



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO URBANO ZACATECAS-GUADALUPE, (1990 y 2016)
USANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

TESINA
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
VANESSA MARTINA DE SANTIAGO TORRES

TUTOR
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. ROMÁN ÁLVAREZ BÉJAR
IIMAS

DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

DRA. JUDITH GUADALUPE RAMOS HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO URBANO
ZACATECAS-GUADALUPE, (1990 y 2016)
USANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA**

TESINA

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

VANESSA MARTINA DE SANTIAGO TORRES

Director de Tesina

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ

Instituto de Geografía

Presidente

DR. ROMÁN ÁLVAREZ BÉJAR

IIMAS

Vocal

DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO

Instituto de Geofísica

Suplente

DRA. JUDITH GUADALUPE

RAMOS HERNÁNDEZ

Instituto de Ingeniería

Suplente

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA

Instituto de Geografía

Agradecimientos

Mi primer agradecimiento es para Dios por darme la vida y salud, por permitirme contar con una familia que me apoya y que son mi principal estímulo de superación.

Agradezco a mi asesor el Doctor Raúl Aguirre Gómez quien con toda paciencia me ha orientado en esta labor, así como me ha compartido sus valiosos conocimientos y tiempo.

También reconozco y agradezco la amabilidad, apoyo y disponibilidad de todos mis sinodales que contribuyeron en la mejora de este trabajo, aportando su conocimiento, recomendaciones y sugerencias para culminar exitosamente este proyecto.

De una manera muy especial agradezco a mis compañeros y amigos de este camino de la Maestría, a la Maestra Noemí López González y al Maestro Andrés Arturo Duarte Solís quienes me han ayudado desinteresadamente en los trámites tanto como en el desarrollo de la misma, compartiendo su tiempo y experiencia.

Un agradecimiento también para el Instituto Nacional de Estadística y Geografía ya que sin su apertura y confianza para el desarrollo de nuevas habilidades no habría incursionado en este tema tan interesante de la Percepción Remota.

A la Universidad Nacional Autónoma de México agradezco la disponibilidad de todos sus colaboradores, su atención especial de los Doctores que compartieron sus conocimientos durante la etapa de enseñanza de la Maestría.

Índice de Contenido

RESUMEN.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 PERCEPCIÓN REMOTA.....	3
1.2 ELEMENTOS BÁSICOS DEL SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.....	4
1.3 TEORÍA ONDULATORIA.....	5
1.4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	6
1.4.1 <i>Curvas Espectrales</i>	7
1.5 PLATAFORMAS Y SENSORES.....	8
1.5.1 <i>Plataformas</i>	8
1.5.2 <i>Satélites Geoestacionarios</i>	9
1.5.3 <i>Satélites de Órbita Polar</i>	10
1.6 TIPOS DE SENSORES (ACTIVOS Y PASIVOS).....	10
1.7 TIPOS DE RESOLUCIONES.....	10
1.7.1 <i>Resolución Espacial</i>	11
1.7.2 <i>Resolución Temporal</i>	12
1.7.3 <i>Resolución Espectral</i>	12
1.7.4 <i>Resolución Radiométrica</i>	12
1.7.5 <i>Resolución Temática</i>	13
1.8 PROGRAMA LANDSAT.....	13
1.9 INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA EN LA ATMÓSFERA.....	16
1.9.1 <i>Dispersión</i>	16
1.9.2 <i>Dispersión Rayleigh</i>	16
1.9.3 <i>Dispersión Mie</i>	17
1.9.4 <i>Dispersión No Selectiva</i>	17
1.10 PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES: CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA Y GEOMÉTRICA.....	18
1.10.1 <i>Corrección radiométrica (o normalización)</i>	18
1.10.2 <i>Corrección geométrica</i>	23
1.11 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.....	24
1.11.1 <i>Composiciones a color</i>	24

1.12	EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA: CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES	27
1.12.1	<i>Clasificación supervisada</i>	27
1.12.2	<i>Clasificación por paralelepípedos</i>	28
1.12.3	<i>Clasificación por mínima distancia</i>	29
1.12.4	<i>Clasificación por máxima probabilidad (verosimilitud)</i>	29
1.12.5	<i>Clasificación No Supervisada</i>	30
1.13	EVALUACIÓN DEL ERROR DEL MAPA DE CLASIFICACIÓN DE LA TIERRA CUBIERTA (GARANTÍA DE CALIDAD)	30
1.13.1	<i>Evaluación de la Exactitud</i>	30
1.13.2	<i>Matriz de confusión</i>	31
1.13.3	<i>Errores de omisión</i>	31
1.13.4	<i>Errores por comisión</i>	32
1.13.5	<i>Coefficiente Kappa</i>	32
CAPÍTULO II. ZONA DE ESTUDIO.....		33
2.1	ZONA DE ESTUDIO.....	33
2.2	MUNICIPIO DE ZACATECAS	34
2.2.1	<i>Ubicación Geográfica</i>	34
2.2.2	<i>Fisiografía</i>	35
2.2.3	<i>Uso de suelo y vegetación</i>	35
2.2.4	<i>Uso potencial de la tierra</i>	35
2.3	MUNICIPIO DE GUADALUPE.....	36
2.3.1	<i>Ubicación Geográfica</i>	36
2.3.2	<i>Fisiografía</i>	37
2.3.3	<i>Uso de suelo y vegetación</i>	37
2.3.4	<i>Uso potencial de la tierra</i>	37
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		38
3.1	ADQUISICIÓN DE LOS DATOS DE TELEDETECCIÓN Y REFERENCIA DEL SUELO.....	38
3.1.1	<i>Consideraciones del Sistema del sensor remoto</i>	38
3.1.2	<i>Consideraciones ambientales</i>	38
3.2	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	39
3.2.1	<i>Importación de imágenes GeoTiff a formato RST</i>	39
3.2.2	<i>Corrección radiométrica (o normalización)</i>	39
3.2.3	<i>Composiciones a color</i>	40
3.2.4	<i>Selección del algoritmo y lógica de clasificación de la imagen</i>	41
3.2.5	<i>Evaluación del error del Mapa de Clasificación de la tierra cubierta (Garantía de Calidad)</i> 42	

CAPITULO IV. RESULTADOS.....	43
4.1 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA.....	43
4.2 RECORTE DEL ÁREA DE ESTUDIO	44
4.3 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	44
4.4 COMPOSICIÓN A COLOR.....	48
4.5 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	51
4.6 EVALUACIÓN DEL ERROR DEL MAPA DE CLASIFICACIÓN	57
CAPITULO V. DISCUSIÓN.....	59
5.1 EVALUACIÓN DE LA IMAGEN DEL AÑO 1990.....	59
5.2 EVALUACIÓN DE LA IMAGEN DEL AÑO 2016.....	62
5.3 PORCENTAJES DE ERROR.....	64
5.4 MATRIZ DE CAMBIO.....	68
5.5 MAPAS BOOLEANOS	69
CAPITULO VI. CONCLUSIONES.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

Índice de Figuras

Figura 1	Teledetección electromagnética de los recursos terrestres	4
Figura 2	Onda Electromagnética	6
Figura 3	El Espectro Electromagnético	7
Figura 4	Firma espectral del Mar	8
Figura5	Posiciones orbitales de los Satélites Geoestacionarios controlados por la Organización Europea de Telecomunicaciones por Satélite (Eutelsat, por sus siglas en inglés)	9
Figura 6	Resolución Espacial.	11
Figura 7	Línea de tiempo de Misiones Landsat.....	14
Figura 8	Método de clasificación por paralelepípedos	28
Figura 9	Ejemplo de referencia de valores extremos.	39
Figura 10	Localización de Cuerpos de Agua en la Zona de Estudio. Landsat 5. Año 1990	40
Figura 11	Banda 1 (Landsat 5 TM), Año 1990 con Corrección Radiométrica	43
Figura 12	Banda 2 (Landsat 8 OLI/TIRS), Año 2016 con Corrección Radiométrica.....	43
Figura 13	Recorte del área de estudio. Banda 1. Landsat 5. Año 1990	44
Figura 14	Banda 4, Landsat 5, Año 1990.....	45
Figura 15	Banda 5, Landsat 8, Año 2016.....	47
Figura 16	Composición a Color Natural. RGB 321. Landsat TM. Año 1990	48
Figura 17	Composición a Color Natural. RGB 432. Landsat OLI_TIRS. Año 2016	49
Figura 18	Composición a Falso Color. RGB 432. Sensor TM. Año 1990	50
Figura 19	Composición a Falso Color. RGB 753. Sensor OLI_TIRS. Año 2016	50
Figura 20	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MAXLIKE. Año 1990	54
Figura 21	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MAXLIKE. Año 2016	55
Figura 22	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando PIPED. Año 1990.....	55
Figura 23	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando PIPED. Año 2016.....	56
Figura 24	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MINDIST. Año 1990.....	56
Figura 25	Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MINDIST. Año 2016.....	57
Figura 26	Mapa Booleano - Zona Conurbada Zacatecas-Guadalupe. Año 1990 y 2016	69
Figura 27	Mapa Booleano - Área de Cultivo. Zacatecas-Guadalupe. Año 1990 y 2016	70

Índice de Tablas

Tabla 1	Designación de bandas de los Satélites Landsat 8, 7, 4-5	15
Tabla 2	Combinaciones de bandas comunes en RGB (Landsat 5 o Landsat 7, y Landsat 8) ..	25
Tabla 3	Interpretación basada en el compuesto de falso color RGB 432 de Landsat EMT+	26
Tabla 4	Metadatos de las imágenes Landsat.....	38
Tabla 5	Niveles Digitales de Landsat 5, Año 1990.....	45
Tabla 6	Niveles Digitales de Landsat 5, Año 1990 después de realizar Reclass	46
Tabla 7	Niveles Digitales de Landsat 8, Año 2016.....	46
Tabla 8	Niveles Digitales de Landsat 8, Año 2016 después de realizar Reclass	47
Tabla 9	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Agua .	51
Tabla 10	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Vegetación Sana	51
Tabla 11	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Zona Urbana	52
Tabla 12	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Área de Cultivo.....	52
Tabla 13	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Sin Vegetación Aparente	53
Tabla 14	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Matorral Xerófilo	53
Tabla 15	Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Pastizal Natural	54
Tabla 16	Superficies por Año y Clase (Hectáreas)	59
Tabla 17	Matriz de error de la clasificación por Máxima Probabilidad del año 1990	61
Tabla 18	Matriz de error de la clasificación por Máxima Probabilidad del año 2016	63
Tabla 19	Error de la Evaluación de la Clasificación Supervisada Año 1990	65
Tabla 20	Error de la Evaluación de la Clasificación Supervisada Año 2016	67
Tabla 21	Matriz de Cambio en la Zona Conurbada Zacatecas-Guadalupe (1990-2016)	68

Índice de Mapas

Mapa 1	Zona de Estudio	33
Mapa 2	Localización geográfica de la Ciudad de Zacatecas, Zac.....	34
Mapa 3	Localización geográfica de la Ciudad de Guadalupe, Zac.....	36

RESUMEN

El objeto de este estudio es la utilización de imágenes de teledetección de manera conjunta con clasificadores para la obtención de superficie y porcentaje de cambio de uso de suelo en específico de la Zona Urbana de las Ciudades de Zacatecas y Guadalupe durante los años 1990 y 2016 a través de imágenes Landsat 5 y Landsat 8, respectivamente.

Se realizó el proceso de corrección radiométrica y atmosférica, se obtuvieron composiciones a color, se generó la firma espectral de las clases encontradas dentro del área de estudio, mediante sitios de entrenamiento. El algoritmo de Máxima Probabilidad dio mejor resultado para la clasificación supervisada.

La evaluación de la exactitud se obtuvo a través de la matriz de confusión con un error de comisión de 82.52% para el año 1990 y 89.29% para el año 2016, así como un porcentaje correcto (Po) de 82.57% en el Año 1990 y 86% Año 2016, el Índice Kappa obtenido fue de 0.7754 y 0.8053 para los años 1990 y 2016, respectivamente.

El mapa booleano resultante muestra en el espacio el crecimiento urbano, en el cual se dio, durante el periodo 1990-2016, un incremento del 101% viéndose disminuidas las clases Área de Cultivo y Sin Vegetación Aparente principalmente. La superficie de 1935.72 hectáreas es lo correspondiente al crecimiento urbano dado durante el periodo.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La enorme potencialidad en la aplicación de las imágenes de percepción remota en múltiples campos del conocimiento y la amplia disponibilidad de éstas, han llevado a las organizaciones e individuos a evolucionar en el desarrollo de tecnologías y mecanismos para su obtención, control, divulgación y utilización.

Enfocados en la perspectiva anterior, el presente trabajo se centra en el aprovechamiento de las imágenes satelitales para realizar la cuantificación del crecimiento de la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe y de los cambios en el uso de suelo durante el período 1990 y 2016.

La expansión física de la ciudad de Zacatecas sobre el suelo del municipio de Guadalupe durante los últimos 20 años, se ha producido por un crecimiento urbano acelerado, no controlado, de los asentamientos hacia áreas no urbanizables. En consecuencia, se ha desarrollado el fenómeno de conurbación intermunicipal, lo cual va desincorporando suelo apto para la agricultura, para convertirlo en zonas de vivienda o de servicios que demandan constantemente infraestructura, empleo y la disponibilidad de recursos necesarios para mantener un nivel de vida aceptable.

Derivado de lo anterior, han surgido problemáticas como asentamientos irregulares, escasez de agua, contaminación, factores de riesgo por habitar en zonas de fracturas geológicas o en túneles mineros, y deterioro de la imagen urbana, entre otros.

Los programas municipales de desarrollo de estas unidades se han visto rebasados por este fenómeno dando lugar al rediseño de estrategias. El Programa de Desarrollo Urbano de la Conurbación Zacatecas–Guadalupe 2004-2030, intenta abarcar parte de la problemática detectada.

Diversos estudios que sustentan a estos programas emplean datos de análisis que son el resultado del cruce de mapas existentes, por medio del uso de sistemas de información geográfica.

Existe hoy en día una diversa gama de sensores que permiten obtener un panorama inmediato de la situación actual y servir de apoyo para estudios de crecimiento urbano.

La aplicación de las técnicas de percepción remota mediante el uso de imágenes de satélite, en particular de la serie Landsat, ofrece una solución a especialistas que buscan información actual y a un costo mínimo.

Dada la amplia gama de sensores remotos y ante el problema de medición del espacio geográfico el objetivo de este trabajo es:

Objetivos

General

Analizar, con técnicas de percepción remota, el crecimiento urbano de las cabeceras municipales de Zacatecas-Guadalupe, de 1990 a la fecha utilizando dos imágenes de satélite Landsat (1990 y 2016).

Específicos

- Realizar el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales
- Identificar el rumbo del crecimiento municipal de acuerdo a su orografía
- Estimar la superficie de cambio
- Cuantificar los cambios de uso de suelo
- Obtener mapas de cambio

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Percepción remota

Dada la importancia hoy en día de la Percepción Remota, a través de la cual podemos recolectar, procesar e interpretar información de la superficie terrestre sin tener que estar en contacto físico con el objeto de estudio.

Encontramos diferentes definiciones de Percepción Remota dentro de las cuales también es conocida como Teledetección:

Lillesand et al. (2008), La Percepción Remota es la ciencia y arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

Chuvieco (1995), Teledetección Espacial es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, se supone que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación.

Sabins (1987), La Percepción Remota se define como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos relacionados, obtenidos de aeronaves y satélites que registran la interacción entre la materia y la radiación electromagnética.

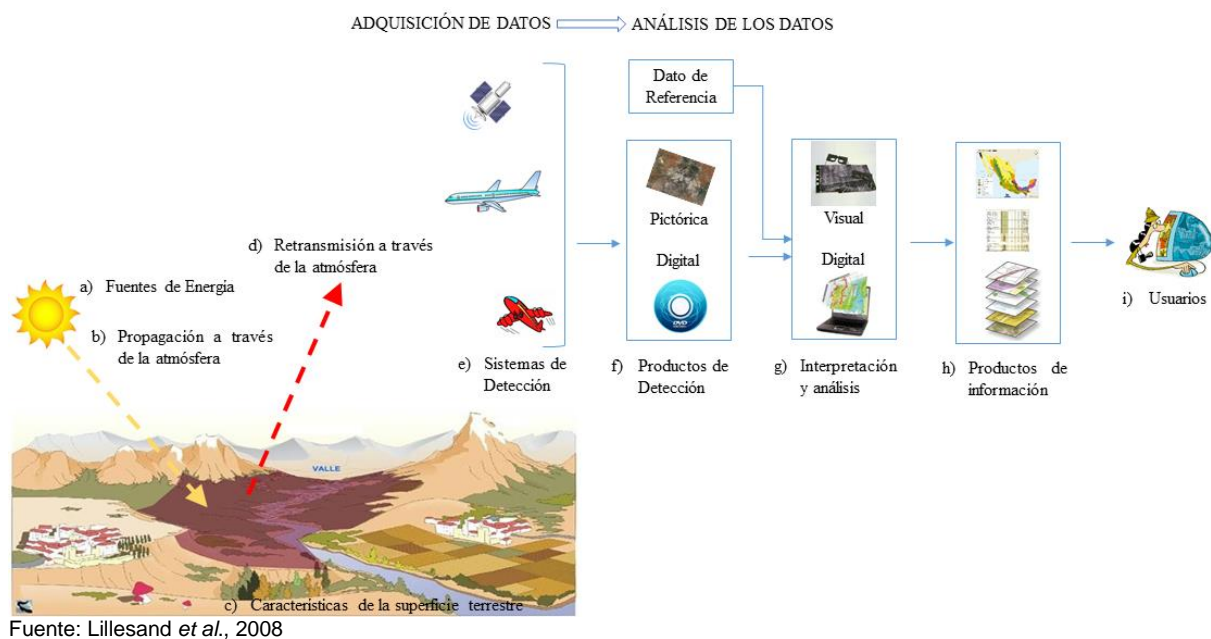
Las definiciones descritas anteriormente coinciden en la Adquisición de información en este caso imágenes satelitales para la recolección y análisis de información a distancia.

1.2 Elementos básicos del sistema de teledetección

Los elementos que conforman un sistema de teledetección de acuerdo a su autor:

Para Lillesand *et al.*, (2008) el sistema de teledetección se compone por los siguientes procesos: Adquisición de Datos y Análisis de los Datos. La Adquisición de Datos esta compuesta por: a) fuente de energía, b) propagación a través de la atmósfera, d) retransmisión a través de la atmósfera, e) sistemas de detección. El análisis de los datos incluye: f) productos de detección, g) interpretación y análisis, h) productos de información, i) usuarios quienes son aplican el resultado del proceso para la toma de decisiones, en la Figura 1 se muestra este sistema de teledetección.

Figura 1 *Teledetección electromagnética de los recursos terrestres*



En cambio, Chuvieco (1995) considera dentro de los componentes de un sistema de teledetección: a) fuente de energía, b) cubierta terrestre, c) sistema sensor-plataforma, d) sistema de recepción-comercialización, e) intérprete, f) usuario final.

En términos generales considera Chuvieco (1995) que existen tres principales elementos dentro del sistema de teledetección:

Sensor, objeto observado y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del sensor, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

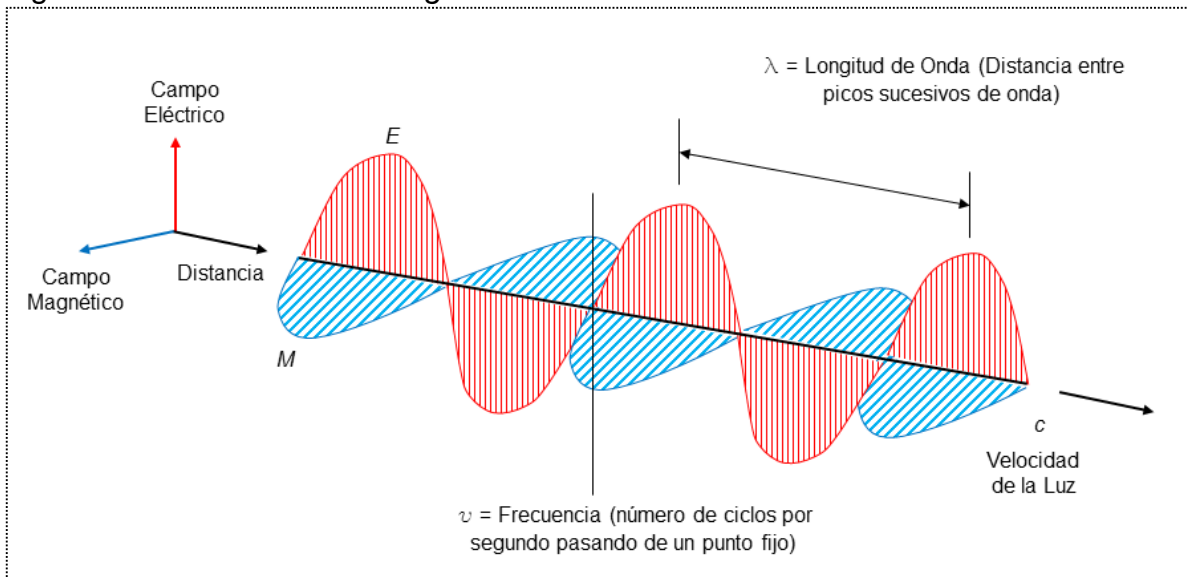
Por lo tanto, define Chuvieco (1995) la reflexión como la principal forma de teledetección, debido a que proviene de la energía que emana el sol. De acuerdo al tipo de cubierta la energía del sol se ve reflejada, llevando hacia el sensor y a las estaciones receptoras la información, generando con esto la dispersión y absorción de la señal original ocasionada por la atmosfera que se encuentra entre la superficie y el sensor.

1.3 Teoría ondulatoria

“La energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos ortogonales entre sí: eléctrico y magnético” (Chuvieco, 1995) La Figura 2 muestra el esquema de una onda electromagnética, incluyendo las características del flujo energético: longitud de onda (λ) y frecuencia (ν).

La energía electromagnética es generada a través de varios mecanismos, entre los que se encuentran cambios en los niveles de energía de los electrones, la aceleración de las cargas eléctricas, la desintegración de sustancias radioactivas y el movimiento térmico de los átomos y moléculas (Campbell y Wynne, 2011).

Figura 2 Onda Electromagnética



Fuente: Lillesand *et al.*, 2008

1.4 Espectro electromagnético

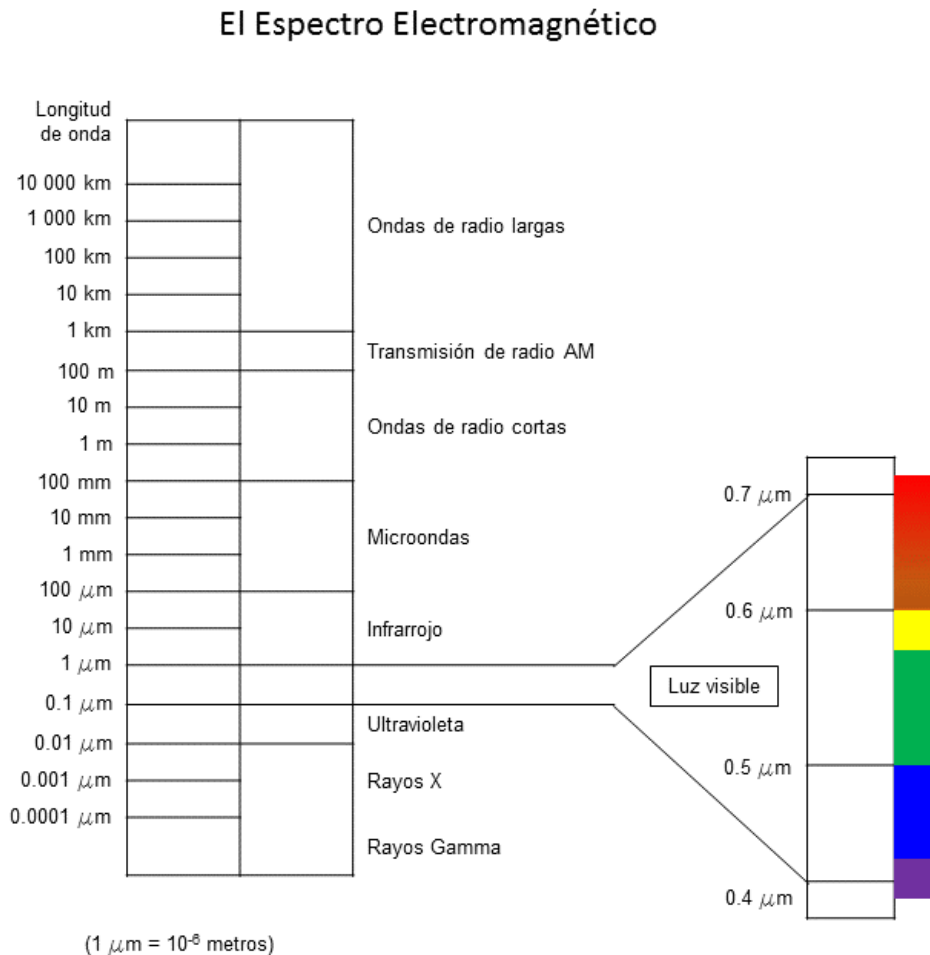
Las principales divisiones del espectro electromagnético están, en esencia, arbitrariamente definidas. En un espectro completo de energía solar no hay rupturas bruscas en las divisiones, como se indica gráficamente en la figura 3. Las subdivisiones se establecen por conveniencia y por tradiciones dentro de diferentes disciplinas, por lo que no se sorprenda al encontrar diferentes definiciones en otras fuentes o en referencias pertenecientes a otras disciplinas. (Campbell y Wynne, 2011).

Para Aguirre, (2002):

Es un continuo de todos los tipos de radiación. En el espectro, cada tipo de energía está ordenado de acuerdo con su longitud de onda. Los rayos gamma y los rayos X se encuentran en un extremo del espectro con las longitudes de onda más cortas, mientras que hacia el otro extremo de las longitudes de onda más largas se localizan las ondas de radio (Figura 3). Algunas zonas del espectro son reconocidas por el ser humano. Por ejemplo, nuestros ojos son capaces de detectar la pequeña porción del espectro electromagnético

conocida como región visible; podemos sentir radiación infrarroja como calor, usamos las microondas para cocinar y comunicarnos; y nos protegemos de la radiación ultravioleta.

Figura 3 *El Espectro Electromagnético*



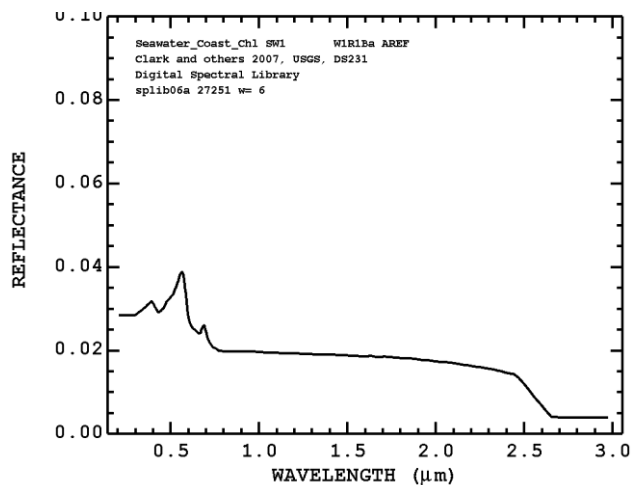
Fuente: Aguirre, 2002

1.4.1 Curvas Espectrales

Diferentes elementos/materiales sobre la superficie terrestre interactúan con la energía electromagnética de diferentes formas. Se puede determinar una curva de respuesta espectral específica, o firma espectral, para cada tipo de material (figura 4). Las clases como la vegetación, el agua y el suelo, en una imagen, a menudo se pueden distinguir comparando sus respuestas en rangos de longitud de onda muy

amplios. Cada sensor remoto es único con respecto a qué parte(s) del espectro electromagnético detecta y registra. Además, cada sensor remoto registra un número diferente de segmentos del espectro electromagnético, o bandas, que también pueden tener anchos de banda diferentes. La resolución espectral de un sensor, por definición, se refiere al número y el tamaño de las bandas que es capaz de grabar (Wang y Weng, 2014).

Figura 4 *Firma espectral del Mar*



Fuente: USGS, 2007

1.5 Plataformas y Sensores

1.5.1 Plataformas

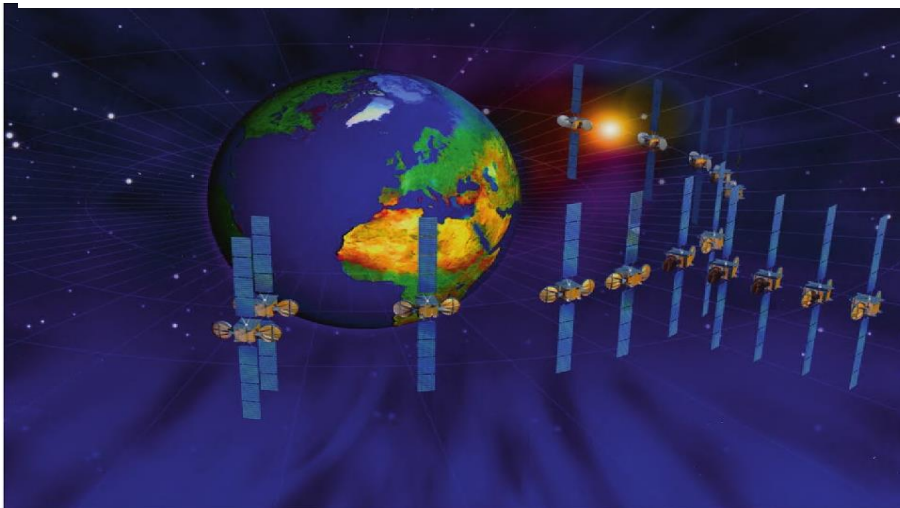
El sistema de adquisición de datos consiste principalmente en el sensor y la plataforma en la que reside el sensor. La plataforma puede estar en la superficie, en el aire o en el espacio. Una plataforma de superficie puede ser una escalera, una torre, una grúa, un edificio alto o un andamio que proporciona datos utilizados principalmente para la calibración y validación. Las plataformas aéreas incluyen aviones y globos. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV's, por sus siglas en inglés) son cada vez más utilizados para fines de teledetección en la actualidad. Las plataformas espaciales son principalmente satélites y transbordadores (Liang *et al.*, 2012).

1.5.2 Satélites Geoestacionarios

Un satélite geoestacionario es aquel que visto desde la Tierra aparece como un punto fijo. El satélite tiene que orbitar en el plano del ecuador y su velocidad angular debe ser igual a la de la Tierra, lo cual requiere que el satélite se encuentre (aproximadamente) a 42,000 km del centro de ella y en una órbita circular (Tun, 1987).

Hoy en día cerca de 300 satélites activos están volando en una órbita geosincrónica, sirviendo como plataforma para todo tipo de actividades de telecomunicaciones, teledetección (observación de la atmósfera, los océanos y masas de tierra), entre otras aplicaciones (Figura 5). Las ventanas asignadas generalmente cubren un rango de ± 0.1 de longitud, que el satélite no debe violar, para evitar la interferencia de señal (o incluso el contacto físico) con la nave espacial vecina (Montenbruck y Everhard, 2012).

Figura5 *Posiciones orbitales de los Satélites Geoestacionarios controlados por la Organización Europea de Telecomunicaciones por Satélite (Eutelsat, por sus siglas en inglés)*



Fuente: Montenbruck y Everhard, 2012

1.5.3 Satélites de Órbita Polar

Los satélites polares orbitan la Tierra de tal manera que cubren las regiones polares norte y sur (Nótese que el término órbita polar no significa que el satélite orbita alrededor de uno u otro de los polos). Mientras que sólo hay una órbita geoestacionaria. Así, hay en teoría, un número infinito de órbitas polares (Roddy, 2001).

1.6 Tipos de Sensores (Activos y Pasivos)

Los Sensores de Percepción Remota pueden ser divididos en dos grupos principales: *Activos* y *Pasivos*. A la grabación y el análisis de la luz solar reflejada se denomina teledetección pasiva. Además de la radiación solar, algunos sensores pasivos registran también la radiación térmica emitida desde la superficie terrestre. En contraste con los sensores pasivos, existen sensores activos que iluminan artificialmente la Tierra emitiendo y recibiendo activamente radiación en forma de ondas de radio (RADAR; Longitudes de onda que varían de 3 a 24 cm) o pulsos de láser (LIDAR, Light Detection and Ranging); típicamente en longitudes de onda NIR (Wegmann *et al.*, 2016).

1.7 Tipos de Resoluciones

No todos los sensores capturan y codifican la radiación por igual. Cada uno de ellos se caracteriza por su resolución, que definimos de forma genérica como “su habilidad para discriminar información de detalle”. Esta definición genérica se particulariza con la de los distintos tipos de resolución con los que caracterizamos un determinado sensor (Miguélez, 2002).

Las resoluciones en teledetección son:

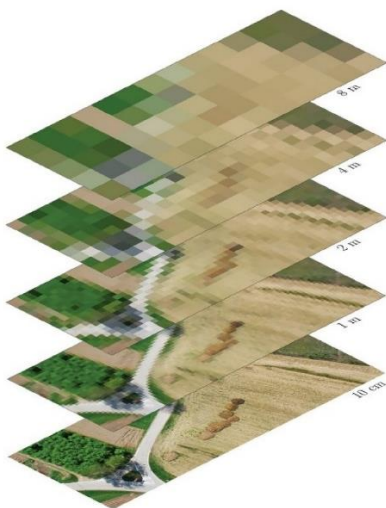
- resolución espacial (m);
- resolución temporal (días);
- resolución espectral (bandas);
- resolución radiométrica (bit);
- resolución temática (clases).

1.7.1 Resolución Espacial

La resolución espacial en los datos ráster se refiere al tamaño de píxeles. Una resolución espacial muy alta (VHR: 0,5-5 m) nos permite identificar casas unifamiliares o árboles, mientras que la resolución muy baja (500-1,000 m) nos da sólo el patrón de paisaje general.

Una resolución espacial de 30 m es más alta que una resolución espacial de 250 m. En la Figura 6 se utiliza una fotografía aérea para visualizar esto. Con la resolución espacial original, se puede diferenciar mucho detalle, pero degradar la imagen a una resolución espacial de aproximadamente 8 m hace imposible la diferenciación de características únicas y muy pequeñas en el paisaje (Wegmann *et al.*, 2016).

Figura 6 *Resolución Espacial.*



Fuente: Wegmann *et al.*, 2016.

1.7.2 Resolución Temporal

La resolución Temporal de un conjunto de datos de teledetección depende del tiempo que tarda un satélite en volver a visitar una escena. Algunos satélites, como MODIS, pasan la misma locación en Tierra cada 1-2 días, otros sólo aproximadamente 2 veces al mes (Landsat). Frecuentemente, los datos no se recogen debido a la limitación del almacenamiento o no se procesan en el caso de nubosidad alta y otros obstáculos (Wegmann *et al.*, 2016).

1.7.3 Resolución Espectral

Resolución Espectral se refiere al número de bandas espectrales que posee cada sensor. Esta característica única de los datos de teledetección es la información espectral la cual nos permite detectar y diferenciar las propiedades de la superficie (Wegmann *et al.*, 2016).

1.7.4 Resolución Radiométrica

La resolución radiométrica determina el número de valores únicos que pueden ser almacenados por el sensor en un pixel. Número de niveles de brillo o valores de gris que se pueden representar. Un detector de resolución radiométrica de 8 bits, por ejemplo, puede almacenar $2^8 = 256$ valores únicos, que son los valores enteros entre 0 y 255 (Wegmann *et al.*, 2016).

Lógicamente cuanto mayor sea el número de niveles mejor es la resolución radiométrica y mejor la información (Sobrino, 2000).

1.7.5 Resolución Temática

La Resolución Temática no es un atributo de datos. Define cuántas clases existen en una clasificación. Una clasificación es simplemente una conversión de nuestros valores de banda de imagen a clases de cobertura terrestre, por ejemplo, vegetación vs suelo vs agua (Wegmann *et al.*, 2016).

1.8 Programa LANDSAT

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general, cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol (Ariza, 2013) Figura 7.

Cuando Landsat 5 se lanzó en 1984, Landsat 6 no logró órbita en 1993 (USGS, 2016a). Landsat 7 lanzado con éxito en 1999 y, junto con Landsat 8, que se lanzó en 2013, continúan proporcionando diariamente datos globales (USGS, 2016a).

Figura 7 *Línea de tiempo de Misiones Landsat*



Fuente: USGS, 2016a.

Los sensores LANDSAT registran la reflectancia y la energía emitida desde la Tierra en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético el cual incluye todas las formas de energía radiada (NASA, 2017).

LANDSAT 4, 5, 7 y 8 “ven” y registran información en el intervalo (0.45-0.52) banda azul, (0.52-0.60) banda verde y (0.63-0.69) banda roja del espectro visible como se puede observar en la Tabla 1, en el espectro infrarrojo los intervalos se encuentran para el infrarrojo cercano (0.76-0.90), infrarrojo de onda corta 1 (1.55-1.75), infrarrojo de onda corta 2 (2.08-2.35). LANDSAT registra esta información digitalmente (NASA, 2017).

Tabla 1 Designación de bandas de los Satélites Landsat 8, 7, 4-5

Landsat 8 (OLI/TIRS)		Landsat 7 (ETM+)		Landsat 4-5 (TM)		Resolución (metros)	Espectro Electromagnético
Banda	Longitud de Onda (μm)	Banda	Longitud de Onda (μm)	Banda	Longitud de Onda (μm)		
1	0.43-0.45	Sin información		Sin información		30	Ultra Azul (Ultra Blue)
2	0.45-0.51	1	0.45-0.52	1	0.45-0.52	30	Azul (Blue)
3	0.53-0.59	2	0.52-0.60	2	0.52-0.60	30	Verde (Green)
4	0.64-0.67	3	0.63-0.69	3	0.63-0.69	30	Rojo (Red)
5	0.85-0.88	4	0.77-0.90	4	0.76-0.90	30	Infrarrojo Cercano (NIR)
6	1.57-1.65	5	1.55-1.75	5	1.55-1.75	30	Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1
7	2.11-2.29	7	2.09-2.35	7	2.08-2.35	30	Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2
8	0.50-0.68	8	0.52-0.90	Sin información		15	Pancromático
9	1.36-1.38	Sin información		Sin información		30	Cirrus
10	10.60-11.19	6	10.40-12.50	6	10.40-12.50	100*(30) ¹ 60*(30) ² 120*(30) ³	Infrarrojo Termal (TIRS) 1
11	11.50-12.51	Sin información		Sin información		100*(30)	Infrarrojo Termal (TIRS) 2

Fuente: USGS, 2016

¹Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se remuestrean a 30 metros en el producto de datos suministrado.

²La Banda 6 (ETM +) se adquiere a una resolución de 60 metros, pero los productos son remuestreados a 30 metros

³La Banda 6 (TM) fue adquirida a una resolución de 120 metros, pero los productos son remuestreados a 30 metros.

1.9 Interacción de la energía en la atmósfera

Cuando la radiación atraviesa la atmósfera se ve atenuada por varias interacciones (absorción y dispersión), esto es ocasionado por la coacción de moléculas y partículas con la radiación electromagnética (Sobrino, 2000).

1.9.1 Dispersión

Chuvieco (1995), establece que:

La dispersión de la radiación electro-magnética es causada por la interacción entre ésta y los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). En definitiva, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor.

1.9.2 Dispersión Rayleigh

Es la más común dado que la radiación interactúa con partículas y moléculas atmosféricas de tamaño inferior que la longitud de onda de la radiación incidente (fotones u ondas). El tipo de Dispersión Rayleigh cambia con el tamaño de la partícula. Interactuando la radiación con partículas del tamaño de moléculas de oxígeno y nitrógeno, el grado de Dispersión Rayleigh aumenta hacia las longitudes de onda cortas y disminuye hacia las longitudes de onda largas. El cielo azul es una manifestación de este tipo de dispersión, y en ausencia de ésta el cielo se vería negro (Pérez, 2007).

1.9.3 Dispersión Mie

Gustav Mie en 1906 publicó un análisis que describe la dispersión atmosférica que implica una gama más amplia de partículas atmosféricas. La dispersión de Mie es causada por partículas atmosféricas grandes, incluyendo polvo, polen, humo y gotas de agua. Estas partículas que causan la dispersión Mie tienen diámetros que son aproximadamente equivalentes a la longitud de onda de la dispersión. Puede influir en una amplia gama de longitudes de onda en y cerca del espectro visible (Campbell *et al.*, 2011). En términos generales la Teoría de Mie presenta un análisis en el cual el tamaño de las partículas es considerado, así como su índice de refracción y el medio que las rodea (Bastidas *et al.*, 2001).

1.9.4 Dispersión No Selectiva

De acuerdo a Ormeño (2006) la Dispersión No selectiva se produce cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor que la longitud de onda de la radiación, podrían tener dichas partículas el tamaño de gotas de agua o polvo de aire. Para Campbell *et al.*, (2011) “No Selectivo” significa que la dispersión no depende de la longitud de onda, por tanto se observa como una neblina blanquecina o grisácea, donde todas las longitudes de onda visibles están dispersas por igual. Una breve descripción del efecto global de las contribuciones de los tres fenómenos de interacción de la radiación con las partículas establece Ormeño (2006): *“reflexión en la superficie de la partícula sin penetración; paso de la radiación a través de la partícula con o sin reflexiones internas; y refracción o difracción en los bordes de la partícula.”*

1.10 Pre-procesamiento de Imágenes: Corrección Radiométrica y Geométrica

Los archivos digitales de las imágenes de satélite descargadas de los servicios de información, tienen un nivel de procesamiento que incluye imágenes con una corrección radiométrica y geométrica como el caso del nivel L1T de Landsat 8. Este nivel de procesamiento puede ser consultado en los metadatos de las mismas; y el detalle, en los respectivos manuales de usuario de estos sensores. Estas imágenes son un producto geoméricamente rectificado, libre de distorsiones relacionadas con el sensor (por ejemplo, efectos del ángulo de visión), del satélite (por ejemplo, desviaciones o variaciones de altitud) y de la misma Tierra (rotación, curvatura, relieve). Las imágenes con este nivel de procesamiento son corregidas radiométricamente, para remover ruido y otros artefactos en la señal. Las imágenes son distribuidas en unidades de Números Digitales (comúnmente conocido como ND, o DN por sus siglas en inglés), y pueden ser fácilmente reescaladas a radiancia espectral o reflectancia en el tope de la atmósfera (Reflectancia TOA Top of Atmosphere) mediante fórmulas y factores de reescalamiento provistos por el mismo autor en los metadatos de la imagen (USGS, 2016b).

1.10.1 Corrección radiométrica (o normalización)

Al momento de adquirir el sensor la información, se presentan anomalías en el sensor. Estas anomalías son las variaciones resultantes en la imagen debido a condiciones ambientales (por ejemplo, efectos atmosféricos, neblina) o anomalías del sensor como pérdida de líneas o celdas o bandeo (Purkis y Klemas, s.f).

Las operaciones de corrección minimizan en la medida de lo posible estas alteraciones, tal es el caso de la corrección radiométrica Esta corrección modifica los valores individuales de las celdas o "píxeles". Esta modificación puede variar desde la substracción uniforme de un valor de la imagen, para disminuir un ruido específico, hasta la aplicación de operadores y funciones matemáticas que se aplican sobre la imagen en el entendido de que es una matriz numérica, para la restauración de celdas pérdidas o bandeo (Velásquez, 1993).

- ***Corrección para el error del detector del sistema del sensor***

A veces el sistema de teledetección simplemente no funciona correctamente, lo que resulta en un error radiométrico en los datos de detección remota. Varios de los errores radiométricos más comunes incluyen saltos de líneas, bandas o bandeado y problemas de inicio de línea (Jensen, 1996).

Un ejemplo importante de lo anterior, es el caso de la anomalía en el sensor ETM+ de la serie Landsat 7, el cual, a causa de un mal funcionamiento de uno de los componentes mecánicos de la plataforma, ocasionó que, a partir del 31 de mayo del 2003, las imágenes resultantes comenzaran a generarse con bandeado.

Si bien es cierto que el bandeado no afecta al 100% de la imagen, la empresa NASA, así como terceros, han puesto a disposición varios algoritmos de corrección o “parchado”, para poder rescatar información y poder utilizar las imágenes.

- ***Corrección del error de atenuación ambiental***

Incluso cuando el sistema de detección remota funciona adecuadamente, puede introducirse un error radiométrico en los datos del sensor remoto. Las dos fuentes más importantes de atenuación ambiental son: (1) atenuación atmosférica causada por la dispersión y absorción en la atmósfera, ya que debido a su contenido en aerosoles causa un efecto de dispersión provocando el incremento de la radiancia detectada por el sensor y (2) atenuación topográfica, producida por el relieve y orientación de las laderas frente al vector de energía incidente, especialmente en zonas montañosas (Jensen, 1996).

Para la corrección del primer tipo de error de atenuación ambiental, se recurre a correcciones atmosféricas; y para el segundo caso, se construyen modelos de reflectancia basados en el modelo digital de elevaciones.

Calibración Radiométrica para Landsat 5

Dado que la escala de los ND depende completamente del sensor y que la radiancia percibida por el sensor depende de la luz solar al momento de la toma, no se pueden comparar firmas espectrales en ND de imágenes de sensores distintos o inclusive del mismo sensor si fueron capturadas en momentos diferentes, por lo que es necesario convertir los datos de la escala de ND a una escala espectral normalizada (Edwards, 1998 citado en Aguilar *et al.*, 2007).

El cálculo de la radiancia es el paso fundamental para poner los datos de múltiples sensores y plataformas en una escala radiométrica común (Chander *et al.*, 2007)

Posteriormente, a partir de los valores de radiancia calculados, se puede determinar el valor de reflectancia en el tope de la atmósfera (Reflectancia TOA), que es la unidad de interés para muchos trabajos con imágenes de satélite, debido a que las firmas espectrales que son utilizadas como base de comparación, están en valores de reflectancia.

La siguiente formula permite llevar los valores de Número Digital originales de cada una de las bandas de la imagen, a valores de radiancia en el sensor: (Chander *et al.*, 2007).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax}} \right) Q_{cal} + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia Espectral

Q_{cal} = Valor del píxel calibrado cuantificado [ND]

Q_{calmin} = Valor mínimo del píxel calibrado cuantificado [ND=0] correspondiente a $LMIN_{\lambda}$

Q_{calmax} = Valor máximo del píxel calibrado cuantificado [ND=255] correspondiente a $LMAX_{\lambda}$

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral que es escalado a Q_{calmin}

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral que es escalado a Q_{calmax}

De Radiancia a Reflectancia (Landsat 5)

Se puede lograr una reducción en la variabilidad entre escenas mediante una normalización para la irradiancia solar a través de la conversión de la radiación espectral, tal como se calculó anteriormente, a la reflectancia planetaria o albedo. Esta superficie combinada y la reflectancia atmosférica de la Tierra se calculan con la siguiente fórmula (NASA, s.f.).

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s} \quad (2)$$

Donde:

ρ_p = Reflectancia en el sensor

L_λ = Radiancia espectral en el sensor

d = Distancia Tierra-Sol en Unidades Astronómicas

$ESUN_\lambda$ = Promedio de Irradiancia solar exoatmosférica

θ_s = Angulo cenit solar en grados

Calibración Radiométrica para Landsat 8

Cálculo de la radiancia espectral para Landsat 8 (USGS, 2016b)

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Donde:

L_λ = Radiancia Espectral

M_L = Es el factor de escalado multiplicativo de Radiancia para la banda
(RADIANCE_MULTI_BAND_n, donde n es el número de la banda)

A_L = Es el factor de escalado aditivo de Radiancia para la banda
(RADIANCE_ADD_BAND_n, donde n es el número de la banda).

Q_{cal} = L1 valor de píxel en ND

De Radiancia a Reflectancia (Landsat 8)

La siguiente ecuación es usada para convertir valores ND a valores de Reflectancia TOA (USGS, 2016b)

$$\rho\lambda' = M_\rho * Q_{cal} + A_\rho \quad (4)$$

Donde:

$\rho\lambda'$ = Reflectancia espectral TOA, sin corrección del ángulo solar.

M_ρ = Es el factor de escalado multiplicativo de reflectancia para la banda
(REFLECTANCE_MULTI_BAND_n, donde n es el número de la banda)

A_ρ = Es el factor aditivo de reflectancia para la banda
(REFLECTANCE_ADD_BAND_n, donde n es el número de la banda).

Q_{cal} = L1 valor de píxel en ND

Nota: $\rho\lambda'$ no es una Reflectancia TOA correcta, porque no contiene una corrección para el ángulo de elevación solar. La conversión a la Reflectancia TOA correcta es la siguiente: (USGS, 2016b)

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\text{Sen}(\theta)} \quad (5)$$

Donde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia espectral TOA

θ = Es el ángulo solar de elevación (de los metadatos, o calculado)

✓ **Corrección Atmosférica**

Existen varios modelos para corregir los efectos de la atmósfera sobre la imagen entre ellos se encuentran:

El Modelo de Reflectancia Aparente (AR): efectúa un ajuste muy pequeño del efecto atmosférico al contemplar solo la elevación solar, y, por consiguiente, el grosor efectivo de la atmósfera.

- Convierte los ND a valores aproximados de reflectancia
- No realiza corrección por absorción o dispersión atmosférica (Brizuela y Aguirre, 2007)

El Modelo de la Sustracción del Objeto Oscuro (DOS): este modelo postula que la bruma atmosférica incrementa los ND en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar reflectancia nula. El valor representativo de esa diferencia se sustrae, en cada banda, en todos los píxeles de la escena (Chávez, 1998 citado en Brizuela y Aguirre, 2007).

Modelo COST: aplica la sustracción del objeto oscuro para el efecto de bruma e incorpora una estimación de la transmitancia ya que esta representa la absorción por parte de los gases atmosféricos y de la dispersión Rayleigh (Chávez, 1998 citado en Brizuela y Aguirre, 2007).

1.10.2 Corrección geométrica

La corrección geométrica permite compensar las distorsiones en las imágenes, generadas por efectos de la rotación de la Tierra y las variaciones en la posición o altitud del satélite, así como el relieve del terreno (Purkis y Klemas).

Como se mencionó, los productos L1T de Landsat contienen un procesamiento de corrección geométrica. Este tipo de procesamiento consiste en transformaciones

puntuales consistentes en cambiar de posición las celdillas originales de la imagen sin alterar sus niveles digitales. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar la geometría de la imagen (Martínez *et al.*, 1998).

Las correcciones necesarias para llevar a cada celda de la imagen a la nueva posición, se basan en ecuaciones polinómicas. El orden del polinomio aplicado determina la flexibilidad del ajuste.

1.11 Procesamiento de Imágenes Satelitales

1.11.1 Composiciones a color

Lira (2010) cita que: *“Todo ser humano se encuentra rodeado de imágenes que percibe a través del sentido de la vista; la mayor cantidad de información la recibimos en forma de imágenes, de todo tipo, en todos colores y en blanco y negro.”* Estableciendo que la radiación electromagnética proveniente de los objetos que tenemos a nuestro alrededor daña la retina, la cual convierte en pulsos eléctricos. Nuestra visión solo capta una pequeña parte del espectro electromagnético.

Para lograr la visualización eficaz de una imagen de teledetección se pueden realizar combinaciones de bandas asignándoles un color para representar el brillo en diferentes regiones del espectro. A pesar de que hay muchas maneras de asignar colores para representar diferentes regiones del espectro, la experiencia muestra que algunos han demostrado ser más útiles que otros (Campbell *et al.*, 2011).

Una imagen natural o de “color verdadero” combina las mediciones reales de la luz rojo, verde y azul. El resultado se parece al mundo tal como lo ven los humanos (NASA, 2014).






Una imagen de falso color utiliza al menos una longitud de onda No Visible, aunque esa banda todavía esté representada en rojo, verde o azul. Estas combinaciones de bandas de falso color revelan aspectos únicos de la tierra o el cielo que podrían no ser visibles de otra manera (NASA, 2014).

Resumiendo, Chuvieco (2002) da una breve descripción de las composiciones a color:

La elección de las bandas para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la aplicación última del proyecto. La composición más habitual es la denominada falso color o infrarrojo color, fruto de aplicar los cañones de color rojo, verde y azul sobre las bandas correspondientes al IRC, R, V, respectivamente. Esta composición facilita la cartografía de masas vegetales, láminas de agua, ciudades, etc., de ahí que se haya empleado profusamente en diversos estudios de análisis visual

Dada la información anterior podemos crear diversas combinaciones de colores con los tres canales espectrales, en la Tabla 2 se muestran diferentes combinaciones de bandas en RGB para los sensores Landsat.

Tabla 2 *Combinaciones de bandas comunes en RGB (Landsat 5 o Landsat 7, y Landsat 8)*

			Landsat 5 o 7	Landsat 8
	Color Infrarrojo		4,3,2	5,4,3
	Color Natural		3,2,1	4,3,2
	Falso Color		5,4,3	6,5,4
	Falso Color		7,5,3	7,6,4
	Falso Color		7,4,2	7,5,3

Fuente: USGS, 2016

Composición RGB 432

Esta combinación de bandas entre las principales coberturas resalta la vegetación esto se debe a que se compone de las bandas infrarrojas, mostrando en tonos de rojo áreas de vegetación (bosques y cultivos). En color azul se observa la estructura urbana. El suelo desnudo, infraestructura de concreto y dunas aparece en color blanco, así como lo muestra la Tabla 3 (Gomarasca, 2009).

Tabla 3 *Interpretación basada en el compuesto de falso color RGB 432 de Landsat EMT+*

Tipología de cobertura territorial	Composición a Falso Color RBB 432
Estructura Urbana	Azul
Roca desnuda, arena, dunas, infraestructura de concreto.	Blanco
Carreteras, ferrocarril	Azul oscuro
Hielo permanente o nieve	Blanco
Cultivos anuales	Rojo
Cultivos permanentes	Rojo-rosa
Bosque caducifolio	Rojo brillante
Bosque de coníferas	Rojo marrón
Pradera	Rosa brillante, rojo brillante
Humedales	Rojo negro o rojo oscuro
Pastizales, Arbustos	Gris-amarillo, gris-rosado, marrón claro
Zonas quemadas	Negro, gris oscuro, azulado

Fuente: Gomarasca, 2009

Composición RGB 742

Esta combinación proporciona una interpretación "como-natural", mientras que también penetra partículas atmosféricas y humo. La vegetación sana será de un verde brillante y puede saturar en temporadas de crecimiento intenso, las praderas aparecerán verdes, las áreas rosadas representarán el suelo estéril, las naranjas y los marrones representan áreas escasamente vegetadas. La vegetación seca será naranja y el agua será azul. Las arenas, los suelos y los minerales se destacan en una multitud de colores. Esta combinación de bandas proporciona imágenes

sorprendentes para las regiones desérticas. Es útil para estudios geológicos, agrícolas y de humedales. Si hubiera algún incendio en la imagen aparecerían rojos. Esta combinación se utiliza en las aplicaciones de manejo de incendios para el análisis post-fuego de áreas boscosas quemadas y no quemadas. Las zonas urbanas aparecen en diferentes matices de magenta. Los pastizales aparecen como verde claro. Las manchas de color verde claro dentro de la ciudad indican la cubierta de tierra herbosa - parques, cementerios, campos de golf. Verde oliva a tonos verde brillante normalmente indican áreas boscosas con bosques de coníferas que son más oscuros de verde que deciduos. (Quinn, 2001).

1.12 Extracción de información temática: Clasificación de imágenes

1.12.1 Clasificación supervisada

Noyola *et al.*, (2005) asumen que: *“La clasificación supervisada se define informalmente como el uso de muestras (o píxeles) de identidad conocida para clasificar píxeles de identidad desconocida.”* Antes de iniciar con la clasificación supervisada se debe identificar las clases de cobertura presentes en la imagen, llamados sitios de entrenamiento (training sites) (Eastman, 2012).

De acuerdo a Olaya (2011) cuando ya se han identificado las clases, el algoritmo de clasificación asigna los puntos de la zona de estudio a una de las clases de acuerdo a sus valores. Algunos de los clasificadores más usuales son los mencionados a continuación:

- Clasificación por paralelepípedos
- Clasificación por mínima distancia
- Clasificación por máxima probabilidad (verosimilitud)

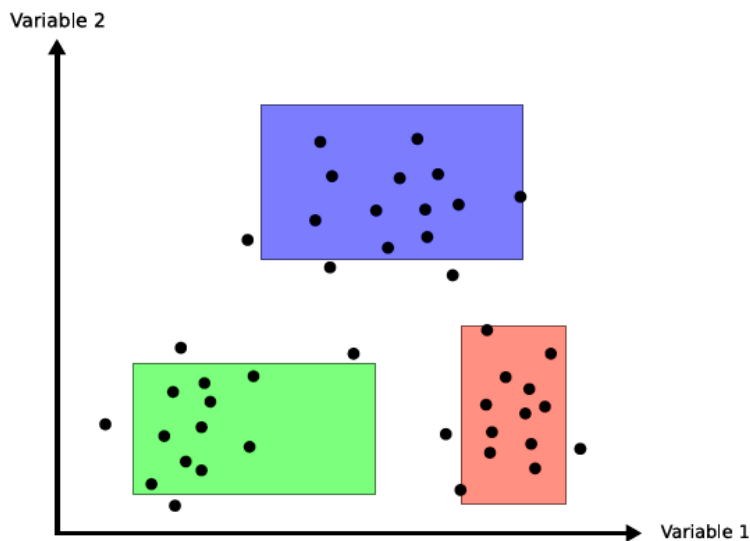
1.12.2 Clasificación por paralelepípedos

El método de clasificación por paralelepípedos se basa en rangos de valores dentro de los datos de entrenamiento para definir regiones en un espacio de datos multidimensional. Los valores espectrales de píxeles no clasificados se proyectan en el espacio de datos; los píxeles que se encuentran dentro de las regiones definidas por los datos de formación se asignan a las categorías apropiadas. (Campbell et al., 2011)

Olaya (2011) explica el método de la siguiente manera:

Los distintos lados de los paralelepípedos vienen definidos por la media de cada variable en la clase y su desviación típica. La longitud de los lados es igual a dos veces la desviación típica, y se encuentran centrados en la media. Un esquema de esto puede verse en la figura 8. Los puntos representados son elementos que se quieren clasificar, que en el caso de una capa ráster serán mucho más numerosos, uno por cada celda.

Figura 8 Método de clasificación por paralelepípedos



Fuente: Olaya, 2011

1.12.3 Clasificación por mínima distancia

Lillesand *et al.*, (2008) refieren que es una de las estrategias de clasificación más simples que se pueden utilizar. En primer lugar, el valor espectral medio o promedio de cada banda para cada categoría es determinado. Estos valores comprenden el vector medio para cada categoría. Considerando los dos canales del valor del pixel como es las coordenadas de posición, un pixel de identidad desconocida puede ser clasificado calculando la distancia entre los valores del pixel desconocido y cada promedio de la categoría. Sobrino, (2000) señala que este algoritmo de clasificación no considera los diferentes grados de varianza interna de las clases, generando esta limitación, que habiendo puntos con cierta varianza sean asignados a otra clase solo porque el centro esta máss cerca.

1.12.4 Clasificación por máxima probabilidad (verosimilitud)

Utiliza los datos de entrenamiento para estimar las medias y las varianzas de las clases, que luego se utilizan para estimar las probabilidades. De acuerdo a Chuvieco (1995):

Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. En pocas palabras, esa función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un pixel (con un determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el pixel a aquella que maximice la función de probabilidad.

Requiere cálculos intensivos, por lo que tiene la desventaja de requerir más recursos informáticos que la mayoría de las técnicas más simples mencionadas anteriormente (Campbell *at el.*, 2011). Así como también es el que tiene mayor robustez y trabaja con la información original de los datos (Chuvieco, 1995).

1.12.5 Clasificación No Supervisada

La clasificación no supervisada requiere sólo una cantidad mínima de información inicial del analista. Es un proceso mediante el cual se realizan operaciones numéricas que buscan agrupaciones naturales de las propiedades espectrales de los píxeles, tal como se examinan en el espacio de características multispectrales. El usuario permite a la computadora seleccionar los medios de clase y las matrices de covarianza que se utilizarán en la clasificación. Una vez que los datos son clasificados, el analista intenta a posteriori (después del hecho) asignar clases naturales o espectrales a las clases de información de interés. Esto puede no ser fácil. Algunos grupos pueden no tener sentido porque representan clases mixtas de materiales de la superficie de la Tierra. El analista debe entender las características espectrales del terreno lo suficientemente bien como para etiquetar ciertos grupos como representación de clases de información (Jensen, 1996).

1.13 Evaluación del error del Mapa de Clasificación de la tierra cubierta (Garantía de Calidad)

1.13.1 Evaluación de la Exactitud

Después de la aplicación del proceso de clasificación (supervisada o no supervisada), la evaluación de la precisión de las imágenes finales es algo crucial. El resultado de la visita a campo de los lugares es comparado con el mapa generado (Eastman, 2012).

Para Mas *et al.*, (2003) la evaluación de la confiabilidad temática se basa en confrontar la información del mapa generado utilizando como referencia información fiable, tomando sitios de verificación para el muestreo, a través del análisis de imágenes con mejor resolución que las utilizadas en la generación del mapa.

En términos generales verificar la calidad, comprobar la validez del método y del producto generado, permite al usuario valorar su grado de acuerdo con la realidad,

así como el riesgo que asume al tomar decisiones sobre la información que ha generado (Chuvieco, 2002).

1.13.2 Matriz de confusión

Una manera de expresar la exactitud de la clasificación es mediante una Matriz de Error de Clasificación llamada Matriz de Confusión, en la cual se comparan las categorías, la relación entre los datos de referencia conocidos (verdad del terreno) y los resultados correspondientes de una clasificación automatizada (Lillesand *et al.*, 2008). Dicha Matriz “*recoge los conflictos que se presentan entre categorías*” (Chuvieco, 2002).

Para Card, citado en Mas *et al.*, (2015)

Es una tabla de doble entrada en la cual se reporta el número de sitios de verificación para cada combinación de categoría en el mapa y en los datos de referencia. Es común calcular directamente los índices de fiabilidad con base en esta matriz, sin embargo, eso es válido únicamente si el número de sitios por categoría del mapa es proporcional a la superficie de esta categoría en mapa como en el caso de un muestreo aleatorio simple.

1.13.3 Errores de omisión

La clase A para la cual se estima la exactitud se clasifica como otra clase, es decir, la muestra se “omite” de la clase verdadera o hay omisión de la categoría correcta. (Joseph, 2005). Para Chuvieco, (2002) son los “*pixeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella*”. Una fiabilidad del productor (error de omisión) del 87.7%, significa que aproximadamente nueve de cada diez superficies que tienen realmente esa cubierta están incluidas en la clasificación como tal.

1.13.4 Errores por comisión

Las muestras de otras clases se clasifican erróneamente y se añaden a la clase A. Es decir, se agregan muestras (entregadas) a la clase incorrecta, hay comisión en otra categoría. (Joseph, 2005). Chuvieco, (2002) establece que son: “*pixeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra*”, un porcentaje bajo, por ejemplo 60% quiere decir que sólo tres quintas partes de las zonas clasificadas como esa cubierta realmente lo son.

1.13.5 Coeficiente Kappa

La exactitud total de una clasificación puede ser evaluada a través de un estimador del coeficiente de Kappa (K'), una técnica discreta multivariada que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. El coeficiente es una medida de la concordancia o exactitud basada en las diferencias entre los datos de la clasificación y los de referencia, comparada con la exactitud proveniente de una clasificación debida al azar (Congalton y Green, 1999; Richards y Jia, 1999, citados en Berlanga *et al.*, 2010).

Kappa varía entre -1 y 1, el -1 indica total desacuerdo, el 0 indica que la coincidencia no es mejor que la producida al azar y el 1 indica total acuerdo o coincidencia (Ormeño, 2006).

CAPÍTULO II. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Zona de estudio

El área de estudio abarca las cabeceras municipales de Zacatecas y Guadalupe, en el estado de Zacatecas, México. Ver Mapa 1 (Datos del INEGI. Modelo digital de elevación, Marco Geoestadístico Nacional 2015, versión 6.2).

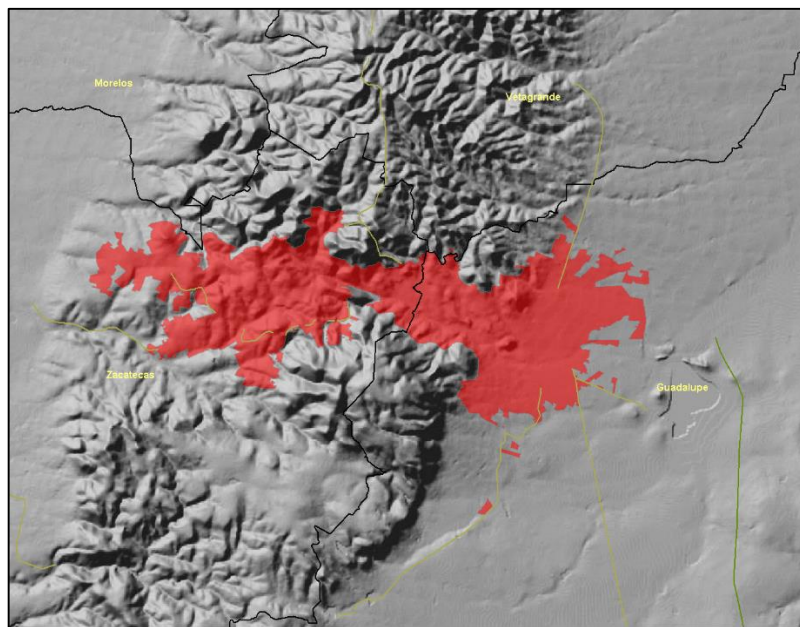
Mapa 1 *Zona de Estudio*



Localización de los Municipios de Zacatecas – Guadalupe, México

Simbología	
	Urbana
	Límite Municipal
	Carretera Estatal Libre
	Carretera Estatal de Cuota

Fuente: Elaboración propia



La información presentada en esta sección se basa en la publicación Compendio de Información Geográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010 a y b). Se recomienda al lector que si requiere profundizar en los temas consulte la publicación.

2.2 Municipio de Zacatecas

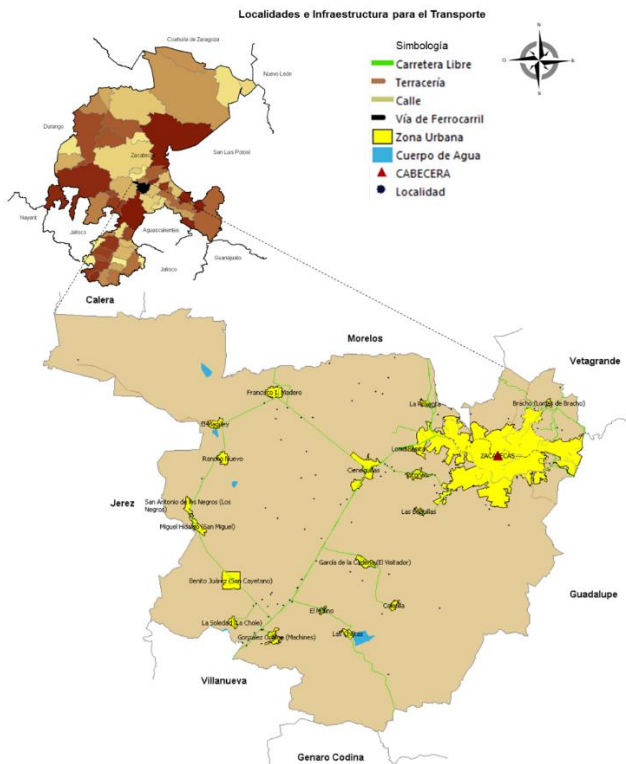
2.2.1 Ubicación Geográfica

Se encuentra localizado entre los paralelos 22° 37' y 22° 51' de latitud norte; los meridianos 102° 32' y 102° 51' de longitud oeste; su altitud oscila entre 2 100 y 2 800 m.

Colinda al norte con los municipios de Calera, Morelos y Vetagrande; al este con los municipios de Vetagrande y Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Genaro Codina y Villanueva; al oeste con el municipio de Jerez.

Ocupa el 0.6% de la superficie del estado. Cuenta con 68 localidades y una población total de 146147 habitantes (INEGI, 2010b). Ver. Mapa 2 (Datos del INEGI. Marco Geoestadístico Nacional 2016. RNC 2015. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie III.)

Mapa 2 *Localización geográfica de la Ciudad de Zacatecas, Zac.*



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Fisiografía

Pertenece a la Provincia Sierra Madre Occidental (100%), Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos (100%) y Sistemas de Topoformas que consisten en Bajada con lomerío (43.8%), Sierra baja (17.4%), Lomerío con bajadas (14.7%), Meseta escalonada (13.0%), Lomerío con Llanuras (7.0%) y Sierra alta con mesetas (4.1%) (INEGI, 2010b).

2.2.3 Uso de suelo y vegetación

En cuanto al Uso de suelo corresponde: Agricultura (39.5%), zona urbana (5.2%) y no aplicable (1.0%). La vegetación que prevalece es: Pastizal (40.6%) y matorral (13.6%). El porcentaje faltante corresponde a Cuerpos de Agua con 0.1% (INEGI, 2010b).

2.2.4 Uso potencial de la tierra

Agrícola: para la agricultura mecanizada continua (57.9%), para la agricultura de tracción animal continua (1.3%), no apta para la agricultura (40.8%).

Pecuario: Para el desarrollo de praderas cultivadas (57.9%), para el aprovechamiento de la vegetación de pastizal (1.3%), para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino (35.5%), no aptas para su uso pecuario (5.3%) (INEGI, 2010b).

2.3 Municipio de Guadalupe

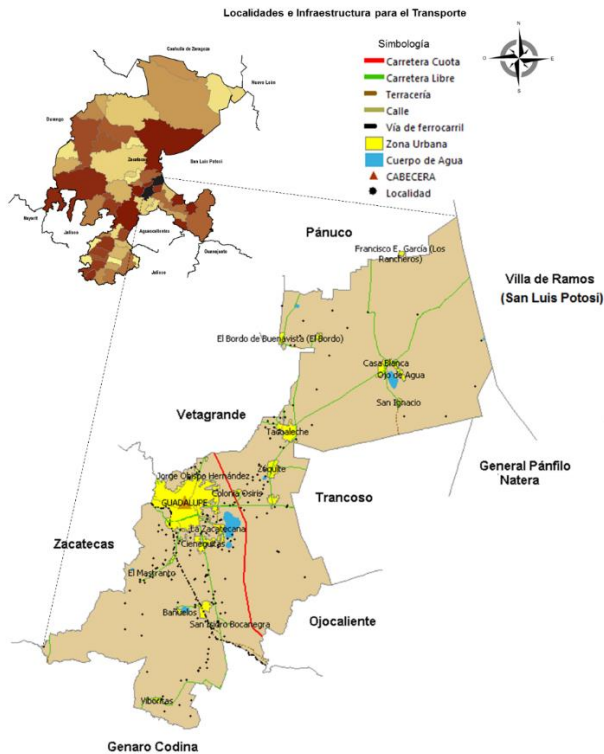
2.3.1 Ubicación Geográfica

Se encuentra localizado entre los paralelos 22° 32' y 23° 02' de latitud norte; los meridianos 102° 11' y 102° 40' de longitud oeste; altitud entre 2 000 y 2 800 m.

Colinda al norte con los municipios de Zacatecas, Vetagrande, Pánuco, Villa de Cos y el Estado de San Luis Potosí; al este con el estado de San Luis Potosí, los municipios de General Pánfilo Natera y Trancoso; al sur con los municipios de Trancoso, Ojocaliente y Genaro Codina; al oeste con los municipios de Genaro Codina, Zacatecas y Vetagrande.

Ocupa el 1.1% de la superficie del estado. Cuenta con 132 localidades y una población total de 187918 habitantes. (INEGI, 2010a) Ver Mapa 3 elaborado con base en los datos del Marco Geoestadístico Nacional 2016. RNC 2015. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie III.

Mapa 3 *Localización geográfica de la Ciudad de Guadalupe, Zac.*



Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Fisiografía

Provincia Sierra Madre Occidental (54.7%) y Mesa del Centro (45.3%), Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos (54.7%) y Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecas (45.3%) y Sistemas de Topoformas que consisten en Bajada con lomerío (31.0%), Bajada típica (28.5%), Lomerío típico (9.9%), Llanura desértica de piso rocoso o cementado (8.8%), Lomerío con bajadas (8.0%), Meseta escalonada (6.8%), Lomerío con llanuras (5.1%) y Sierra Baja (1.9%) (INEGI, 2010a).

2.3.3 Uso de suelo y vegetación

En cuanto al Uso de suelo corresponde: Agricultura (54.9%), zona urbana (3.5%) y no aplicable (0.5%). La vegetación que prevalece es: Matorral (31.4%) y pastizal (9.1%) (INEGI, 2010a).

2.3.4 Uso potencial de la tierra

Agrícola: Para la agricultura mecanizada continua (64.1%), para la agricultura de tracción animal continua (3.9%), no apta para la agricultura (32.0%).

Pecuario: Para el desarrollo de praderas cultivadas (64.1%), para el aprovechamiento de la vegetación de pastizal (3.9%), para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (11.4%), para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino (16.5%), no aptas para uso pecuario (4.1%) (INEGI, 2010a).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El capítulo considera la adquisición de datos, el pre-procesamiento (correcciones radiométricas, atmosféricas, composiciones de color) y procesamiento de las imágenes (algoritmo empleado para una clasificación efectiva de clases en la superficie y su comparación).

3.1 Adquisición de los datos de teledetección y referencia del suelo

Las imágenes satelitales fueron obtenidas de la página web EarthExplorer USGS de acuerdo a los criterios siguientes:

- a) Sistema del sensor remoto
- b) Ambientales

3.1.1 Consideraciones del Sistema del sensor remoto

Se dispone de dos imágenes satelitales Landsat. En la tabla 4 se muestran los metadatos más relevantes de las imágenes.

Tabla 4 *Metadatos de las imágenes Landsat*

Satélite	Sensor	Fecha de Adquisición (Año-Mes-Día)	Path	Row	Elevación Solar	Formato de salida	Datum de Referencia
Landsat 5	TM	1990-03-07	29	44	44.79	Geotiff	WGS84
Landsat 8	OLI_TIRS	2016-03-30	29	44	59.62	Geotiff	WGS84

3.1.2 Consideraciones ambientales

En cuanto a las consideraciones ambientales, el ciclo fenológico de las imágenes corresponde al tiempo cuando la vegetación es relativamente poca debido a que ya se terminó la producción agrícola. Las imágenes corresponden al mes de marzo en ambos casos

3.2 Procesamiento de Imágenes

3.2.1 Importación de imágenes GeoTiff a formato RST

El formato de descarga de imágenes Landsat es Geotiff para realizar los procesos correspondientes dentro del Software Idrisi Selva las imágenes deben estar en formato RST, por consiguiente, se realizó la importación al formato requerido.

3.2.2 Corrección radiométrica (o normalización)

Para realizar la corrección radiométrica es necesario llevar los valores digitales (ND) a parámetros físicos de radiancia, la cual es la cantidad total de luz del sol que llega al sensor.

Dicha corrección se efectuó a las imágenes del Sensor TM de acuerdo a la ecuación 1 de calibración radiométrica para Landsat 5. Posteriormente se llevó a cabo la conversión de radiancia a reflectancia a dicho sensor ecuación 2.

En cuanto a las imágenes del Sensor OLI/TIRS se aplicaron las fórmulas de Cálculo de radiancia ecuación 3 y la Reflectancia para Landsat 8 (ecuación 5).

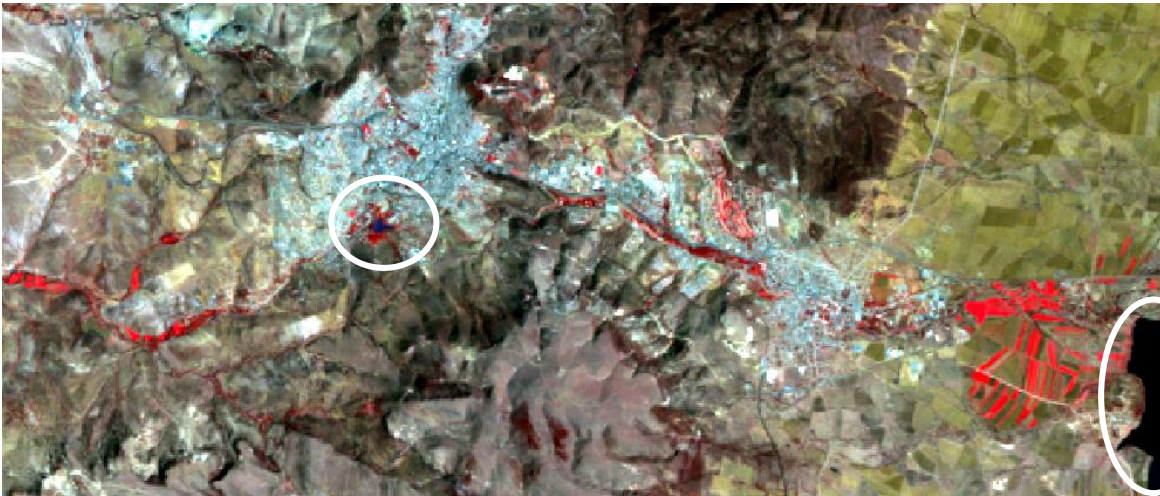
Antes de realizar el proceso de correcciones atmosférica se realiza el recorte de la imagen de acuerdo al área de estudio. Estableciendo los valores máximos y mínimos en cada coordenada (X, Y). La figura 9 es un ejemplo gráfico de localización de los valores extremos de la imagen.



3.2.2.1 Corrección Atmosférica

Una vez realizado el recorte continuamos con la corrección atmosférica, la cual se realizaría de acuerdo al Método Chávez que consiste en la Sustracción del Objeto Oscuro (lagos o agua profunda). Dentro de nuestra área de estudio se identificaron dos cuerpos de agua: un lago artificial (Lago La Encantada) y una laguna (Laguna El Pedernalillo), como se muestra en la figura 10

Figura 10 *Localización de Cuerpos de Agua en la Zona de Estudio. Landsat 5. Año 1990*



3.2.3 Composiciones a color

A través de una composición a color podemos discernir entre diferentes coberturas dentro de una imagen satelital, para ello se realizaron diferentes composiciones a color, por ejemplo, para el sensor Landsat 5 el compuesto en Color Natural se formó con las bandas 3, 2 y 1 respectivamente en los cañones Red, Green, Blue. Para el sensor Landsat 8, el compuesto en color natural es RGB 432.

En cuanto a Composiciones en Falso Color se utilizaron para Landsat 5 el compuesto RGB 432 denominado Color Infrarrojo, en tanto para las imágenes de Landsat 8 se generó el compuesto RGB 543. Otra composición en Falso Color de gran utilidad es RGB 742 para Landsat 5, RGB 753 para Landsat 8.

Al generar las anteriores composiciones a color se pretende identificar el Área Urbana, Zona de Cultivo, Cuerpos de Agua y la identificación del resto de las categorías. Son de gran ayuda para crear los sitios de entrenamiento para el proceso de clasificación supervisada, ya que se logra discernir las categorías en las combinaciones.

Las composiciones nos ayudan a identificar con mayor claridad los elementos existentes dentro de nuestra área de estudio, dependiendo de lo que se desea destacar en la imagen podemos enviar una banda en específica a un canal (RGB) para resaltar dicho material en la imagen.

3.2.4 Selección del algoritmo y lógica de clasificación de la imagen

La elección del algoritmo de clasificación (Paralelepípedos, Mínima Distancia y Máxima Probabilidad) se definirá a través de aquel que logre la mejor separabilidad entre clases.

Los sitios de entrenamiento encontrados dentro del área de estudio son los siguientes:

1. Agua
2. Vegetación sana
3. Zona Urbana
4. Área de cultivo
5. Sin Vegetación aparente
6. Matorral Xerófilo
7. Pastizal Natural

3.2.5 Evaluación del error del Mapa de Clasificación de la tierra cubierta (Garantía de Calidad)

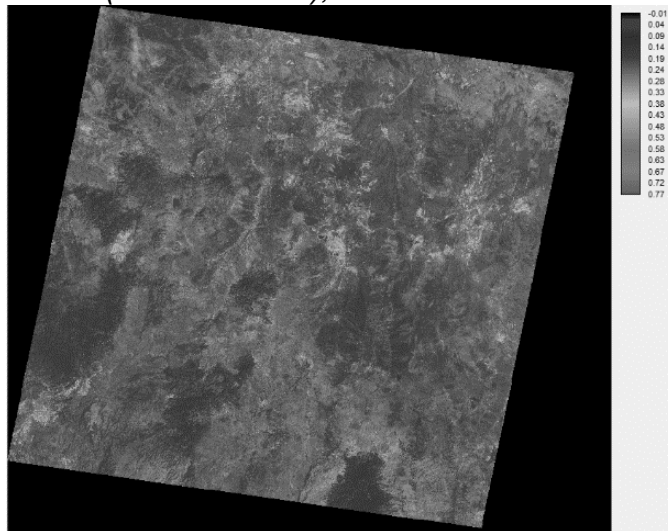
Se evaluará la exactitud comparando datos de campo con la clasificación supervisada realizada, a través de una matriz de confusión la cual es una tabla donde se reporta el número de sitios de verificación de las categorías, confrontando la información con los datos conocidos del terreno y el resultado de la clasificación automatizada, para calcular la certidumbre del Mapa de Clasificación así como el Coeficiente Kappa utilizado para medir el grado de concordancia entre los datos resultantes de la clasificación y los datos de referencia.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1 Corrección Radiométrica

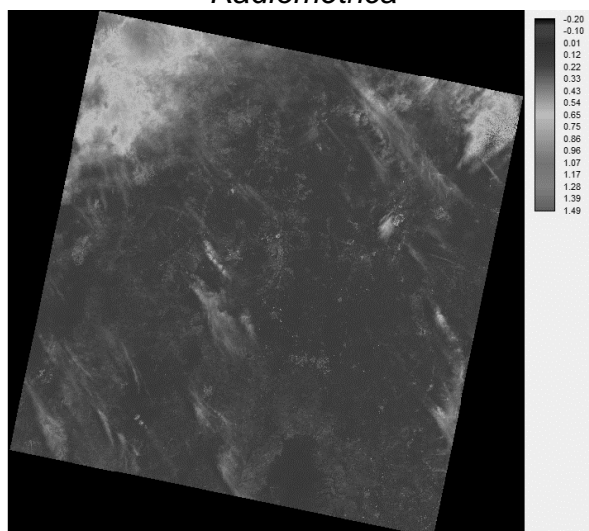
Lo concerniente a la normalización de la imagen del sensor TM produjo el resultado mostrado en la figura 11 quedando valores de radiancia.

Figura 11 *Banda 1 (Landsat 5 TM), Año 1990 con Corrección Radiométrica*



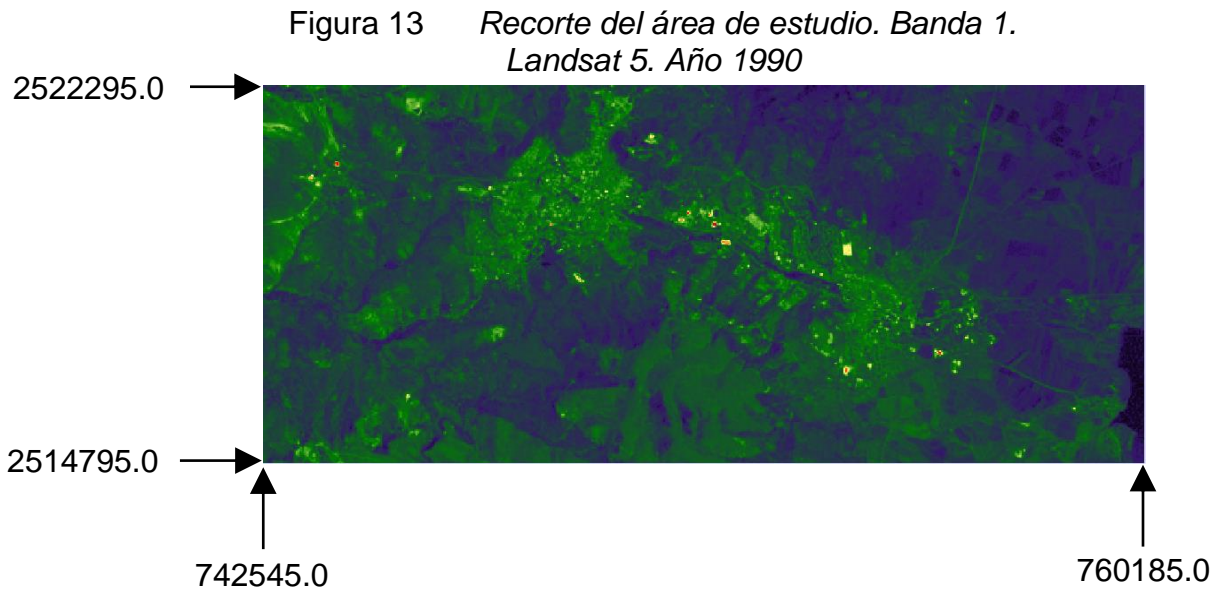
Para el sensor OLI/TIRS se efectuó la corrección radiométrica (dando valores entre -0.20 y 1.49, los valores negativos se deben a la parte de la imagen donde no se tiene información, como se muestra en la figura 12.

Figura 12 *Banda 2 (Landsat 8 OLI/TIRS), Año 2016 con Corrección Radiométrica*



4.2 Recorte del área de estudio

Los valores máximos y mínimos en X y Y resultantes del proceso de recorte se muestran en la figura 13.



Dentro de este proceso se revisó que todas las bandas de cada una de las imágenes utilizadas tengan los mismos valores (X, Y), así como la misma cantidad de columnas y filas (588 columnas, 250 filas).

4.3 Corrección Atmosférica

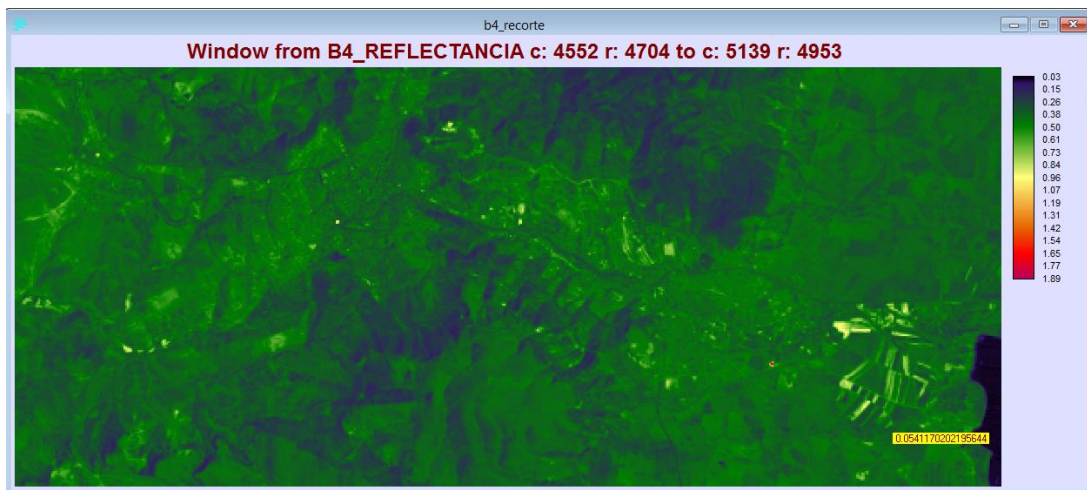
Después de realizar el recorte del área de estudio para las imágenes de Landsat 5, los rangos de valores quedan entre 0 y 2, como lo muestra la tabla 5.

Tabla 5 *Niveles Digitales de Landsat 5, Año 1990*

Banda	ND Mínimo	ND Máximo	Valores > 1
1	0.14	0.77	0
2	0.10	1.63	5
3	0.08	1.46	3
4	0.03	1.89	5
5	0.00	1.23	9
7	0.00	1.98	14

También se identificó en la banda 4 (infrarrojo cercano) de Landsat 5, que el cuerpo de agua tiene valor de Cero por lo que la corrección Atmosférica ya no es necesaria, como podemos ver en la figura 14.

Figura 14 *Banda 4, Landsat 5, Año 1990*



Se realizó un Reclass para las bandas de Landsat 5 con valores mayores a 1, quedando la tabla de valores dentro del rango de 0 a 1, ver Tabla 6.

Tabla 6 *Niveles Digitales de Landsat 5, Año 1990 después de realizar Reclass*

Banda	ND Mínimo	ND Máximo	Valores > 1
1	0.14	0.77	0
2	0.10	1.00	0
3	0.08	1.00	0
4	0.03	1.00	0
5	0.00	1.00	0
7	0.00	1.00	0

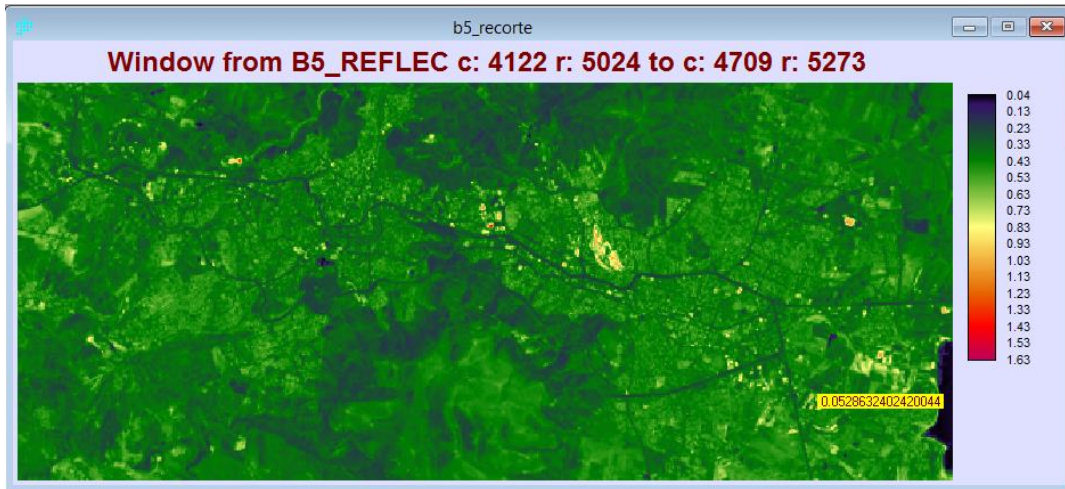
La información resultante de Landsat 8 de acuerdo al área de estudio muestra valores de 0 a 1.84, como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7 *Niveles Digitales de Landsat 8, Año 2016*

Banda	ND Mínimo	ND Máximo	Valores > 1
2	0.12	1.43	5
3	0.08	1.44	13
4	0.05	1.59	26
5	0.04	1.63	64
6	0.00	1.82	113
7	0.00	1.84	106

La banda 5 (infrarrojo cercano) de Landsat 8 tiene valores de Cero en el cuerpo de agua razón por la cual la corrección Atmosférica no se efectuó. La figura 15 muestra el resultado.

Figura 15 *Banda 5, Landsat 8, Año 2016*



Se reclasificaron los valores mayores a 1 para cada una de las bandas de Landsat 8, obteniendo valores dentro del rango de 0 a 1, ver Tabla 8.

Tabla 8 *Niveles Digitales de Landsat 8, Año 2016 después de realizar Reclass*

Banda	ND Mínimo	ND Máximo	Valores > 1
2	0.12	1.00	0
3	0.08	1.00	0
4	0.05	1.00	0
5	0.04	1.00	0
6	0.00	1.00	0
7	0.00	1.00	0

4.4 Composición a Color

Las figuras 16 y 17 contienen información generada a través de los Compuestos a Color Natural o Real, como se ha mencionado anteriormente para el Sensor TM se obtiene con las bandas 3, 2 y 1, en cambio para el Sensor OLI_TIRS se utilizan las bandas 4,3,2.

Las composiciones RGB 321 y RGB 432 son las que representan las tonalidades más cercanas a la percepción de la tierra desde nuestra visión. Los cuerpos de agua aparecen en color azul oscuro. Suelo desnudo y rocas se muestran en colores amarillentos y plateados. En tonos de gris brillante se discrimina las zonas urbanas y carreteras. El área de cultivo se muestra en color marrón-rojizo. Las zonas con vegetación arbustiva en colores marrón-oscuro.

Figura 16 *Composición a Color Natural. RGB 321. Landsat TM. Año 1990*

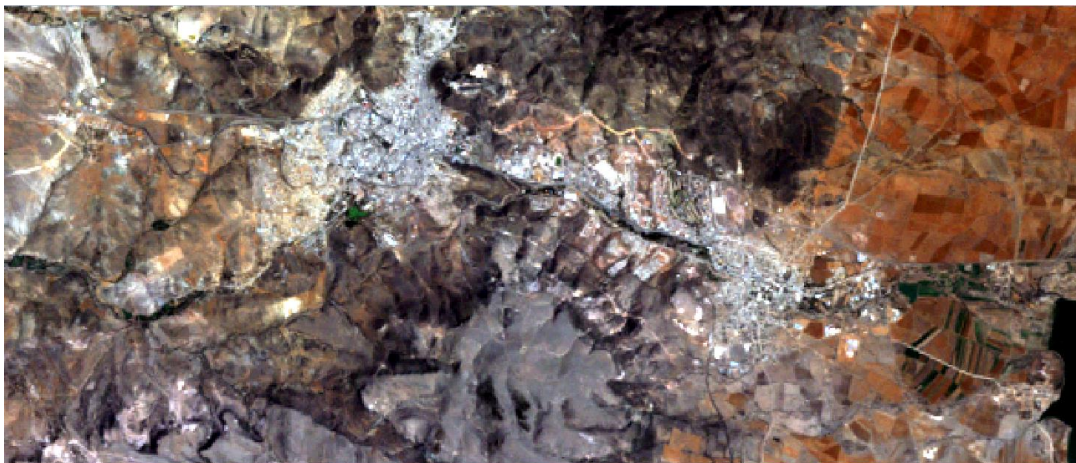


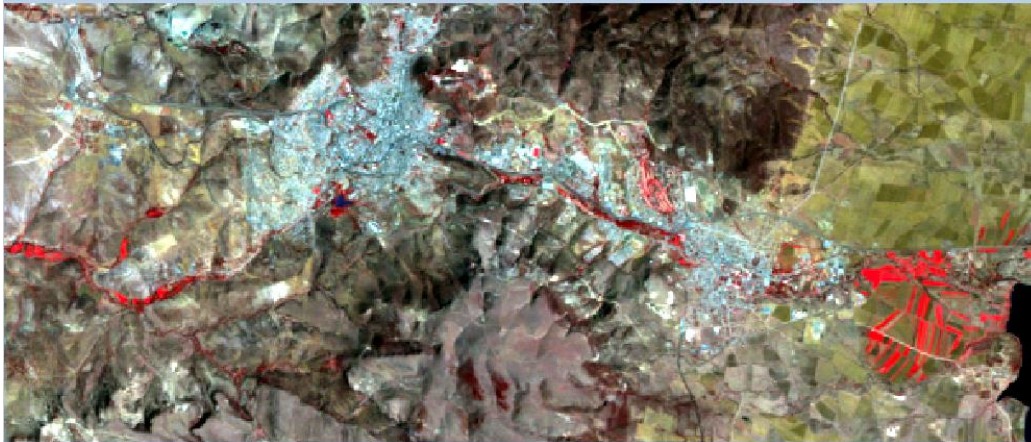
Figura 17 *Composición a Color Natural. RGB 432. Landsat OLI_TIRS. Año 2016*



Las Composiciones a Falso Color (RGB 432, RGB 742) se realizaron para las imágenes satelitales correspondientes al año 1990, para las imágenes del año 2016 se generaron las Composiciones a Falso Color (RGB 543, RGB 753). La figura 18, despliega la información de una composición a color RGB 432, del año 1990, Landsat TM.

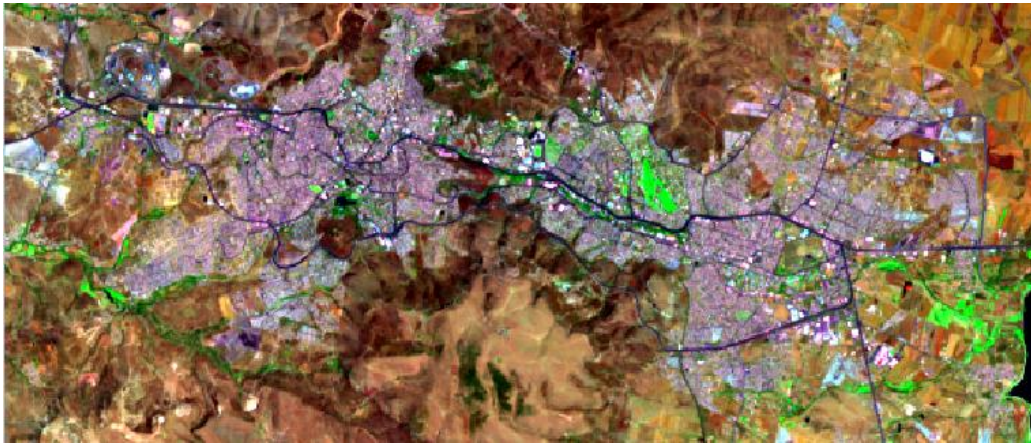
En la cual las ciudades o áreas pobladas se muestran entre tonalidades de grises a azul metálico, así como también puede tratarse de rocas al desnudo. En color negro aparecen los cuerpos de agua. Las áreas con escasa o nula vegetación, pero con alta reflectividad, como lo son canteras, arenas y suelos desnudos se presentan en color blanco. Las zonas con vegetación menos densa o en crecimiento se visualizan en color rosa. La vegetación saludable y cultivos regados se muestran en color rojo. El área de cultivo, el cual en esta temporada del ciclo fenológico está en la transición de secado, es identificada en color verde-dorado. En tono marrón-café se aprecia la vegetación arbustiva.

Figura 18 *Composición a Falso Color. RGB 432. Sensor TM. Año 1990*



En la figura 19, se muestra una composición usando las bandas OLI_TIRS 5, 3 (RGB), esta combinación da mucha información, ya que la vegetación se presenta en tonos verdes. Áreas urbanas aparecen en varios tonos de color magenta. Zonas verdes oscuras corresponden a vegetación de tierras altas. El cuerpo de agua aparece en color oscuro. La composición a color corresponde a bandas satelitales Landsat OLI_TIRS del Año 2016.

Figura 19 *Composición a Falso Color. RGB 753. Sensor OLI_TIRS. Año 2016*



4.5 Clasificación supervisada

Las tablas 9 a 15 muestran la Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de cada Clase encontrada dentro del área de estudio.

Tabla 9 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Agua

Clase	Agua	
Descripción	En esta área solo se encuentran dos cuerpos de agua (Lago Artificial “La Encantada” y Laguna “El Pedernalillo”).	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Tabla 10 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Vegetación Sana

Clase	Vegetación Sana	
Descripción	Esta clase cubre la vegetación más densa y sana.	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Tabla 11 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Zona Urbana

Clase	Zona Urbana	
Descripción	Queda integrada por las áreas donde el asentamiento humano es más denso, así como también incluye las vialidades, suelo desnudo y lugares en proceso de urbanización.	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Tabla 12 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Área de Cultivo

Clase	Área de Cultivo	
Descripción	Esta clase comprende las tierras dedicadas al cultivo.	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

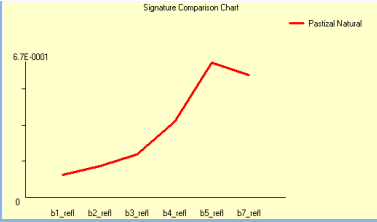
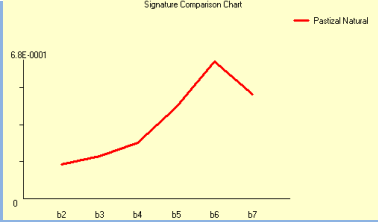
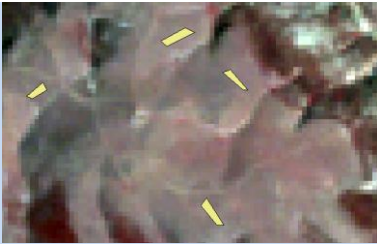

Tabla 13 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Sin Vegetación Aparente

Clase	Sin Vegetación Aparente	
Descripción	Corresponde a las áreas donde la vegetación es muy escasa	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Tabla 14 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Matorral Xerófilo

Clase	Matorral Xerófilo	
Descripción	Esta clase corresponde a la vegetación que se adapta al medio seco por lo tanto tiene poca clorofila y sobre todo en la época del año de estudio tiene un color café. Debido a esto tiene baja reflectancia en la banda 4 y alta reflectancia en la banda 5. Este tipo de vegetación incluye arbustos chaparritos.	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Tabla 15 Descripción, Año, Firma Espectral y Polígonos de Entrenamiento de la Clase Pastizal Natural

Clase	Pastizal Natural	
Descripción	Esta comprendido por pastos secos en este periodo de tiempo debido al área semidesértica de estudio.	
Año	1990	2016
Firma Espectral		
Polígonos de entrenamiento		

Después de realizar la ejecución de varios algoritmos de clasificación supervisada como Paralelepípedos, Mínima Distancia y Máxima Probabilidad, el clasificador que dio mejor resultado fue Máxima Probabilidad logrando una separabilidad entre las clases. Como se muestra en la Figura 20 referente al Año 1990 y Figura 21 correspondiente al Año 2016.

Figura 20 Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MAXLIKE. Año 1990

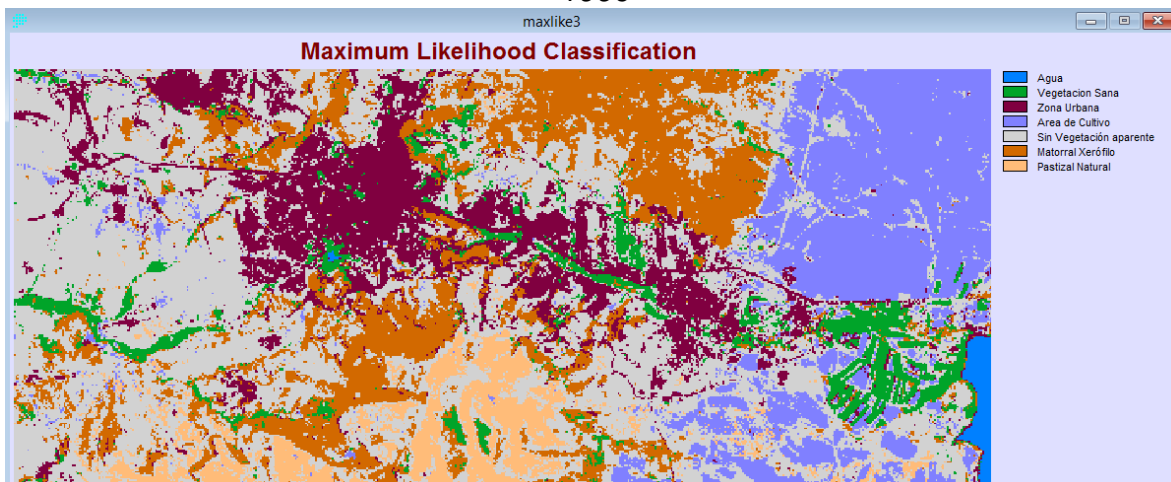
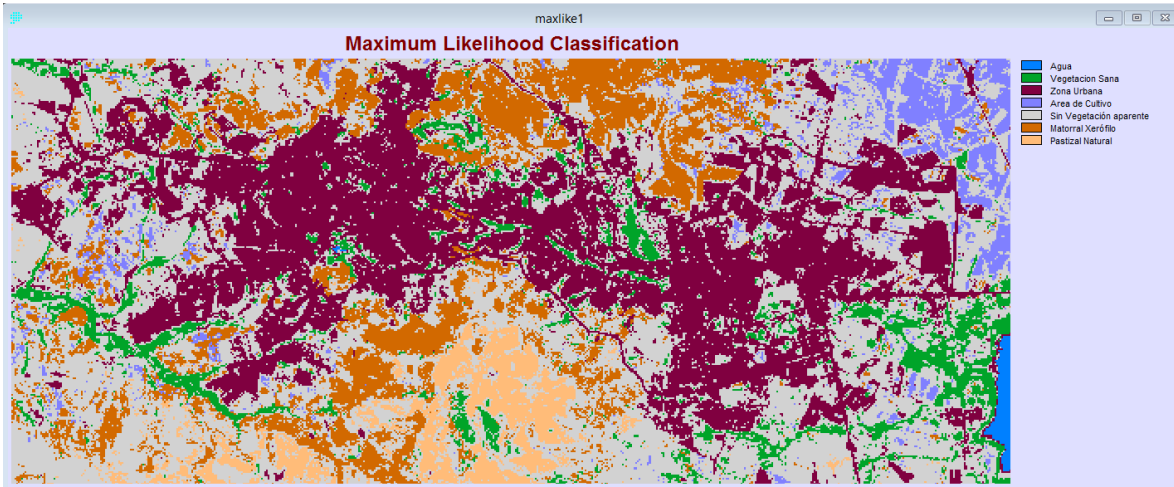


Figura 21 *Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MAXLIKE. Año 2016*



Como se indicó anteriormente uno de los clasificadores que se ejecutó fue por Paralelepípedos el cual no dio la separabilidad de regiones esperada, las figuras 22 y 23 muestran el resultado de este método para los años 1990 y 2016 respectivamente. La clase de Zona Urbana presenta mucha discrepancia entre los años analizados, ya que presenta más superficie en el año 1990 que en año 2016, genera confusión con diversas clases, pero más con la categoría Sin Vegetación Aparente en la imagen del año 2016.

Figura 22 *Resultado de la Clasificación Supervisada, usando PIPED. Año 1990*

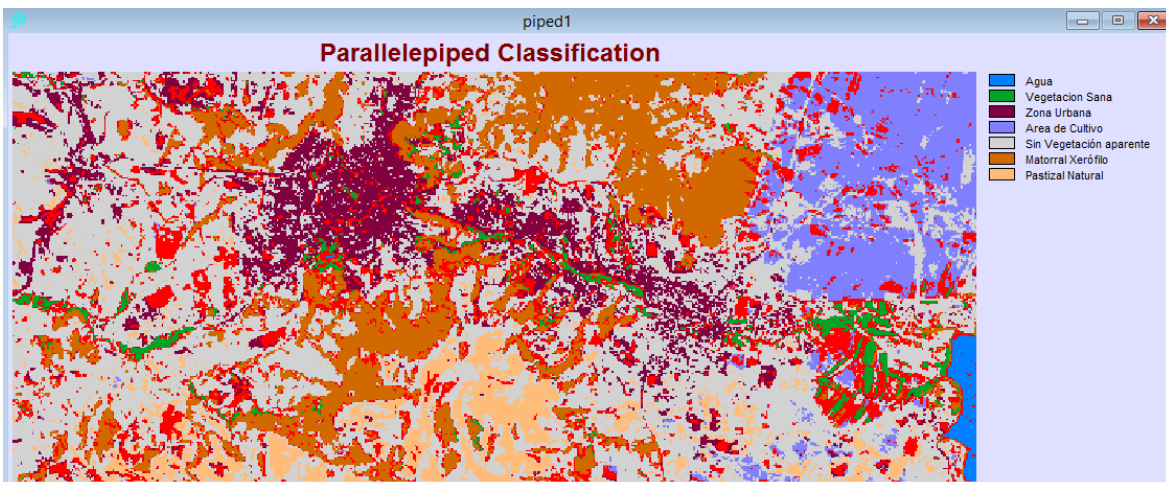
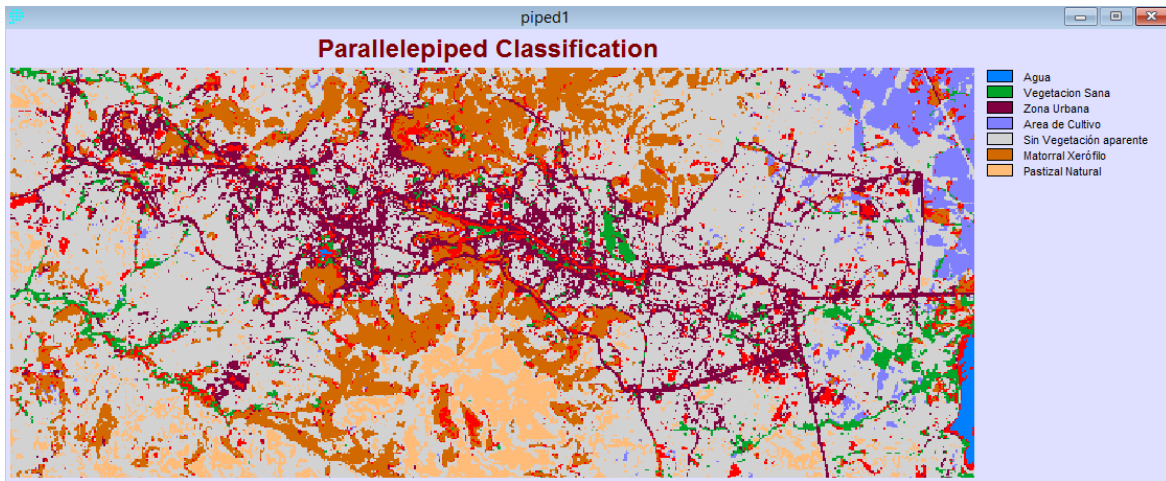


Figura 23 Resultado de la Clasificación Supervisada, usando PIPED. Año 2016



Otro método analizado fue Mínima Distancia, que al igual que el clasificador Paralelepípedo no permite una clasificación idónea de las categorías identificadas en la zona de estudio, las figuras 24 y 25 presentan el resultado de la ejecución de los años 1990 y 2016. En este clasificador la Zona Urbana es claramente definida en los años estudiados, sin embargo, algunas de las vías de comunicación (carreteras) son consideradas en otra clase a la cual no corresponden (Pastizal Natural y Matorral Xerófilo).

Figura 24 Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MINDIST. Año 1990

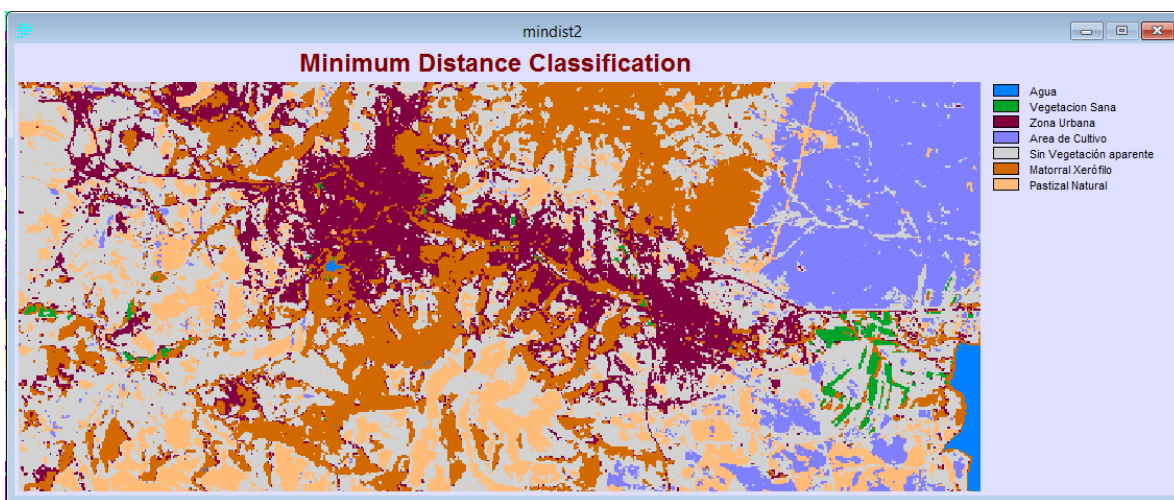
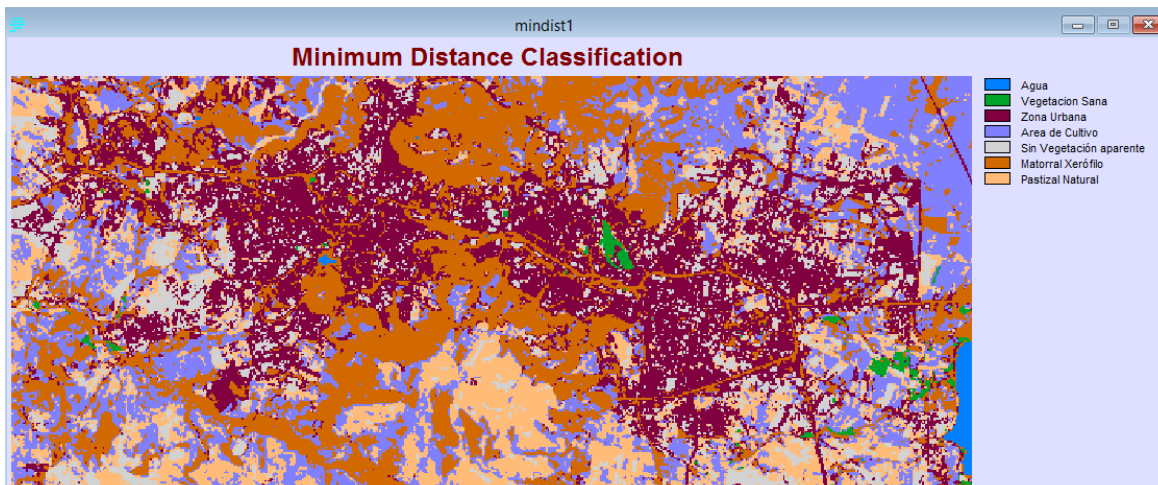


Figura 25 Resultado de la Clasificación Supervisada, usando MINDIST. Año 2016



Los resultados se presentan en esta sección, pero se analizarán y discutirán en el capítulo V (Discusión).

4.6 Evaluación del error del Mapa de Clasificación

Para evaluar la exactitud se generó una serie de puntos de muestreo aleatorios a través del Software Idrisi Selva obteniendo una capa vectorial de 350 puntos para cada imagen (Años 1990 y 2016).

La verificación para el año 1990 se realizó mediante ortofotos de 1990-1993 generando un mosaico en el Software ArcGis 10.4.1, dichas ortofotos fueron georreferenciadas previamente a la zona UTM zona 13.

El resultado de la matriz de error en cuanto al error de comisión fue de 82.52% estando dentro del rango aceptable.

En cuanto a la imagen del año 2016, la verificación se efectuó en el Software ArcGis 10.4.1 utilizando imágenes de Digital Globe con fecha 30 de noviembre de 2016. Se obtuvo un porcentaje aceptable en el error de comisión de 89.29%.

Con los 350 puntos de evaluación, los resultados obtenidos de porcentaje correcto (Po) es de 0.8257 para el año 1990 y 0.8600 (Po) en el año 2016, el índice de concordancia Kappa (κ) fueron 0.7754 y 0.8053 para los años 1990 y 2016, respectivamente.

CAPITULO V. DISCUSIÓN

Los mapas de clasificación mostrados en el Capítulo IV que corresponde a las figuras 19 y 20, las cuales son el Resultado de la Clasificación Supervisada utilizando el algoritmo MAXLIKE, representan la cobertura de las clases en el área de estudio.

Las clases están delimitadas por colores, así la Zona Urbana aparece en color guinda, Vegetación Sana en color verde, Área de Cultivo en color violeta, en color azul se representa el Agua, en color gris la clase que corresponde a Sin Vegetación Aparente, en color naranja se muestra el Matorral Xerófilo y, por último, en color naranja claro el Pastizal Natural.

5.1 Evaluación de la imagen del año 1990

De acuerdo a la Tabla 16, la clase correspondiente a Agua sufre pérdida de superficie, la Vegetación Sana tiene un incremento en la superficie, la clase de Zona Urbana muestra un significativo aumento durante el periodo de 1990 a 2016. En cambio, la clase que se ve disminuida de manera significativa en este periodo es la clase de Área de Cultivo. Lo correspondiente a Sin Vegetación Aparente tiene un aumento en su superficie. La clase Matorral Xerófilo sufrió pérdida de superficie, así como la clase de Pastizal Natural.

Tabla 16 *Superficies por Año y Clase (Hectáreas)*

	Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de Cultivo	Sin Vegetación aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural
1990	95.31	777.33	1904.94	2007.36	5537.61	2226.15	681.3
2016	58.32	836.01	3840.66	545.58	5690.88	1723.68	534.87
Diferencia	-36.99	+58.68	+1935.72	-1461.78	+153.27	-502.47	-146.43

Los resultados mostrados en la Tabla 16 indican que la Zona Urbana tuvo un incremento del 101% con relación al año 1990 donde se contaba con una superficie de 1904.94 hectáreas y en el año 2016 presentó una superficie de

3840.66 hectáreas, lo que representa un incremento de 1935.72 hectáreas durante el lapso de veintiséis años, promediando un aumento de 74.45 hectáreas por año. Por otro lado, la clase que muestra más disminución es Área de Cultivo restando un 73% de superficie con respecto al año 1990, de acuerdo a la Matriz de Cambio (Tabla 21) fueron 576.54 hectáreas de superficie del Área de Cultivo que ahora corresponden a la Zona Urbana.

Las clases Matorral Xerófilo y Pastizal Natural sufren una pérdida de superficie de 23% y 22% respectivamente. 304.83 hectáreas de superficie de Matorral Xerófilo cambio a Zona Urbana, 243.0 hectáreas de superficie de Pastizal Natural en el lapso de tiempo al año 2016 pasaron a la Clase Sin Vegetación Aparente. La clase de Vegetación Sana se ve incrementada un 7% dentro del periodo estudiado, así como también la clase Sin Vegetación Aparente la cual incrementa 2.76%. Por último, la clase Agua sufre una disminución de 38% con respecto al año 1990, pasando a las Clases de Vegetación Sana, Zona Urbana y Sin Vegetación Aparente.

La matriz de error efectuada para la evaluación de la confiabilidad del procedimiento realizado a las imágenes del año 1990, muestra un error de omisión de 84.93% y de error de comisión 82.52%, estando dentro del porcentaje aceptable de acuerdo a Chuvieco (2002), establece que un porcentaje Alto en el error de omisión significa que la cubierta está realmente incluida en la clasificación como tal, para el Error de Comisión un porcentaje Alto señala que las zonas clasificadas en esa cubierta realmente lo son. Para la elaboración de la matriz se tomó como referencia Ortofotos con fechas de adquisición 1990-1993, como lo muestra la Tabla 17.

Tabla 17 *Matriz de error de la clasificación por Máxima Probabilidad del año 1990*

Ortofotos 1990-1993

Clases	Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de cultivo	Sin vegetación aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural	%	82.52 % en Comisión	Promedio
Agua	3			1				75		
Vegetación Sana		21	2		2			84		
Zona Urbana		1	35	1	7	3		74.46		
Área de cultivo			1	51	4	1		89.47		
Sin vegetación aparente		1	13	5	105	4	2	80.76		
Matorral Xerófilo					7	54	4	83.07		
Pastizal Natural					2		20	90.90		
%	100	91.30	68.62	87.93	82.67	87.09	76.92			
84.93 % en Omisión										
Promedio										

Como lo muestra la Tabla 17, en la clasificación de Agua, el resultado de error por comisión es de 75% el cual se considera un poco bajo, probablemente se ve afectado este porcentaje por la cantidad de puntos del muestreo que cayeron dentro de esta área ya que solo son 4 puntos a verificar. La firma espectral de esta clase tiene las características de agua clara (Baja reflectancia en el visible, disminuyendo aún más en los infrarrojos), el tipo de muestreo fue estratificado aleatorio por ello la cantidad de puntos de muestreo varía de acuerdo a la superficie encontrada dentro del área de estudio.

La Vegetación Sana tiene un porcentaje de 84% en error de comisión el cual entra dentro del rango aceptable, esta clase ha sido sencilla de encontrar, ya que está bien definida su firma espectral mostrando alta reflectancia en la banda 4.

La clasificación efectuada para la Zona Urbana a través de las firmas espectrales generadas con los campos de entrenamiento tiene una precisión de 74.46% en el error por comisión, es posible que este resultado se vea afectado por la gran reflectancia de la clase Sin Vegetación Aparente ya que esta clase abarca las áreas donde la vegetación es muy escasa incluso nula.

Por otro lado, la clase Área de Cultivo tiene un porcentaje aceptable en el error de comisión 89.47%, la clase Sin Vegetación Aparente su porcentaje es 80.76%, Matorral Xerófilo y Pastizal Natural de 83.07% y 90.90% respectivamente.

5.2 Evaluación de la imagen del año 2016

Se utilizó el servicio de Imágenes Satelitales Digital Globe con fecha de adquisición 30 de noviembre del 2016. En esta verificación se obtuvo un porcentaje de error de comisión de 89.29 % y 83.36% de error de omisión, como lo muestra la Tabla 18.

Tabla 18 *Matriz de error de la clasificación por Máxima Probabilidad del año 2016*

Digital Globe(2016-11-30)

IMAGEN 2016	Clases	Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de cultivo	Sin vegetación aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural	%	89.29 % en Comisión	Promedio
	Agua	1							100		
	Vegetación Sana		22						100		
	Zona Urbana			91		2			97.84		
	Área de cultivo			1	8	3	3		53.3		
	Sin vegetación aparente			11	14	126	13	1	76.36		
	Matorral Xerófilo				1		39		97.5		
	Pastizal Natural							14	100		
%	100	100	88.34	34.78	96.18	70.90	93.33				
83.36 % en Omisión											
Promedio											

Los porcentajes en el error de Comisión para las clases de Agua y Vegetación Sana corresponden a 100% se debe a que son pocos los puntos que se generaron aleatorios y que son clases que están muy bien definidas y fáciles de identificar. Otra clase que también obtuvo un porcentaje de error de Comisión aceptable es Zona Urbana teniendo un 97.84%.

La clase de Área de Cultivo es la que tiene más bajo el porcentaje de error de Comisión (53.3%) esto debido a que es poca cantidad de puntos de muestreo y que se confunde con la Clase Sin Vegetación Aparente ya que tienen una firma espectral muy similar. Por lo tanto, el porcentaje de error de comisión para la clase Sin Vegetación Aparente es relativamente bajo. Adicionalmente el Área de Cultivo

se encuentra dentro del ciclo fenológico en el momento de secado por ello también la similitud.

El Matorral Xerófilo y Pastizal Natural tienen porcentajes error de comisión de 97.5% y 100% respectivamente.

5.3 Porcentajes de error

Con base en la Tabla 19, los resultados obtenidos de los puntos de evaluación para la imagen del Año 1990 muestran un porcentaje correcto (P_o) e índice de concordancia Kappa (κ) de 82.75% y 0.7754, respectivamente. Los cuales se obtuvieron de la manera siguiente.

Diagonal = 289

Total Puntos = 350

$$P_o = \frac{\text{Suma Diagonal}}{\text{Total Puntos}} = \frac{289}{350} = 0.8275 \quad \text{Proporción de clases catalogadas correctamente;}$$

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_r(i) P_c(i) = 0.22369 \quad \text{Proporción de clases catalogadas incorrectamente;}$$

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} = \frac{0.8257 - 0.222369}{1 - 0.22369} = \frac{0.60202}{0.77631} = 0.7754 \quad \text{Índice Kappa}$$

La tabla 19 muestra estos valores integrados con la matriz de error

Tabla 19 *Error de la Evaluación de la Clasificación Supervisada Año 1990*
Ortofotos 1990-1993

IMAGEN 1990	Clases	Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de Cultivo	Sin vegetación Aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural	Total	Pr	Pr * Pc
	Agua	3			1				4	0.01143	0.00010
	Vegetación Sana		21	2		2			25	0.07143	0.00469
	Zona Urbana		1	35	1	7	3		47	0.13429	0.01957
	Área de cultivo			1	51	4	1		57	0.16286	0.02699
	Sin Vegetación Aparente		1	13	5	105	4	2	130	0.37143	0.13478
	Matorral Xerófilo					7	54	4	65	0.18571	0.03290
	Pastizal Natural					2		20	22	0.06286	0.00467
	Total	3	23	51	58	127	62	26	350		0.22369
	Pc	0.00857	0.06571	0.14571	0.16571	0.36286	0.17714	0.07429			

La clase mejor clasificada fue la correspondiente al Agua, al igual que las clases Pastizal Natural y Vegetación Sana ya que presentaron los errores más pequeños. La clase Zona Urbana se confundió con la clase Sin Vegetación Aparente y con Matorral Xerófilo, así como la clase Área de Cultivo la cual presentó confusión con las clases Sin Vegetación Aparente.

La clase Matorral Xerófilo se confundió con las clases Sin Vegetación Aparente y Pastizal Natural. La clase en la que hubo más error fue Sin Vegetación Aparente que presenta confusión con prácticamente todas las clases exceptuando la clase Agua.

La evaluación para la imagen del Año 2016 proporcionó un porcentaje correcto (P_o) de 86 % y un índice de concordancia Kappa de 0.8053. Considero que el resultado fue mejor que el obtenido del Año 1990 ya que la verificación de la clasificación del Año 2016 fue realizada con imágenes con mayor resolución lo que permite lograr una identificación más precisa de las clases.

El cálculo del P_o se realizó con base en los resultados de la Tabla 18. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Diagonal = 301

Total Puntos = 350

$$P_o = \frac{\text{Suma Diagonal}}{\text{Total Puntos}} = \frac{301}{350} = 0.86 \quad \text{Proporción de clases catalogadas correctamente;}$$

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_r(i) P_c(i) = 0.28109 \quad \text{Proporción de clases catalogadas incorrectamente;}$$

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} = \frac{0.8600 - 0.28109}{1 - 0.86} = \frac{0.57891}{0.71891} = 0.8053 \quad \text{Índice Kappa}$$

Tabla 20 *Error de la Evaluación de la Clasificación Supervisada Año 2016*
Digital Globe (2016-11-30) WV03_VNIR-Strip

IMAGEN 2016

Clases	Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de Cultivo	Sin vegetación aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural	Total	Pr	Pr * Pc
Agua	1							1	0.00286	0.00001
Vegetación Sana		22						22	0.06286	0.00395
Zona Urbana			91		2			93	0.26571	0.07820
Área de cultivo			1	8	3	3		15	0.04286	0.00282
Sin Vegetación Aparente			11	14	126	13	1	165	0.47143	0.17645
Matorral Xerófilo				1		39		40	0.11429	0.01796
Pastizal Natural							14	14	0.04000	0.00171
Total	1	22	103	23	131	55	15	350		0.28109
Pc	0.00286	0.06286	0.29429	0.06571	0.37429	0.15714	0.04286			

Las clases Agua, Pastizal Natural y Vegetación Sana son las mejor clasificadas, les siguen la clase Área de cultivo la cual se confundió con las clases Sin Vegetación Aparente y Matorral Xerófilo. La clase Matorral Xerófilo fue confundida con la clase Área de Cultivo, mientras que la clase Zona Urbana se confundió con la clase Sin Vegetación Aparente.

La clase Sin Vegetación Aparente fue la que tuvo más error al presentar confusión con las clases Zona Urbana, Área de Cultivo y Matorral Xerófilo.

5.4 Matriz de Cambio

La tabulación cruzada entre las imágenes de 1990 y 2016 muestra qué clase cambio a qué otra clase y cuántos pixeles se quedaron igual. Para realizar una representación más idónea la información está dada en hectáreas, como lo muestra la Tabla 21.

Tabla 21 *Matriz de Cambio en la Zona Conurbada Zacatecas-Guadalupe (1990-2016)*

		1990							
2016		Agua	Vegetación Sana	Zona Urbana	Área de Cultivo	Sin Vegetación Aparente	Matorral Xerófilo	Pastizal Natural	Total (Hectáreas)
	Agua	58.23	0.09	0	0	0	0	0	58.32
	Vegetación Sana	13.5	321.93	47.34	53.28	297.27	91.17	11.52	836.01
	Zona Urbana	11.79	104.49	1386.72	576.54	1439.91	304.83	16.38	3840.66
	Área de Cultivo	0	11.61	2.79	369.72	129.96	30.42	1.08	545.58
	Sin Vegetación Aparente	11.79	309.78	422.55	985.32	3004.92	713.52	243	5690.88
	Matorral Xerófilo	0	29.16	45.45	18	537.12	1084.77	9.18	1723.68
	Pastizal Natural	0	0.27	0.09	4.5	128.43	1.44	400.14	534.87
	Total (Hectáreas)	95.31	777.33	1904.94	2007.40	5537.61	2226.15	681.30	13230.00

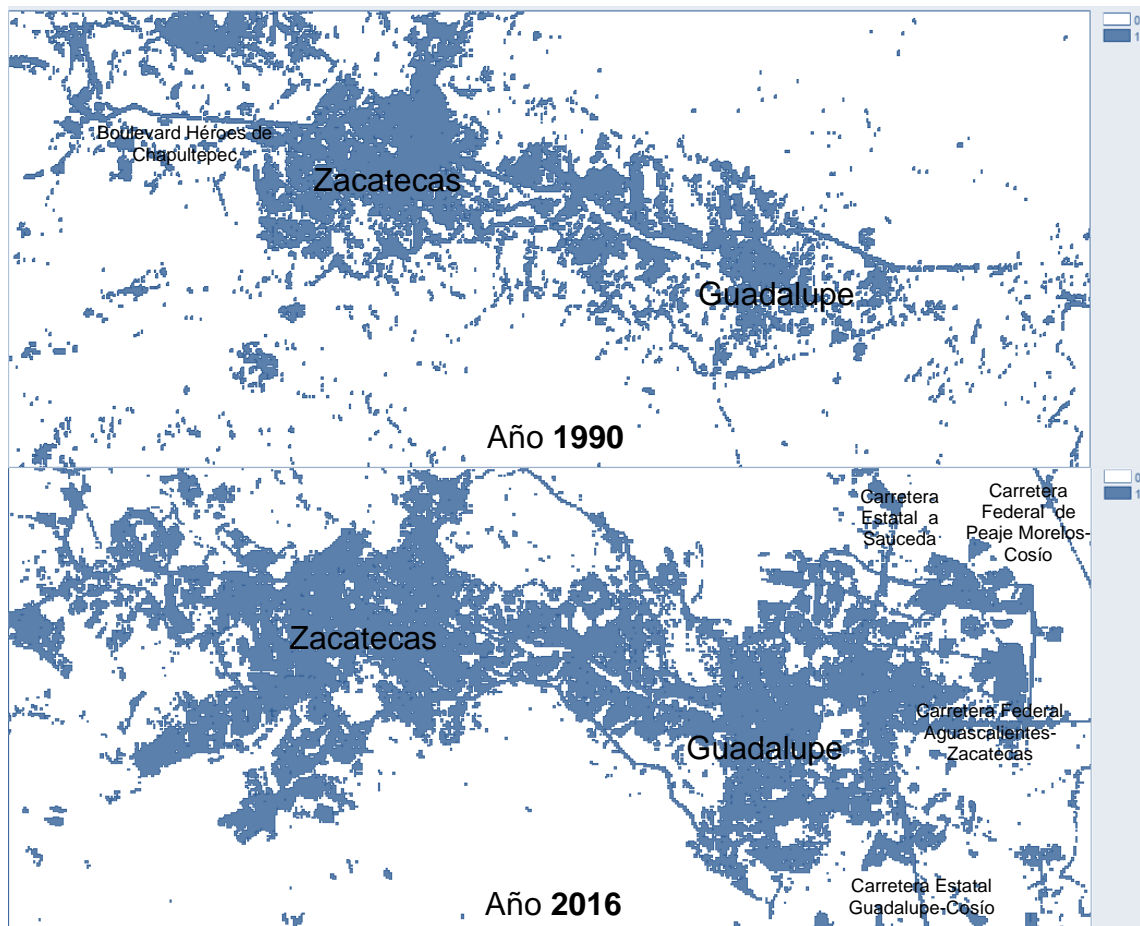
Como se mencionó la Zona Urbana tuvo un incremento de 101% en el período de 1990-2016 esto es posible observarlo en la matriz de cambio, la cual muestra que las clases afectadas para que se diera dicho aumento fueron las correspondientes al Área de cultivo y Sin Vegetación Aparente al perder superficie pasando 576.54 hectáreas de Área de Cultivo a Zona Urbana, y 1439.91 hectáreas de Sin Vegetación Aparente a Zona Urbana.

El área de cultivo disminuyó donando 28% de su superficie a la Zona Urbana con 576.54 hectáreas y 49% de la superficie paso a Sin Vegetación Aparente con 985.32 hectáreas.

5.5 Mapas Booleanos

La utilidad de los Mapas Booleanos es que nos muestran gráficamente la superficie ocupada por una clase específica en el espacio. En este caso, la Figura 26 representa el área urbana de la Zona Conurbada Zacatecas-Guadalupe en los Años 1990 y 2016. Esta clase de Zona Urbana corresponde a los asentamientos humanos, así como también vialidades, suelo desnudo y lugares en proceso de urbanización. Los mapas ayudan a identificar los cambios ocurridos durante el período estudiado siendo notorio el cambio de 1990 al año 2016.

Figura 26 *Mapa Booleano - Zona Conurbada Zacatecas-Guadalupe. Año 1990 y 2016*



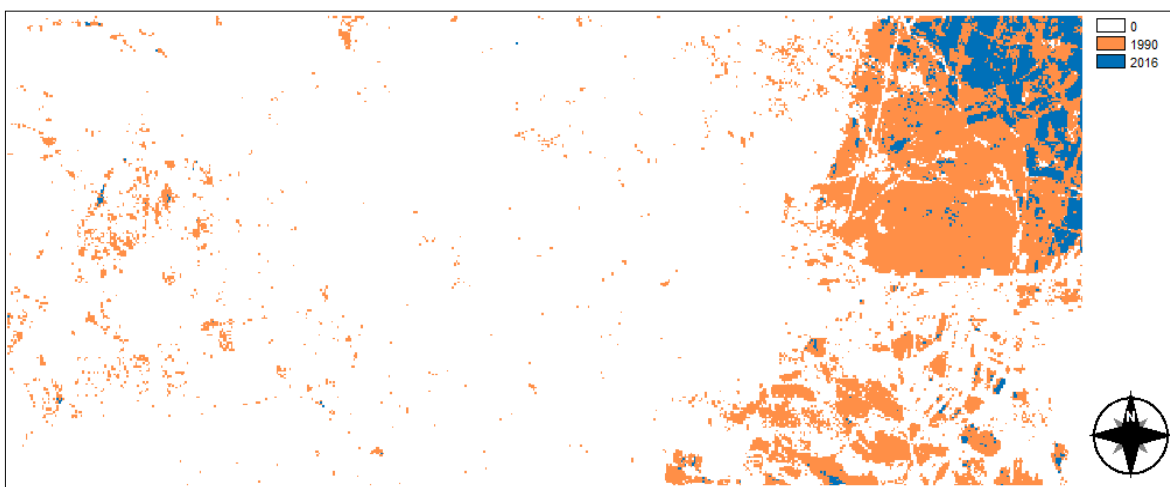
El Área representada en color Azul representa la Zona Urbana, la cual incluye los asentamientos humanos, vialidades, suelo desnudo y lugares en proceso de urbanización. En color Blanco están representadas el resto de las clases.

Dentro de la clasificación Zona Urbana ha quedado lo correspondiente a Carreteras mostrando una notoria visualización al sur de la Ciudad de Guadalupe en el Mapa del año 2016 donde se observa la Carretera Estatal Guadalupe-Cosío, así como al Noreste de la dicha Ciudad la Carretera Federal de Peaje Morelos-Cosío. Al Este de Guadalupe corre la Carretera Federal Aguascalientes – Zacatecas. Hacia el Norte de Guadalupe se aprecia la Carretera Estatal a Saucedá.

En el Mapa del año 1990 podemos apreciar en el Noroeste de la Ciudad de Zacatecas el Boulevard Héroes de Chapultepec el cual queda saturado por la urbanización en el Mapa del año 2016. Dicho Boulevard conecta al Noroeste con la Carreteras Federal Zacatecas - Durango, así como Suroeste con la Carretera Federal Guadalajara - Zacatecas.

El Área de Cultivo es una de las clases primordiales en cuánto a disminución de superficie por la llegada de la Urbanización hacia la orientación Noreste y Sur de la Ciudad de Guadalupe como se observa en la Figura 27. Aunque también podemos apreciar que a pesar de la orografía hay crecimiento urbano hacia el Suroeste de la Ciudad de Zacatecas donde la fisiografía está dada en Bajadas con lomeríos y la clase que se vio afectada principalmente es Sin Vegetación Aparente, en la Figura 26 se muestra este cambio.

Figura 27 *Mapa Booleano - Área de Cultivo. Zacatecas-Guadalupe. Año 1990 y 2016*



En color Naranja representa el Área de Cultivo del año 2016, en color Azul muestra el Área de Cultivo del año 1990. En color Blanco están representadas el resto de las clases.

Lo anterior, es una muestra de que el uso de imágenes satelitales en el estudio del Crecimiento Urbano ha sido de gran utilidad ya que se puede cuantificar la superficie y la dispersión del Área Urbana a través de los años. En este caso para el análisis de la mancha urbana de la Zona Conurbada Zacatecas – Guadalupe, los procesos de pretratamiento (Corrección Atmosférica, Composiciones a Color para discernir los materiales presentes en el área) y tratamiento (Clasificación de la imagen a través del algoritmo Maxlike creando sitios de entrenamiento de los cuales resultaron 7 clases) y postratamiento que implicó encontrar el porcentaje aceptable en la evaluación de la exactitud de la clasificación a través de la matriz de error, y posteriormente, generar los mapas de cambio (Mapas Booleanos). Así, se logró obtener la superficie de crecimiento de la Zona Conurbada (Zacatecas-Guadalupe) estableciendo un 101% de crecimiento desde el año 1990 al 2016, con 1935.72 hectáreas de crecimiento en 26 años.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

El objetivo general del trabajo fue analizar el Crecimiento Urbano de las cabeceras municipales de Zacatecas-Guadalupe, mediante técnicas de percepción remota, para lo cual dicho propósito fue cumplido ya que se logró mostrar y comparar la mancha urbana en un periodo de tiempo utilizando imágenes satelitales, logrando discernir las áreas afectadas o modificadas por dicho crecimiento. Las técnicas empleadas permitieron analizar el comportamiento de la clase perteneciente a zona urbana en el área de interés. Los datos muestran un aumento en superficie de esta clase en un poco más del cien por ciento en el periodo de 1990 a 2016.

Realizar el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales fue otro de los objetivos que se llevó a cabo, para ello se obtuvieron las imágenes del sitio web USGS. Los resultados obtenidos demuestran que fue posible identificar e interpretar por medio de técnicas de percepción remota elementos de rasgos urbanos en una imagen satelital, así como lograr discernir entre las diferentes los usos de suelos encontrados en el área de estudio.

La identificación del rumbo del crecimiento municipal de acuerdo a su orografía, requiere un análisis más minucioso considerando otras fuentes de información relacionadas con la topografía. De manera visual y de acuerdo al conocimiento previo de la zona de estudio, podemos valorar que el crecimiento urbano en la cabecera municipal de Zacatecas se ha incrementado hacia el suroeste a pesar de encontrarse en un área donde existen bajas con lomeríos. El crecimiento de la mancha urbana en la cabecera municipal de Guadalupe se ha dado mayormente hacia la zona de cultivo considero que esto es debido a que son áreas con planicies donde la creación de viviendas e industrias es más factible por la orografía del lugar.

La estimación de la superficie de cambio se logró gracias a las técnicas de procesamiento de imágenes, determinando una superficie de 1904.94 hectáreas en el año 1990 correspondientes a la zona urbana, para el año 2016 incremento a 3840.66 hectáreas.

Gracias a los mapas de cambio obtenidos, podemos comparar y confrontar visualmente la información generada del procesamiento, logrando distinguir el rumbo y la expansión geográfica del área urbana.

Con esto, se demuestra que el comportamiento de crecimiento de un asentamiento humano a lo largo de un periodo de tiempo puede ser observado y medido con las técnicas adecuadas, y se refuerza que la dinámica de crecimiento de la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe ha sido en los últimos años, un fenómeno de importancia crucial que requiere atenderse urgentemente por medio de políticas. Sin embargo, estas políticas requieren datos sustentados, así como indicadores que pueden obtenerse a través de las amplias posibilidades de un análisis de cambio por medio del tratamiento de imágenes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el Módulo Flassh del Software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59. doi:10.15359/rgac.2-53.2
- Aguirre Gómez, R. (2002). *Los Mares Mexicanos a través de la Percepción Remota*. México, D.F: Universidad Autónoma de México y Plaza y Valdés.
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Bastidas Gustin, A. E., Jaramillo Ayerbe, M., & Solarte Rodríguez, E. (2001). Método para elaborar un programa de cómputo útil para el cálculo rápido de la dispersión Mie aplicable a la técnica LIDAR. *Colombia, Unicauca Ciencia*(6), 113-119. doi:ISSN: 0122-6037
- Berlanga Robles, C. A., García Campos, R. R., López Blanco, J., & Ruiz Luna, A. (11 de Mayo de 2009). Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(72), 7-22. doi:10.14350/rig.19272
- Brizuela, A. B., & Aguirre, C. A. (2007). *Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal*. (Martin, Ed.) Recuperado el 4 de Enero de 2017, de Asociación Española de Teledetección.: <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg27.pdf>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5a ed.). New York: The Guilford Press. doi:10.3390/rs5010282

- Chander, G., Brian L., M., & Julia A., B. (16 de Julio de 2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(3), 490-494. doi:10.1109/LGRS.2007.898285
- Chuvieco Salinero, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (2a ed.). España: Rialp, S.A.
- Chuvieco Salinero, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio* (1a ed.). Barcelona, España: Ariel Ciencia.
- Comisión Nacional del Agua. (21 de Julio de 2000). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 3 de Enero de 2017, de Fundamentos de Teledetección Espacial:
<http://sig.a.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20de%20espacial.PDF>
- Degollado García, R. A. (2001). *Procesos de Reestructuración Urbana en la ciudad de Zacatecas y su conurbación con Guadalupe, 1585-2000*. México, D.F.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Worcester MA, USA: Clark University. Recuperado el 9 de Enero de 2017, de <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Gobierno del Estado de Zacatecas. (2012). *Programa de Desarrollo Urbano Zacatecas-Guadalupe 2012*, 326. Zacatecas, Zacatecas, México. Recuperado el 18 de Noviembre de 2016, de www.zacatecas.gob.mx
- Gomasca, M. A. (2009). *Basics of Geomatics*. Milano, Italia: Springer. doi:10.1007/978-1-4020-9014-1
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010a). *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010 Guadalupe*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010b). *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010 Zacatecas*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015a). *Encuesta Intercensal 2015*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015a). *Marco Geostadístico Nacional 2015*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015a). *Red Nacional de Caminos 2015*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (Junio de 2016). *Marco Geoestadístico Nacional 2016*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective* (2a ed.). Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos de América: Prentice Hall.
- Joseph, G. (2005). *Fundamentals of Remote Sensing* (2a ed.). Himayatnagar, Hyderabad, India: Universities Press.
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications* (1a ed.). San Diego, California, Estados Unidos de América: Academic Press.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote Sensing And Image Interpretation* (6a ed.). Estados Unidos de América: Wiley.
- Lira Chávez, J. (2010). *Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales* (2da ed.). México, D.F., México.
- Martínez Cañadas, A., Gallud Lázaro, J. A., & Abad Cerdá, F. J. (1998). Distorsiones en la adquisición de imágenes de teledetección y su corrección. *Revista de la Facultad de Educación de Albacete*(13), 349-360.

- Mas, J.-F., Díaz-Gallegos, J. R., & Pérez Vega, A. (7 de Mayo de 2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(51), 53-72.
- Mas, J.-F., Pérez-Vega, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. O., & Vega, E. (Abril de 2015). *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM*. Recuperado el 9 de Enero de 2017, de http://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/modelacione/pdf/Mas20151020_sbsr.pdf
- Miguélez Pose, F. (2002). *Teledetección de pesquerías y predicción de mareas tóxicas* (1a ed.). Coruña, España: Netbiblio, S.L.
- Montenbruck, O., & Everhard, G. (2012). *Satellite Orbits: Modelos, Methods and Applications*. New York: Springer. doi:10.1007/978-3-642-58351-3
- NASA. (4 de Marzo de 2014). *Earth Observatory*. (H. Riebeek, Editor) Recuperado el 6 de Enero de 2017, de <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/FalseColor/>
- NASA. (3 de Enero de 2017). *Landsat Science*. Recuperado el 3 de Enero de 2017, de <http://landsat.gsfc.nasa.gov/data/>
- NASA. (s.f.). *Landsat Science*. Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf
- Noyola-Medrano, M. C., Hinojosa-Corona, A., & Martín-Barajas, A. (11 de Julio de 2005). Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 229-245. Recuperado el 9 de Enero de 2017, de [http://rmcg.unam.mx/22-2/\(7\)Noyola.pdf](http://rmcg.unam.mx/22-2/(7)Noyola.pdf)

- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 25 de Enero de 2017
- Ormeño Villajos, S. (2006). *Teledetección Fundamental* (3a ed.). Madrid, España: SOV. Recuperado el 4 de Enero de 2017, de <http://pdi.topografia.upm.es/santi/descarga/FunTeled.PDF>
- Pérez, D. J. (2007). *Laboratorio de Tectónica Andina. Departamento de Ciencias Geológicas*. Recuperado el 4 de Enero de 2017, de Universidad de Buenos Aires: http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf
- Purkis, S., & Klemas, V. (2011). *Remote Sensing and Global Environmental Change*. Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9781118687659
- Quinn, J. W. (2001). *Laboratorio de Tectónica Andina*. Recuperado el 03 de Mayo de 2017, de Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.: http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/bandcombinations.html
- Roddy, D. (2001). *Satellite Communications* (3a ed.). Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- Sobrino, J. A. (2000). *Teledetección*. Valencia, España: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. doi:10.13140/2.1.2883.3283
- Tun Molina, D. M. (16 de Marzo de 1987). Inclinación de la órbita de un satélite geoestacionario. *Revista Mexicana de Física*(33), 1. Recuperado el 2 de Diciembre de 2016, de http://132.248.181.74/pdf/rmf/33/2/33_2_265.pdf
- USGS. (2007). *United States Geological Survey, U.S. Department of the Interior*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2016, de <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>
- USGS. (29 de Noviembre de 2016a). *United States Geological Survey, U.S. Department of the Interior*. Recuperado el 6 de Diciembre de 2016, de <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>

USGS. (29 de Marzo de 2016b). *United States Geological Survey, U.S. Department of the Interior*, 2.0. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>

USGS. (5 de Enero de 2017). *United States Geological Survey, U.S. Department of the Interior*. Recuperado el 12 de Enero de 2017, de <https://earthexplorer.usgs.gov>

Velásquez M., S. (1993). *Sistema de Información Geográfica*. Catie, Turrialba.

Wang, G., & Weng, Q. (2014). *Remote Sensing of Natural Resources*. Florida: Taylor & Francis Group. doi:10.1201/b15159-24

Wegmann, M., Leutner, B., & Dech, S. (2016). *Remote Sensing and GIS for Ecologists: Using Open Source Software*. Reino Unido: Pelagic Publishing.