facilita la caracterización e identificación de las distintas unidades y propiedades que componen del paisaje (Richards, 2012).

Resolución radiométrica

Elachi y Zyl (2006) define a la resolución radiométrica como la capacidad de un escáner de discriminar niveles de brillo o intensidades de radiancia espectral en el proceso de captura de una banda (imagen digital) registrada matricialmente en un conjunto de celdas o píxeles, donde cada uno tiene un número digital (ND) proporcional a la cantidad de energía electromagnética capturada, se expresa en números binarios, o bites, en un rango de valores (figura 3.11). Una imagen radiométrica de 8 bits contiene 255 niveles de grises y un valor nulo expresado en negro, esta característica permite diferenciar las superficies observadas partir de un brillo relativo (Khorram *et al.*, 2012). Un pixel desde el punto de vista radiométrico y espacial, es una unidad individual con valores espectrales escalados en niveles radiométricos que refleja la firma espectral de un lugar dentro de una imagen digital (Campbell y Wynne, 2011).

Figura 3.11 Resolución espectral y radiométrica.



Fuente: Richards, 2012.

Resolución temporal

Refiere a la periodicidad con que un sensor adquiere imágenes de la misma escena (Sobrino, 2001). Dicha característica depende de los objetivos y propiedades orbitales (órbita polar o geoestacionaria) de la plataforma-sensor.

3.3. Preprocesamiento y ajuste

La información que se obtiene del territorio por medio de fuentes satelitales varía debido a numerosos factores como la órbita terrestre, fenómenos atmosféricos, relieve y errores de captura por problemas del sensor o en la plataforma, que en conjunto generan procesos conocidos como error radiométrico y geométrico (Huete *et al.*, 2016; Tristán *et al.*, 2007). Para los propósitos de la teledetección, es necesario convertir los números digitales de la radiancia a reflectancia con la finalidad de restaurar los valores que tendrían en condiciones ideales en ausencia o minimización del efecto atmosférico, donde los valores se encuentren representados en una escala “normal y común”, a lo que se le conoce como proceso de normalización (Tristán *et al.*, 2008). Cada sensor requiere de cálculos de calibración específica (Campbell y Wynne, 2011).

Correcciones radiométricas

Se refiere al pre-procesamiento o método en el que se modifican los números digitales de una imagen cruda. El objetivo es simular la captura de la superficie hipotética en el que la energía electromagnética emitida por el Sol es reflejada de la superficie al sensor; sin embargo, el espectro registrado será modificado por el grado en que la atmósfera absorba y disperse selectivamente a la radiación (Losaponarana y Masini, 2012; Mather y Koch, 2011; Richards, 2012).

Al ajuste de una imagen con una unidad de referencia ortorectificada se le conoce como corrección geométrica, con ello la imagen tendrá una menor distorsión tanto en su geometría como en el sistema de coordenadas; sin embargo, las imágenes Landsat no requieren de este ajuste (Lasaponara y Masini, 2012). El objetivo de la corrección atmosférica es homogenizar los valores de brillo y minimizar la influencia atmosférica y sus interacciones tanto como sea posible. En los sensores de la constelación Landsat, los conjuntos de bandas son previamente calculados a partir del método de ganancia y sesgo (Richards, 2012).

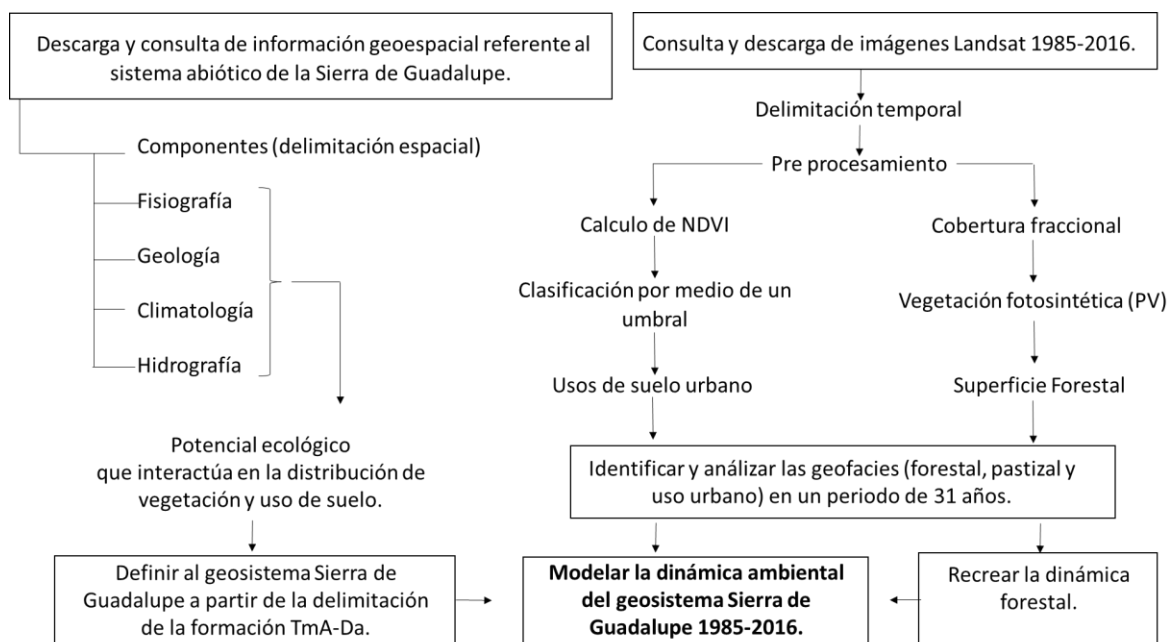
Capítulo 4

Método y resultados

En este capítulo se aborda la estrategia metodológica con la que se generó el modelo de representación cartográfica del geosistema Sierra de Guadalupe, las geofacies que la componen y la dinámica temporal de 31 años.

En el primer y segundo subcapítulo se aborda el inventario geoecológico en el que se reconocen los elementos abióticos y bióticos por medio de consultas cartográficas, con base en los componentes identificados, se define el orden taxonómico del paisaje; en el tercer subcapítulo se desarrolló un método de preprocesamiento y ajuste con el objetivo de estandarizar la información de las seis imágenes; en el cuarto subcapítulo se identificó las geofacies pertenecientes al geosistema Sierra de Guadalupe y a partir de los valores de reflectancia se llevó a cabo el análisis integral del paisaje; en el quinto subcapítulo se modeló la dinámica de paisaje, a partir de las seis fechas de muestreo y se recreó la dinámica ambiental en la Sierra de Guadalupe (figura. 4.1).

Figura 4.1 Estrategia metodológica.



4.1. Sistema natural abiótico

La Sierra de Guadalupe (SG) es un conjunto volcánico, cuya base promedio es de una altitud de 2 350 metros, se encuentra formado por depósitos volcánicos del mioceno y plioceno (Velázquez y Jaimes, 1989; SGM, 2002). Se ubica al centro de la cuenca de México rodeada por materiales lacustres, esto hace que el sistema montañoso sea como una isla orográfica en forma de herradura con dirección NE-SW (figura 4.2). Se localiza al norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) entre los límites de la Ciudad de México (CDMX) y del Estado de México dentro de la delegación Gustavo A. Madero (en la CDMX) y de los municipios de Coacalco de Berriozábal, Ecatepec de Morelos, Tlalnepantla de Baz y Tultitlán.

Componentes morfoestructurales

La Sierra de Guadalupe forma parte de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, su composición data del Mioceno temprano, piso geológico en el que la actividad magmática se desarrolló sobre las fracturas O-E, lo que generó sobre ellas una serie de erupciones de andesita y dacita con un espesor promedio de 600 a 700 metros (Tapia y López 2002; SGM, 2002).

La SG se compone de un conjunto de domos volcánicos y estratovolcanes colapsados. Los rasgos topográficos referentes a la génesis de estratovolcán son: Pico Tres Padres, C. Moctezuma, C. El Jaral, Picacho, C. Zacatenco y C. La Presa. La SG se encuentra seccionada por un sistema de fallas en dirección NE-SW, que en su conjunto forman el graben de Cuauhtepac ubicada en la cuenca central. El sistema de fallas más reciente corresponde a un conjunto de fallas normales con una dirección E-W, la cual forman el graben de Barrientos (García *et al.*, 2006). Los tipos de actividad volcánica corresponden a actividad de tipo explosiva, la cual formó a los grandes edificios volcánicos mediante procesos extrusivos, un último periodo de formación se caracteriza por una serie de procesos efusivos o cortos derrames de lava. Los domos volcánicos resultantes son formaciones rígidas de composición compacta (Lugo y Salinas, 1996).

Las laderas convexas son en general coladas de lava, por otro lado, las laderas cóncavas surgieron debido al intemperismo y por procesos gravitacionales. El pie de monte es una superficie de inclinación menor (8°), se encuentra formada principalmente por lava, material residual de los procesos gravitacionales y carga de fondo fluvial; la superficie inferior a 2 350 m.s.n.m. se encuentran compuestas por material lacustre del sistema de lagos de Texcoco (*Ibíd.*).

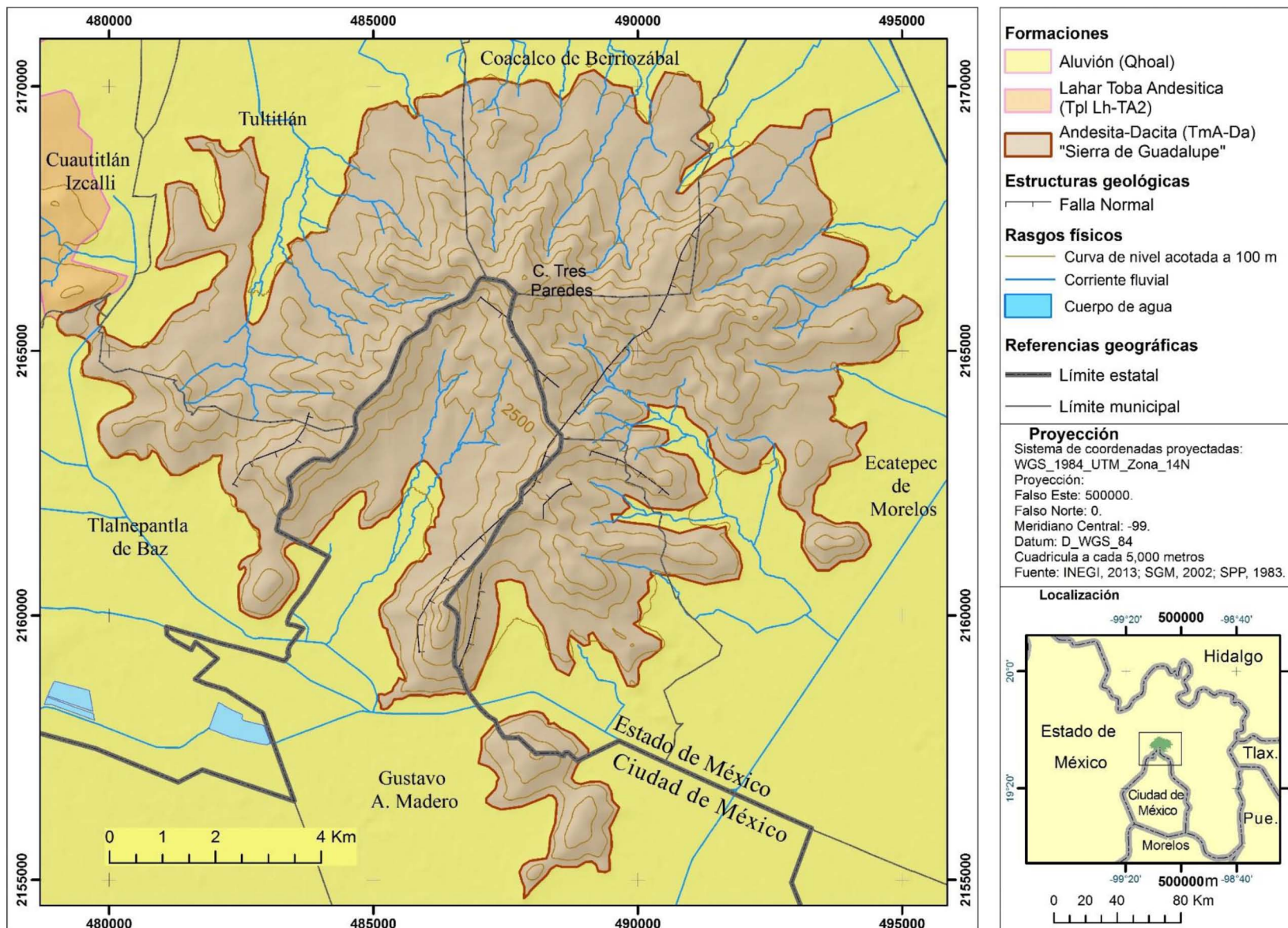
La SG presenta una serie de estructuras en forma de herradura, originadas por los procesos de remoción en masa, este fenómeno se presenta en las zonas elevadas de la Sierra, relacionado a los sistemas de fallas y a compuestos de flujos piroclásticos (García *et al.*, 2006).

Con base en la Carta Geológica-Minera Ciudad de México E-14-2 (2002) y de la carta geológica Cuautitlán E14a29 de la Secretaria de Programación y Presupuesto (1983) se define al geosistema Sierra de Guadalupe como un modelo geoespacial de aproximadamente 11 236 ha, los límites se ajustan a la formación geológica Andesita y Dacitas (Tm A-Da) que la forma, debido a que es un sistema que se rige por la energía potencial producto de su topografía que normaliza el sistema de flujo de materia y energía propio de la unidad (figura 4.2).

Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (2004) el clima predominante en la SG es templado subhúmedo con lluvias en verano C(Wo)(i'), sin embargo, ésta condición no es constante debido a la compleja topografía de la SG (Cedillo *et al.*, 2007; García *et al.*, 2006). Las precipitaciones predominantes en la SG son de origen ciclónico, en el que los niveles pluviométricos oscilan entre 600 y 700 milímetros (mm) anuales. La estación lluviosa corresponde a los meses de mayo a octubre con un 75% del valor anual de lluvia, mientras que la estación seca corresponde a los meses de noviembre y abril, la temperatura promedio mensual oscila entre los 24°C y 5.5°C , este valor desciende gradualmente hacia las zonas elevadas de la Sierra (Cedillo *et al.*, 2007).

Figura 4.2 Morfo-estructura y delimitación del geosistema Sierra de Guadalupe.



Hidrología

Conforme al Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas (SIATL), la SG se localiza al interior de la Región hidrológica río Panuco (RH26), en la cuenca hidrográfica río Moctezuma (D), en la sobcuenca Lagos de Texcoco y Zumpango. La formación de Andesita-Dacita (Tm A-Da) de la SG se distingue por ser poco permeable, por lo que la capacidad de infiltración es baja y por lo tanto la formación de acuíferos es escasa. El control estructural dado por sus sistemas de fallas permite la formación de un sistema de drenaje durante las temporadas de lluvia (SGN, 2002; Cedillo *et al.*, 2007; y García *et al.*, 2006). El escurrimiento fluvial de la SG es dominado por dos tipos de patrones de drenaje, el primero corresponde al tipo radial cuyo origen parte del núcleo topográfico de la SG, mientras que el segundo patrón es detrítico, propio de formaciones volcánicas; en menor medida se encuentra el patrón de drenaje angular. En términos generales los patrones de drenaje tienen un fuerte control estructural (García *et al.*, 2006). Los valles fluviales son erosivos de tipo "V" entre 10 a 200 metros (m) de profundidad, se caracterizan por ser estrechos con depósitos de aluvión y de cantos rodados. Las corrientes fluviales surgen de pequeñas fuentes cercanas a la cumbre (Lugo y Salinas, 1996).

4.2. Sistema natural biótico

En este subcapítulo se abordan las propiedades bióticas del geosistema SG, el dominio de las especies vegetales que la ocupan y la interacción que mantiene con el medio abiótico y cultural.

Vegetación

La vegetación de la cuenca de México se desarrolla sobre una gran cantidad de hábitats, debido a la situación geográfica de la unidad hidrográfica y por localizarse en latitudes tropicales a una altitud superior a 2 000 m.s.n.m. y con una variedad de relieves (Cedillo *et al.*, 2007), además por localizarse en el límite de la

región biogeográfica de la zona neártica y neotropical (Zunino y Zullini, 2003), dentro de ella se encuentran especies vegetales correspondientes al altiplanicie árido del norte del Continente Americano, de zonas tropicales centroamericanas y especies forestales alpinas (Rzedowski, 2006). El fenómeno histórico fitogeográfico de la cuenca de México se ha definido por no haber funcionado como un núcleo aislado de evolución florística, dado que la génesis del relieve ha influido en el proceso de ocupación y desarrollo de especies vegetales endémicas que se adaptaron a las condiciones morfoestructurales (Calderón y Rzedowski, 2001).

Strahler (2005) describe que la vegetación se puede clasificar según su forma biológica, de esta clasificación se extraen los siguientes estratos: herbáceo, arbustivo y arbóreo. De acuerdo con Cedillo *et al.*, (2007) la superficie de la SG está dominada por pastizales, arbustos y una menor porción por los bosques. La cobertura vegetal de la SG se encuentra compuesta por bosques mixtos del género *Quercus* y bosques inducidos de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, matorral xerófilo, pastizales inducidos y agricultura de temporal.

Los individuos que forman los bosques perennifolios de *Quercus rugosa* en promedio miden entre 5 y 12 m de altura. Estos bosques nativos se desarrollan entre las cotas de 2 500 y 2 800 m.s.n.m., se asocian con otras especies del mismo género taxonómico o con especies del género *Pinus*. Algunos bosquetes de *Bursera cuneata* y *Ipomoea murucoides*, se identifican como pequeños relictos de la vegetación antigua de la cuenca de México (Calderón y Rzedowski, 2001). Por otro lado las especies introducidas mediante las prácticas de silvicultura son: *Eucalyptus sp.*; *Casuarina equisetifolia* (casuarina); *Cupressus lindleyi* (cedro blanco); *Cupressus sempervirens* (ciprés panteonero), *Pinus cembroides*, *P. montezumae*, *P. patula* y *P. radiata* (Cedillo *et al.*, 2007).

Los matorrales xerófilos se distribuyen sobre suelos someros en zonas relativamente secas entre un rango de altitud de 2 250 a 2 700 m.s.n.m. Los pastizales se desarrollan en la zona discontinua entre los bosques de la SG y la periferia urbana (*Ibíd.*).

Edafología

Debido a la historia geológica de la SG los suelos son someros o inexistentes, de acuerdo con el sistema de clasificación de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación / Organización para la Educación, la Ciencia y la Cultura de las Naciones Unidas (FAO/UNESCO), los suelos de la SG son de tipo feozem háplico y leptosol lítico, dichas unidades de suelos se caracterizan por tener una pedregosidad de regular a abundante, con base en el Sistema de Capacidad de Uso elaborado en 1960 por *Soil Conservation Service* de Estados Unidos, se identificó que el uso adecuado de la SG corresponde a forestal con vida silvestre y protección de cuencas (Cedillo *et al.*, 2007; SPP, 1983).

4.3. Calibración y reflectancia

El sistema cultural se encuentra definido por el área urbana correspondiente a la infraestructura de la ciudad. De acuerdo con González y Arcia (1994), los usos de suelo y las comunidades vegetales representan tipos específicos de geofacies, definirla por medio de imágenes satelitales crudas, suponé utilizar técnicas de calibración, corrección y normalización radiométrica que revelen información cuantitativa y cualitativa sobre la composición superficial.

Para el caso de estudio se utilizó el *Sistema de Análisis de Landsat Carnegi Versión Lite* (CLASlite), es un software con base en investigaciones y técnicas de percepción remota, sustentado con procesos y metodologías biofísicas destinadas al análisis y mapeo automatizado de cobertura forestal, deforestación y degradación forestal. El método de calibración radiométrica contenido en el software consiste en convertir la información registrada por el sensor satelital en valores de reflectancia. La paquetería utiliza factores de conversión para la calibración radiométrica, datos de ganancia y compensación, que obtiene de los proveedores de los sensores satelitales para convertir las muestras de números digitales o de conteo en unidades de radiancia, es decir, vatios por metro cuadrado por unidad de ángulo sólido, también conocida como energía medida por el sensor satelital.

Para obtener una corrección atmosférica, CLASlite emplea el modelo de transferencia radiativa, el cual se basa en la abstracción teórica de una atmósfera estándar. El modelo de transferencia radiativo 6S, desarrollado por Erick Vermonte, simula las condiciones de la aereomasa en cada imagen satelital capturada, por medio de tablas de referencia de datos del sensor MODIS, que proporciona una cobertura global casi diaria, la técnica recrea la modulación del espectro electromagnético que pasa por la atmósfera, interactúa con el terreno y en la transmisión hacia el sensor satelital. A partir del proceso la imagen se corrige, al eliminar el estimado de la atmósfera interactuante, con base en ello se obtiene como resultado una imagen corregida atmosféricamente, en unidades de reflectancia superficial o de porcentaje representados por números enteros de 0 a 10 000, donde 10 000 corresponde al 100% (Asner *et al.*, 2009; CLASlite Team, 2003; Levin, 1999).

Para ello se prepara las imágenes crudas procedentes del sensor Landsat, en el que se genera un paquete compuesto por los archivos raw, therm y QA (en el sensor OLI). Se ingresan las imágenes producto del proceso de preparación, se reduce el enmascaramiento y se genera una calibración final, la cual se conforma de un conjunto de 6 bandas enmascaradas y calibradas a una reflectancia superficial con valores menores a 10 000, sin embargo, al revisar el histograma, se encontraron valores de reflectancia inferiores a cero (figura 4.3 b).

Por último se estandarizó el efecto de la distribución en el histograma, por medio de un método que consiste en normalizar los valores a partir de los datos de la propia imagen con la finalidad de reducir la incidencia de falsos positivos; este método se basa en el ajusté de los niveles de reflectancia en un rango de 0 a 10,000. Con ello se obtuvo una imagen de reflectancia de la superficie recuperada en un factor de escala de 10 000, donde 10 000 supone el 100% de la reflectancia de la imagen y cero cuerpos oscuros sin reflectancia (figura 4.3 c). De este proceso se generó un conjunto de seis imágenes normalizadas referentes al área de estudio (figura 4.4). La corrección radiométrica final no elimina los fenómenos atmosféricos o hechos topográficos como si fuese un cuerpo invisible, dado que únicamente

homogeniza la distribución de los valores para su apropiado procesamiento (Richards, 2012; Jensen, 2007).

Figura 4.3 Proceso de calibración vista en color verdadero, donde; a) información cruda (adquisición), b) calibración radiométrica y c) normalización.

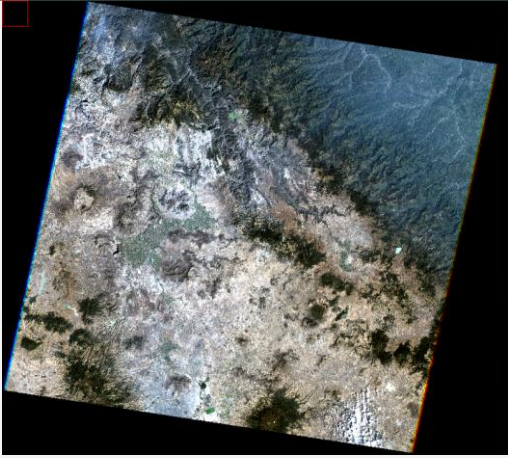
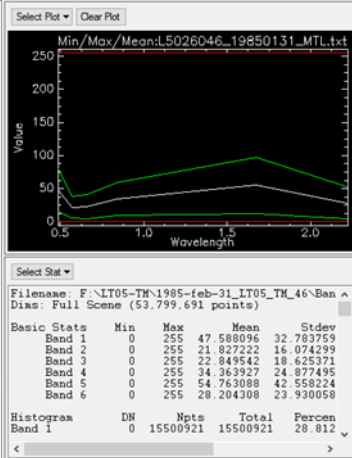
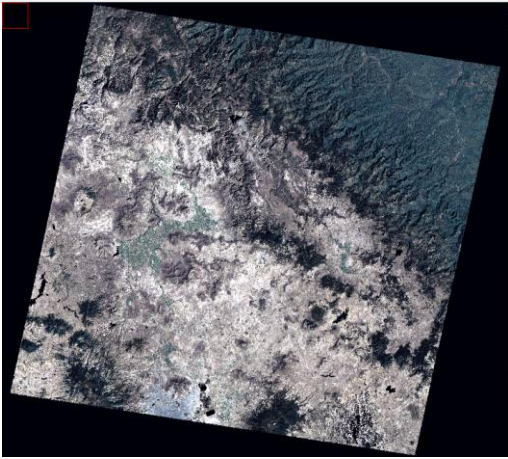
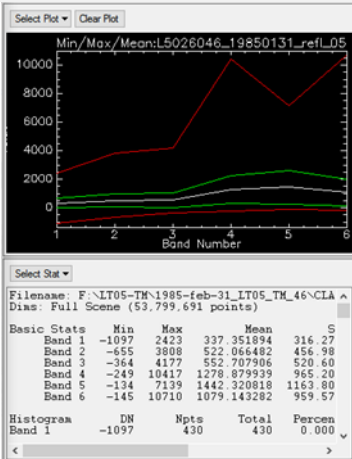
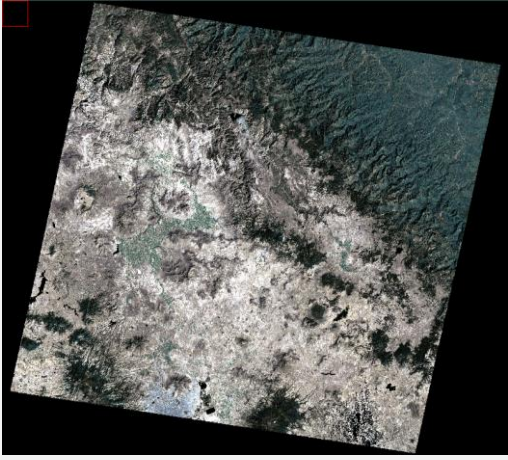
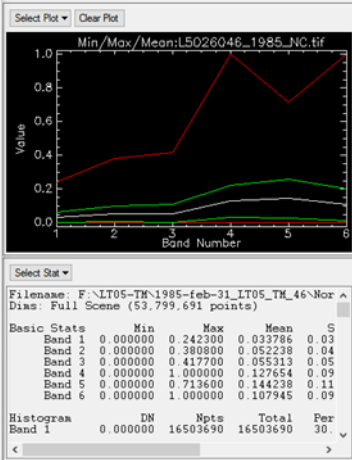
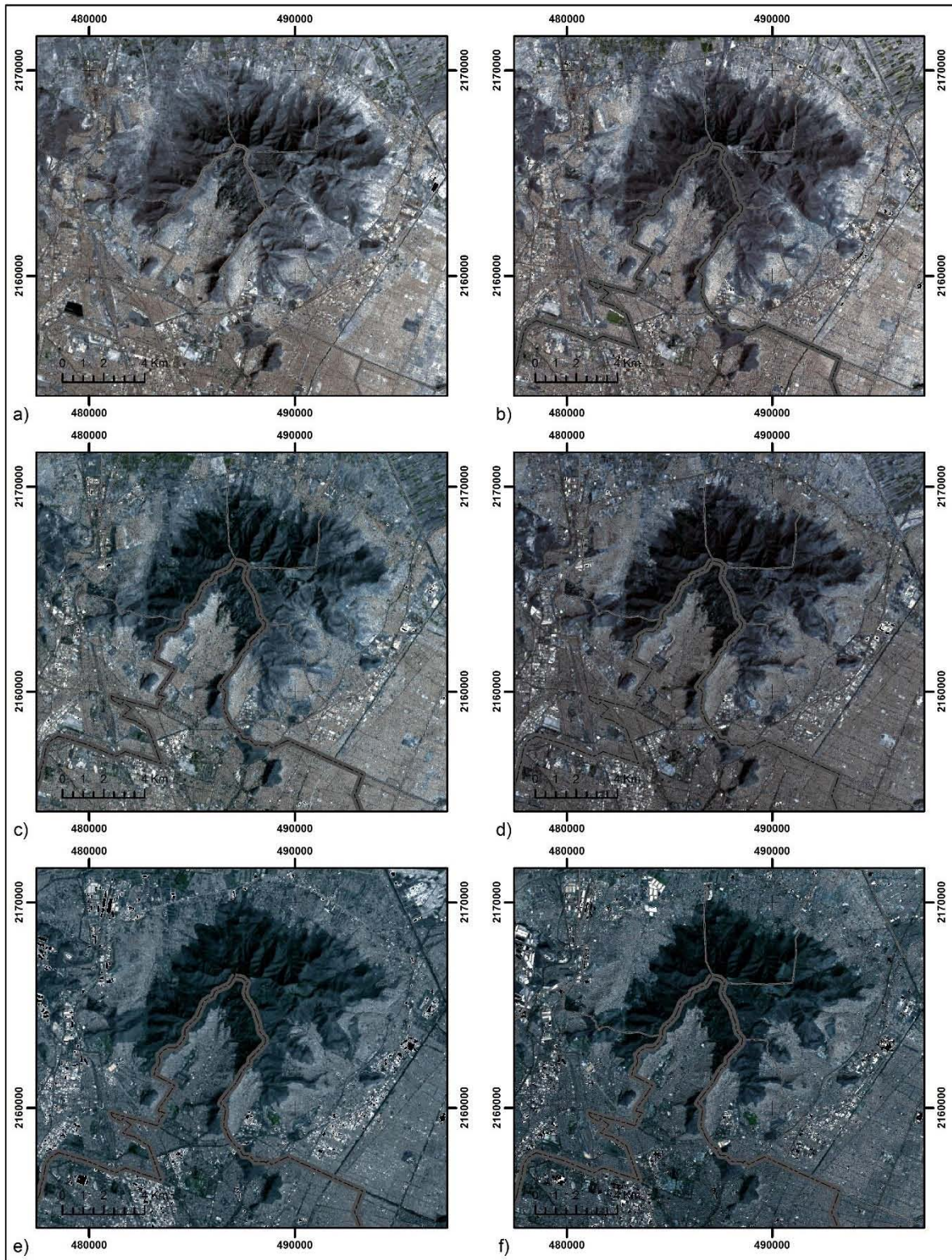
	Escena	Histograma	Propiedades
a)		 <pre> Select Stat ----- Filename: F:\LT05-TM\1985-feb-31_LT05_TM_46\Ban Dims: Full Scene (53,799,691 points) Basic Stats Min Max Mean Stdev Band 1 0 255 47.588096 32.783759 Band 2 0 255 21.827232 16.074299 Band 3 0 255 22.849542 18.625371 Band 4 0 255 24.363927 24.877495 Band 5 0 255 54.763088 42.558224 Band 6 0 255 28.204308 23.930058 Histogram DN Npts Total Percen Band 1 0 15500921 15500921 28.812 </pre>	Información cruda: los valores definidos en radiancia, en un rango de 0 a 255 ND.
b)		 <pre> Select Stat ----- Filename: F:\LT05-TM\1985-feb-31_LT05_TM_46\ClA Dims: Full Scene (53,799,691 points) Basic Stats Min Max Mean S Band 1 -1097 2423 337.351894 316.27 Band 2 -655 3808 522.064482 456.98 Band 3 -364 4177 552.707906 520.60 Band 4 -249 10417 1278.879939 965.20 Band 5 -134 7139 1442.320818 1163.80 Band 6 -145 10710 1079.143282 959.57 Histogram DN Npts Total Percen Band 1 -1097 430 430 0.000 </pre>	Reflectancia: valores calibrados en un factor de escala, donde 10 000 es igual a 100%, Nubes y sombras enmascaradas.
c)		 <pre> Select Stat ----- Filename: F:\LT05-TM\1985-feb-31_LT05_TM_46\Nor Dims: Full Scene (53,799,691 points) Basic Stats Min Max Mean S Band 1 0.000000 0.242300 0.033786 0.03 Band 2 0.000000 0.380800 0.052238 0.04 Band 3 0.000000 0.417700 0.055313 0.05 Band 4 0.000000 1.000000 0.127654 0.09 Band 5 0.000000 0.713600 0.144238 0.11 Band 6 0.000000 1.000000 0.107945 0.09 Histogram DN Npts Total Per Band 1 0.000000 16503690 16503690 30. </pre>	Imagen Normalizada (ideal): En una escala que va de 0 a 10 000, donde 10 000 es igual a 100%. Sin valores negativos.

Figura 4.4 Imágenes normalizadas, donde a) 1985, b) 1990, c) 1995, d) 2000, e) 2010 y f) 2016.



— Límite estatal
 — Límite municipal

4.4. Clasificación y transformación

Identificar la dinámica de los cambios de uso de suelo por medio de la segmentación espectral de múltiples imágenes de una escena permite generar, localizar y recrear los cambios dados en la estructura territorial (Yengoh *et al.*, 2015).

La energía electromagnética que refleja la superficie de la Tierra no es homogénea, dado que cada unidad de paisaje presenta una composición material y estructural única (Richards, 2012; Biondi *et al.*, 2004). A partir de esta postura parte el método de segmentación del territorio, donde una escena se descompone en geofacies, por medio de una clasificación raster, que consiste en agrupar a los píxeles en clases de coberturas temáticas (Lira, 2009).

La agrupación homogénea de píxeles con propiedades semejantes entre sí, forma paquetes uniformes dentro de la imagen, en la práctica este proceso representa el método de clasificación temática de la escena; la cual será general o específica de acuerdo a las propiedades de la imagen y de la escala del fenómeno a analizar (Keller y Smith, 2014). Transformar un conjunto de bandas espectrales supone utilizar procesos aritméticos en combinaciones lineales (sumas, multiplicaciones o divisiones) entre bandas espectrales, cuyos resultados evidencian una agrupación de los datos originales (Chuvienco, 1995).

Con base en el contenido espectral de una superficie se tipifica a los conjuntos en subconjuntos en función de la composición material (tipos de suelo, tipos de cobertura vegetal) y objetos que la forman, (infraestructura urbana), el método resulta ser la visualización fenosistémica (horizontal) del territorio y por lo tanto la base para definir y delimitar las geofacies de un sistema territorial (Lasaponara y Masini, 2012; González, 1981; Dávila y Romero, 1992). La asignación de categorías espectrales a informativas consiste en clasificar a los píxeles en grupos, que contengan valores semejantes, por medio de una clasificación supervisada o no supervisada o de alguna agrupación por medio de umbrales que aglomere al conjunto de píxeles en grupos homogéneos que representen un tipo de superficie (Campbell y Wynne, 2011; Lillesand y Kiefer, 1994).

Los cocientes o ratios, son un tipo de operación aritmética (división), dadas pixel por pixel, entre los números digitales almacenados en dos o más bandas de una imagen. A partir de este principio se sustenta el índice de vegetación en el que se combina la banda correspondiente a infrarrojo cercano y rojo (Chuvieco, 1995). Los índices de vegetación son considerados como una fuente de información sobre el estado, distribución de biomasa, distintos compuestos fotosintéticos, densidad, distribución foliar, contenido de agua en las hojas e identificación de infraestructura urbana (Zha *et al.*, 2003; Yengoh *et al.*, 2015).

El índice de vegetación permite calcular valores de reflectividad y extraer información referente al brillo de la superficie, con ello se discrimina la cobertura de vegetación respecto a otras variables, calcular la cobertura fotosintética de la superficie terrestre y los impactos en términos de pérdida de unidades biofísicas en mediano y largo plazo. Un índice muy sofisticado corresponde al Índice de vegetación normalizado (NDVI, *Normalised Difference Vegetation Index*), que se obtiene a partir de la relación diferencial entre las medidas de la banda infrarrojo cercano (IR) y banda roja (R), de cualquier sensor multiespectral (Evans y Lasaponara, 2012; Yengoh *et al.*, 2015; Sobrino, 2001; Zha *et al.*, 2003).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

En este estudio se llevó a cabo un NDVI, se utilizó las bandas normalizadas de las seis fechas de análisis; se despejaron con las bandas espectrales de los sensores TM y OLI:

$$NDVI(TM) = \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \qquad NDVI(OLI) = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

Se generó un proceso de clasificación NDVI donde se obtuvieron seis imágenes de salida normalizadas en un intervalo comprendido entre -1 y +1, donde los valores más altos corresponden a superficie con una alta biomasa, mientras que los valores más bajos corresponden a suelo expuesto o infraestructura urbana, a simple vista se observa el incremento de la cobertura fotosintética en una frecuencia de tiempo (figura 4.5).

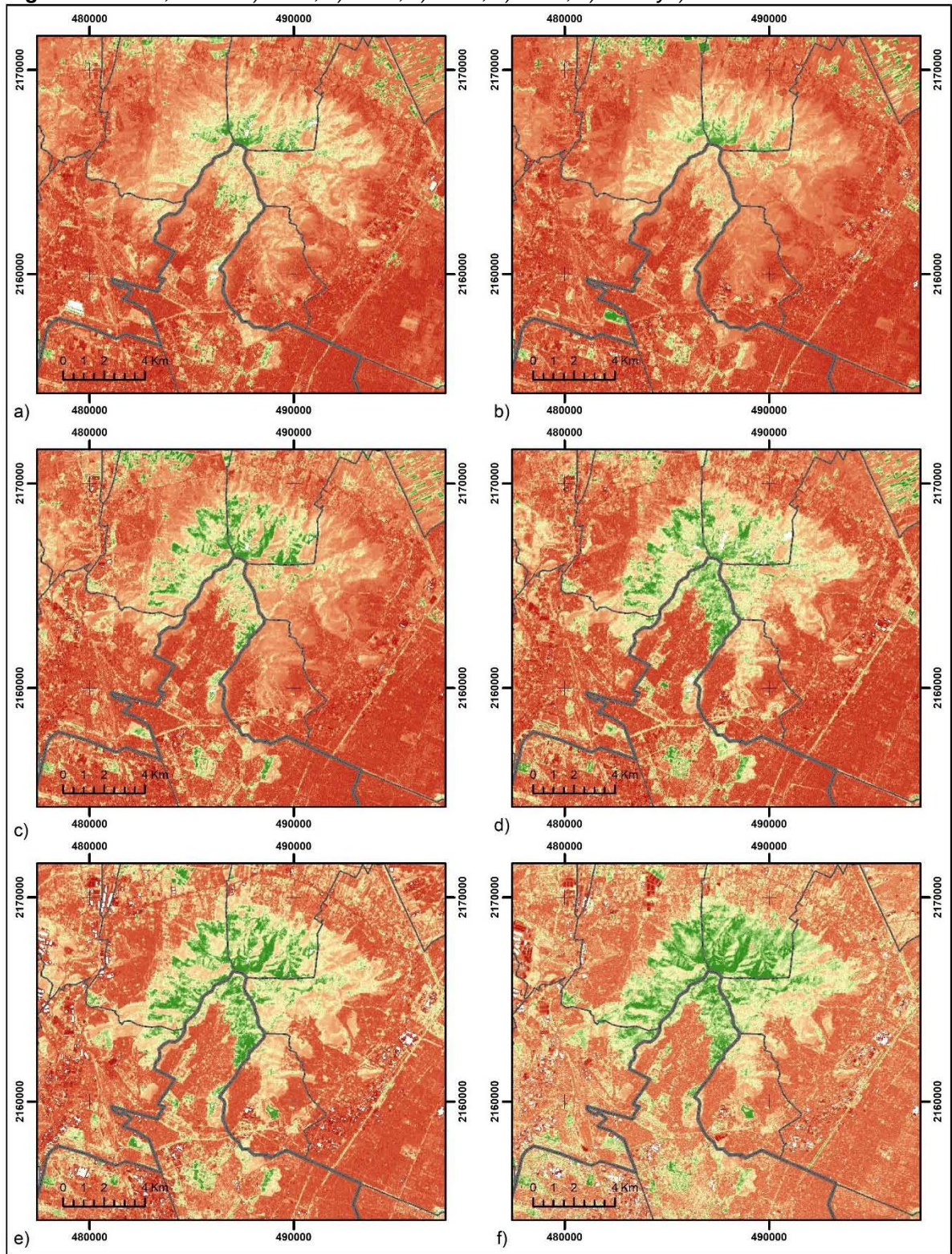
Las clases con una menor reflectancia fotosintética, se seleccionaron para delimitar la distribución del área urbana (Zha *et al.*, 2003; Yengoh *et al.*, 2015), a partir de un análisis se dividió la muestra en un umbral de 0.20. Los datos > 0.20 fueron considerados como otras coberturas y los valores < 0.20 se nombraron uso de suelo urbano. Se llevó a cabo una segmentación de las imágenes en el software QGIS¹². Con base en los resultados las seis imágenes fueron clasificadas y se generó un conjunto de salida en formato vectorial que corresponde a la superficie de uso de suelo urbano en 1985, 1990, 1995, 2000, 2010 y 2016 (figura 4.6).

Del conjunto de imágenes correspondientes al uso de suelo se observan las siguientes situaciones; la primera es que para el año 1985 la infraestructura urbana empieza a ocupar parte de la ladera sur de la SG, los espacios discontinuos dentro del área urbana corresponden a parques, escurrimiento fluviales o centros recreativos con algún tipo de vegetación, mientras que las líneas rectas espaciadas entre infraestructura urbana evidencian vialidades con componentes fotosintéticos (jardineras). El proceso de urbanización no corresponde a una línea continua, sino a un espacio poco denso que con el tiempo se aglomera en función de la dirección del proceso de periurbanización (figura 4.6).

La naturaleza propia del paisaje urbano tiende a tomar más atención que otras superficies, como uso de suelo no corresponde a un material único, dado que contiene materiales correspondientes a infraestructura urbana (concreto, asfalto, metal), vegetación y suelo descubierto, en consecuencia la clasificación de su superficie no es homogénea (Antonini, 2008; Weeks J.R. 2010).

¹² QGIS o Quantum GIS, es un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto.

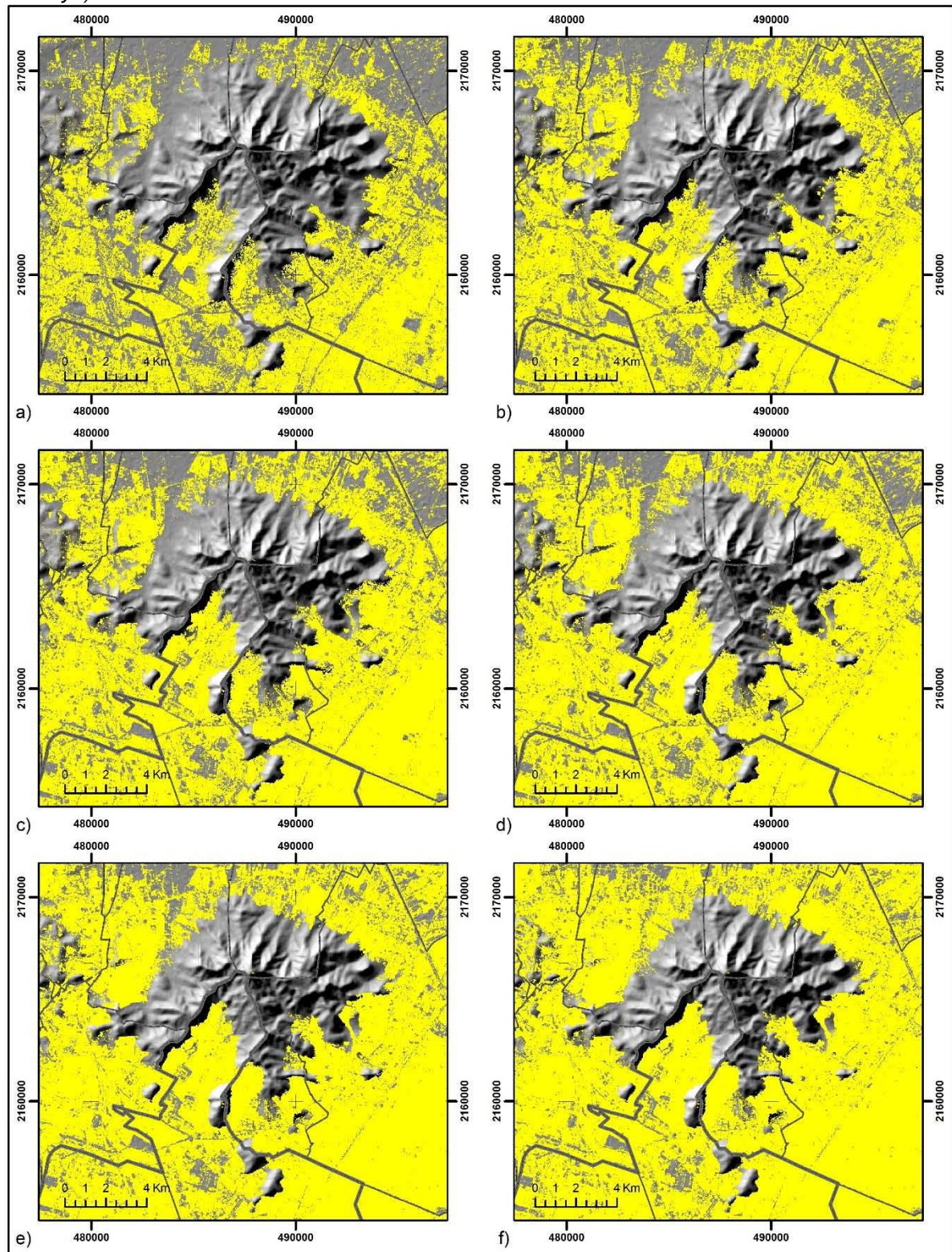
Figura 4.5 NDVI, donde a) 1985, b) 1990, c) 1995, d) 2000, e) 2010 y f) 2016.



— Límite estatal
— Límite municipal



Figura 4.6 Uso de suelo urbano derivado del NDVI, donde a) 1985, b) 1990, c) 1995, d) 2000, e) 2010 y f) 2016.



Coberturas fraccionales (AutoMCU o Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo).

El análisis de las fracciones de cobertura representa el núcleo de CLASlite, se basa en un algoritmo para la segmentación biofísica de una imagen digital. El método AutoMCU, es un enfoque probabilístico basado en la biofísica del dosel, clasifica a cada pixel de una imagen en fracciones de cobertura (figura 4.7), en este proceso se le asigna a los pixeles un paquete de clases de forma porcentual dado que un solo pixel de 30 x 30 m no contiene un tipo de cobertura, por lo tanto es un análisis a nivel sub pixel donde las clases de estudio son: vegetación fotosintética (PV), vegetación no fotosintética (NPV) y sustrato expuesto (S). En este método, CLASlite considera a los pixeles no como una unidad homogénea sino como un pixel heterogéneo que contiene distintos elementos del paisaje, para un modelaje cercano a la realidad fotosintética; la función AutoMCU selecciona de forma interactiva un espectro de PV, NPV y S de cada biblioteca espectral, con lo que segrega la información del pixel en fracciones de cobertura que se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho(\lambda)\text{Pixel} = \sum [C_e \cdot \rho(\lambda)_e] + \varepsilon = [C_{pv} \cdot \rho(\lambda)_{pv} + C_{npv} \cdot \rho(\lambda)_{npv} + C_{substrate} \cdot \rho(\lambda)_{substrate}] + \varepsilon$$

Donde $\rho(\lambda)_e$ es la biblioteca de firmas, (e) reflectancia, λ la longitud de onda y ε es un término de error. La solución de cada fracción (C_e) requiere que las observaciones de satélite [$\rho(\lambda)$ pixel] almacenen información espectral para resolver una serie de ecuaciones lineales, en diferentes longitudes de onda (λ). El método calcula las posibles combinaciones de los caracteres espectrales puros de una escena, el proceso de selección aleatoria se repite hasta 50 veces o cuando la solución converja en un valor medio para cada superficie fraccional (figura 4.8).

CLASlite descompone a la fracción de cobertura en una medida proporcional, donde los rangos de clasificación van de 1 a 100 %, al ser una clasificación probabilística esta condición suele variar. A partir de este proceso se obtuvo seis imágenes de salida pertenecientes a las fechas ya mencionadas, cada una de ellas contiene seis bandas que se describen a continuación:

- ❖ Banda 1: Fracción de Cobertura Sustrato Expuesto (*S*), representa el suelo expuesto, rocas, infraestructura humana. Expresada en porcentaje (0-100%).
- ❖ Banda 2: Fracción de Cobertura Vegetación Fotosintética (*PV*), representa a la vegetación viva, la cual tiene propiedades espectrales únicas asociados con los pigmentos fotosintéticos de las hojas, el contenido de agua del dosel y la cantidad del follaje en el dosel (0-100%).
- ❖ Banda 3: Fracción de Cobertura Vegetación no Fotosintética (*NPV*), representa a la vegetación senescente y muerta. Incluye la hojarasca superficial, residuos de la deforestación por tala y los pastos en decadencia. La firma espectral de este tipo de está asociada con compuestos de carbono seco contenido en las hojas muertas y madera expuesta (0-100%).
- ❖ Banda 4: Incertidumbre de la Fracción *PV*, expresada como la desviación estándar de las iteraciones de AutomMCU.
- ❖ Banda 5: Incertidumbre de la Fracción *NPV* expresada como la desviación estándar de las iteraciones de AutoMCU.
- ❖ Banda 6: Error Total, expresado como el EMRSE de la firma de reflectancia modelada.

Al final se obtuvo un conjunto de seis imágenes referente a las temporalidades de estudio, las cuales contienen tres coberturas de fracción, en la figura 4.9 se muestra la combinación RGB de las bandas fraccionales *S* (*R*), *PV* (*G*) y *NP* (*B*) correspondientes al área de estudio, en el conjunto de imágenes la cobertura fotosintética (*PV*) representada en color verde es una expresión de la cubierta vegetal del Geosistema SG la cual se encuentra rodeada por tonalidades naranja, violetas y azules correspondientes a suelo descubierto o infraestructura urbana.

Figura 4.7 Identificación de las fracciones de cobertura y enmascaramiento, a partir de un falso color RGB en el que S (R), PV (G) y NPV (B).

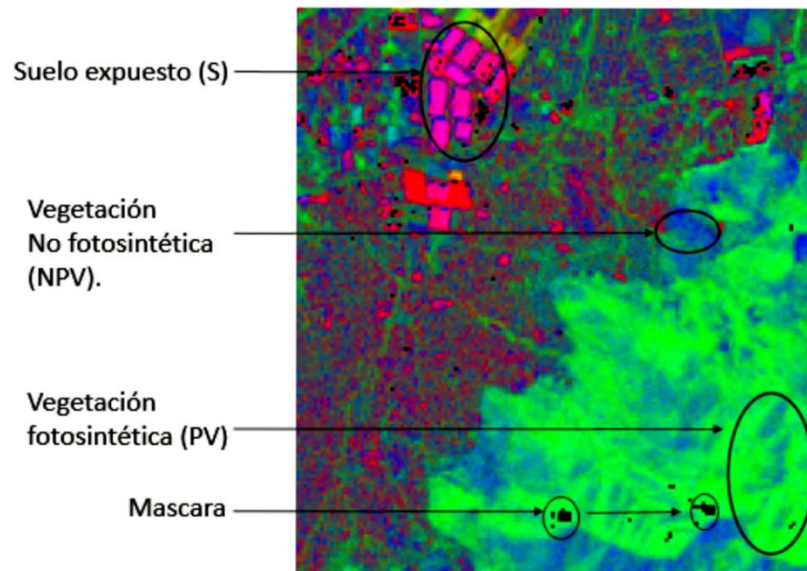
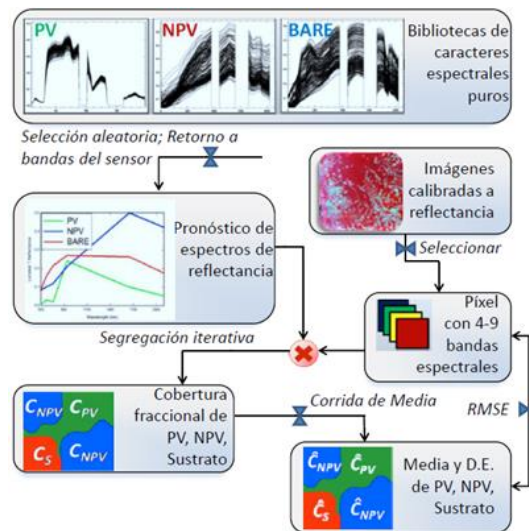
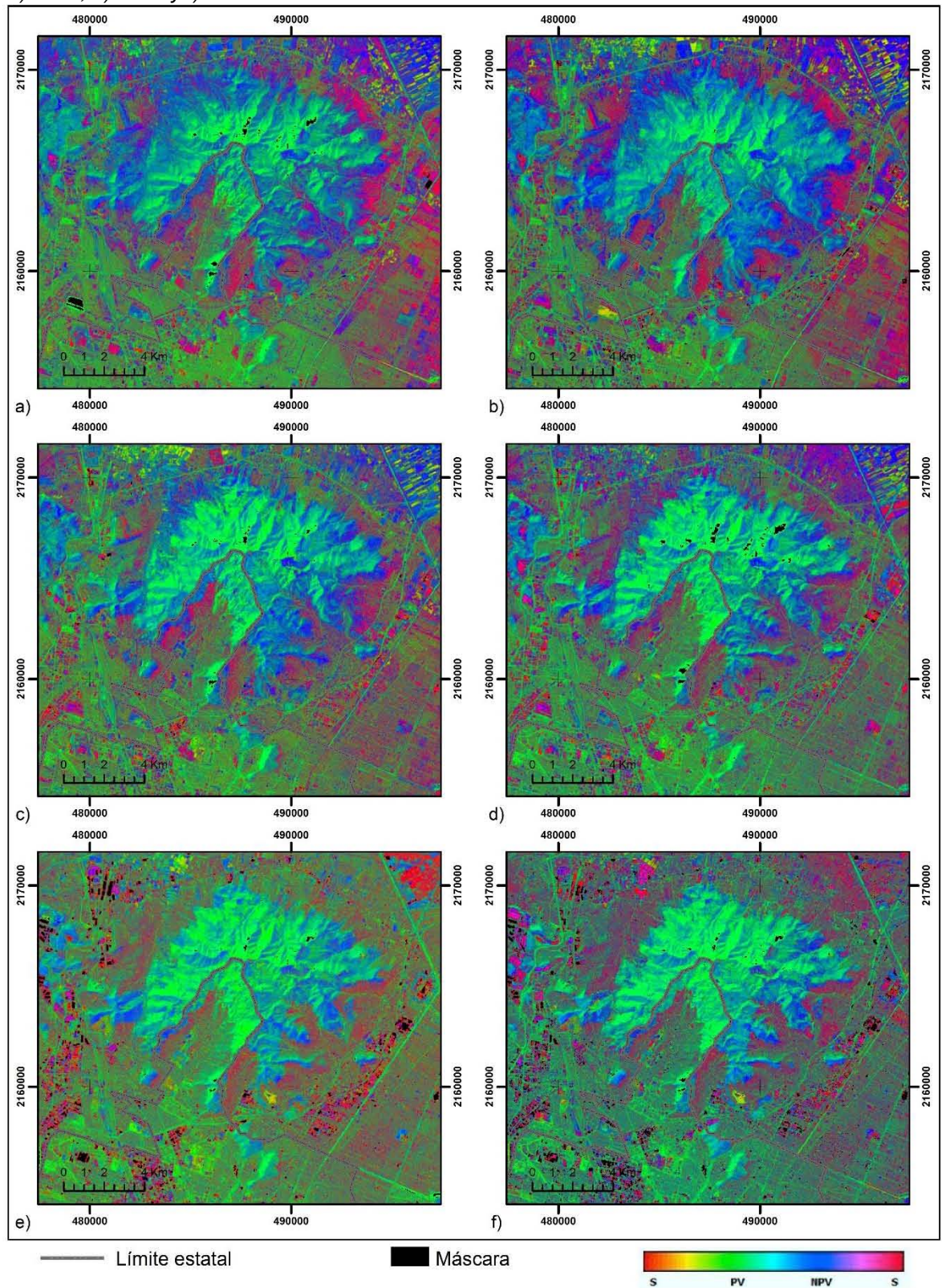


Figura 4.8 Procesamiento del sub-modelo de Segregación Espectral Automatizada (AutoMCU) en CLASlite.



Fuente: CLASlite Team, 2003.

Figura 4.9 Imágenes que muestran las coberturas fraccionales, donde a) 1985, b) 1990, c) 1995, d) 2000, e) 2010 y f) 2016.



Clasificación de la cobertura boscosa

Corresponde a un método en el que se identifica la cobertura boscosa y no boscosa a partir de una sola imagen de satélite. Para ello CLASlite utiliza las coberturas fraccionales y un árbol de decisión en el que:

Bosque: $PV \geq 80$ y $S < Sval$

Área no boscosa: $PV < 80$ y $S > Sval$

Donde PV es la fracción de superficie fotosintética en el pixel, S es la cobertura correspondiente al sustrato expuesto en el pixel y Sval es el umbral definido por el usuario que permite sintonizar el mapeo con las condiciones actuales del bosque. Resulta ser un árbol de decisiones simple, la imagen final corresponde a la distribución teórica del bosque. En el proceso se conservaron los valores definidos de CLASlite. La imagen de salida contiene los siguientes valores:

0 – Pixeles enmascarados.

1 – Bosque.

2 – No bosque.

A partir de este método se obtuvo un conjunto de archivos raster extensión tif correspondientes a la cobertura forestal de cada fecha de estudio. Posteriormente se transformaron a archivos vectoriales, con la finalidad de conocer las medidas geométricas de la superficie. Se extrajo el valor cero o máscara de las seis temporalidades y por medio de la herramienta de geoprocésamiento “*Combine*” de QGIS se sumaron las máscaras de las seis temporalidades con la finalidad de obtener una sola máscara final, que elimine los falsos positivos en el análisis multitemporal (figura 4.10). Se editaron las capas de las distintas temporalidades (1985, 1990, 1995, 2000, 2010 y 2016) que representan las superficies de suelo forestal y urbano, para contenerlas en formato vectorial.

Se editaron las poligonales de las seis fechas de estudio con la herramienta de geoprocésamiento “*Erase*”, la cual permite eliminar los píxeles aislados comunes entre el uso de suelo urbano y uso de suelo forestal, con lo que se obtuvo un conjunto de imágenes de salida pertenecientes al área boscosa y área urbana. El espacio marcado entre área urbana y el dosel se consideró como geofacie pastizal, para la generación del archivo vectorial se generó un polígono que cubriera el espacio vacío dado entre las geofacies uso de suelo urbano y forestal.

A partir de la resolución propia de las seis temporalidades y de lo descrito por Geri *et al.*, 2008, se determinaron las siguientes geofacies a analizar, que son: bosque, área urbana y pastizales (cuadro 4.1).

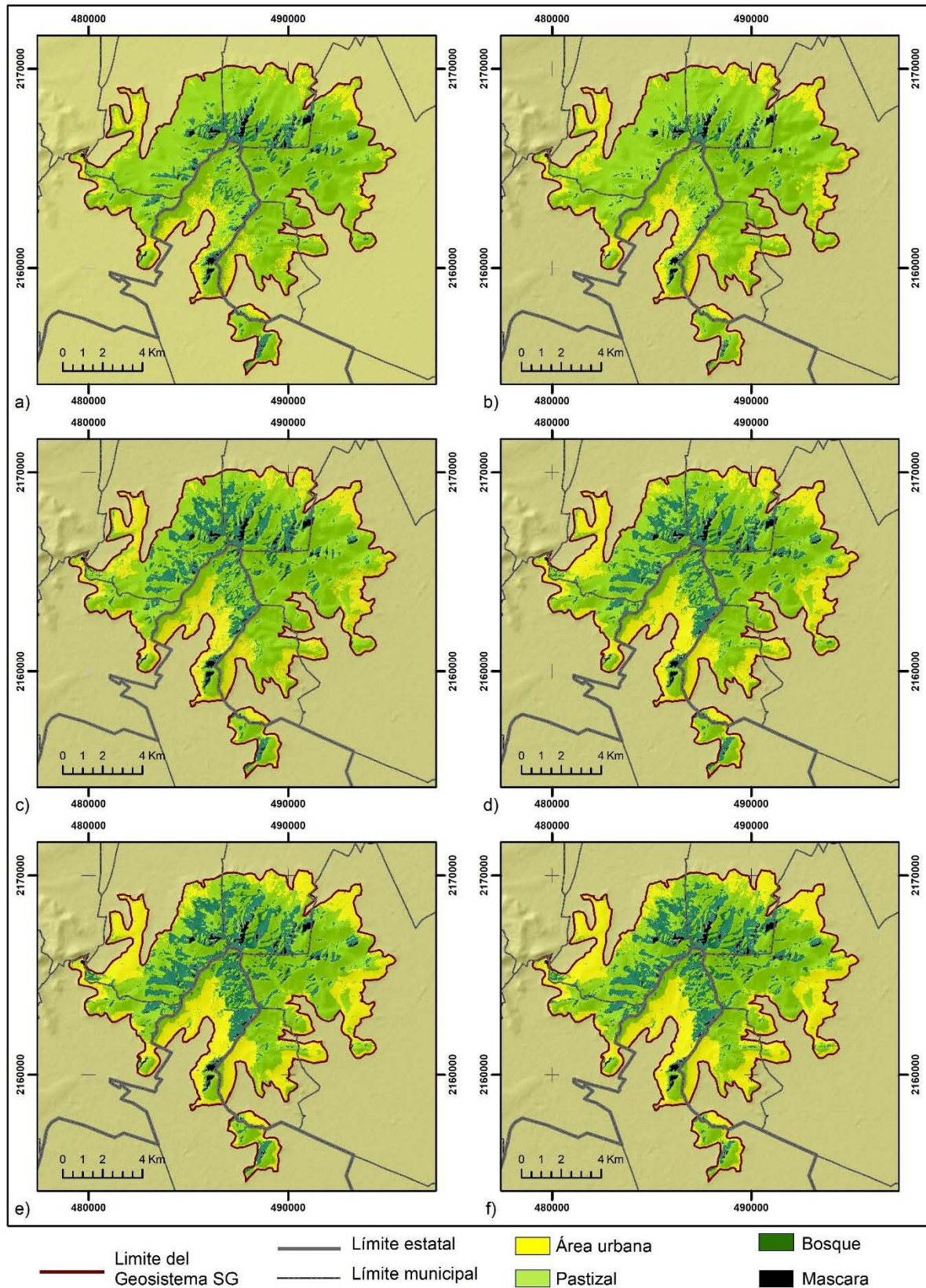
Cada tipo de superficie tiene su firma espectral única, a partir de ello se extraen unidades de paisaje básicas como: áreas urbanas, cuerpos de agua, matorral y bosque (Geri *et al.*, 2008). En este estudio se utilizó el término geofacie y en función de la resolución espacial de la imagen, se generó un mosaico de usos de suelo y vegetación propios de cada fecha de estudio (figura 4.10).

Cuadro 4.1 Geofacies y sus características.

<i>Geofacie</i>	<i>Descripción de la clase de uso de suelo</i>
<i>Bosque</i>	Área que evidencia un cobertura boscosa superior al 45
<i>Área natural y seminatural (Pastizal)</i>	Área arbustiva, estrato herbáceo natural, relieve expuesto, zona de pastoreo o de siembra con árboles aislados
<i>Área Urbana</i>	Antroposistema (infraestructura urbana)
<i>Cuerpos hídricos</i>	Superficies pertenecientes a la hidrosfera
<i>Sin datos</i>	Sin información, debido a las propiedades de captura de la imagen

Fuente: Geri *et al.*, 2008.

Figura 4.10 Geofacias del geosistema Sierra de Guadalupe, en perspectiva temporal, donde a) 1985, b) 1990, c) 1995, d) 2000, e) 2010 y f) 2016.



4.5. Dinámica del paisaje

La detección del cambio de uso de suelo por medio del uso de datos de sensores remotos, surge del supuesto de que las imágenes capturadas de un mismo lugar en dos fechas distintas, al ser comparadas varían en los niveles de radiancia capturada y se logra identificar áreas con alteraciones significantes, las cuales son delimitadas y clasificadas para revelar la dinámica fenológica, el cambio de uso de suelo o de cobertura vegetal (Singh, 1989).

La arqueología del paisaje, permite visualizar de forma temporal la dinámica dada entre las unidades y las nuevas características adquiridas. Los cambios de uso de suelo son evidentes al sobreponer dos mapas del mismo lugar en distintas fechas, con ello se muestra que las unidades espaciales o polígonos cambian en tamaño y forma, por lo tanto de componente espacial (Rodríguez y Olivella, 2011).

El análisis del espacio geográfico parte del desglose de los componentes que interactúan como un sistema, a partir de ello, se logra entender las causas y consecuencias del desarrollo de las actividades humanas y procesos naturales (Quintero, 2009). La cobertura forestal es una geofacie evidente (Forman, 1995); hacer un análisis integral de la distribución teórica del bosque permite identificar los procesos de deforestación, permanencia forestal y forestación, que revela un panorama acerca de la dinámica espacial y temporal del dosel.

Para recrear la dinámica de la cobertura forestal, se combinaron las coberturas vectoriales de bosque correspondientes a 1985, 1990, 1995, 2000, 2010 y 2016, por medio de la herramienta de geoprocésamiento “*Union*” de QGIS, con lo que se obtuvo una cobertura vectorial equivalente a la distribución teórica del dosel en el periodo de 1985 a 2016.

Se combinaron las bandas PV de las seis fechas de estudio por medio de la herramienta “*Combine Raster*” de QGIS, el resultado fue cortado por medio de la herramienta “*Clip*”, donde la capa vectorial de la distribución teórica del bosque 1985-2016 se utilizó como base de corte; este proceso asegura que las seis

imágenes de análisis contienen 28 494 píxeles ordenados por medio de un ID de 0 a 28 493, en cada imagen, esto quiere decir que el píxel con un ID 0 de 1985 será el mismo que el píxel con ID 0 de 1990 o 2016 así sucesivamente hasta el píxel 28 493. Las tablas de los archivos raster PV de las seis temporalidades se exportaron a formato dbf, esto con la finalidad de ser cargadas a una sola hoja de cálculo, para analizar de forma estadística las variables continuas equivalentes a los valores porcentuales de la superficie fotosintética de 1985-2016 (cuadro 4.2).

El objetivo de la estadística es describir de forma simple la muestra obtenida; por lo tanto, es necesario simplificar las variables por medio de un cambio de unidad (Gorgas *et al.*, 2009). Con este principio se redujeron los datos a partir de la diferencia entre los valores de las bandas PV, se obtuvo un cambio de unidades por medio de la transformación lineal, que consiste en transferir una variable “y” a otra “x”. A partir de este principio se generó una diferencia vectorial entre las temporalidades por píxel, por ejemplo (cuadro 4.2):

1990-1985 = D 1

1995-1990 = D 2

2000-1995 = D 3

2010-2000 = D 4

2016-2010 = D 5

Con el resultado se generó un promedio por píxel de las seis temporalidades, con lo que se obtuvo una salida, en la que el píxel tiene un nuevo atributo equivalente al promedio de las diferencias vectoriales por ID. Se define a la media aritmética \bar{x} o promedio como una tendencia central que se obtiene al sumar los puntajes de un conjunto de n mediciones dividida entre n unidades (Mendenhal *et al.*, 2010).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$\sum_{i=1}^N x_i$ Que significa $x_1+x_2+x_3+\dots +x_N$

La media se calcula a partir de la suma los distintos valores de x y al dividir el resultado por el número de datos. Una propiedad del promedio es que la suma de las desviaciones de un conjunto de sus datos respecto a su media es igual a cero, en otras palabras, la media equilibra las desviaciones positivas y negativas respecto a su valor, por lo que el promedio representa un centro geométrico del conjunto de medidas. Se generó un promedio por pixel de las cinco diferencias y como producto de salida se obtuvo un atributo correspondiente a vector promediado por pixel o ID (cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Ejemplo de la tabla de análisis por pixel, donde se muestran los valores PV y los valores lineales (D 1, D 2... y D 5) producto de la diferencia de la temporada 2-1 o 1990-1985 y el vector promedio de diferencias.

ID	1985	1990	1995	2000	2010	2016	D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	Vector Promedio
0	43	44	44	85	76	51	1	0	41	-9	-25	1.6
1	38	27	36	68	93	87	-11	9	32	25	-6	9.8
2	40	33	50	67	80	83	-7	17	17	13	3	8.6
3	34	30	43	65	93	83	-4	13	22	28	-10	9.8
4	36	30	38	44	81	88	-6	8	6	37	7	10.4
5	61	58	72	45	78	67	-3	14	-27	33	-11	1.2
6	32	18	40	46	87	82	-14	22	6	41	-5	10
7	37	23	42	45	85	86	-14	19	3	40	1	9.8
8	65	47	65	74	79	84	-18	18	9	5	5	3.8
... 253	88	63	75	47	47	62	-25	12	-28	0	15	-5.2
...28493	77	77	73	78	80	88	0	-4	5	2	8	2.2

Se promedió el campo “vector promedio” (cuadro 4.2), equivalente a 2.1, con base en ello se define la lógica del vector (cuadro 4.3). A partir de esta lógica se reclasificó la tabla de atributos en la que los datos entre ± 2.1 se les asignó una categoría nominal nombrada “Permanencia”, los datos con valores < -2.1 fueron nombrados “Deforestación” y aquellos > 2.1 se les asignó la categoría “Forestación” (cuadro 4.4).

Cuadro 4.3 Lógica del vector promedio a partir de los valores porcentuales de la banda PV.

Lógica de vector promedio	
Forestación	> 2.1
Permanencia	0 ± 2.1
Deforestación	< -2.1

Cuadro 4.4 Conjunto de variables donde se simplifica el vector promedió a lógica de vector.

<i>ID</i>	<i>Vector Promedio</i>	<i>Lógica del vector</i>
0	1.6	Permanencia
1	9.8	Forestación
2	8.6	Forestación
3	9.8	Forestación
4	10.4	Forestación
5	1.2	Forestación
6	10	Forestación
7	9.8	Forestación
8	3.8	Forestación
...253	-5.2	Deforestación
...28493	2.2	Forestación

Tal síntesis se debe al hecho de que +- 2.1 corresponde al centro geométrico de la muestra, por lo tanto es equivalente a la permanencia forestal, los datos negativos se expresan como pérdida o degradación fotosintética, mientras que los datos positivos como ganancia de cobertura fotosintética.

Se exportó el archivo raster a formato vectorial para obtener la distribución espacial y las medidas geométricas en hectáreas de la superficie y un mapa que describe la dinámica espacial del dosel (figura 4.11); se calculó la superficie deforestada, en permanencia y forestada en el periodo de 1985-2016. En el cuadro 4.5 se muestra la superficie forestada que es casi equivalente al área de dosel en permanencia, por otro lado la superficie deforestada es de 152 hectáreas.

Cuadro 4.5 Dinámica de la cobertura forestal de la SG en ha 1985-2016.

<i>Estado</i>	<i>Superficie Ha.</i>
<i>Deforestación</i>	152
<i>Permanencia</i>	1294
<i>Forestación</i>	1126

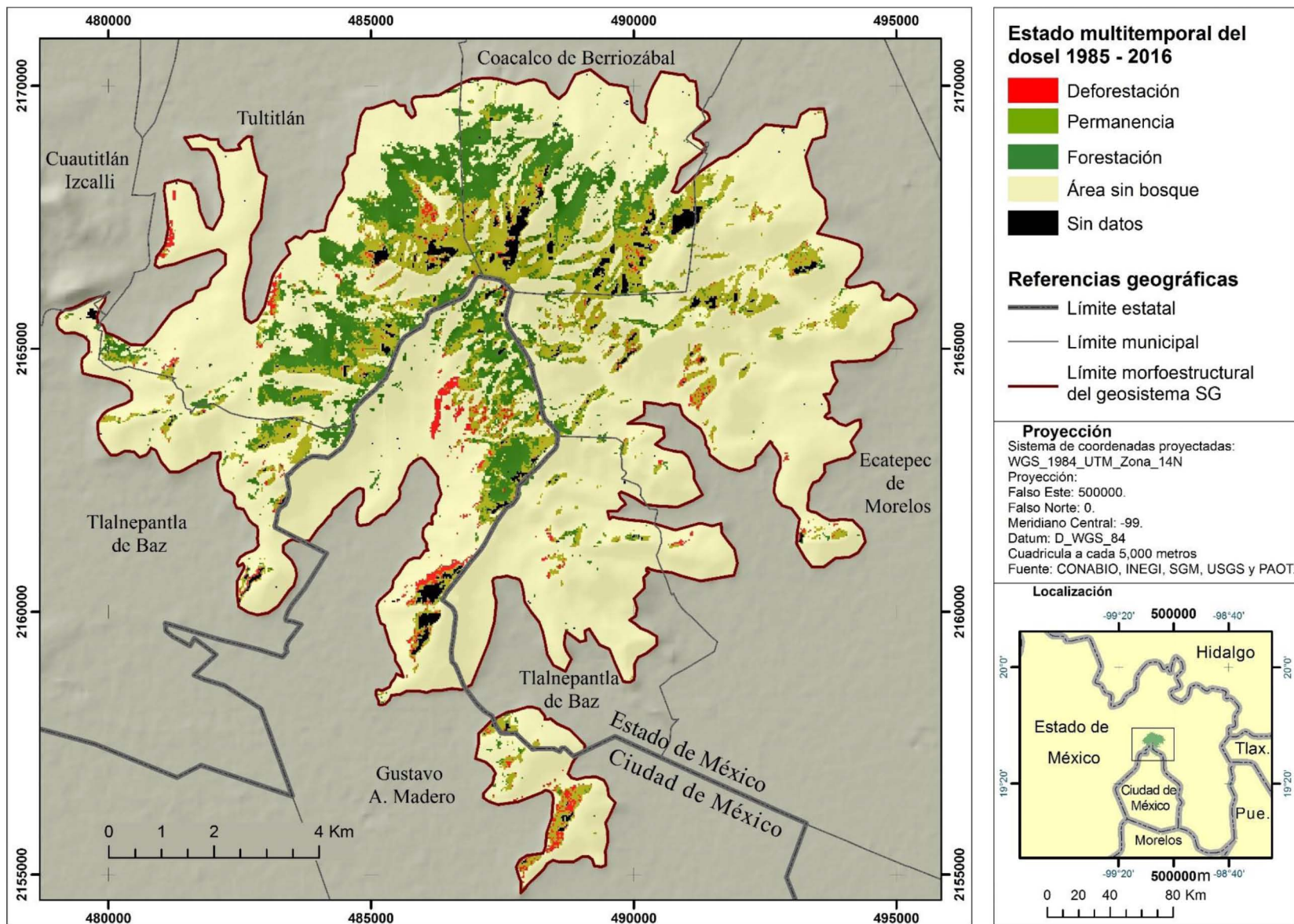
En la figura 4.11 se identifica que las zonas en permanencia forestal se mantienen en el núcleo de la Sierra de Guadalupe, las coberturas forestales estables mantienen esa condición a causa de la topografía, por lo tanto han recibido un menor impacto, de acuerdo con la carta de usos de suelo y vegetación E14-2 (INEGI, 2016). La vegetación en permanencia en la cumbre de la Sierra corresponde a la distribución forestal de bosques mixtos *Quercus sp.*, los hábitats compuestos por corredores forestales nativos contienen especies endémicas de la cuenca de México.

La distribución de la flora y fauna asociada a un estrato vegetal se correlaciona con los factores geomorfológicos, climáticos, hidrográficos y a los distintos tipos de suelo, por lo tanto; el término hábitat es referido a un medio físico en específico que sustenta una comunidad biótica. En consecuencia se compone de un conjunto de elementos caracterizados por la biocenosis que integra fragmentos o corredores que sostiene de manera espacial el desarrollo de una especie (Delfín *et al.*, 2011).

La figura 4.11 muestra que la superficie forestal aumentó significativamente en un periodo de 31 años, su desarrollo se dio en los alrededores del bosque en permanencia y en pequeñas porciones aisladas, no obstante, de acuerdo con Cedillo *et al.*, (2007), los espacios forestados no corresponden con especies nativas, sino a diversos proyectos de forestación.

La deforestación y la forestación con especies exóticas, evidencia una serie de efectos negativos como la pérdida de recursos genéticos, la alteración de los suelos, la modificación de los sistemas hidrológicos e hidrográficos, los cambios en los ciclos bioquímicos, por lo tanto; un deterioro ambiental (Pérez, 2012). Los bosques representan gran parte de la biomasa; almacenan la energía solar y fijan el carbón, por lo que la distribución resulta ser un elemento clave para localizar la energía y materia contenida sobre la superficie terrestre en forma de carbón (Miller, 2002).

Figura 4.11 Dinámica de la cobertura forestal de la Sierra de Guadalupe 1985-2016.



Los bosques son coberturas espaciales que llegan a ser modificadas por las actividades humanas, al grado de que se generará una conversión de uso forestal a suelo expuesto, condición que se define como deforestación. Los incendios y la tala selectiva generan un deterioro sobre el dosel, dicha perturbación sobre la cobertura boscosa se define como degradación del bosque (CLASlite Team, 2003).

Los bosques son conjuntos estables que se mantienen más o menos constantes a pesar de los cambios naturales o por la interacción directa e indirecta que mantiene con el ser humano. Un bosque estable genera una serie de bienes y servicios ambientales indispensables para el desarrollo de múltiples organismos, no obstante, pierden la cualidad de un estado estable al entrar en pérdida de biomasa. Este fenómeno se puede identificar por la resiliencia¹³ y resistencia, desde el punto de vista forestal; la primera, es la capacidad del bosque de recuperarse tras fenómenos de perturbación significativos, por un lado, la segunda, se define como la cualidad del bosque de tolerar cambios originados por perturbaciones (Thompson, 2012), no obstante, como se observa en el área de estudio, el remplazo de cobertura forestal por superficie urbana no tendrá algún tipo de recuperación, sin embargo, el bosque en permanencia muestra un cierto tipo de resistencia debido a las condiciones topográficas de la sierra (figura 4.11; 4.12).

Los cambios de mayor importancia se reconocen por la presencia de vacíos dentro de la cobertura del dosel, estas áreas pobladas por vegetación herbácea evidencian la antigua presencia de cobertura forestal removida por las actividades humanas, por lo tanto es una condición que refleja la pérdida de resiliencia, que surge cuando el estado de un bosque presenta una modificación parcial o total con transición a pastizal que se sobreponen a las comunidades nativas (Thompson, 2012; Casado y Miguel, 1997). En la figura 4.11 se observa que la cobertura forestal no es completamente homogénea dado que hay áreas desprovistas de masa forestal tanto en la cumbre como en las laderas del complejo montañoso, sin

¹³ Capacidad de adaptación de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que ha estado sometido (Calaza, 2016).

embargo, no es suficiente prueba para decir que existe un aprovechamiento directo de los recursos forestales.

La palabra dinámica es entendida como relativo a la fuerza que produce un movimiento (Máximo y Alvarenga, 2006), para el presente estudio del medio ambiente, se define como dinámica ambiental al fenómeno dado por el desplazamiento de las geofacies de un sistema territorial; en este proceso los cambios de uso de suelo representan el actuar de las fuerzas sociales sobre los estratos vegetales dentro del geosistema Sierra de Guadalupe.

Para representar la dinámica ambiental del geosistema Sierra de Guadalupe, se utilizó al conjunto de geofacies de las seis temporalidades. Para ello, se editaron las capas uso de suelo urbano y cobertura forestal, cada una de las geofacies fue procesada, de la siguiente forma, la capa 2010 cortó a la capa 2016 por medio la herramienta “*Erase*”, con lo que se obtuvo el desplazamiento dado entre 2010 y 2016, por medio del mismo método, la capa 2000 cortó a la capa 2010, la capa 1995 cortó a la capa 2000, la capa 1990 cortó a la capa 1995, la capa 1985 cortó a la capa 1990 y por último la capa 1985 se conservó. Los resultados de los cinco archivos vectoriales y la capa 1985 correspondiente a los cortes de uso de suelo urbano y bosque se sumaron con ayuda de la herramienta “*Merge*” con el resultado se obtuvo de forma cartesiana el proceso evolutivo de la forestación y el desarrollo del área urbana en el periodo de 1985 a 2016. La capa deforestación del mapa anterior, se utilizó para sobreponer a los resultados, con ello se muestra que la urbanización generó procesos de deforestación. El pastizal en permanencia parte de la última capa correspondiente a geofacie pastizal 2016 (figura 4.12).

A partir de los resultados de la figura 4.12 se identifica que la reducción del estrato vegetal es originado por el desplazamiento de la infraestructura urbana; por lo tanto, la dinámica de cambio de uso de suelo surge de una presión demográfica que afecta de manera negativa a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, a causa de la demanda del recuso suelo. El mapa de la figura 4.12 representa la síntesis estructural y dinámica del territorio, esta última etapa evidencia el arreglo medio ambiental de la Sierra de Guadalupe.

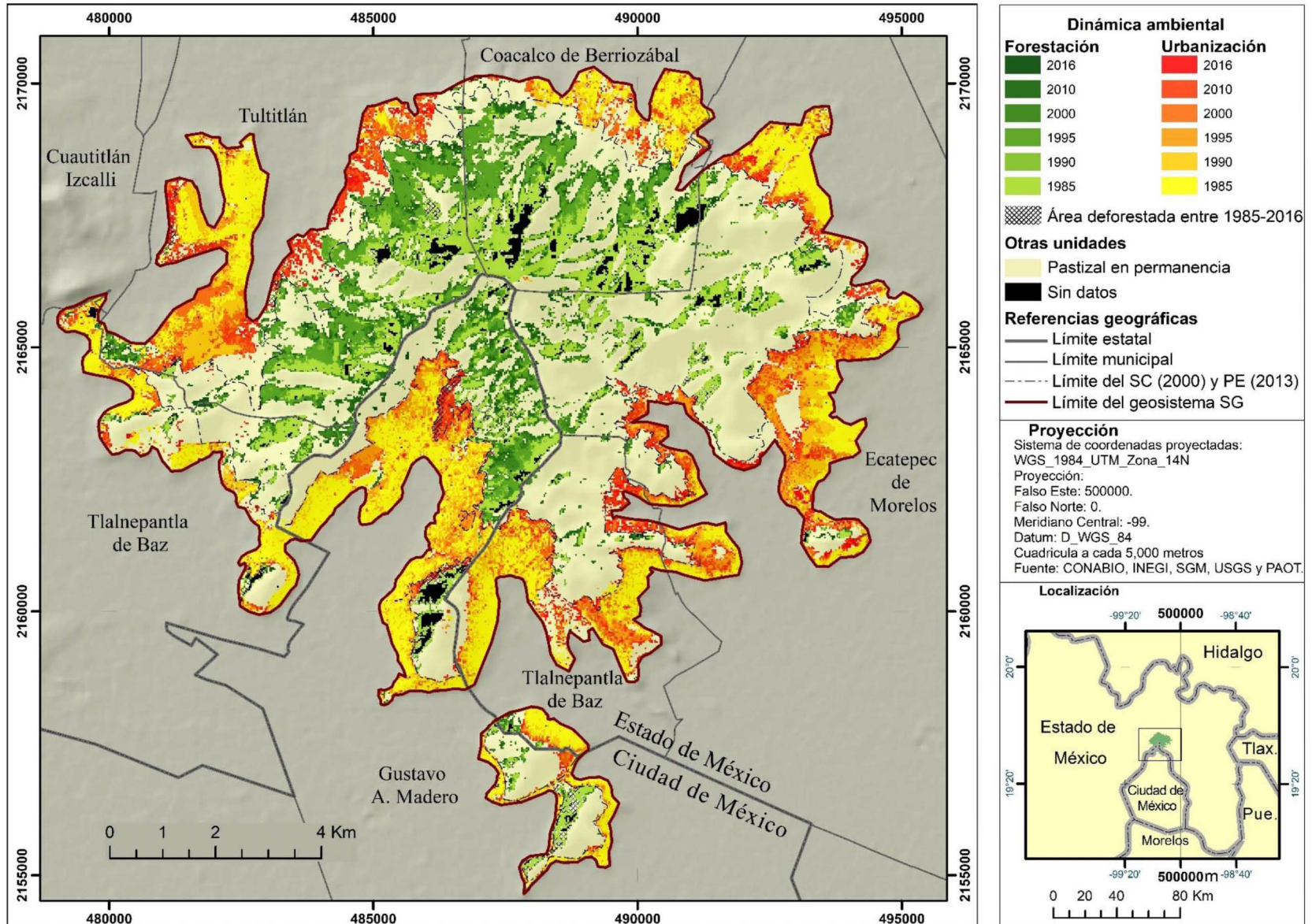
El cuadro 4.6 muestra en valores porcentuales y en hectáreas el cambio de uso de suelo dado entre la infraestructura urbana y las geofacies bosque y pastizal, lo que marca una tendencia decreciente de las superficies vegetales, por otro lado, el proceso forestación ha desplazado a la geofacie pastizal. Se estima que 142 ha de la Sierra de Guadalupe sujetas a un programa de conservación ecológica han sido debido al establecimiento de infraestructura urbana (figura 4.12).

Cuadro 4.6 Síntesis de la dinámica ambiental de las unidades de paisaje de la SG de 1985 -2016.

Tipología temática	Superficie temporal en Ha						
	1985	1990	1995	2000	2010	2016	Cambio
<i>Bosque</i>	1058 (9%)	515 (5%)	1635 (15%)	1708 (15%)	2059 (18%)	1964 (17%)	907 (8%)
<i>Pastizales y matorrales</i>	8477 (75%)	8243 (73%)	6727 (60%)	6266 (56%)	5505 (49%)	5330 (47%)	-3147 (-28%)
<i>Área Urbana</i>	1507 (13%)	2284 (20%)	2680 (24%)	3068 (27%)	3478 (31%)	3748 (33%)	2241 (20%)
<i>Sin datos</i>	194 (2%)	194 (2%)	194 (2%)	194 (2%)	194 (2%)	194 (2%)	0 (2%)

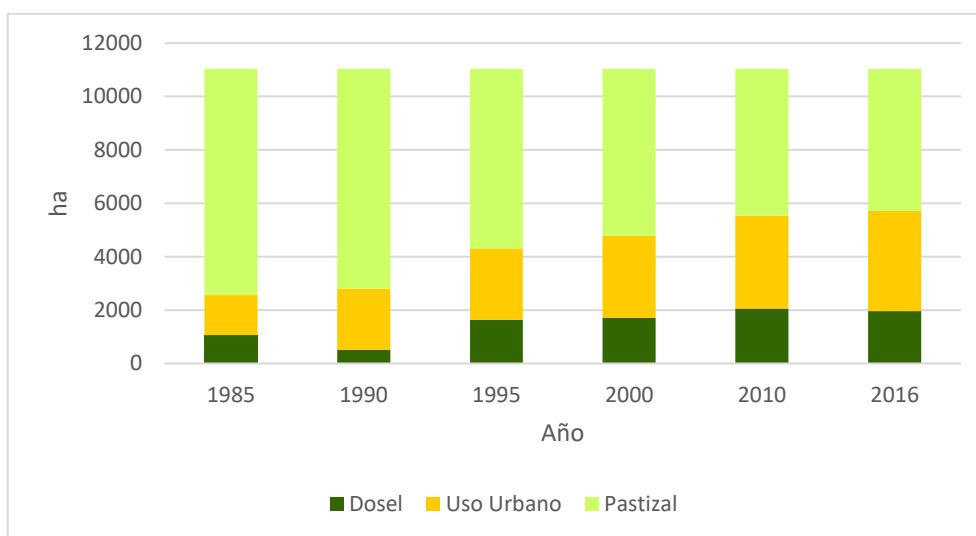
La dinámica ambiental del geosistema Sierra de Guadalupe se define como el proceso en el que las geofacies se desplazan en función del aprovechamiento del recurso suelo, con ello se retoma la hipótesis dado que el desarrollo urbano y los planes de conservación ecológica, representan las causas de la dinámica ambiental, los efectos son dos; tanto un aumento del desarrollo urbano sobre el medio natural próximo, el cual a rodeado al complejo montañosos Sierra de Guadalupe y el aumento de cobertura forestal; el principal impacto resulta ser la disminución espacial y el aislamiento de un relicto biótico de la cuenca de México, por medio del establecimiento de infraestructura urbana sobre elementos naturales próximos (cuadro, 4.7; figura 4.12, 4.13).

Figura 4.12 Dinámica ambiental del geosistema Sierra de Guadalupe 1985-2016.



Cuadro 4.7 Análisis de las unidades de paisaje 1985-2016.

Unidad de paisaje	Caracterizar	Desarrollo en %	Impacto
Bosque	Superficie homogénea de dosel	8%	Zonas deforestadas por infraestructura urbana o pastos
Pastizal	Área herbácea, arbustos, suelos descubiertos, siembra y árboles aislados	-28%	Perdida por el desplazamiento de infraestructura urbana
Área Urbana	Infraestructura urbana compuesta de distintos materiales	20%	Cambios inadecuados de uso de suelo

Figura 4.13 Dinámica ambiental en hectáreas.

El análisis del geosistema Sierra de Guadalupe, se generó a partir del desglose de la unidad territorial en componentes pequeños en un tiempo delimitado, con ello se identificaron los parámetros espaciales y temporales que muestran la causa, efecto e impacto de la dinámica ambiental (cuadro 4.7). El conjunto de resultados muestra que el espacio geográfico guarda una expresión que surge del acomodo horizontal y vertical de sus componentes en un tiempo específico, el arreglo de la figura 4.12 concuerda con la primera ley de la Geografía o de la autocorrelación espacial de Tobler (1970), que afirma que “todas las unidades están relacionadas entre sí, pero las unidades cercanas están más relacionados que las distantes”.

Conclusión

Este estudio es un primer acercamiento en el que se ha logrado representar de forma cartesiana y estadística la dinámica dada entre la conservación ecológica y el desarrollo urbano en la Sierra de Guadalupe (SG), la utilidad de los resultados se muestran al identificar patrones espaciales y temporales o zonas de interés entre la dinámica urbana y forestal.

El Geosistema Sierra de Guadalupe es un modelo espacial delimitado por la formación geológica TmA-Da; las geofacies que la componen fueron identificadas a partir de las propiedades electromagnéticas de la superficie, con base en la resolución del sistema sensor Landsat TM y OLI, se definieron tres tipos de geofacies sustentadas por sus firmas espectrales, estas unidades de paisaje son: cobertura forestal, pastizal y uso de suelo urbano.

El análisis del geosistema SG se dio a partir de la identificación y segmentación de geofacies en seis fechas de estudio, lo cual permitió recrear la evolución de cada unidad en un periodo de 31 años, entre 1985-2016. En el desarrollo de la investigación se evidencio los cambios que experimentados por la distribución biótica y cultural, fenómeno que se expresa por la ganancia o pérdida espacial entre las geofacies; a este proceso en la investigación se le nombró desplazamiento de geofacies que es la base de la dinámica ambiental en la SG.

Los resultados evidenciaron que el desarrollo de la geofacie área urbana y bosque desplazaron a la geofacie pastizales. El crecimiento urbano ha modificado a los elementos naturales cercanos a su periferia, de tal modo que hay un cambio irreversible sobre el hábitat que fue desplazado y ha quedado rodeado por la infraestructura urbana; la dinámica forestal presento tres tendencias, una inicial correspondiente a una deforestación entre 1985 y 1990; un forestación entre 1990 y 1995; y una aparente estabilidad entre 2000 y 2016 que coincide en tiempo con el desarrollo de programas de conservación ecológica (figura 4.13, 1.2).

El patrón de desarrollo del área urbana de la Ciudad de México sobre la SG, se muestra con una mayor intensidad hacia la ladera sur del complejo montano

debido a la cercanía con la ciudad central, no obstante, el proceso se ha mantenido homogéneo en el resto de la sierra, tal crecimiento irregular rebasa la capacidad de los límites de espacios sujetos a conservación ecológica, de continuar con este ritmo urbano, se vulnerará la distribución de la vegetación, por lo tanto, la calidad de los servicios ambientales existentes en la cuenca de México.

El fenómeno ambiental muestra dos posturas sociales acerca del complejo montañoso SG; la primera como espacio reservado al desarrollo urbano y la segunda como un área sujeta a la restauración ecológica. Por lo tanto, la representación cartográfica del espacio geográfico en perspectiva temporal muestra la forma en que las sociedades humanas generan su espacio en función de sus necesidades, intereses y expectativas colectivas.

El estado del Geosistema SG se encuentra en reexistencia debido a la pérdida del equilibrio entre el potencial ecológico y la explotación biológica. Se distingue a la SG como un geosistema seminatural geobiocenoide dado que sus componentes naturales aún persisten, sin embargo, fueron modificados en estructura y función por la interacción directa de los agentes sociales.

Con base en los resultados se considera dinámica ambiental, al desarrollo dado en el sistema territorial, originado por las unidades de paisaje que interactúan en función de los procesos sociales o fenómenos naturales, en el que la correlación horizontal de uso de suelo y vegetación parte del legado de la necesidad de recurso espacio por parte de una sociedad. El suelo, es el recurso espacial de cualquier actividad humana, la conversión del uso surge de necesidad de espacio ya sea por ocupación urbana o algún tipo de aprovechamiento, que desplace coberturas vegetales y ocasione pérdida irreversible de estratos biológicos endémicos, que termina por representar un tipo de impacto ambiental evidente.

La dinámica ambiental surge de la interacción que mantiene la periferia norte del área urbana de la Ciudad de México con la SG además de los programas de conservación ecológica, ambas interacciones forman dos perspectivas distintas sobre el recurso suelo de montaña. De esta forma se comprueba la hipótesis de la investigación dado que el desarrollo de la infraestructura urbana termina por generar

un mayor impacto sobre las coberturas vegetales continuas que aquellas que se encuentran en la cumbre de la sierra, las cuales se mantienen en permanencia. La forestación se reconoce como una consecuencia positiva, dado que dentro de la dinámica ambiental del geosistema no todo es degradación.

La Teoría del Geosistema y la Percepción Remota representan en conjunto una metodología funcional en el modelaje y análisis de la dinámica ambiental. Por otro lado, la constelación Landsat es una fuente indiscutible de exploración de espacios de difícil acceso y en la generación de una arqueología de paisaje, para representar de forma cartográfica la dinámica del geosistema SG. Si bien la calidad de la información de los sensores TM y OLI se encuentra delimitada por la resolución espacial y algunos inconvenientes que surgen de la interacción que mantiene con los distintos fenómenos atmosféricos, estos tienen a ser mínimos si consideramos las ventajas ya mencionadas, además de la reducción de costos de campo y evasión de riesgos.

La carta geográfica contiene la localización de un fenómeno para su comprensión en un lugar y momento dado; sin embargo, muchos procesos cambian en menor o mayor medida con el tiempo, no obstante los mapas con intervalos regulares revelan con eficiencia patrones espaciales y temporales. A partir de los resultados obtenidos se muestra que el paisaje no es estático sino dinámico y cambia en función de la generación del medio ambiente, su estructura surge del legado de los distintos aprovechamientos dados por los actores sociales. En síntesis se puede decir que la representación del medio ambiente desde el punto de vista de la Geografía evidencia la necesidad y aprovechamiento del recurso suelo por parte de una sociedad.

El mapa representa un medio de comunicación que sirve de base para la toma de decisiones. La información que se ha generado resulta ser de gran utilidad para futuras investigaciones acerca de la distribución forestal, herbácea y urbana de la SG, dado que, en el documento queda referida la localización, causas, correlación y patrones de desarrollo de estos fenómenos espaciales en un periodo de 31 años.

Referencias

- Antonini, G. (Coor) (2008). *Carta dell'uso del suolo, comune di Perugia*. Servizio Civile Nazionale.
- Aguilar, A.G. (2009). *Introducción. Periferia Urbana deterioro Ambiental y reestructuración metropolitana*. Instituto de Geografía-UNAM, Miguel Ángel Porrúa Editor, México. pp. 5-18.
- Aguilar Méndez, S., Benítez Lugo, J.L. y Tafalla Macklen, R. (2006). *Problemas Sociales, Económicos y Políticos de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aguilar, A. G. (2009). *Urbanización Periférica e Impacto Ambiental. El Suelo de Conservación en la Ciudad de México*. En: Aguilar, A.G. y Escamilla, I. (Coord) *“Periferia urbana, Deterioro Ambiental y Reestructuración Metropolitana”* Instituto de Geografía-UNAM, Miguel Ángel Porrúa Editor, México. pp. 21-52. (capítulo).
- Aguilar, C., Martínez, E. y Arriaga, L. (2000). *Deforestación y fragmentación de ecosistemas: ¿Qué tan grave es el problema en México?* Biodiversidad, 30(1), 7-11.
- Aguirre Gómez, R. (2009). *Bases físicas de la percepción remota*. En: Aguirre Gómez, R. *“Conceptos de geomática y estudios de caso en México”* Pp.15-59.
- Aguirre Gómez, R. (Coor) (2009). *Conceptos de geomática y estudios de caso en México* (No. 526.982097 C6).
- Arcia Rodríguez, M. I. (Com) (1994). *Geografía del medio ambiente, una alternativa del ordenamiento ecológico*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Arias Sierra, P. (2003). *Periferia y nueva ciudad: el problema del paisaje en la dispersión urbana*. Departamento de urbanística y ordenamiento del territorio. Sevilla.
- Artunduaga Salas, I.R. (2009). *Medio Ambiente y Evolución*. U. Externado de Colombia.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Balaji, A., y Páez-Acosta, G. (2009). *Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation*. En: CLASlite. Journal of Applied Remote Sensing 3:033543.
- Baena, G. (2002). *Metodología de la investigación*. Publicaciones culturales. México.
- Baena, G. (2004). *Instrumento de investigación: Tesis profesionales y trabajos académicos*. Editores mexicano unidos.
- Bassols Batalla, Á. (1982). *Recursos naturales de México; teoría, conocimiento y uso*. Ed nuevo tiempo México. (No. 04; HC54, B3 1982.).
- Bazant, S. (2010). *Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana*. Espacio abierto, 19(3).
- Bell, J. (2002). *Cómo hacer tu primer trabajo de investigación*. Trad. de Fililla. Barcelona.

- Beroutchachrill, N. y Panareda i Clopes, J. M. (1977). *Tendencia actual de la ciencia del paisaje en la Unión Soviética. El estudio de los geosistemas en la estación de Martkopi (Georgia)*. En Revista de Geografía, vol. XI, n° 1-2, 1977, pp. 23-36.
- Bertalanffy, L. von. (2006). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de cultura económica.
- Bertrand, C., y Bertrand, G. (2007). *Geografía del medio ambiente. El sistema GTP: Geosistema, territorio y paisaje*. Edit. Manuales de humanidades/Geografía, Universidad de Granada.
- Bertrand, G. (1966). *Pour une étude géographique de la végétation. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. 37(2), 129-144.
- Bertrand, G. (2008). *Un paisaje más profundo. De la Epistemología al Método*. Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada, (43), 17-28.
- Beruete, S. (2016). *Jardinosofía. Una historia filosófica de los jardines*. Valencia: Turner Publicaciones.
- Biondi, E. Feoli, E. y Zuccarello, V. (2004). *Modelling environmental responses of plant associations: a review of some critical concepts in vegetation study. Critical Reviews in Plant Sciences*. 23(2), 149-156.
- Bocco, G. y Urquijo, P. S. (2013). *Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional*. Región y sociedad, 25(56), 75-102.
- Bolòs i Capdevila, M. (1981). *Problemática actual de los estudios de paisaje integrado*. Revista de Geografía, 15(1), 45-68.
- Butler, M. J. A., Mouchot, M. C., Barale, V. y LeBlanc, C. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio*. FAO Documentos técnicos de pesca-T295, 355. Roma, Disponible en línea: <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/T0355S05.htm>
- Beroutchachvnil I. y Panaderaj., M. (1977). *Tendencia actual de la ciencia del paisaje en la Unión Soviética: El estudio de los geosistemas en la estación de Martkopi (Georgia)*. Revista de Geografía, vol. 11, n.O 1-2, 1977, pp. 23.36. En: <http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45913/56729>
- Caire Lomelí, J. (2002). *Cartografía Básica*. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México.
- Calaza Martínez, P. (2013). *Infraestructura verde. Sistema natural de salud pública*. Mundi-Prensa Libros. España.
- Calderón, G. y Rzedowski, G. (2001). *Flora fanerogámica del Valle de México*. (No. C/582.09725 F56/2001). Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Campbell, N. A. y Reece, J. B. (2007). *Biología*. 7ma Edición Médica Panamericana.
- Campbell, J. B. y Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.

- Carrascal Galindo, I. E. (2007). *Metodología para el análisis e interpretación de los mapas*. México, UNAM-Instituto de Geografía (Temas selectos de Geografía de México).
- Carrasco Aquino, R.J. (2006). *La naturaleza y sus formas de apropiación en contradicción*. En: Mundo Siglo XXI, No 6 Otoño. En: <http://www.mundosisigloxxi.ciecas.ipn.mx/pdf/v02/06/05.pdf>
- Casado, M. A. y de Miguel, J. M. (1997). *Modelo de estados y transiciones en pastizales mediterráneos montaña y dehesa del centro de la península Ibérica*. *Ecotrópicos*, 10(2), 113-132.
- Caselles, V., Coll, C. y Sobrino, J. A. (1991). *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia, 95-140.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J. y Skinner, B. J. (2007). *Recursos de la Tierra: origen, uso e impacto ambiental*. Pearson Educación.
- Cedillo Acosta, O. L., Rivas Sepúlveda, M. A. y Rodríguez Casasola, F. N. (2007). *El área natural protegida sujeta a conservación "Sierra de Guadalupe"*. México, D.F.: Revista Sistemas Ambientales, Vol. 1, No. 1.
- Chuvieco, E. y Huete A. (2010). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. CRC press.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección especial*. Rialp. SA. Madrid.
- CLASlite Team (2013). *CLASlite Forest Monitoring Technology: Version 3.1 User Guide*. Disponible en línea: <http://claslite.carnegiescience.edu>. Carnegie Institution for Science, Washington, DC.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad –CONABIO- (2011). *División política estatal 1:250000. 2010*. Portal de Geoinformación. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2009). *Base de Datos Geográfica de Áreas Naturales Protegidas Estatales y del Distrito Federal de México*. Portal de Geoinformación. México.
- Connolly, P. y Cruz, M. S. (2004). *Nuevos y viejos procesos en la periferia de la ciudad de México*. En: Aguilar, A.G. (Coord.) "Procesos Metropolitanos y grandes ciudades: Dinámicas recientes en México". Miguel Ángel Porrúa Editor, Instituto de Geografía-UNAM, CONACYT. México.
- Contreras Delgado, C. (2005). *Pensar el paisaje*. Explorando un concepto geográfico. Trayectorias, 7(17), 57-69.
- Curtis, H., Barnes, N. S., Schnek, A. y Flores, G. (2000). *Biología*. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires.
- Dávila Tovar, P. y Romero Martín, L. E. (1990). *Elementos para la determinación de una técnica de diagnóstico de la dinámica de un paisaje: Ossorio (Gran Canaria)*. Coloquios de Historia Canario Americana, 9(9), 147-168.

- Danilova, V. S. (2014). *The Role of Noobiogeocenosis in Interaction of the Artificial and the Natural. Conferencia asiática sobre ética, religión y filosofía 2014*. Actas Oficiales de la Conferencia. En: http://iafor.info/archives/offprints/acerp2014-offprints/ACERP2014_0215.pdf
- Delfín-Alfonso, C. A., Gallina-Tessaro, S. A. y López-González, G.A. (2011). *El hábitat: definición, dimensiones y escalas de evaluación para la fauna silvestre*. En: "Manual de Técnicas para el estudio de la Fauna" 317.
- Delgado, C. C. (2005). *Pensar el paisaje. Explorando un concepto geográfico*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Trayectorias, 7(17). 57-69. 17, enero-abril, 2005, pp. 57-69 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60722197007>
- Diario Oficial de la Federación (05 de febrero de 2016). *ACUERDO General del Pleno del Consejo de la Judicatura Federal por el que se cambia la denominación de Distrito Federal por Ciudad de México en todo su cuerpo normativo*.
- Diario Oficial de la Federación (2003). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, México*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 25 de febrero, 1-70.
- Diario Oficial de la Federación (7 de febrero de 1996). *Ley de desarrollo urbano del Distrito Federal*. Disponible en línea: http://www.fimevic.df.gob.mx/documentos/transparencia/ley_local/LDUDF.pdf
- Diario Oficial de la Federación (16 de julio 1987). *ACUERDO por el que se aprueba la nueva versión del Programa General del Programa Director para el Desarrollo Urbano del Distrito Federal*. En: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4666696&fecha=16/07/1987
- Elachi, C. y Van Zyl, J. J. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing* (Vol. 28). John Wiley & Sons.
- Erickson, J. (1992). *La exploración de la Tierra desde el espacio*. MacGraw-Hill. España
- Escamilla Herrera, I. y Santos Cerquera, C. (2012). *La zona Metropolitana del Valle de México*. XII coloquio internacional de Geografía.
- Estes, J. E. y Cosentino M. J. (1989). *Remote Sensing of Vegetation*. En: Rambler, M. B., Margulis, L. y Fester, R. (Ed) "Global Ecology: Toward a Science of the biosphere" Academic Press, Inc.
- Evans, D. y Lasaponara, R. (2012). *Uncovering Angkor: Integrated Remote Sensing Applications in the Archaeology of Early Cambodia*. En; Lasaponara, R., y Masini, N. (Eds) "Satellite remote sensing: A new tool for archaeology" (Vol. 16). Springer Science & Business Media.
- Ezcurra, E. (2010). *De las chinampas a la megalópolis*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Falconer de la Muela, T. (2001). *Ciberespacio: un espacio geográfico* (tesis que para obtener el título de Licenciada en Geografía), asesor Georgina Calderón Aragón, UNAM, México.

- Farina, A. (2011). *Analisi e valorizzazione del paesaggio*. Universita' degli studi Del molise. Universita' degli studi di sassari.
- Fernández Christlieb, F. y Garza Merodio, G. (2011). *Cultura y territorialidad en la ocupación de un mismo espacio: México-Tenochtitlan y la Ciudad de México en el siglo XVI*. GeoTrópico, 5 (2), Artículo 4: 53-64.
- Forman, T. T. (1995). *Land Mosaic: The ecology of landscapes and regions*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Freuter, F. (2009). *Plataformas orbitales y sensores*. Facultad de ciencias forestales, Universidad del Estero, Serie didáctica N° 34.
- Frolova, M y Bertrand, G. (2006). *Geografía y Paisaje*. En: Hiernaua, D. y lindón, A. (Director), "Tratado de Geografía Humana" Ed Ariel. España.
- Fuentes Aguilar, L. (1992). *Cambios en el uso de suelo agrícola en México*. Instituto de Geografía México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gaceta de Gobierno (2013). *Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México*. No. 80. México. Edo. Mex.
- Gaceta de Gobierno (1999). *Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México*. No. 26. México. Edo. Mex.
- Gaceta Oficial el Distrito Federal (2003). *Órgano del Gobierno del Distrito Federal* No. 103
- Gaceta Oficial el Distrito Federal (2002). *Órgano del Gobierno del Distrito Federal* No. 112
- Gaceta Oficial el Distrito Federal (2000). *Órgano del Gobierno del Distrito Federal* No. 139
- García Merino, L. V. (1998). *Los usos del suelo y la organización del espacio*. En: "Paisaje y Medio Ambiente" Secretaria de publicaciones e intercambio científico Universidad de Valladolid.
- García Romero, A. (1998). *El paisaje: una herramienta en el estudio detallado del territorio*. Kuxulkab'. Revista de divulgación, 7, 22-33 No. 14.
- García Romero, A. y Muñoz Jiménez, J. (2002). *El paisaje en el ámbito de la Geografía*. Instituto de Geografía UNAM, México.
- García Palomo, A., Carlos Valerio V., López Miguel C., Galván García A. y Concha-Dimas A. (2006). *Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the México Basin*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo LVIII, Núm. 2. México, D.F.
- Garza Merodio, G. G. (2012). *Geografía Histórica y Medio Ambiente*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Coordinación de la Investigación Científica.
- Garza, G. (1983). *El proceso de urbanización de la Ciudad de México; 1821-1970*. (Tesis de Doctorado) UNAM.
- Garza, G. (2003). *La urbanización de México en el siglo XX*. El Colegio de México. México.

- Geri, F., Granziera, P. y Chiarucci, A. (2008). *Cambiamenti dell'uso del suolo, tra abbandono e chiusura degli spazi aperti*. Estimo e Territorio, 7, 40-47.
- Gómez Escobar, M. D. C. (2004). *Métodos y técnicas de la cartografía temática*. México, UNAM-Instituto de Geografía (Temas selectos de Geografía de México), 405.
- Gómez Rodríguez G. y Rojas García, O. (2009). *Estudio del cambio de uso de suelo como insumo de la base territorial de la Zona V Norte del estado de Chiapas*. En: Aguirre Gómez, R. (2009). "Conceptos de geomática y estudios de caso en México" pp. 213-240.
- Gómez Zotano, J. (2000). *El paisaje integrado de las montañas andaluzas*. Análisis de la metodología experimentada. Cuadernos Geográficos, 30, 445-470.
- González Bernáldez, F. (1981). *Ecología y paisaje*. Barcelona: Blume.
- González Otero, I. y Arcia Rodríguez, M. (1994). *Fundamentos teóricos y metodológicos de la Geografía del medio ambiente*. En: Arcia Rodríguez, M. I. (Com) "Geografía del medio ambiente, una alternativa del ordenamiento ecológico" Universidad Autónoma del Estado de México.
- Goodchild, M. F. y Kemp, K. K. (Eds) (1990). NCGIA Core Curriculum: Introduction to GIS (Vol. 1). National Center for Geographic Information and Analysis, University of California at Santa Barbara.
- Gorgas García, G., Cardiel López, N. y Zamorano Calvo, J. (2009). *Estadística básica para estudiantes de Ciencias*. Universidad Complutense de Madrid.
- Gutiérrez de MacGregor, M.T., González Sánchez, J. y Zamorano Orozco, J.J. (2005). *La Cuenca de México y sus cambios Demográficos-Espaciales*. Instituto de Geografía. México.
- Gurevich, R. (2005). *Sociedades y territorios en tiempos contemporáneos. Una introducción a la enseñanza de la Geografía*. Fondo de Cultura Económica. Buenos Aires Argentina.
- Hernández, H. J. (2011). *Procesamiento Digital de Imágenes. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza*. U. de Chile.
- Huete, A., Ponce-Campos, G., Zhang, Y., Restrepo-Coupe, N., Ma, X. y Moran, M. S. (2016). *Monitoring Photosynthesis from Space*. En: "Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing" (pp. 3-22).
- Ibarra Benlloch, P. (1993). *Una propuesta metodológica para el estudio del paisaje integrado*. *Geographicalia*. (30), 229-242.
- Ignacio Kunz B. (Coor.) (2003). *Usos de suelo y territorio: tipos y lógicas de localización en la ciudad de México*. UNAM, Facultad de Arquitectura
- Ímaz Gispert, M., Camacho Lomeli, R. y Ruíz Gutiérrez, E. (2011). *Política pública ambiental en la ciudad de México: suelo de conservación una ruta ambiental incorrecta*. En: Enrique Pérez Campuzano, María Perecochtchikova, V. Sophie Ávila Foucat (Coor) "Suelo de Conservación del Distrito Federal". Miguel Ángel Porrúa.

- Instituto Nacional de Ecología –INE- (2000). *Programa para Mejorar la Calidad Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. En: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros> revisado
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI- (2016). *Carta de uso de suelo y vegetación Ciudad de México 1:250000 E14-2*. México, Ags. Instituto Nacional de Estadística y Geografía –INEGI- (1997). *Carta Topográfica Ciudad de México 1:50 000 E14A39*. México, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014). *Cuaderno estadístico de la zona Metropolitana del Valle de México 2014*. México, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). *Carta Topográfica Cuautitlán 1:50 000 E14A29*. México, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *MARCO GEOESTADÍSTICO Estatal 2010. VERSIÓN 5.1*. México. Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *MARCO GEOESTADÍSTICO Municipal 2010. VERSIÓN 5.1*. México. Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2008). *Carta topográfica Ciudad de México 1:250000 E14-2*. México, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2004). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. México.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective*. Pearson Education.
- Jiménez Olivencia, Y. y Moreno Sánchez, J. J. (2006). *Los SIG en el análisis y el diagnóstico del paisaje: el caso de río Guadix (Parque Nacional de Sierra Nevada)*. Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada, (39), 103-124.
- Keller, J. K. y Smith, C. R. (2014). *Improving GIS-based wildlife-habitat analysis*. Springer.
- Kennedy, M. D. (2013). *Introducing geographic information systems with ARCGIS: a workbook approach to learning GIS*. John Wiley & Sons.
- Kidder, S. Q. y Haar, T. H. V. (1995). *Satellite meteorology: an introduction*. Gulf Professional Publishing.
- Kirkpatrick, L., y Francis, G. (2006). *Physics: A world view*. Cengage Learning.
- Khorram, S., Koch, F. H., van der Wiele, C. F. y Nelson, S. A. (2012). *Remote sensing*. Springer Science & Business Media.
- Kraak, M. J., y Ormeling, F. (2011). *Cartography: visualization of spatial data*. Guilford Press.
- Krygier, J. y Wood, D. (2016). *Making maps: a visual guide to map design for GIS*. Guilford Publications.
- Lasaponara, R. y Masini, N. (Eds) (2012). *Satellite remote sensing: A new tool for archaeology* (Vol. 16). Springer Science & Business Media.

- Lasaponara, R. y Masini, N. (2012). *Sensing in Archaeology: From Visual Data Interpretation to Digital Data Manipulation*. En; Lasaponara, R., y Masini, N. (Eds) "Satellite remote sensing: A new tool for archaeology" (Vol. 16). Springer Science y Business Media.
- Levin, N. (1999). *Fundamentals of remote sensing*. 1st Hydrographic Data Management Course, IMO—International Maritime Academy, Trieste, 76.
- Lira, J. (2009). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. Editorial Fondo de Cultura Económica (FCE), México.
- Lobato Correa R. (1998). *Como pensar la geografía*. En: Uribe Ortega, G (Com) "Cuaderno de Geografía brasileña" ED. Centro de Investigación científica "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C.
- López García M. J. y Caselles V. (1990). *Introducción a la teledetección*. En: GANDIA, S. A. y MELIA, J. "La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales Recursos Renovables: Agricultura" Universidad de Valencia, Departamento de termodinámica.
- Lugo Hubp, J. y Salinas Montes, A. (1996). *Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (Al norte de la Ciudad de México)* y su relación con peligros naturales. Revista Mexicana de Ciencia Geológicas, Volumen 13. No. 2. México, D.F.
- Lugo Hubp, J. (1989). *Diccionario geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México, 337.
- Martínez de Pisón, E. (1998). *El concepto del paisaje como instrumento del conocimiento ambiental*. En: "Paisaje y Medio Ambiente" Secretaria de publicaciones e intercambio científico Universidad de Valladolid.
- Martínez de Pisón, E. (2009). *Miradas sobre el paisaje*. Editorial biblioteca nueva, S. L., Madrid
- Martínez de Pisón, E. (2000). *Cuadernos de montaña*. Ediciones temas de hoy, España.
- Maskrey, A (1993). *Los desastres no son naturales*. Tercer Mundo. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.
- Mateo Rodríguez, J. M. y Vicente da Silva, E. (2009). *La geoecología del paisaje, como fundamento para el análisis ambiental*. REDE-Revista Electrónica do PRODEMA, 1(1).
- Mateo Rodríguez, J.M. (1984). *Apuntes de geografía de los paisajes*. Universidad de la Habana. Facultad de Geografía.
- Mather, P. M. y Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Máximo, A. y Alvarenga, B. (2006). *Física general*. Ed Oxford. México.
- Maza Vázquez, F. (2015). *Espacio geográfico, topografía, cartografía y planificación*. EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica, 20(25), 218-227.

- Medina, P. J. S. (2001). *Bioética y medio ambiente: Introducción a la problemática bioético-ambiental y sus perspectivas*. Persona y Bioética, (13-14). En: <http://personaybioetica.unisabana.edu.co/index.php/personaybioetica/article/viewArticle/811/1957>
- Mendenhal, W., Beaver, R.J. y Beaver, B.M. (2010). *Introducción a la Probabilidad y Estadística*. Cengage Learning.
- Mérida Rodríguez, M. F. (1996). *El paisaje visual*. Baética: Estudios de arte, Geografía e historia, (18), 205-222.
- Miller, G. T. (1994). *Ecología y medio ambiente*. Grupo editorial Iberoamérica.
- Miller, G. T. (2002). *Ciencia Ambiental: preservemos la tierra*. (No. 333.7 M653c). México, MX: Thomson.
- Miranda F. G. y Hernández. X. E. (1963). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. Bol. Soc. Bot. Mex. 29–179.
- Moran, J. M., y Morgan, M. D. (1997). *Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Moreno Sanz, F. y García-Abad Alonso, J. (1996). *Cartografía de la calidad visual del paisaje: reflexiones teóricas y ejemplo de aplicación*. Serie geográfica, 6, 115-129.
- Morlans, M. C. (2005). *Introducción a la Ecología del Paisaje*. Catamarca: Editorial Científica Universitaria. Universidad Nacional de Catamarca. En: <http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/Ecologia/imagenes/pdf/001-Introd-ecologia-del-paisaje.pdf>
- Muñoz Bollas, A. (2011). *Geodesia y Cartografía*. En: Navarro, A. P. (Coord) *“Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática”* (Vol. 173). Editorial UOC.
- Muñoz Criado, A. y Díez, N. (2012). *Guía metodológica. Estudios de paisaje*. Edición: Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. Instituto Cartográfico Valenciano. Eds.
- Muñoz Jiménez, J. (1998). *Paisaje y geosistema*. Paisaje y Medio Ambiente, Secretaria de publicaciones e intercambio científico Universidad de Valladolid.
- Muñoz Jimenez, J. y Sanz Herraiz, C. (1995). *Las Montañas*. Ed. Alianza, Madrid.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (10 de October de 1995). *Landsat 6 failure attributed to ruptured manifold*. Disponible en línea: http://landsat.gsfc.nasa.gov/wpcontent/uploads/2012/12/NOAA_landsat6.pdf verificado en enero 2016
- Oropeza Orozco, O. (2002). *Introducción En: “El paisaje en el ámbito de la Geografía”* Instituto de Geografía UNAM, México.
- Orozco Segovia, A. y Vázquez Yanes, C. (2013). *La destrucción de la naturaleza*. Fondo de Cultura Económica. México.

- Ortega Valcárcel, J. (2000). *Los horizontes de la Geografía: teoría de la Geografía*. (No. 910.1 ORT). Ariel Editorial.
- Ortega Cantero, N. (1998). *Paisaje y cultura*. En: "Paisaje y Medio Ambiente" Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid, 137-46.
- Panadera i Clopés, J. M. (1973). *Estudio de paisaje integrado: Ejemplo del Montseny*. Revista de Geografía, 7(1), 157-165.
- Peña Reyes, L. B. (2011). *Algunos elementos metodológicos para pensar especialmente en ciencias sociales*. Universidad Externado de Colombia.
- Pérez Campuzano, E. (2012). *Periferia urbana e incentivos económicos, para la conservación ambiental: el caso de FOCOMDES*. En: Pérez Campuzano, E., Perevochtchiokova, M., Ávila Foucat V.S. "Hacia un manejo sustentable del suelo de conservación del Distrito Federal" Instituto Politécnico Nacional, Fondo de Cultura Económica.
- Pérez Navarro, A. (2011). *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática* (Vol. 173). Editorial UOC.
- Phlipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*. Ed Ariel S.A. Barcelona
- Pinto, I. F. (2012). *Geomática. Tecnologías de punta*. 1a Edición. Palibrio. Procuraduría Ambiental y del ordenamiento territorial del D.F. (2003). *Informe Anual Apéndice temático*. Documentos de referencia. En: http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/informes/informe2003_borrarme/temas/suelo.pdf
- Propin, E. (2003). *Teorías y métodos en Geografía Económica*. Temas Selectos de Geografía de México (III. 3), Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Quintero Perez, J. A. (2009). *Definición y origen de los sistemas de información geográfica*. En: Aguirre Gómez, R. (Coord). "Conceptos de geomática y estudios de caso en México" (No. 526.982097 C6).
- Rashed, T. y Jürgens, C. (Eds) (2010). *Remote sensing of urban and suburban areas* (Vol. 10). Springer Science y Business Media.
- Reboratti, C. (2011). *Geografía y ambiente*. Geografía y Ambiente en América Latina, 31-32.
- Richards, J. A. (2012). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. ANU College of Engineering and Computer Science the Australian National University Springer.
- Robinson, A. H., Sale R. D. y Muehrcke, P. C. (1987). *Elementos de cartografía*. Omega, Barcelona. Lloret, J., y Olivella González, R., (2011). *Introducción a los sistemas de información geográfica*. En: Pérez Navarro, A., (Coord) "Introducción a los sistemas de información geográfica y geo telemática". Editorial UOC,
- Roger, A. (2007). *Breve tratado del paisaje*. Biblioteca Nueva, Madrid. Barcelona.

- Romero G y Maskrey, A. (1993). *Como entender los desastres naturales*. En: Maskrey, A (Com) "Los desastres no son naturales" Tercer Mundo. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.
- Rubio Romero, P. (1996). *La teoría general de sistemas y el paisaje*. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, 11(41).
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sala Sanjaume, M., y Batalla Villanueva, R. J. (1996). *Teoría y métodos en Geografía Física*. Editorial Síntesis. Madrid.
- Sámano Jiménez, M, (2011). *Indicadores ambientales*. Tesis que para obtener el título de Químico Farmacéutico Biólogo, presenta Mauricio Sámano Jiménez; asesor Aldo Gonzalo Pérez Taboada. UNAM, Facultad de Química.
- Sánchez Crispín, A. (Coord) (2007). *Conocimientos Fundamentales de Geografía*. Vol. I Editorial Mc. Graw Hill, Colección (Conocimientos Fundamentales), México, 26-36.
- Sánchez, J. E. (1991). *Espacio, economía y sociedad*. Madrid, Siglo XXI.
- Santos, C., Escamilla, E. y Guarneros, L. (2009). *La expansión urbana en la zona norte de la periferia metropolitana de la Ciudad de México*. En: "Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana" Instituto de Geografía-UNAM, Miguel Ángel de Porrúa. México.
- Schlögel, K. (2007). *En el espacio leemos el tiempo: sobre historia de la civilización y geopolítica*. (Vol. 55). Siruela.
- SEDESOL, CONAPO e INEGI (2005). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. México, Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (1983). *Cuautitlán E14A29, Carta geológica 1:50000*. México.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (1983). *Ciudad de México E14-2, Carta edafológica 1:250000*. México.
- Secretaría de Fomento (1911). *Estadística forestal [Distrito Federal]*, Carta no. 4 del anexo no. 117 de la Memoria de la Secretaría de Fomento, "Memoria de la Secretaría de Fomento" Disponible en versión digitalizada. En: <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/mapa%3A270>
- Serrano Cañadas, E. (2012). *Montañas, paisaje y patrimonio*. Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje, (29), 701-718.
- Servicio Geológico Mexicano -SGM- (2002). *Carta Geológica Minera Ciudad de México E14-2*. Secretaría de Economía. Hidalgo.
- Sheinbaum Pardo, C. (2011). *La compleja problemática del suelo de conservación del Distrito Federal*. En: Pérez Campuzano, E., Perevochtchikova, M., y Ávila Foucat,

- V.S., (Coord) “*Suelo de conservación del distrito federal: ¿hacia una gestión y anejo sustentable?*” Miguel Ángel de Porrúa Editores. México.
- Shepher, E. J. (2004). *Il “Rilievo topofotografico di Ostia dal Palone”*. Archeologia aerea II
- Singh, A. (1989). *Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data*. International journal of remote sensing, 10(6), 989-1003.
- Smith, M. J., Goodchild, M. F. y Longley, P. (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador Publishing Ltd.
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.
- Sosa Velásquez, M. (2012). *¿Cómo entender el territorio?* Universidad Rafael Landívar.
- Salitchev, K. (1979). *Cartografía*. Editorial pueblo y educación.
- Storey, D. (2012). *Territories: The claiming of space*. London: Routledge.
- Strahler, N. y Strahler, A. (2005). *Geografía Física*. Ediciones Omega. Barcelona
- Szekielda, K. (1988). *Satellite monitoring of the earth*. John Wiley y Sons, Inc., Somerset, New Jersey. New York: J. Wiley.
- Tapia-Varela, G. y López-Blanco, J. (2002). *Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1: 100 000*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19(1), 50-65.
- Tarback, E.J., Lutgens, F.K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra, Una introducción a la Geología Física*. Pearson Prentice Hall, España.
- Thompson, I. (2012). *Biodiversidad, umbrales ecosistémicos, resiliencia y degradación forestal*. Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales, (238), 25-30.
- Tobler, W. R. (1970). *A computer movie simulating urban growth in the Detroit region*. Economic geography, 46(sup1), 234-240.
- Triola, M. F. (2013). *Estadística*. Pearson educación.
- Tristán, P., Wainschenker, R., y Doorn, J. H. (2008). *Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal*. En: “X Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación”.
- Tristán, P., Doorn, J. H. y Wainschenker, R. (2007). *El problema de normalización en súper-resolución de imágenes satelitales*. En: “IX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación”.
- Troll, C. (2003). *Ecología del paisaje*. Gaceta ecológica, (68), 71-84.
- Ulloa, A. (2001). *Transformaciones en las investigaciones antropológicas sobre naturaleza, ecología y medio ambiente*. Revista Colombiana de antropología, (37), 8.
- Unikel Spector, L. (2000). *La dinámica del crecimiento de la ciudad de México*. Revista El Mercado de Valores. V60 N4 abr P62-75.

- Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Asner, G. P., y Green, R. O. (2004). *Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties*. *BioScience*, 54(6), 523-534.
- Vargas Ulate, G. (2012). *Espacio y territorio en el análisis geográfico*. *Reflexiones*, 91(1), 313-326.
- Vázquez, F. M. (2015). *Espacio geográfico, topografía, cartografía y planificación*. EGA. *Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 20(25), 218-227.
- Velázquez Sanchez, E. y Jaimes Palomera, R. (1989). *Geología de la cuenca de México*. Geofísica internacional Vol. 29. UNAM.
- Vieyra, A. y Escamilla Herrera, I. (2004). *La periferia Expandida de la Ciudad de México Transformación de su estructura industrial Laboral*. En: Aguilar, G. A. (Coord) "Procesos Metropolitanos y grandes ciudades: Dinámicas recientes en México" Miguel Ángel Porrúa Editor, Instituto de Geografía-UNAM, CONACYT. México.
- Vinuesa Angulo, J. y Vidal Domínguez, M. J. (1991). *Los procesos de urbanización*. Editorial Síntesis. Madrid España.
- Wallace, J. M. y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Academic press.
- Weeks J. R. (2010) *Defining Urban Areas*. En: Rashed, T. y Jürgens, C. (Eds) "Remote sensing of urban and suburban areas" (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- Yuan, F. y Bauer, M. E. (2007). *Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery*. *Remote Sensing of environment*, 106(3), 375-386.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E. y Tucker III, C. J. (2015). *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations*. Springer.
- Zarate Martín, M. A. y Rubio Benito, M.T. (2005). *Geografía Humana: sociedad economía y territorio*. Editorial Universitaria Ramón Areces. Madrid, España.
- Zenón Cano, S. (2002). *¿CÓMO ESCRIBIR UNA TESIS?* Ciencias, enero-marzo, número 065. Universidad Nacional Autónoma de México Distrito Federal, México. pp. 68-75.
- Zha, Y., Gao, J. y Ni, S. (2003). *Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery*. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.
- Zubelzu Mínguez, S. y Allende Álvarez, F. (2015). *El concepto de paisaje y sus elementos constituyentes: requisitos para la adecuada gestión del recurso y adaptación de los instrumentos legales en España*. Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía, 24(1), 29-42.
- Zunino, Z. y Zullini, A. (2003). *Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución*. Fondo de Cultura Económica. México.

Recursos en línea

Diccionario de la lengua española. En: <http://dle.rae.es/?w=diccionario>

EarthExplorer. En: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre biodiversidad. En:
<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Landsat Missions, U.S. Geological Survey. En: <https://landsat.usgs.gov/>

Landsat Science – NASA. En: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Mapa Digital de México. INEGI. En:

<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>

National Aeronautics and Space Administration (s.f.). *Landsat Science*. En:
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3209>

National Aeronautics and Space Administration. *Landsat 07*. Disponible en línea:
<http://science.nasa.gov/missions/landsat-7/> verificado en enero del 2015

Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). En:
http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#

U.S. Geological Survey (n/d) *Landsat Missions: SLC-off Products: Background*. En:
http://landsat.usgs.gov/products_slc_offbackground.php