

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO DEL EJE  
MARACAY VALENCIA USANDO TÉCNICAS DE  
TELEDETECCIÓN Y SIG**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por la Br.:

Forja Miranda, Selene

Para optar al título de

Ingeniero Geodesta

Caracas, 2019

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO DEL EJE MARACAY VALENCIA USANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG**

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Víctor Vilachá

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por la Br.:

Forja Miranda, Selene

Para optar al título de

Ingeniero Geodesta

Caracas, 2019

**ACTA**

El día 31 de octubre de 2019 se reunió el jurado formado por los profesores:

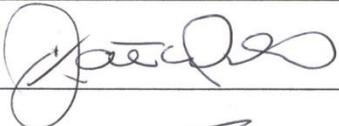
Victor Vilacha  
Juan Jose Machado  
Miguel Rios

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO DEL EJE MARACAY - VALENCIA USANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG"**, presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de **INGENIERO GEODESTA**.

Una vez oída la defensa oral que la bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió la siguiente calificación:

NOMBRE Y APELLIDOS	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
SELENE FORJA MIRANDA	20	Veinte

**FIRMAS DEL JURADO**

Victor Vilacha  
  


## **DEDICATORIA**

A mamá y papá, por creer en mí desde que era solo un deseo.

A Tábita y Dacio Gabriel, mis hermanos y mejores amigos, por siempre confiar en mí y apoyarme incondicionalmente

A A.J. por todo.

Selene.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, mis papás, hermanos, abuelos, mi tía, y a mi novio y a su familia por apoyarme durante toda mi carrera universitaria y siempre estar en mi vida.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por permitirme aprender, crecer y conocer a personas maravillosas. Siempre será la casa que vence las sombras.

A todos los profesores y preparadores que pasaron por mi vida a lo largo de la carrera, especialmente a mi querido Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura.

A mi tutor, Víctor Vilachá, por haberme guiado a lo largo del desarrollo de este trabajo y siempre tener tiempo para mis consultas.

Al Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, a la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales y a la Fundación Instituto de Ingeniería por la ayuda prestada para realizar este trabajo.

A los grandes amigos que me regaló la mejor universidad de Venezuela.

Gracias a todos.

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ABAE	Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales
ABRAE	Área Bajo Régimen de Administración Especial
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CDMS	Cumbre Mundial Sobre el Desarrollo Sostenible
CNES	Centre National D'Études Spatiales
CPDI	Centro de Procesamiento Digital de Imágenes
DEM	Digital Elevation Model
DN	Digital Number
DOS	Dark Object Subtraction
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain relief Model
EEM	Espectro Electromagnético
EROS	Earth Resources Observation and Science
ERTS	Earth Resource Technology Satellite
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GCP	Ground Control Point
GeoTIFF	Geographical Tagged Image File Format
HRVIR	High Resolution Visible Infrared

IFOV	Instantaneous field of view
INE	Instituto Nacional de Estadística
IRS-1	Indian Remote Sensing Satellite 1
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDS	Modelo Digital de Superficie
MDT	Modelo Digital de Terreno
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
NDT	Neutralidad en la Degradación de la Tierra
NIMA	Department of Defense's National Imagery and Mapping Agency
NIR	Near Infrared
OCEI	Oficina Central de Estadística e Informática
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OLI	Operational Land Imager
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PDUL	Plan de Desarrollo Urbano Local
QA	Quality Assessment
RBV	Return Beam Vidicon
RMS	Root Mean Square

SAR	Synthetic Aperture Radar
SIG	Sistema de Información Geográfica
SLC	Scan Line Corrector
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Short Wave Infrared
TIR	Thermal Infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TOA	Top of Atmosphere
UCV	Universidad Central de Venezuela
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversal de Mercator
UV	Ultraviolet
WGS84	World Geodetic System 1984

**Forja Miranda, Selene**

**DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO DEL EJE  
MARACAY VALENCIA USANDO TÉCNICAS DE  
TELEDETECCIÓN Y SIG**

**Tutor Académico: Ing. Víctor Vilachá.**

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de  
Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura. 2019.**

**Número de páginas: 175**

**Palabras Clave:** Teledetección, detección de cambio, SIG, crecimiento urbano, Landsat, SPOT.

**RESUMEN**

Los asentamientos humanos constituyen el ecosistema más variante en toda la naturaleza, y no es de extrañar que se hayan dirigido esfuerzos para comprender estos cambios por medio de la tecnología. La teledetección es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, y en su amplio abanico de aplicaciones se encuentra el estudio de los asentamientos humanos, cómo evolucionan, crecen en el tiempo y cuáles son sus consecuencias en el medio ambiente. Entender la dinámica que presentan las poblaciones en el mundo, es un elemento primordial para la comprensión del desarrollo temporal y espacial de las ciudades. De acuerdo a esta línea de investigación, el objetivo de este trabajo especial de grado es el análisis del crecimiento urbano del eje Maracay – Valencia utilizando técnicas de teledetección y SIG. Para lograrlo se trabajó con imágenes de los satélites Landsat y SPOT desde 1988 hasta el año 2018, donde se identificaron las áreas urbanas, los cuerpos de agua y algunas otras cubiertas para estudiar sus cambios durante el período 30 años.

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA .....	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2. MARCO REFERENCIAL .....	6
1.3. OBJETIVOS.....	9
1.3.1. Objetivo General .....	9
1.3.2. Objetivos Específicos.....	9
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	10
1.5. ALCANCES .....	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1. Teledetección Espacial .....	14
2.2. La Radiación Electromagnética.....	16
2.3. El Espectro Electromagnético .....	18
2.4. Sistema Sensor .....	20
2.5. Resolución de un Sistema Sensor.....	22
2.5.1. Resolución Espacial .....	22
2.5.2. Resolución Espectral.....	23
2.5.3. Resolución Radiométrica .....	24
2.5.4. Resolución Temporal .....	24
2.6. Sensores Pasivos.....	25
2.7. Las Imágenes Satelitales .....	28
2.8. Correcciones de la Imagen .....	30
2.8.1. Fuentes de error en una imagen satelital .....	31
2.8.2. Correcciones Radiométricas .....	33
2.8.3. Correcciones Geométricas .....	36
2.9. El programa Landsat .....	43
2.9.1. Características Orbitales.....	45
2.9.2. Instrumentos de Observación.....	45
2.9.3. Niveles de pre-procesamiento de las escenas Landsat.....	48

2.9.4.	Descarga de imágenes .....	50
2.10.	El programa SPOT .....	51
2.10.1.	SPOT 4 .....	52
2.10.2.	Niveles de pre-procesamiento de las imágenes SPOT .....	53
2.11.	Modelos del Terreno .....	54
2.11.1.	Modelos Digitales de Terreno (MDT).....	55
2.11.2.	Modelos Digitales de Elevación (MDE) .....	56
2.11.3.	Shuttle Radar Topography Mission.....	57
2.12.	Ortorrectificación.....	58
2.13.	Realces y mejoras de la Imagen.....	60
2.13.1.	Ajuste de contraste .....	60
2.13.2.	Composiciones de color .....	61
2.14.	Análisis visual de imágenes.....	62
2.15.	Clasificación Digital .....	64
2.15.1.	Clasificador de máxima probabilidad.....	64
2.16.	Verificación de los cálculos y resultados.....	66
2.16.1.	La Matriz de Confusión.....	67
2.16.2.	Índice Kappa.....	71
2.17.	Áreas Metropolitanas .....	72
2.17.1.	Características de la Metrópoli.....	74
2.17.2.	Áreas metropolitanas en Venezuela .....	75
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO .....		80
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	80
3.2.	SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	80
3.3.	DATOS PARA EL ESTUDIO .....	83
3.3.1.	Definición de escala y leyenda.....	84
3.4.	SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES .....	88
3.4.1.	Imágenes y datos descargados .....	91
3.5.	TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LAS IMÁGENES .....	94
3.5.1.	Ortorección de las imágenes .....	94

3.5.2.	Validación de la exactitud posicional de las imágenes corregidas .....	96
3.5.3.	Mejoramiento de contraste.....	96
3.6.	DELIMITACIÓN DE LAS COBERTURAS.....	97
3.6.1.	Clasificador de máxima probabilidad .....	97
3.6.2.	Interpretación visual.....	99
3.7.	VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN.....	102
3.7.1.	Matriz de Confusión.....	102
3.8.	DETECCIÓN DE CAMBIOS POST-CLASIFICACIÓN .....	104
3.9.	ESQUEMA METODOLÓGICO .....	106
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		108
4.1.	VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	108
4.1.1.	Validación de la exactitud posicional de las imágenes .....	109
4.1.2.	Validación de las clasificaciones .....	112
4.2.	ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO.....	122
4.2.1.	Dinámica urbana por Municipio .....	126
4.2.2.	Dinámica urbana por Estado .....	133
4.3.	CRECIMIENTO DEL LAGO DE VALENCIA .....	135
4.3.1.	Cambio en la superficie de los demás cuerpos de agua .....	142
4.4.	CAMBIOS DE COBERTURAS ENTRE 1988 Y 2018 .....	143
4.4.1.	Clasificaciones de 1988 y del 2018.....	144
4.4.2.	Diferencias en las clasificaciones de 1988 y 2018.....	147
CONCLUSIONES .....		151
RECOMENDACIONES .....		153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		154
ANEXOS .....		160
ANEXO N°1: Puntos de verificación para las imágenes Landsat y SPOT .....		160
ANEXO N°2: Mapas por año de las áreas urbanas de la zona de estudio.....		165
ANEXO N°3: Mapas por municipios de las áreas urbanas de la zona de estudio		169
ANEXO N°4: Áreas para los cuerpos de agua de la zona de estudio por año .....		173

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Componentes de un Sistema de Teledetección.....	15
Fig. 2 Esquema de una onda electromagnética .....	17
Fig. 3 Espectro Electromagnético .....	19
Fig. 4 Tipos de sensores remotos .....	21
Fig. 5 Tipos de sensores pasivos de barrido.....	26
Fig. 6 Diagrama de un explorador de barrido .....	27
Fig. 7 Diagrama de un explorador por empuje .....	28
Fig. 8 Organización de una imagen digital .....	30
Fig. 9 Ejemplos de distorsión geométrica en la imagen.....	32
Fig. 10 Opciones de corrección geométrica.....	37
Fig. 11 Ejemplos de transformación geométrica de la imagen .....	40
Fig. 12 Efecto del algoritmo de transferencia en la corrección geométrica de la imagen.....	42
Fig. 13 Cronología del Programa Landsat .....	44
Fig. 14 Continuidad en los datos multiespectrales del programa Landsat.....	46
Fig. 15 Número de descarga de imágenes Landsat, costo de las imágenes, y el número de publicaciones anuales.....	50
Fig. 16 Cronología de las tres primeras generaciones del programa SPOT.....	52
Fig. 17 Diferencia entre un Modelo de Superficies y un Modelo de Terreno (topográfico).....	55
Fig. 18 Esquema general del SRTM .....	58
Fig. 19 Proceso general de Ortorrectificación.....	59
Fig. 20 Ejemplo de Matriz de Confusión.....	68
Fig. 21 Ejemplo matemático de la Matriz de Confusión .....	69
Fig. 22 Ubicación de las ciudades centro-norte de Venezuela.....	78
Fig. 23 Área de estudio en cuadrícula de 1:100.000.....	81
Fig. 24 Footprint de 5053 y 4053 de Landsat sobre la zona de estudio.....	91
Fig. 25 Par ortocorregido de las imágenes 005053 y 004053 del año 1990. La zona delimitada por el polígono verde es el área de estudio en RGB: 432 .....	95
Fig. 26 Vista de la Base Aérea Libertador en Maracay en escena de Landsat 5 de 1996. A la izquierda composición RGB 432, a la derecha RGB 321 .....	101
Fig. 27 Esquema del método Comparación post-clasificación .....	105
Fig. 28 Diferencia entre los valores de píxeles entre dos raster.....	106
Fig. 29 Esquema metodológico.....	107
Fig. 30 Zonas urbanas del eje Maracay Valencia para cada año de estudio .....	124
Fig. 31 Zonas urbanas del eje Maracay Valencia para los años 1988 y 2018.....	125
Fig. 32 Gráfico del crecimiento urbano por municipios en los años de estudio .....	129

Fig. 33 Área Urbana del eje Maracay Valencia en 2002 por municipios .....	130
Fig. 34 Área Urbana del eje Maracay Valencia en 2008 - 2010 por municipios .....	132
Fig. 35 Gráfico del crecimiento del Lago de Valencia desde 1988 hasta el 2018 ....	136
Fig. 36 Crecimiento del Lago de Valencia desde 1988 hasta el 2018 .....	138
Fig. 37 Crecimiento del Lago de Valencia en 1988 y 2018.....	139
Fig. 38 Crecimiento del Lago de Valencia y cambio en sus islas en 1988 y 2018 ...	141
Fig. 39 Gráfico de las áreas en los cuerpos de agua de la zona de estudio desde 1988 hasta 2018 .....	143
Fig. 40 Clasificación de Coberturas del eje Maracay - Valencia en 1988 .....	145
Fig. 41 Clasificación de Coberturas del eje Maracay - Valencia en el 2018 .....	146
Fig. 42 Diferencias entre las clasificaciones de coberturas del eje Maracay - Valencia para 2018 y 1988.....	149

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Bandas espectrales del sensor TM de Landsat 4 y 5.....	47
Tabla 2 Bandas espectrales de OLI y TIRS comparadas con las de ETM+ .....	48
Tabla 3 Características orbitales de SPOT.....	52
Tabla 4 Instrumentos, bandas y más del programa SPOT .....	53
Tabla 5 Municipios que se encuentran en el área de estudio .....	82
Tabla 6 Habitantes por municipios del área de estudio en los estados Carabobo y Aragua.....	83
Tabla 7 Atributos urbanos/suburbanos y las resoluciones en teledetección mínimas requeridas para obtener dicha información .....	85
Tabla 8 Clasificación de uso y cobertura de USGS (1976) .....	87
Tabla 9 Imágenes Landsat descargadas .....	92
Tabla 10 Imágenes SPOT 4 utilizadas .....	93
Tabla 11 Imágenes VRSS - 1 utilizadas.....	94
Tabla 12 Estándares de precisión horizontal para datos planimétricos digitales .....	108
Tabla 13 Tolerancia y RMS para mapas a escala 1:100.000 según el IGVSB .....	109
Tabla 14 Valores de RMS en la ortocorrección de las imágenes Landsat (L) y SPOT en píxels .....	110
Tabla 15 Valores de RMS en la ortocorrección de las imágenes Landsat y SPOT en metros.....	110
Tabla 16 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1988 .....	113

Tabla 17 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1990 .....	113
Tabla 18 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1996 .....	114
Tabla 19 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2002 .....	114
Tabla 20 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2008-2010 .....	115
Tabla 21 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2014 .....	115
Tabla 22 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2018 .....	116
Tabla 23 Valores de precisión global y kappa para las clasificaciones de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua.....	116
Tabla 24 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 004053 de 1988.....	117
Tabla 25 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 005053 de 1988.....	118
Tabla 26 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 004053 de 2018.....	119
Tabla 27 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 005053 de 2018.....	120
Tabla 28 Áreas totales y cambios de las zonas urbanas desde 1988 hasta 2018 .....	123
Tabla 29 Diferencia entre las áreas de la zona urbana entre 2018 y 1988 .....	125
Tabla 30 Área de los municipios de la zona de estudio para todos los años de interés en hectáreas .....	127
Tabla 31 Porcentaje de crecimiento en las áreas urbanas por municipios entre 1988 y 2018.....	128
Tabla 32 Diferencia en las zonas urbanas por municipios entre los años de estudio en hectáreas .....	131
Tabla 33 Diferencias en las zonas urbanas por estado en los años de estudio.....	134
Tabla 34 Superficie y diferencias del Lago de Valencia en todos los años de estudio en píxeles y en hectáreas .....	135
Tabla 35 Crecimiento del Lago de Valencia entre 1988 y 2018.....	137
Tabla 36 Comparación de las áreas de las islas del Lago de Valencia entre 1988 y el 2018.....	140
Tabla 37 Áreas clasificadas en cada clase para 1988 y 2018.....	144
Tabla 38 Diferencia en las clases de las clasificaciones entre 1988 y 2018 .....	148

## INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano empezó su vida en comunidad ha tenido la necesidad no solo de explorar, sino de conocer e identificar su entorno. Científicos e historiadores afirman que existen registros de mapas que se remontan a 5.000 años antes del establecimiento del tiempo meridional.

Los avances tecnológicos alcanzados a lo largo del tiempo hicieron que los mapas evolucionaran de ser simples líneas dibujadas en piedras a convertirse en elaborados modelos de la Tierra, sistemas de posicionamiento global y otras herramientas que potencian y agilizan los estudios de la superficie y composición del planeta en la actualidad.

La teledetección, una de las disciplinas de la ingeniería geodésica, trata de la observación remota del planeta Tierra. Entre sus principales beneficios resaltan la cobertura global y periódica de la superficie terrestre, la visión panorámica y la homogeneidad en los datos que ofrece.

Utilizando las herramientas que brinda la teledetección, en conjunto con métodos tradicionales, se pueden llevar a cabo trabajos de cartografía, monitoreo de desastres naturales y la detección de cambios, entre otros.

Detectar los cambios en las características de la superficie de la Tierra es de gran importancia para entender la relación entre los humanos y los fenómenos naturales que ocurren en el planeta. Utilizando la teledetección se pueden responder preguntas como ¿Qué tipo de cambios ocurrieron? ¿Cuándo y dónde sucedieron estos cambios? ¿Cuáles consecuencias tienen estos cambios? y ¿Cuáles son los ciclos y la tendencia del cambio?

Sin embargo, desde la creación del primer mapa muchas cosas han cambiado en el mundo: los humanos pasaron de vivir en pequeños grupos a formar grandes asentamientos urbanos cuyo impacto sobre la naturaleza puede ser determinado a través

de la teledetección. Entender y dotar de características los cambios que estos asentamientos humanos tienen sobre el ambiente es posible utilizando los instrumentos de esta técnica de la geodesia.

Conocer cómo ha sido el proceso de expansión de las áreas urbanas tiene un gran abanico de aplicaciones y beneficios para la sociedad. Desde mejorar la prestación de servicios públicos hasta facilitar el desarrollo de nuevos urbanismos, la detección de cambios ofrece una perspectiva única de cómo evolucionan los asentamientos humanos. Además, estos estudios permiten realizar planes sobre las tendencias de crecimiento de los centros poblados.

En 2017, el porcentaje de población urbana en Venezuela era del 88%. La mayor concentración de habitantes la tiene Caracas, capital del país sudamericano, pero no muy lejos le siguen las dos principales ciudades del centro del país: Maracay, estado Aragua, y Valencia, estado Carabobo.

El eje Maracay – Valencia conforma una de las principales zonas industriales del país. Aun así, su crecimiento en las últimas décadas no ha sido evaluado, al menos no en su totalidad, a pesar de ser históricamente, dos de las ciudades venezolanas con mayor expansión urbana.

Una investigación dirigida a la aplicación de la teledetección para el análisis del crecimiento urbano del eje Maracay – Valencia proporcionará a los entes gubernamentales e instituciones privadas un registro certero de cómo se ha transformado la zona en los últimos años y qué consecuencias tiene para la región.

Para determinar los cambios presentes en el eje se utilizaron imágenes Landsat y SPOT desde el año 1988 hasta el 2018, con las que se realizó un estudio multitemporal que permitió identificar y clasificar los cambios existentes.

## **CAPÍTULO I. EL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La dinámica que presentan las poblaciones en el mundo, es un elemento primordial para la comprensión del desarrollo temporal y espacial de las ciudades. En la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDSD), realizada en Johannesburgo, Sudáfrica en el año 2002, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoció la necesidad de afrontar los retos del crecimiento urbano a fin de promover un hábitat adecuado para todos y una urbanización sostenible, elementos indispensables para lograr un entorno económico, social y cultural viable.

Según datos del Banco Mundial, basados en las perspectivas de la urbanización mundial de la ONU, el porcentaje de población urbana en Venezuela en 1960 era de 62%, para el año 2017 esta característica se posicionó en 88%. Este fenómeno no se presenta solo en este país, actualmente el 55% de las personas en el mundo viven en ciudades, y la ONU estima que esta proporción aumentará un 13% para el año 2050.

La teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas altamente eficaces para la ordenación y gestión de espacios urbanos. Este hecho cobra mayor relevancia en países emergentes, como es el caso de Venezuela, donde la precaria disponibilidad de información básica y de aspectos temáticos dificulta una adecuada planificación de los espacios urbanos, que se caracterizan por una continua expansión; producto, por una parte, del excesivo aumento demográfico que experimentan estos países. (Molina, 2004).

“La urbanización ocasiona, de hecho, un mayor uso de energías renovables, nuevos materiales y bienes de consumo, generando a su vez efectos negativos en el ambiente, como la contaminación de los recursos naturales que, a su vez, generan graves consecuencias para la salud pública.” (UNESCO, 2005).

Una política de planificación efectiva y un apropiado manejo de recursos solo pueden lograrse bajo la toma de decisiones informadas y oportunas, pero aun así, la información básica en la extensión y cambios en los asentamientos urbanos son usualmente escasos y carecen de precisión, desactualizados o simplemente inexistentes. (Barnsley, Moller-Jensen, & Barr, 2001). Esto se ve particularmente en los países emergentes. (Baudot, 2001).

En 1950 la única ciudad que superaba el medio millón de habitantes en Venezuela era Caracas, por lo que era la única metrópoli del país, mientras que para el censo de 1981 se le habían sumado, entre otras, Valencia y Maracay (capitales de los estados Carabobo y Aragua, respectivamente). Valencia se consolidó como centro regional de importancia industrial, mientras que Maracay concentraba población debido a la presencia de un sector manufacturero y al apoyo que se le otorgó en su momento al sector agrícola y al turístico del estado Aragua y regiones vecinas. (Viana, 2017).

El eje Maracay – Valencia ha sido una región caracterizada por un alto crecimiento poblacional; en las décadas de los ochenta y noventa se estabilizó el crecimiento de estas dos ciudades en torno al 30%, siendo todavía ésta, una cifra mucho más alta que el promedio presente en todo el país. (OCEI, 2001).

Se puede afirmar que: “...estas dos regiones colindantes aun cuando no existe continuidad del espacio construido, mantienen fuertes relaciones de interdependencia entre sí al punto que pueden ser consideradas una megalópolis...” (Negrón, 2001). Pero en la actualidad, los estudios sobre el crecimiento de estas dos ciudades aledañas entre sí son escasos, donde no se tienen datos vigentes a la fecha de cómo ha sido la evolución en la ocupación del suelo en este proceso de dinamismo urbano.

El Lago de Valencia o Lago de Tacarigua, es el cuerpo de agua dulce natural, sin desagüe al mar, más grande de Venezuela, en sus orillas se asientan dos de las

principales ciudades del país, Valencia y Maracay. Por estar localizado en una cuenca endorreica, los desechos que se depositan en él no tienen posibilidad de ser evacuados a otra parte o de circular hacia otros lugares, lo que ha venido produciendo una acumulación de tóxicos contaminantes en sus aguas. (Martinez, 2015).

Actualmente se está agravando el problema del aumento del nivel del lago, debido al trasvase de las aguas de la cuenca del Orinoco, que se hace hacia la cuenca del lago de Valencia, sin haber hecho los canales de drenaje para las aguas sobrantes. Como consecuencia de ello, los niveles de contaminación de sus aguas también han venido aumentando debido a la importante industrialización de las ciudades de Maracay y Valencia. (Martinez, 2015).

Venezuela es un país con clima tropical, según la clasificación climática de Köppen, el clima de las ciudades de Maracay y Valencia es tropical de sabana. La estación seca comienza en diciembre y la lluviosa se inicia en mayo y se prolonga durante seis meses. (Molina, 2004). La presencia de nubosidad en la zona centro-norte del país es abundante, en especial en la época lluviosa antes mencionada, por lo que en algunas ocasiones obtener escenas de sensores remotos ópticos sin presencia de nubes se dificulta.

La falta de documentación e información actualizada en este ambiente dinámico se traduce en problemas de planificación y gestión territorial para las ciudades de Maracay y Valencia, se evidencia la necesidad de obtener información veraz y actual en la zona, caracterizando cambio de uso de suelos y el crecimiento en los diferentes sectores que conforman estas ciudades, como también los cambios en el Lago de Valencia y su influencia en la ocupación del suelo, haciendo uso de datos multitemporales de teledetección, en conjunto con sistemas de información geográfica, para así lograr una visión fundamentada para la planificación y toma de decisiones en estas dos importantes ciudades de Venezuela.

## **1.2. MARCO REFERENCIAL**

El estudio de detección de cambios usando técnicas de teledetección ha sido aplicado desde el inicio de los sensores remotos, pero no fue hasta el lanzamiento del primer satélite ERS-1 (luego renombrado Landsat 1) que se empezó a contar con imágenes de plataformas satelitales con resoluciones espaciales y espectrales apropiadas para empezar con estudios más detallados.

Los satélites con resoluciones espaciales medias están diseñados para proveer información en escalas apropiadas para una variedad de aplicaciones relacionadas a los recursos naturales de la Tierra. La continuidad del programa Landsat, desde 1972, está reconocida como un evento clave en la evolución de los sensores remotos. (Rogan & Chen, 2003). La resolución espacial del sensor MSS (Landsat Multispectral Scanner) dio inicio al desarrollo en los análisis para el cartografiado general de áreas urbanas y suburbanas, como también el estudio de recursos naturales. Los datos del programa Landsat son recursos históricos invaluable para los estudios de detección de cambios en todo el mundo (Rogan & Chen, 2003).

Desde el inicio del lanzamiento de los satélites con resoluciones espaciales medias a altas, se han realizado innumerables estudios sobre la detección de cambios de uso de suelo, y del tema de este trabajo de investigación, estudios de detección de cambio y crecimiento en entornos urbanos. A continuación se mencionan algunas de estas investigaciones sobre el tema, donde los autores hacen uso de técnicas de teledetección.

Estas aplicaciones han sido implementadas por diversidad de investigadores, en muchos de los países del mundo, tales como Argentina, Canadá, Chile, China, Colombia, EE.UU., España, Irán, y Venezuela entre otros. El uso de las imágenes del programa Landsat es recurrente porque son de libre descarga, resolución espacial media y cuentan con un banco de imágenes amplio. Aunque el uso de sensores de alta

resolución espacial gana cada vez más terreno, sus limitados catálogos – por su menor tiempo en existencia – hacen a las imágenes del programa Landsat una de las principales fuentes de imágenes satelitales para estudios de teledetección y SIG.

Mahdi Sabet, Ab. Latif & Pavlos (2011) presentan resultados de una experiencia en la ciudad Shiraz, en Irán, donde realizaron un estudio multitemporal de tres décadas, desde 1976 hasta el 2005, sobre el crecimiento y los cambios de esta ciudad, usando escenas de los sensores MSS, TM y ETM+ del programa Landsat. En esta investigación se logró delimitar el área de crecimiento de la ciudad durante este período y se observa una alta disminución de la vegetación que rodeaba a esta importante ciudad al sur de Irán.

Recio, Pardo, Ruiz, Sarría & Córcores en el 2005 realizaron exitosamente una metodología, en la Universidad Politécnica de Valencia, para efectuar el análisis automático de las zonas urbanas mediante imágenes de satélite y ortofotografías aéreas. Utilizaron imágenes de Landsat ETM+ y fotografías aéreas para hacer una clasificación multiespectral y por texturas, para así analizar el crecimiento urbano de la zona de l'Horta Nord de Valencia, España. Los resultados indicaron un nivel satisfactorio en la identificación de núcleos urbanos y algunas limitaciones en la correcta delimitación de zonas industriales.

Arango, Chilito & Cifuentes (2016) analizaron la expansión urbana de la ciudad de Popayán, Colombia, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat desde 1989 hasta el 2014, codificando cuatro aspectos primordiales en el comportamiento expansivo, que fueron cobertura vegetal, construcciones o edificaciones, red hídrica e infraestructura vial y evaluación de la expansión urbana. Se concluyó la tasa de crecimiento de 0,68 km/año y una disminución considerable en la cobertura vegetal de la ciudad.

Xian, Shen & Ge (2004), realizaron una investigación de las tendencias de urbanización en la ciudad de Shijiazhuang en China, usando SIG y técnicas de

teledetección. Se identificó el cambio en la cobertura y uso de la tierra desde 1987 hasta el 2001 y demostraron que hubo una gran expansión urbana en el área de estudio; esto se logró usando imágenes de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+, además de cartografía y archivos de la zona de años anteriores a las escenas.

En Venezuela algunos profesionales han realizado investigaciones referentes al cambio de coberturas haciendo uso de la teledetección. Un ejemplo de esto es la investigación de la profesora Gladys Molina realizada en 2004 en la zona de Maracay, Estado Aragua. En su trabajo se trató de definir la dinámica de ocupación y transformación de los usos de suelo para la ciudad de Maracay y sus alrededores, haciendo uso de dos imágenes Landsat 5 de los años 1986 y 1991, donde afirma que la dinámica de ocupación de suelo en la ciudad de Maracay y Palo Negro es alta entre los años estudiados.

En dicho trabajo ella afirma que “De acuerdo con las tendencias mostradas es de prever que de no ser aplicados planes de ordenamiento territorial adecuados, el eje Valencia-Maracay-Caracas, podría convertirse en una nebulosa urbana de una magnitud casi inimaginable, con las consecuentes secuelas de problemas derivados: deficiencia en la prestación de servicios básicos, deterioro ambiental, dificultad de enlace en las redes de transporte, etc. Por esta razón, es necesario crear incentivos económicos (por ejemplo, la instalación de industrias) y condiciones sociales atractivas en otras regiones, para que éstas sirvan de desahogo a la ya desbordada Región Central” (Molina, 2004). Por lo que un estudio de la zona de Maracay y Valencia hasta la actualidad mostrará el estado en el que se encuentra este importante eje de Venezuela.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo General**

Analizar la dinámica de crecimiento urbano del eje Maracay – Valencia haciendo uso de técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Explorar la base cartográfica de mapas y archivos disponibles en el área del eje Maracay – Valencia.
- Identificar las imágenes satelitales disponibles en la zona de interés (eje Maracay – Valencia) desde el año 1988 hasta la fecha.
- Definir las técnicas de detección de cambio más adecuadas para el análisis del dinamismo en el eje Maracay – Valencia.
- Valorar los resultados obtenidos con respecto a las especificaciones técnicas cartográficas vigentes.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La detección de cambios a partir de una secuencia multitemporal de imágenes de satélite es una de las aplicaciones más importantes en teledetección. “La comparación de imágenes multitemporales se ha venido empleando fundamentalmente en la detección de cambios en la cubierta terrestre, para seguir la evolución de áreas forestales, superficies quemadas, recursos naturales, crecimiento urbano, entre otros” (Ambrosio, González, & Arévalo, 2002).

La disponibilidad de imágenes adquiridas desde diversas plataformas espaciales permite analizar el territorio desde una perspectiva cada vez más completa. La variedad de resoluciones espaciales hace posible estudios a diferentes niveles de detalle, mientras que la información espectral permite la caracterización de espacios o unidades de paisaje. Todo ello, unido a la periodicidad de adquisición de las imágenes, hace que estas técnicas sean idóneas para seguir la evolución del territorio a lo largo del tiempo. (Ruiz Fernández, Pérez, Estornell Cremades, & Ruiz Marín, 2007).

La dinámica de crecimiento urbano está provocando importantes cambios de usos del suelo, ocasionando como consecuencia una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales, sobre la calidad de vida de las personas y sobre la sostenibilidad global del planeta (Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2006). Es de gran importancia, por tanto, estudiar los cambios de crecimiento de las zonas urbanas, para contar con información oportuna, actual y confiable de estas áreas.

En el año 1985 se creó el Plan de Ordenación Urbanística para el Área Metropolitana de Valencia – Guacara, el cual fue realizado por el Ministerio de Desarrollo Urbano (MINDUR) con la formulación del Plan Rector de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Valencia - Guacara, el cual no fue publicado oficialmente hasta siete años más tarde, cuando fue promulgado mediante Resolución

N° 1.029 del MINDUR en la Gaceta Oficial N° 4.479 extraordinario, en esta propuesta se abarcó un horizonte de planificación de 20 años, comprendidos de 1985 al 2005.

Desde entonces, el Área Metropolitana de Valencia – Guacara, definida para el momento, no ha tenido un nuevo plan de ordenación urbana, que esté adaptado a los existentes cambios que se presentaron a lo largo del tiempo, ni tampoco se han realizado análisis actuales de los cambios en los límites de esta zona urbana. “Dicho plan ha sido la base para la elaboración de todos los Planes de Desarrollo Urbano Locales (PDUL) elaborados a la fecha, además de haber comprendido una amplia prospectiva de tiempo, este Plan se encuentra desactualizado y nunca fue formalmente evaluado” (Houtman, 2001).

El PDUL de Maracay ha tenido vigencia desde el 3 de noviembre de 2003, este estaba establecido para un período de 10 años, sin embargo, su siguiente actualización se llevó a cabo cinco años después de lo pautado, cuando el 09 de mayo del 2018 se promulgó la Gaceta Municipal de Girardot N° 23.246 extraordinario, donde se actualizaba el mismo. Este Plan expone la búsqueda del fortalecimiento de la estructura urbana de la ciudad, sin embargo, al ser un Plan Local, solo está estipulado para el municipio Girardot, sin tomar en cuenta las relaciones con los municipios aledaños, que en sí, son los que abarcan la zona metropolitana de Maracay en su totalidad.

Maracay y Valencia, unas de las principales ciudades del país, han presentado características cambiantes a lo largo de su historia, desde sus amplias parcelas agrícolas hasta su importante aumento en la industrialización de estas. Un análisis sobre el dinamismo del eje Maracay Valencia aportaría información valiosa para la planificación y desarrollo urbanístico de ambas ciudades, tomando en cuenta el proceso de cambios que han experimentado en los usos de la cobertura terrestre; información que podría ser aprovechada por los entes competentes en el área, para la planificación de los servicios básicos para sus habitantes y la creación de planes de contingencia ante

los posibles daños que puedan ocasionar catástrofes naturales a los habitantes de estas poblaciones.

La alta tasa de cambio en las ciudades y su desarrollo urbanístico hace imperativo aplicar técnicas que respondan a las necesidades de planificación y gestión del cambiante territorio, para así utilizar métodos efectivos que sirvan de base para la creación de planes de ordenación urbana que tomen en cuenta la relación existente entre estas dos grandes metrópolis dinámicas en el centro-norte de Venezuela.

## 1.5. ALCANCES

Las escenas utilizadas para el análisis multitemporal del dinamismo del eje Maracay – Valencia fueron adquiridas por los satélites Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y SPOT 4, en cuanto a las imágenes de la misión Landsat tienen un nivel de procesamiento Level-1G; para abarcar en su totalidad el área de estudio fueron necesarias las imágenes 005/053 (Path: 5, Row: 53) y 004/053 (Path: 4, Row: 53), las cuales cubren las poblaciones de Valencia, San Diego, Guacara, Maracay, Cagua y La Victoria, por solo nombrar las más notables.

Cada imagen Landsat es capturada con un ancho de franja (swath) de 185 km; de estas imágenes se seleccionó el área de estudio, la cual comprende 3700  $km^2$ , dicha zona se extiende desde la ciudad de Tocuyito, perteneciente al Municipio Libertador del Estado Carabobo hasta el pueblo de El Consejo, capital del municipio José Rafael Revenga, del Estado Aragua. Las imágenes se encuentran en proyección cartográfica UTM Huso 19 y Datum WGS84.

Se obtendrán como productos finales capas de la zona de estudio en formato raster de las áreas urbanas del eje Maracay – Valencia en los años de estudio, 1988, 1990, 1996, 2002, 2008 – 2010, 2014 y 2018, donde se analizará el dinamismo presente en estos asentamientos humanos, presentados en un SIG.

Se elaborarán productos con una escala de visualización máxima de 1:100.000, específicamente en la categoría L1-USGS Level I, en las clases definidas por Jensen y Cowen en 1999 para las características de uso y cobertura de la tierra, esto debido a la resolución espacial de 30 metros de las imágenes Landsat 4, 5, 7 y 8, en las principales bandas del espectro electromagnético que serán utilizadas para el estudio. Siendo el Modelo Digital de Elevación usado para la ortocorrección de las escenas el SRTM 1' (Shuttle Radar Topography Mission) de 30 m de resolución.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El fundamento teórico que da soporte a este trabajo se presenta a continuación, mencionando conceptos, teorías y procedimientos necesarios para aclarar y dar soporte teórico al desarrollo realizado por la autora de esta investigación.

### 2.1. Teledetección Espacial

Se conoce como Teledetección Espacial aquella técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre (Chuvieco, 1990). Para que esta técnica sea posible, es necesario que entre el sensor y el objeto exista algún tipo de interacción, ya sea óptica, acústica, microondas, entre otras.

“Suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o un haz energético artificial, por emisión propia. A su vez, es preciso que este haz energético recibido por el sensor se trasmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para un determinada aplicación” (Chuvieco, 1990).

Según la interacción existente entre el sensor y la superficie terrestre, hay tres formas de adquirir información mediante un sensor remoto, (i) reflexión, donde se usa la principal fuente de energía del planeta, el sol, (ii) emisión, en este caso el sensor es capaz de captar la energía emitida por las propias cubiertas y (iii) emisión-reflexión, el sensor genera su propio haz de energía, el cual luego de su reflexión en la cubierta, es recogida por el sensor.

Los elementos que componen un sistema de teledetección espacial son los siguientes (ver Fig. 1):

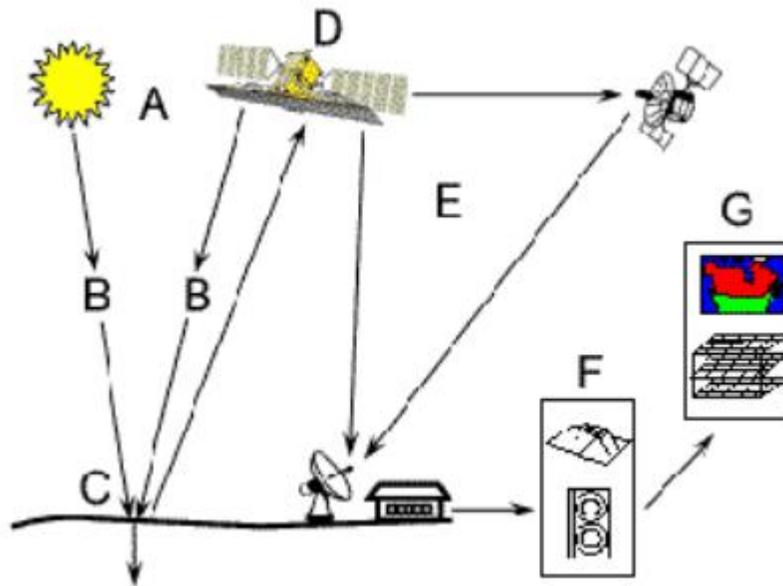


Fig. 1 Componentes de un Sistema de Teledetección

Fuente: *Fundamentals of Remote Sensing* (Canada Centre for Remote Sensing)

- A. Fuente de energía: el primer requerimiento para que exista una interacción entre el sensor y la cubierta es tener una fuente de energía que ilumine con energía electromagnética al objeto de interés. Es el origen del flujo energético detectado por el sensor. La principal fuente de energía es la solar, donde se habla de teledetección pasiva y el foco de energía es externo al sensor. Si el haz energético está emitido y recibido por el sensor se habla de teledetección activa.
- B. La radiación y la atmósfera: Mientras la energía se desplaza desde su fuente hasta el objetivo, esta entrará en contacto e interactuará con la atmósfera cuando pasa a través de ella, el cual es un elemento que siempre estará presente en la teledetección espacial.
- C. Cubierta terrestre: formada por distintas masas vegetales, suelos, agua, o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

- D. Sistema sensor: compuesto por el sensor propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- E. Sistema de recepción-comercialización: en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en formato adecuado (usualmente en formatos electrónicos), y tras las oportunas correcciones se distribuye a los intérpretes.
- F. Procesamiento y análisis: se analiza y procesa la imagen, convirtiéndola en clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema de estudio.
- G. Usuario final: el último elemento del proceso de teledetección es alcanzado cuando se logra aplicar la información analizada sobre el objeto o cubierta. El usuario final es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. La energía térmica se transmite de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación. La radiación constituye la base de los sistemas de teledetección usados en este trabajo.

## **2.2. La Radiación Electromagnética**

La radiación electromagnética históricamente se ha explicado por dos teorías contrapuestas, una que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell) y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con una masa igual a cero (Planck, Einstein). (Chuvienco, 1990). En la actualidad se ha demostrado que ambas teorías se pueden compaginar, ya que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

- Teoría Ondulatoria: La teoría ondulatoria indica que 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 de fuerzas, eléctrico y magnético, los cuales son ortogonales entre sí.

$$c = \lambda F \quad \text{Ecuación 1}$$

Sus principales elementos, longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia (F) están inversamente relacionados, siendo c la velocidad de la luz.

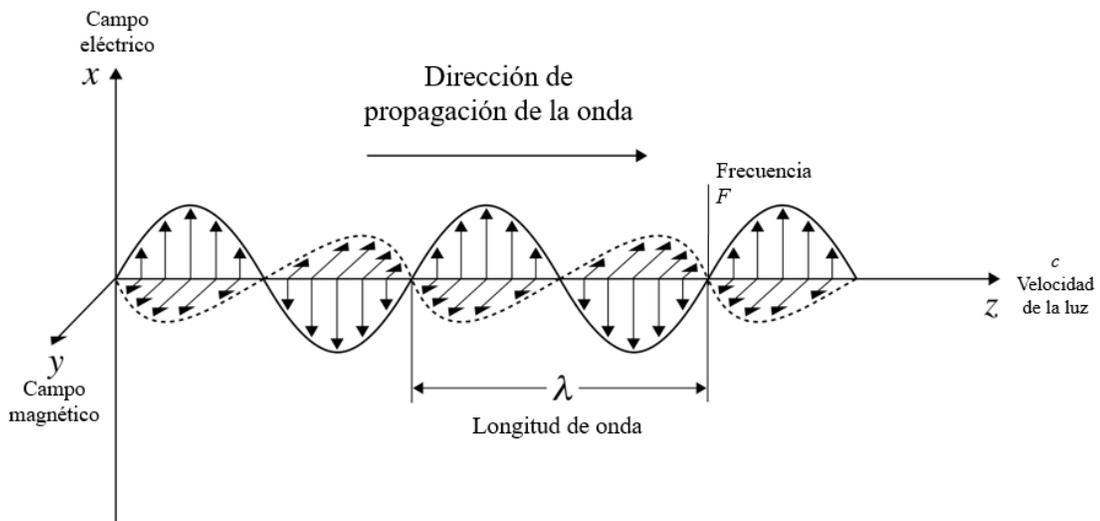


Fig. 2 Esquema de una onda electromagnética

Fuente: *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Chuvieco, 1990)

- Teoría Cuántica: esta teoría propone que todo cuerpo radiante emite energía electromagnética de forma discreta y no continua. A mayor longitud de onda o menor frecuencia el contenido energético será menor y viceversa.

$$Q = h F \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Q es la energía radiante de un fotón, F la frecuencia y h la constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34} J s$ ). Se puede afirmar que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, por lo que las primeras requieren medios de detección más sofisticados.

### **2.3. El Espectro Electromagnético**

Gracias a las teorías anteriores, se puede deducir que cualquier tipo de energía radiante se puede describir en función de su longitud de onda o frecuencia. “Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético” (Chuvieco, 1990).

El espectro electromagnético va desde longitudes de onda corta, como lo son los rayos gamma y rayos x, que tienen como unidad de medida de micras ( $\mu\text{m} = 10^{-6}$  metros), hasta las kilométricas, utilizadas para telecomunicaciones, las cuales se miden en centímetros o metros.

En el campo de la teledetección las bandas que son frecuentemente utilizadas ya están definidas (ver Fig. 3), algunos autores difieren en la amplitud y denominación de estas, ya que las bandas son continuas y no tienen unos límites claros, si bien la terminología más común y empleada por E. Chuvieco en su libro Fundamentos de Teledetección Espacial son las siguientes:

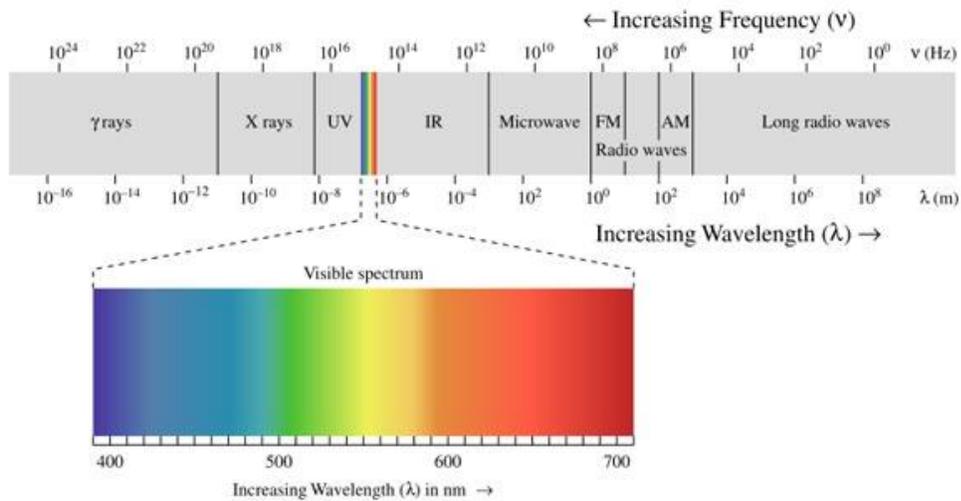


Fig. 3 Espectro Electromagnético

Fuente: Trabajo Especial de Grado: Propuesta metodológica para la fusión y ortocorrección de imágenes del satélite Miranda orientado a la actualización cartográfica (Caballero Caguado, 2015)

- Espectro visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ): Lleva su nombre por tratarse de la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar, siendo el sol la principal fuente de energía EM de la Tierra. Este rango se divide en tres bandas elementales, que se denominan azul (0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ ); verde (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ), en razón a los colores elementales asociados a estas longitudes de onda.
- Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ): También denominado infrarrojo próximo (NIR, por sus siglas en inglés), reflejado y fotográfico. Resulta de vital importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ): Conocido como Infrarrojo de Onda Corta (SWIR, por sus siglas en inglés). En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu\text{m}$ ): Es la energía correspondiente a la emitida por la superficie terrestre, incluye la porción emisiva del espectro terrestre. Denominado también TIR, por sus siglas en inglés.
- Micro-ondas ( $> 1\text{mm}$ ): Constituye la región espectral de longitudes de onda con mayor longitud, es de gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa. Es capaz de penetrar a ciertas profundidades entre las formaciones boscosas, son útiles en estudios de la humedad del suelo, así como de la rugosidad de la superficie terrestre.

Cada cubierta terrestre tiene un comportamiento espectral específico con cada una de las bandas del EEM (espectro electromagnético). Las regiones con longitudes de onda más cortas no cuentan con un amplio uso en el campo de la teledetección, debido a que por sus longitudes de onda, Rayos Gamma ( $< 0,3 \text{ nm}$ ) ( $\text{nm} = 10^{-9} \text{ metros}$ ); Rayos X (0,03 a 30 nm) y Ultravioleta, conocida como UV (0,03 a 0,4  $\mu\text{m}$ ), su energía es completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera y la capa de ozono con respecto a las longitudes de onda menores a 0,3  $\mu\text{m}$ .

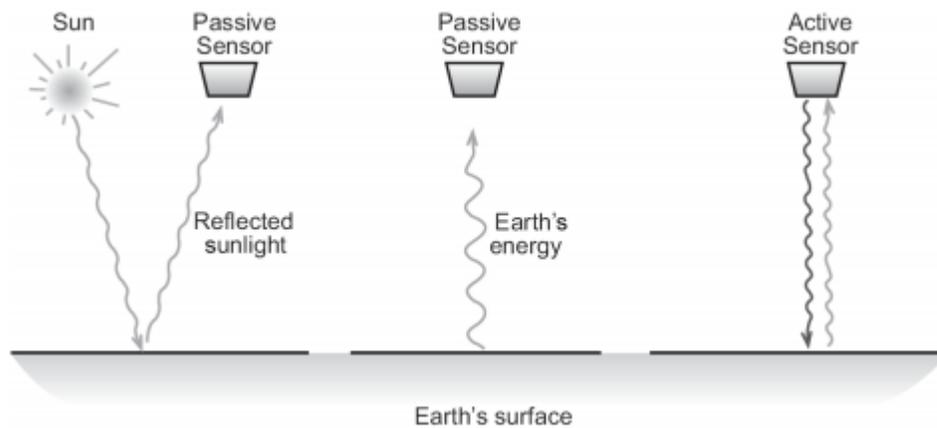
#### **2.4. Sistema Sensor**

Los sistemas de teledetección requieren, al menos, tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. El sistema sensor está compuesto por el sensor y la plataforma que lo sostiene.

Un sensor remoto es un dispositivo que permite a distancia detectar, cuantificar y usualmente registrar la radiación electromagnética, la cual es almacenada en formato analógico o digital. Estos son de diferentes tipos, de acuerdo con los principios básicos de su diseño, su forma de registrar los datos y la fuente de energía que emplean. (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

Una de las formas habituales en las que se clasifican los Sensores Remotos es considerando la forma en que estos sistemas reciben la energía procedente de distintas cubiertas. De esta manera, se definen dos tipos principales de sensores, ver Fig. 4:

- Sensores pasivos: estos sensores se limitan a recoger la energía EM procedente de las cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya emitida en virtud de su propia temperatura.
- Sensores activos: los sensores activos son capaces de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Entre los sistemas más conocidos entre los sensores activos está el radar, radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja entre las bandas de 0,1 cm y 1 m.



*Fig. 4 Tipos de sensores remotos*

*Fuente: Principles of Remote Sensing: An introductory textbook. (The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009)*

A continuación se analizarán algunos conceptos que son aplicados e incumben a todos los sistemas sensores, tanto pasivos como activos.

## **2.5. Resolución de un Sistema Sensor**

Chuvieco y otros autores acuerdan en que se puede definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar, discriminándola, información de detalle. Esta definición engloba varios aspectos que requieren comentarios más detallados. La resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes.

En definitiva, el concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

### **2.5.1. Resolución Espacial**

Este concepto designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. Cuando se trabaja con un sistema fotográfico, se refiere a la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía, y depende de la longitud focal de la cámara y la altura de vuelo del sensor respecto a la superficie.

En cuanto a los sensores ópticos-electrónicos, se prefiere utilizar el concepto de campo de visión instantáneo (IFOV). Este se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado. No obstante, se suele utilizar normalmente la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo. Simplificando las cosas, esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, denominada pixel (Chuvieco, 1990).

La resolución espacial tiene un papel protagónico al momento de la interpretación de la imagen, marcando el nivel de detalle que esta ofrece. Parece obvio decir que solo se pueden discriminar sobre la imagen elementos de tamaño superior a la del pixel, si bien autores como Jensen en 1986 han demostrado que este umbral suele elevarse a cuatro veces ese tamaño mínimo.

La escala de trabajo, en consecuencia, está estrechamente relacionada con la resolución espacial, al igual que la confiabilidad finalmente obtenida en la interpretación. “Cuanto menor sea el pixel, menor también la probabilidad de que éste sea un compuesto de dos o más cubiertas fronterizas. Un pixel mixto, viene definido por una señal intermedia a las distintas cubiertas que lo componen” (Chuvieco, 1990).

### **2.5.2. Resolución Espectral**

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Tener varias bandas espectrales en un mismo sensor permite registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro, para así contar con información multitemporal.

Un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. También es importante que estas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. La elección del número, ancho de las bandas y su localización en el sensor están directamente relacionados con los objetivos de su diseño.

Muchos sistemas sensores registran la energía en sectores de longitudes de onda con varias resoluciones espectrales, estos son conocidos como sensores multiespectrales, como por ejemplo los de la plataforma Landsat 7 que cuenta con 8 bandas espectrales (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011). También existen sensores denominados hiperespectrales, los cuales cuentan con cientos de bandas espectrales, un ejemplo de este tipo de sensores con altas resoluciones espectrales es el sensor Hyperion de la NASA, el cual tenía la capacidad de trabajar con 220 bandas (desde 0,4 hasta 2,5  $\mu\text{m}$ ).

### **2.5.3. Resolución Radiométrica**

Corresponde a la sensibilidad del sensor, esto es, su capacidad para detectar variaciones en la Radiancia espectral que recibe. En la imagen presentada en formato digital el número de valores que incluye el rango dinámico, esto es el número máximo de niveles digitales de la imagen, suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor.

Es decir, la resolución radiométrica en este formato se refiere al número de posibles niveles digitales (ND) en cada banda. Ese número se expresa tradicionalmente en bits, los cuales indican la capacidad necesaria para almacenar cada pixel, este es determinado como  $2^n$ , donde n es el número de bits.

Este rango de codificación varía con los distintos sensores. Inicialmente los Landsat-MSS, ofrecían un rango de 128 niveles de codificación por píxel, 64 para el infrarrojo cercano. Actualmente, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel (entre 0 y 255), como Landsat 7-ETM+, utilizando 8 bits.

Como ocurre con las otras resoluciones del sistema sensor mencionadas, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen, representando con mayor precisión los datos de las variaciones en la radiación que proviene de la superficie.

### **2.5.4. Resolución Temporal**

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Chuvieco, 1990). Este ciclo depende de varias características del sensor y su plataforma, como son la altura de vuelo, la velocidad e inclinación, así como el ángulo de observación y de apertura.

Según el objetivo fijado para el sensor, su resolución temporal varía, los satélites meteorológicos están obligados a obtener información de manera frecuente de la misma zona en la Tierra, ya que se dedican a observar un fenómeno con alto dinamismo. Por lo contrario, los satélites de recursos naturales, como lo son SPOT y Landsat, ofrecen una cadencia menor, 26 y 16 días respectivamente.

En cuanto a la relación entre las diferentes resoluciones existentes se puede decir que, “Conviene aclarar que estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral y la radiométrica” (Chuvieco, 1990). Al verse en aumento una de estas resoluciones se incrementa el volumen de datos, que tanto el sensor como la estación receptora tienen que procesar.

## **2.6. Sensores Pasivos**

Como se dijo anteriormente, los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea reflejada de los rayos solares, o emitida en virtud de la propia temperatura de la cubierta. Estos sensores pueden categorizarse según el procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos. Se pueden dividir en tres grandes grupos, los sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. En función del enfoque de este trabajo especial de grado se abordará el tema de los sensores Pasivos electrónicos principalmente.

Entre los sensores óptico-electrónicos se tienen los sistemas de barrido y de no-barrido.

Los sensores pasivos clasificados como una combinación de scanners y productores de imágenes están además subdivididos en dos categorías: Sensores barredores de planos de imagen (cámaras de TV); y Sensores scanners (barredores) de

planos de objetos (scanners óptico-mecánicos, como el MSS y radiómetros scanners de microondas) (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

En cuanto a los sensores pasivos de no-barrido se obtienen productos de tipo de registro de perfiles, como los sensores magnetómetros, gravímetros y otros, es decir, no producen imágenes. Un sensor pasivo de no-barrido y que produce imágenes es la cámara aérea o espacial.

Dentro de los sistemas scanners óptico-electrónicos existen dos tipos principales: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje (Ver Fig. 5).

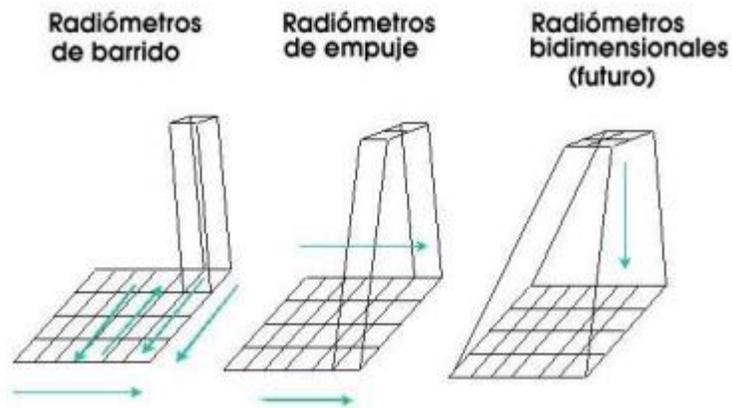


Fig. 5 Tipos de sensores pasivos de barrido

Fuente: SIG y Teledetección (Tema 3) (Universidad de Murcia, 2015)

Uno de los sensores más habituales en teledetección espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (scanners). Su funcionamiento se basa en un espejo móvil, que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria y les permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite (Ver Fig. 6).

El número y características de los detectores que incorpora un equipo de barrido es muy importante para explicar las condiciones de la imagen resultante, como lo es el

tamaño de mínima unidad de información adquirida, el pixel, que está relacionado con los intervalos regulares en que los detectores reciben la señal enviada por el equipo óptico.

En muchos equipos de barrido la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detectores. En ese caso, se habla de exploradores de barrido multiespectral, pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro. (Chuvieco, 1990).

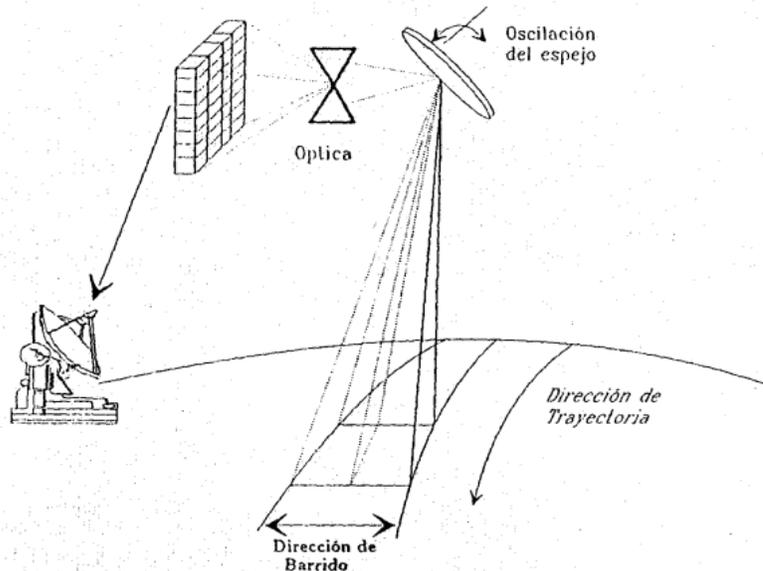


Fig. 6 Diagrama de un explorador de barrido

Fuente: *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Chuvieco, 1990)

Los equipos de barrido multiespectrales se han incorporado sistemáticamente desde hace décadas en las principales misiones de teledetección desde el espacio.

El segundo grupo son los radiómetros de empuje (pushbroom), en estos se elimina el espejo oscilante al disponer de una cadena con un gran número de detectores de manera que se cubre todo el campo de visual del sensor, ver Fig. 7.

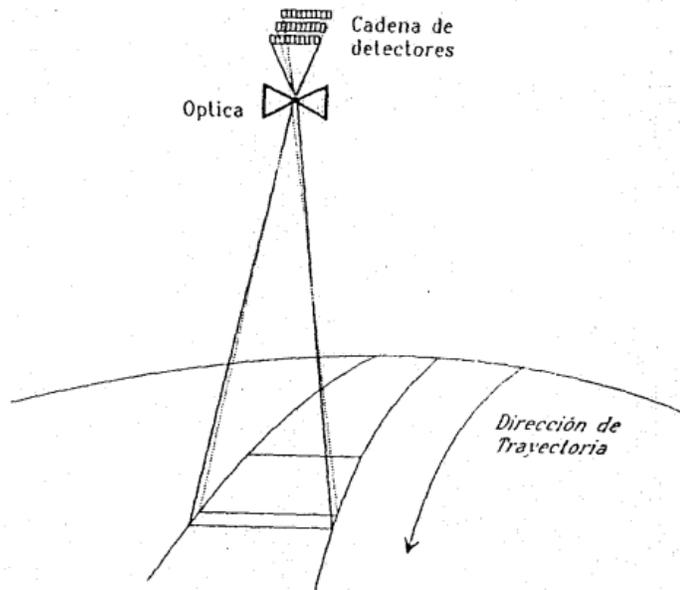


Fig. 7 Diagrama de un explorador por empuje

Fuente: *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Chuvieco, 1990)

Esta tecnología permite aumentar la resolución espacial del sistema respecto a los barredores convencionales, al eliminar la parte móvil, como también reduce los errores geométricos, al perderse la sincronía entre el movimiento del espejo y de la plataforma. Estos radiómetros también están presentes en algunas de las principales misiones de teledetección espacial, como es el caso del satélite francés SPOT, del indio IRS-1 y el satélite Miranda (VRSS-1).

## 2.7. Las Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales están compuestas por matrices, en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este píxel dependerán de la resolución espacial del sensor. (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

El sensor detecta la Radiancia media de una parcela del terreno equivalente al tamaño del píxel, unidad visual más pequeña que aparece en la imagen (Chuvienco, 1990). Este valor medio luego es llevado a un valor numérico, a partir del cual se realiza el tratamiento digital de la imagen que obtiene el sensor.

El valor numérico que acompaña a cada píxel es un número entero, que viene de la radiación electromagnética recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre iluminada y en determinada banda del espectro. El valor numérico se denomina Número Digital (ND), o como se conoce en inglés Digital Number (DN), este valor puede traducirse fácilmente en una tonalidad o intensidad visual.

La organización de los datos en una imagen digital viene dada por una matriz, como se puede ver en la Fig. 8. Se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. En la matriz, el origen de coordenadas se encuentra en la esquina superior-izquierda.

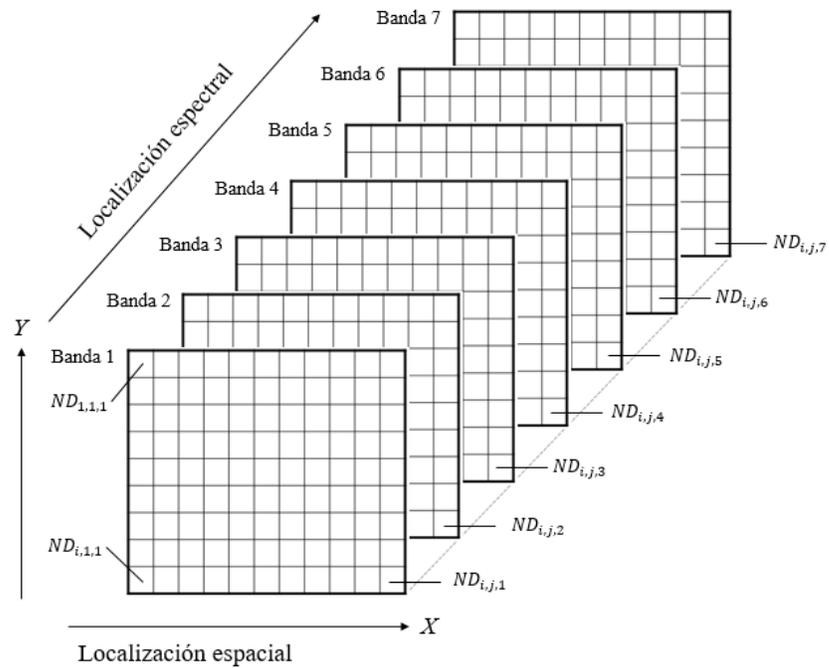


Fig. 8 Organización de una imagen digital

Fuente: *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Chuvieco, 1990)

La orientación aproximada norte-sur se expresa a través de las filas de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas o filas, mientras que las columnas indican la disposición Oeste-Este. La tercera dimensión corresponde a la resolución espectral del sensor (Chuvieco, 1990). La disposición de cada píxel en la imagen satelital está determinada por un eje de coordenadas XYZ, donde X corresponde al número de columna de la matriz; Y es el número de fila de la matriz y Z es el valor del ND almacenado.

## 2.8. Correcciones de la Imagen

Se entiende por correcciones de la imagen a “todos aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, o en los ND de los píxeles que la componen” (Chuvieco, 1990). Se realizan estas

correcciones para acercar a la escena a los datos que hubiese obtenido si las condiciones de adquisición fuesen idóneas, tanto en la posición de los píxeles como en la radiancia que significan.

Los centros de procesamiento de las estaciones receptoras de las imágenes usualmente realizan, en distintos niveles, correcciones radiométricas y geométricas a las escenas que se proporcionan a los usuarios. En algunas ocasiones estas correcciones bastan para abordar un estudio de aplicación. Sin embargo, en muchos casos se precisa realizar una corrección más detallada, como es el caso para estudios multitemporales.

### **2.8.1. Fuentes de error en una imagen satelital**

Todas las imágenes adquiridas por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial, tienen asociadas una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a varios factores, y cada combinación de sensor-plataforma es probable que tenga sus propios tipos de distorsiones geométricas en sus imágenes. En el caso específico de las imágenes espaciales, Chuvieco en su libro “Fundamentos de la Teledetección Espacial” agrupa las distorsiones más frecuentes en cuatro apartados:

- a. Distorsiones originadas por la plataforma: Aunque las plataformas espaciales tienen una mayor estabilidad a la que ofrece un avión, tienden a producirse pequeñas variaciones en la altitud de la órbita, en su velocidad o en la orientación de cualquiera de sus tres ejes: aleteo (pitch), cabeceo (roll) y giro lateral (yaw). En el primer caso se producen cambios en la escala de la imagen, y en el segundo distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición.
- b. Distorsiones provocadas por la rotación terrestre: Teniendo en cuenta la altitud orbital de las plataformas espaciales, el efecto de rotación de la Tierra aparece claramente en la imagen, ver en Fig. 9. Esto resulta en una distorsión geométrica de la imagen que puede ser fácilmente corregida por una georreferenciación en 2D.

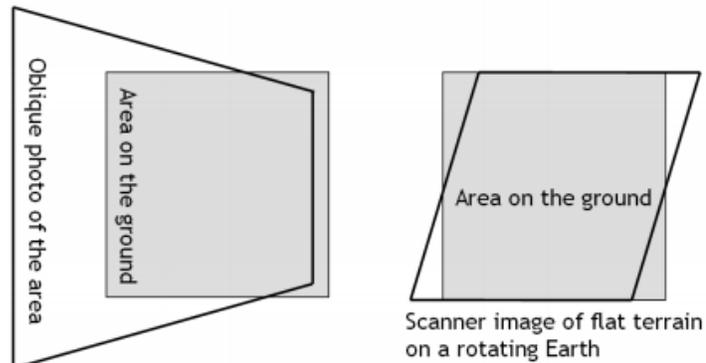


Fig. 9 Ejemplos de distorsión geométrica en la imagen

Fuente: *Principles of Remote Sensing (The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009)*

Las anomalías del sensor, pueden generar efectos de barrido no lineal o cambios en la tasa de adquisición de la información. En el caso de sensores que disponen de un amplio campo de visión se pueden generar distorsiones panorámicas, haciendo que los objetos que se encuentran lejos del centro de la imagen, o el nadir, se vean afectados en mayor medida.

- c. Distorsiones provocadas por el sensor: Los sensores de barrido electrónicos exploran la superficie de forma perpendicular a la trayectoria del satélite, y mediante el uso de los espejos oscilantes envían la energía detectada a una cadena de detectores de estado sólido. Una anomalía en el sensor provocaría un efecto de barrido no lineal o cambios en el intervalo de recogida de la información. Otro problema frecuente en el sensor es la falta de calibración entre los detectores, provocando un efecto de bandeo en la imagen final.
- d. Distorsiones provocadas por la atmósfera: Los distintos elementos que componen la atmósfera causan una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre. El efecto más importante es el de dispersión, causado por la presencia de aerosoles, gases y vapor de agua, que implica un aumento de la señal recibida por el sensor.

Otra distorsión, que afecta principalmente a las imágenes de sensores espaciales y aéreos de mayor escala, es el desplazamiento por relieve, el cual es un error no sistemático, como lo es el movimiento de la plataforma. Esta distorsión ocurre cuando los puntos del terreno están por encima o por debajo de la elevación de referencia, por lo que se ven desplazados en la imagen alejándose desde o hacia el nadir del punto. Esta distorsión no ocurre en los objetos que están en el nadir del sensor, donde los objetos que se encuentren en el centro de la imagen tendrán solo visible su tope, pero en cuanto más se alejan los objetos hacia los bordes o aumenta su altura estos parecen inclinarse lejos del centro y el tope de estos y sus lados son visibles.

### **2.8.2. Correcciones Radiométricas**

Con este término se designan todas aquellas técnicas que modifican los ND originales, con el objetivo de acercarlos a los que habrían en la imagen en caso de una recepción ideal. Dentro de esta categoría se encuentran las distorsiones provocadas por la atmósfera y los problemas de radiometría originados por el mal funcionamiento del sensor (Chuvienco, 1990).

#### **2.8.2.1. Restauración de líneas o píxeles perdidos**

La imagen presenta una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de píxeles aislados de similar aspecto. En ambos casos se trata de información irreparablemente perdida. Puesto que se trata de píxeles perdidos, la forma más lógica de estimar sus ND estriba en considerar los ND de los píxeles vecinos. Para la restauración de líneas/píxeles perdidos se pueden utilizar tres métodos de sustitución:

1. Estimar los ND de las líneas/píxeles perdidos a partir de los ND de las inmediatas, así sean líneas/píxeles precedentes o las posteriores.

2. Promediar los valores de las líneas/píxeles anterior y posterior a la defectuosa.
3. Utilizar una banda auxiliar, altamente correlacionada con la que presenta problemas. A partir de esa banda auxiliar se estima el valor de los píxeles defectuosos.

### **2.8.2.2. Corrección del bandeo de la imagen**

Se observa el bandeo de la imagen (en sensores de barrido secuencial), especialmente perceptible en zonas de baja radiancia (grandes embalses, mar), debido a la mala calibración entre los detectores del sensor, provocando que alguno de ellos codifique la radiancia que recibe en ND superiores o inferiores al resto (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011). Este bandeo (stripping) crea un patrón de creación de bandas en el que cada línea n-ésima contiene datos erróneos.

Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los detectores se realizan los siguientes pasos:

1. Se asume que todos los detectores, en caso de estar bien calibrados, tenderían a presentar similares histogramas. Conviene, por tanto, restaurar el histograma de cada detector, calculando independientemente la frecuencia de los grupos de líneas (cuyo número es igual al de los detectores).
2. Ajustar esos histogramas de cada detector a otro que se elija como referencia. Lo más habitual es que el histograma de referencia sea el del conjunto de la imagen. La forma más sencilla de realizar el ajuste se basa en aplicar unos coeficientes lineales (sesgo y ganancia) a desviaciones típicas con las que ofrece el histograma de referencia.

### 2.8.2.3. Corrección Atmosférica

La atmósfera con sus elementos constituyentes ocasiona un efecto de dispersión provocando el incremento de la radiancia detectada por el sensor. El principal problema que implica esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo. Por ello las correcciones generales que se realizan sobre la imagen solo son aproximaciones. Para una corrección rigurosa deben hacerse medidas en tierras simultáneas a la fecha de adquisición de la imagen.

Pese a estas dificultades, es preciso realizar, al menos, una estimación del efecto atmosférico. La corrección del efecto atmosférico es imprescindible cuando (i) hayan de efectuarse combinaciones lineales entre bandas, por ser la dispersión un fenómeno dependiente de la longitud de onda; (ii) hayan de transformarse los ND de la imagen en magnitudes físicas; (iii) cuando se realicen estudios multitemporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Existe gran cantidad de métodos para estimación de la distorsión atmosférica en una imagen, uno de los más sencillos es el ideado por P.S. Chávez (Método empírico), que se denomina *Corrección del histograma por sus valores mínimos*. Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción (agua, zonas en sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye a la dispersión atmosférica.

La dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente las longitudes de onda más cortas, confirmando que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmósfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie. En consecuencia, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero.

Otro método común y más avanzado conocido como Dark Object Subtraction (DOS) sugerido también por P.S. Chávez, pero basado en el anterior, tiene en cuenta que la dispersión tiende a estar correlacionada entre bandas. Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión. A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de las bandas teniendo en cuenta algunos parámetros.

### 2.8.3. Correcciones Geométricas

Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los píxeles de la imagen, sino solo su posición, sus coordenadas (Chuvieco, 1990). La expresión general para este tipo de funciones matemáticas sería:

$$f(x) = f_1(c, f) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f(y) = f_2(c, f) \quad \text{Ecuación 4}$$

Esto es, las coordenadas  $x$ ,  $y$  de la imagen corregida son función de las coordenadas  $c$ ,  $f$  (columna, fila) de la imagen de entrada. Esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí.

Sea una u otra la finalidad, las modificaciones geométricas de la imagen pueden plantearse con dos orientaciones. La primera, parte de las características orbitales del sensor, esto permite corregir los errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación terrestre o de la inclinación de la órbita, a partir de modelar teóricamente su influencia en la imagen final. Al tratarse de correcciones sistemáticas, pueden aplicarse con escasa información del terreno, por lo que son idóneas para zonas donde la cartografía es escasa o inadecuada (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

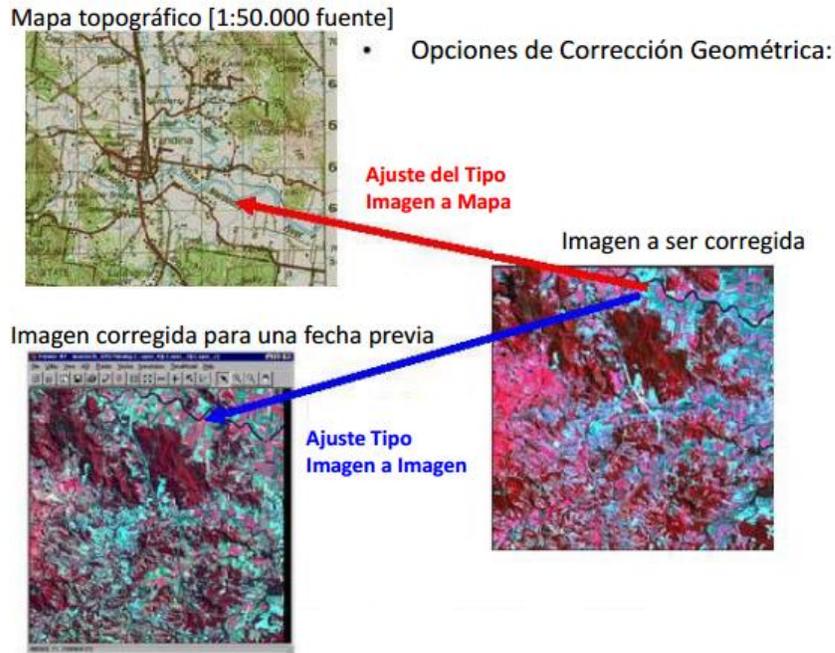


Fig. 10 Opciones de corrección geométrica

Fuente: Clase # 7: Aspectos geométricos de las imágenes satelitales - Fotointerpretación (Machado, Clase 7: Aspectos geométricos de las imágenes satelitales, 2016)

La segunda es más empírica, esta parte de una cartografía básica a la que se pretende ajustar la imagen, o de otra imagen que se considera como de referencia (ver Fig. 10). En ambos casos, la corrección se realiza en tres fases principales:

### 2.8.3.1. Establecimiento de los puntos de control

Si se quiere calcular cualquier función entre dos o más variables, es necesario contar previamente con una serie de observaciones comunes entre ellas. Las funciones que permiten transformar coordenadas de la imagen al mapa precisan localizar una serie de puntos de control entre la imagen y el mapa. Por cuanto las funciones se estiman a partir de esta muestra de coordenadas, la calidad del ajuste dependerá de la precisión con que se localicen estos puntos.

Para que el ajuste entre imagen y mapa sea correcto, Chuvieco afirma que se requiere atender tres aspectos en la selección de los puntos de control terrestre (GCP):

- i. **Número:** La cantidad idónea de puntos de control depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, si las deformaciones que presenta la imagen son importantes, se precisa también un mayor número de GCP. Matemáticamente solo son necesarios 3 puntos para una función de ajuste de 1<sup>er</sup> grado, 6 para una de 2<sup>do</sup> grado y 10 para una de 3<sup>er</sup> grado. Pero es importante señalar, que conviene superar con creces ese número mínimo para garantizar una buena conformidad entre imagen y mapa.
- ii. **Localización:** Se recomienda, en cuanto a la localización, que sean puntos fácilmente identificables en la imagen y en el mapa (o imagen maestra), preferiblemente rasgos humanos del paisaje, no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carretera, vías de ferrocarril, entre otros. No conviene señalar puntos en líneas de costa, cursos de agua o embalses, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico.
- iii. **Distribución:** Conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el territorio abarcado por la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio. La norma es especialmente importante cuando estén presentes contrastes topográficos, ya que en las imágenes de satélite también existe un efecto de desplazamiento por relieve que puede causar serios problemas en su ajuste topográfico. Para intentar atenuarlos, resulta recomendable introducir GCP sobre áreas de distinta altitud, e incluso sobre cotas, siempre que estos puntos resulten identificables en la imagen.

### **2.8.3.2. Cálculo de funciones de transformación**

Como se comentó anteriormente, la corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo una función matemática, que pone en relación las

coordenadas de la imagen con las del mapa. De este forma, a partir de las coordenadas columna y fila de cada píxel, pueden estimarse las coordenadas “x”, “y” de la imagen de salida (Chuvieco, 1990). Esta transformación puede expresarse como:

$$\hat{s} = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} c^j f^k \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $s$  indica la coordenada de la imagen corregida, que se estima a partir de las coordenadas de la imagen de entrada  $c$  y  $f$ . El superíndice  $m$  indica el grado del polinomio de ajuste.

El caso más simple sería el de la ecuación lineal, para las dos coordenadas del mapa se expresaría como:

$$\hat{X}_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 f_i \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 c_i + b_2 f_i \quad \text{Ecuación 7}$$

Esto se trata de una regresión lineal múltiple, donde  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$  y  $b_3$  son los coeficientes de regresión;  $c_i$  y  $f_i$ , las variables independientes, y  $X_i$  e  $Y_i$  indican las variables dependientes. De igual forma pueden estimarse las coordenadas de columna (c) y fila (f) de la imagen corregida a partir de coordenadas UTM del mapa de referencia.

Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que en una función lineal basta aplicar unas transformaciones elementales de la imagen, como se muestra en la Fig. 11. Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no presenten contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudir a funciones de segundo o tercer grado, en donde se aborden alteraciones geométricas no lineales (Chuvieco, 1990).

Los coeficientes de las funciones de transformación ( $a_0, a_1, a_2, \dots$ ) se calculan a partir de las coordenadas de los puntos de control seleccionados previamente.

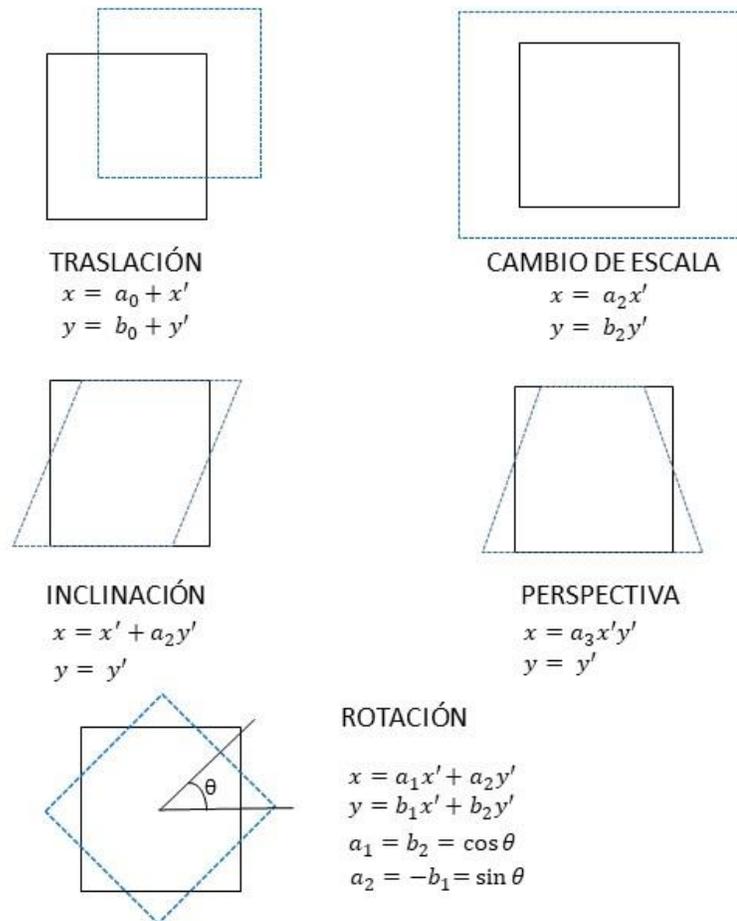


Fig. 11 Ejemplos de transformación geométrica de la imagen

Fuente: Fundamentos de Teledetección Espacial (Chuvieco, 1990)

El método más habitual es aplicar un ajuste por cuadrados mínimos. La bondad del ajuste se mide por los residuales (diferencia entre el valor estimado y el real) de cada punto empleado en el proceso. Cuanto menor sea este valor, el ajuste entre las

variables independientes y dependientes será mayor. La calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por regresión con las reales.

El indicador más utilizado es el error medio cuadrático (RMS). En el caso que se utilice la transformación de primer grado, el RMS para un punto de control  $i$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RMS_i = \sqrt{(\hat{c}_i - c_i)^2 + (\hat{f}_i - f_i)^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Un alto RMS indica que ese punto no se ajusta a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, puede optarse por eliminar aquellos puntos con alto RMS, ya que se asume que no se seleccionaron correctamente. Al eliminar algún punto de control, se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un RMS por debajo de cierto umbral, previamente fijado. El error medio debe estar, en ese momento, dentro de unos márgenes tolerables, de acuerdo a la escala y a la precisión con que se pretenda obtener los resultados.

### **2.8.3.3. Transferencia de los ND originales a la posición corregida**

Conociendo que las funciones anteriores permiten llevar de las coordenadas del mapa a la imagen, si se pretende crear una imagen que corresponda adecuadamente con estas coordenadas, se deben trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición.

Es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de estos píxeles originales a los píxeles resultantes en la transformación, ya que con estas funciones se crea una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011). El llenado de esta matriz es el objetivo de la última fase de la corrección geométrica.

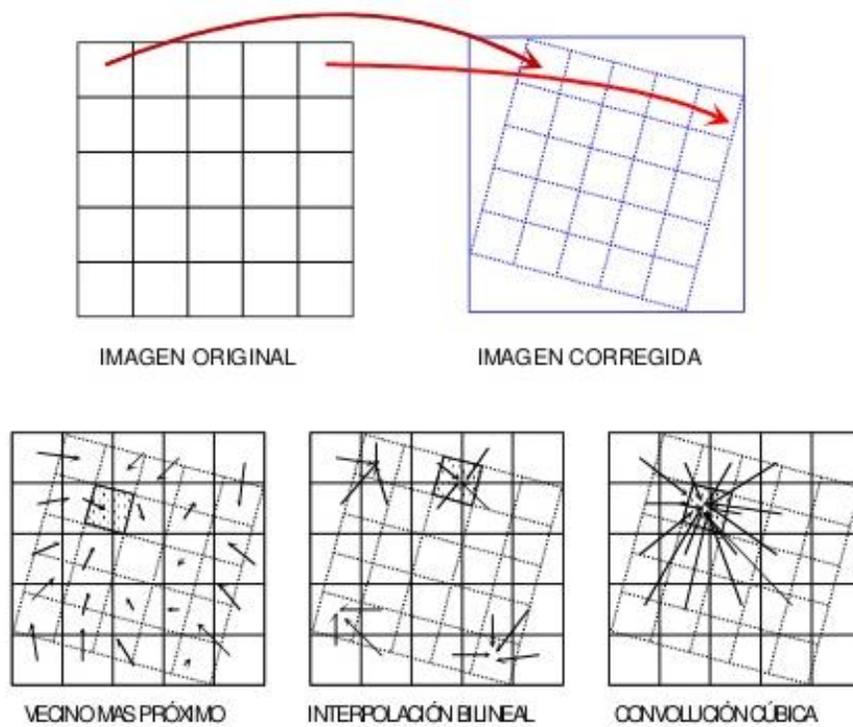


Fig. 12 Efecto del algoritmo de transferencia en la corrección geométrica de la imagen

Fuente: *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Chuvieco, 1990)

El traspaso de los valores del sistema original al transformado es conocido como *remuestreo*, y puede abordarse por tres (3) métodos diferentes, dependiendo de la complejidad de la transformación y del tipo de datos (ver Fig. 12):

- i. Vecino más cercano: Denominado nearest neighbor en inglés, tiene su nombre por situar en cada celda de la imagen corregido el ND del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales. Su principal inconveniente es que

introduce una distorsión en los rasgos lineales de la imagen (fracturas, carreteras o camino), que pueden aparecer en la corregida como líneas quebradas.

- ii. Interpolación bilineal: (bilinear interpolation), consiste en promediar el ND de los cuatro píxeles más cercanos en la original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido: donde tienen mayor influencia los píxeles más cercanos a la imagen inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un poco los contrastes espaciales de la imagen original.
- iii. Convolución cúbica: (cubic convolution) considera los ND de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado que los dos métodos anteriores.

Cuál método se elige para la corrección depende de la finalidad del proceso al que va a ser sometida la imagen. Si pretende corregirse una imagen clasificada, el método del vecino más cercano es la elección obligada, pues es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios (que, por otra parte, no tendrían sentido en una clasificación temática).

## **2.9. El programa Landsat**

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la NASA diseñó a fines de la década del 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres (Chuvieco, 1990). Esta serie de satélites enfocados en la captura de imágenes de la Tierra se denominó el programa Landsat.

Los satélites Landsat han estado adquiriendo y proporcionando imágenes multiespectrales de la Tierra, de manera continua, desde el 23 de julio de 1972, día del lanzamiento del primer satélite del programa ERTS (Earth Resource Technology

Satellite). A partir del segundo satélite se cambia el nombre de la familia a Landsat, en 1975. Diversos autores afirman que esta serie constituye el proyecto de teledetección espacial más fructífero desarrollado hasta el momento.

La cobertura global, la buena resolución de sus sensores, la periodicidad de las observaciones que realizan y su buena comercialización, explican su abundante empleo por expertos de muy variados campos en el mundo; donde su amplio uso en variadas disciplinas ayuda a mejorar el conocimiento de la superficie terrestre y el impacto de los humanos sobre el ambiente y los recursos naturales de este.

Algunos de los campos de aplicación que se le ha dado a las imágenes Landsat incluyen el manejo de tierra y agua, investigación sobre los cambios globales, exploración minera y petrolera, evaluación de cultivos y deforestación, actualización cartográfica y detección de cambio de la superficie terrestre.

En la actualidad se cuenta con el funcionamiento de las dos misiones más modernas del programa, Landsat 7 y Landsat 8. El programa cuenta con 7 satélites funcionales a lo largo de sus más de 45 años de trayectoria, Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 7 y Landsat 8, el cual fue puesto en órbita en el año 2013, ver Fig. 13.



Fig. 13 Cronología del Programa Landsat

Fuente: Landsat Science: A Landsat Timeline (NASA, 2019)

El sexto satélite del programa, Landsat 6, fue lanzado el 5 de octubre de 1993, pero se perdió en el lanzamiento, ya que no fue posible ponerlo en la órbita correcta, este contaba con un sensor ETM abordo.

El satélite Landsat 8 fue lanzado exitosamente el 11 de febrero del 2013. El siguiente paso para este programa fue anunciado el 16 de abril del 2015, donde se comunicó la creación de un siguiente satélite, Landsat 9, programado para estar fabricado en 2020/2021.

### **2.9.1. Características Orbitales**

Los primeros tres satélites Landsat tenían una forma similar entre sí, en forma de mariposa por la disposición de los paneles solares. Sus dimensiones eran de 3 m de altura por 1,5 m de diámetro. Su órbita era heliosíncrona, polar, ligeramente inclinada ( $99,1^\circ$ ), con una altura orbital media de 917 km, dando 14 órbitas diarias y una resolución temporal de 18 días.

Los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8 cambiaron su diseño y sus características orbitales. La altura de vuelo se redujo a 705 km, y se mejora el ciclo de cubrimiento pasando a 16 días en promedio. Estos últimos también fueron diseñados con órbitas heliosincronizadas.

### **2.9.2. Instrumentos de Observación**

El primer satélite del programa, Landsat 1 o ERTS-1, contaba con dos instrumentos para capturar las escenas de la superficie, el sistema Vidicon (RBV, Return Beam Vidicon) y un escáner multiespectral de 80 metros de resolución con 4 bandas (MSS). Landsat 2 y Landsat 3 estaban configurados de manera similar, el segundo satélite también contaba con una resolución espacial de 80 m, pero para el

tercer satélite se mejoró el sistema Vidicon, alcanzándose 40 metros de resolución aproximadamente, ver Fig. 14.

Satellite	Sensor	Swath	Bits	VNIR				SWIR	
L8	OLI	185km	12	30m	30m	30m	30m	30m	30m
	TIRS			30m	15m				
Landsat 7	ETM+	185km	8	30m	30m	30m	30m	30m	30m
Landsat 4 & 5	MSS	185km	8		82m	82m	82m		
	TM	185km	8	30m	30m	30m	30m	30m	30m
Landsat 1-2	RBV	183km			80m	80m	80m		
Landsat 3	RBV	183km				40m			
Landsat 1-3	MSS	183km	8		79m	79m	79m		

Fig. 14 Continuidad en los datos multiespectrales del programa Landsat

Fuente: LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook (USGS, 2019)

En 1984 se realizó el lanzamiento de Landsat 4, el cual fue equipado con dos sensores, el mismo MSS y un instrumento nuevo llamado Thematic Mapper (TM). Al igual que su predecesor el sensor TM es de barrido multiespectral, que emplea una técnica similar a la usada por MSS. El TM, con respecto al MSS, aumenta el número de detectores de 24 a 100, se aumentan los niveles de codificación y se realiza el barrido en las dos direcciones. Todo ello permitió mejorar la resolución espacial, de 79 m a 30 m, de 4 a 7 bandas y de 6 a 8 bits, ver Tabla 1. El satélite Landsat 5 fue prácticamente un duplicado de Landsat 4, y estuvo operativo por 28 años.

Tabla 1 Bandas espectrales del sensor TM de Landsat 4 y 5

Bandas de Landsat 4 y 5	Intervalo de Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución Espacial (m)
Banda 1: Azul	0,45 – 0,52	30
Banda 2: Verde	0,52 – 0,60	30
Banda 3: Rojo	0,63 – 0,69	30
Banda 4: NIR	0,76 – 0,90	30
Banda 5: NIR	1,55 – 1,75	30
Banda 6: Térmico (TIR)	10,40 – 12,50	120
Banda 7: Infrarrojo Medio (Mid IR)	2,08 – 2,35	30

Fuente: Elaboración propia, modificado de Landsat Misiones: Landsat 5 (NASA, 2019)

Landsat 7 fue lanzado en 1999 y contó con un nuevo instrumento abordo, el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) siendo un sistema Whiskbroom, este funcionó a todo su potencial hasta mayo del 2003, cuando falló el sensor Scan Line Corrector (SLC). Desde ese momento el satélite ha continuado generando escenas útiles de la cobertura terrestre trabajando en modo SLC-off, donde se presenta un bandeo falto de data en las imágenes.

Tabla 2 Bandas espectrales de OLI y TIRS comparadas con las de ETM+

Landsat-7 ETM+ Bandas ( $\mu\text{m}$ )			Landsat-8 OLI y TIRS Bandas ( $\mu\text{m}$ )		
			30 m Costas/Aerosol	0,435-0,451	Banda 1
Banda 1	30 m Azul	0,441 -0,514	30 m Azul	0,452-0,512	Banda 2
Banda 2	30 m Verde	0,519 -0,601	30 m Verde	0,533-0,590	Banda 3
Banda 3	30 m Rojo	0,631-0,692	30 m Rojo	0,636-0,673	Banda 4
Banda 4	30 m NIR	0,772-0,898	30 m NIR	0,851-0,879	Banda 5
Banda 5	30 m SWIR-1	1,547-1,749	30 m SWIR-1	1,566-1,651	Banda 6
Banda 6	60 m TIR	10,31-12,36	100 m TIR-1	10,60-11,19	Banda 10
			100 m TIR-2	11,50-12,51	Banda 11
Banda 7	30 m SWIR-2	2,064-2,345	30 m SWIR-2	2,107-2,294	Banda 7
Banda 8	15 m Pan	0,515-0,896	15 m Pan	0,503-0,676	Banda 8
			30 m Cirrus	1,363-1,384	Banda 9

Fuente: LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook (USGS, 2019)

El satélite Landsat 8 cuenta con dos tipos de sensores nuevos, OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), ambos capturan simultáneamente las imágenes, pero tienen la capacidad de trabajar por separado si alguno de los dos llegara a presentar una falla. A diferencia de Landsat 7, los sensores de Landsat 8 trabajan con un sistema Pushbroom o por empuje. El instrumento OLI trabaja con 9 bandas espectrales, de las cuales 8 tienen una resolución espacial de 30 m, excepto la banda pancromática, con 15 metros (Tabla 2).

### 2.9.3. Niveles de pre-procesamiento de las escenas Landsat

Los productos generados por el programa Landsat tienen diferentes niveles de pre-procesamiento, estos productos están predefinidos en formato Geographical Tagged Image File Format (GeoTIFF) (CIAF, 2013). A continuación se describen los tipos de productos proporcionados por el USGS:

- Productos de Nivel 0 (L0): Los productos de tipo L0 son imágenes digitales con todas las transmisiones de datos y objetos sin formato. Estos productos están ordenados de manera proporcional, espacial y secuencialmente por bandas multispectrales.

Cuando se habla de productos Nivel 1 o Level 1 se refiere generalmente a productos que están geocodificados, con la aplicación de correcciones radiométricas y geométricas haciendo uso de los parámetros de procesamiento estandarizados del ente encargado, como los algoritmos de remuestreo, orientación de la imagen y proyección cartográfica (LANDSAT SPPA, 2015).

Estos productos entregan la imagen en ND, los cuales pueden ser fácilmente llevados a radiancia espectral o reflectancia TOA (Top of Atmosphere). Un producto Landsat Level 1 completo consiste en 13 archivos (para Landsat 8, por ejemplo), donde 11 son las bandas de la imagen, el archivo de metadata y un archivo QA (Quality Assessment).

- Productos de Nivel 1 Geometrically Corrected (L1G): Corregido radiométricamente y remuestreado para corrección geométrica; el producto se entrega con proyección cartográfica, la cual usualmente tiene como referencia WGS84.
- Productos de Nivel 1 Systematic Terrain (L1GT): Los productos L1GT incluyen corrección radiométrica y geométrica, y usa un MDE para corregir el error por paralaje, ocasionado por la topografía de la escena; la precisión de la corrección en el terreno depende de la resolución del MDE utilizado.
- Productos de Nivel 1 Terrain Precision (L1Tp): Incluye corrección radiométrica, geométrica y corrección en la precisión de la escena. Se usa un MDE para corregir el error por paralaje; la precisión del producto depende de la disponibilidad de Ground Control Points (GCP) en el área, como también de la resolución del mejor MDE disponible para la corrección. (USGS, 2017)

### 2.9.4. Descarga de imágenes

Las imágenes del programa Landsat estuvieron por algunos años en manos de los que podían pagarlas, bien sea para sus actividades comerciales o científicas; pero esto cambió desde el año 2008, cuando el United States Geological Survey (USGS) hizo los datos e imágenes del programa Landsat de libre acceso y descarga vía internet. Esto llevó a un gran aumento en la descarga de escenas de Landsat e impulsó a una rápida expansión en las investigaciones científicas y posibles aplicaciones del programa, siendo usadas en los sectores gubernamentales, privados y civiles. (Zhe Zhu, y otros, 2019). Ver Fig. 15.

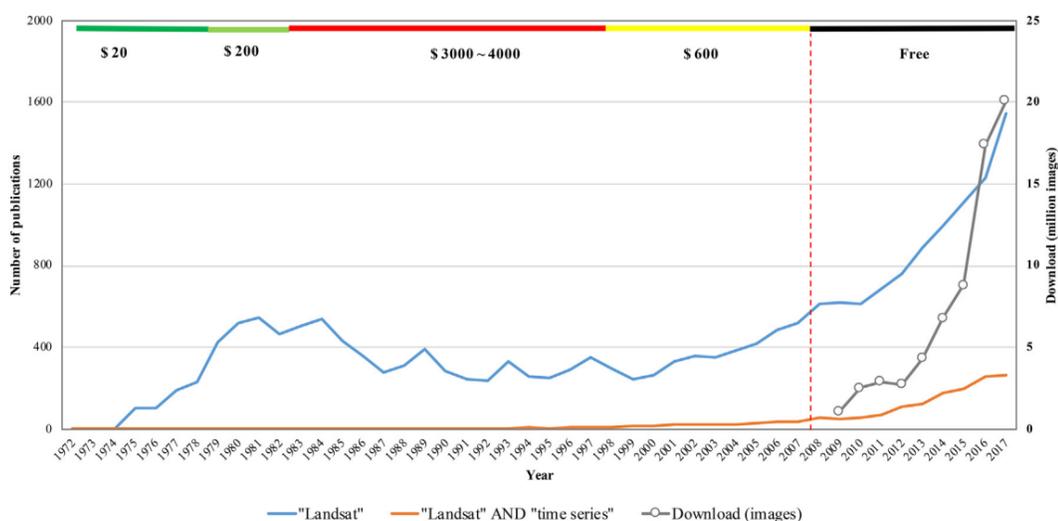


Fig. 15 Número de descarga de imágenes Landsat, costo de las imágenes, y el número de publicaciones anuales

Fuente: Benefits of the free and open Landsat data policy (Zhe Zhu, y otros, 2019)

Existen diversidad de portales web cuya función es la de proporcionar un catálogo de las imágenes del programa Landsat, y de otras misiones como Sentinel, ASTER, MDE globales, entre otros, donde el único prerrequisito para la descarga gratis de dichas imágenes es la de registrarse en el servicio de EROS Registration System

(ERS) del USGS. Algunos de los principales portales web oficiales para la descarga de las imágenes Landsat se listan a continuación:

- Earth Explorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- GloVis: <https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1>
- LandSatLook: <https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>
- LandViewer: <https://eos.com/landviewer/?lat=10.48059&lng=-66.90361&z=11#%2F>

Para realizar la descarga de la zona de interés para el usuario, indiferentemente de cual sea el portal web o aplicación que se use para este proceso, es necesario definir algunas características para la búsqueda: seleccionar o posicionar en el mapa de referencia la zona de interés para el usuario, definir de qué programa, satélite o sensor se desea obtener la data (escoger los data sets) y delimitar el período de captura de las imágenes que se buscan.

## **2.10. El programa SPOT**

El programa SPOT (del francés Satellites Pour l'Observation de la Terre) fue concebido por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) francés, en colaboración con Bélgica y Suecia, los satélites fueron fabricados por AIRBUS, antiguamente EADS Astrium. La misión empezó con el satélite SPOT 1, lanzado en 1986 y estando en operación por 17 años consecutivos. El programa contó con 5 satélites, SPOT 1, 2, 3, 4 y 5 que ya no se encuentran en operación, el último en órbita hasta el 2015 (ver Fig. 16) y los satélites SPOT 6 y 7, que fueron lanzados en 2012 y 2014 respectivamente, ambos con una vida útil de 10 años.

Las imágenes obtenidas por los sensores abordo tienen un cubrimiento de 60 x 60 km, y cuentan con altas resoluciones espaciales, 10 m de SPOT 1 a SPOT 4 y desde SPOT 5 de 2,5 m (CNES, 2016). Todos los satélites contaron con una órbita

heliosincrónica y un pase en el Ecuador de forma descendente a las 10:30 (hora local) (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011), ver Tabla 3.

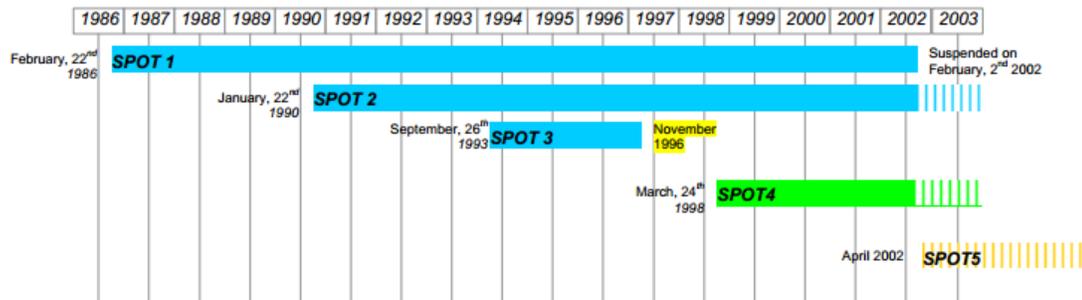


Fig. 16 Cronología de las tres primeras generaciones del programa SPOT

Fuente: SPOT 123-4-5 Geometry Handbook (Riazanoff, 2004)

Una de las ventajas con que cuentan los satélites SPOT es la posibilidad de observación no vertical de sus sensores. Estos se denominan sensores enfocables, que permiten adquirir datos de zonas fuera de su órbita, mediante el movimiento de hasta 27° fuera del nadir de un dispositivo instalado en el equipo óptico.

Tabla 3 Características orbitales de SPOT

<b>Tipo de órbita</b>	Heliosincrónica
<b>Altitud</b>	832 km
<b>Inclinación</b>	98,7°
<b>Período</b>	101,4 minutos
<b>Ciclo</b>	26 días
<b>Tiempo local</b>	10:30

Fuente: SPOT 123-4-5 Geometry Handbook (Riazanoff, 2004)

### 2.10.1.SPOT 4

El satélite SPOT 4 fue lanzado el 24 de marzo de 1998 desde Kourou, Guayana Francesa, y estuvo operativo durante 13 años, hasta su retiro el 29 de enero del año 2013, y es considerado la segunda generación de la serie SPOT. Se caracteriza por el sistema pushbroom (empuje) de barrido, con sensores abordo denominados HRVIR1

y HRVIR2 (High Resolution Visible Infrared) y VEGETATION 1. Diseñado con una vida útil de 5 años, la cual superó, al igual que SPOT 1, 2 y 5.

SPOT 4 fue el primero del programa en contar con un instrumento llamado VEGETATION, que obtuviera data en la banda SWIR (ver Tabla 4), el cual también fue incluido en SPOT 5. Este instrumento fue diseñado para el monitoreo de árboles, plantas y cultivos, para obtener un mayor entendimiento de sus ciclos de crecimiento y variaciones estacionarias y causadas por el clima.

Tabla 4 Instrumentos, bandas y más del programa SPOT

<i>satellite</i>	<i>instrument</i>	<i>band name</i>	<i>wavelength range</i>	<i>sampling distance<sup>(1)</sup></i>	<i>CCD per line</i>
SPOT123	HRV1 or HRV2	XS1	0.50-0.59 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		XS2	0.61-0.68 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		XS3	0.78-0.89 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		PAN	0.50-0.73 $\mu\text{m}$	10 m	6000
SPOT4	HRVIR1 or HRVIR2	XS1	0.50-0.59 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		XS2	0.61-0.68 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		XS3	0.78-0.89 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		SWIR	1.58-1.75 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		M	0.61-0.68 $\mu\text{m}$	10 m	6000
SPOT5	HRG1 or HRG2	XS1	0.495-0.605 $\mu\text{m}$	10 m	6000
		XS2	0.617-0.687 $\mu\text{m}$	10 m	6000
		XS3	0.780-0.893 $\mu\text{m}$	10 m	6000
		SWIR	1.545-1.750 $\mu\text{m}$	20 m	3000
		HMA	0.475-0.710 $\mu\text{m}$	5 m	12000
		HMB	0.475-0.710 $\mu\text{m}$	5 m	12000
	HRS	HRS1 ( <i>fore view</i> )	0.49-0.69 $\mu\text{m}$	10 m x 5 m	12000
	HRS2 ( <i>aft view</i> )	0.49-0.69 $\mu\text{m}$	10 m x 5 m	12000	

(1) Ground sampling distance at vertical viewing.

Fuente: SPOT 123-4-5 Geometry Handbook (Riazanoff, 2004)

### 2.10.2. Niveles de pre-procesamiento de las imágenes SPOT

En esta sección se explican brevemente las principales categorías de niveles de procesamiento disponibles para los productos SPOT:

- Nivel 1A – Producto crudo: para las escenas SPOT 1A, solo se realizó una corrección radiométrica, para corregir los errores originados en las diferencias de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de captura de imagen CCD. La banda SWIR en este producto está registrada como XS.
- Nivel 1B – System corrected product: Este nivel consiste en remover las distorsiones geométricas internas de la imagen, como también las correcciones radiométricas mencionadas en el nivel 1A. Escenas 1B cuentan con correcciones en las distorsiones causadas por la rotación de la Tierra, curvatura terrestre y efecto panorámico. Este producto no está geocodificado.
- Nivel 2A – Producto proyectado sin GCP: Los productos nivel 2 son productos cartográficos, es decir, tienen asignada una proyección y sistema geodésico (elipsoide/datum). Para SPOT 4 las imágenes 2A son generadas usando únicamente la data auxiliar adquirida por el sensor, y no utilizan GCP, sin embargo el producto está geocodificado.

Los demás niveles 2B y 3, ofrecen procesamiento geométricos avanzados, en donde se entrega como producto al usuario imágenes rectificadas, geocodificadas y ortocorregidas con puntos de control terrestre.

### **2.11. Modelos del Terreno**

Araque y Vásquez, citando a Joly (1998) definen *modelo* como “una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades”. Los modelos pretenden representar algunas de las propiedades del objeto real con el fin de estudiar de forma simple y comprensible una porción de este. En los modelos digitales la información está codificada en cifras, lo que permite que se le realice un tratamiento informático.

### 2.11.1. Modelos Digitales de Terreno (MDT)

Se define el modelo digital de terreno como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). El MDT es una representación de una variable, modelando fenómenos geográficos y morfológicos, y la construcción de la estructura de datos debe realizarse de acuerdo a una estructura interna, que almacene y vincule las unidades de información entre sí.

Los MDT pueden representar muchas propiedades del terreno, por lo que es importante diferenciar claramente que variable se está representando en el modelo. Es común entonces, denominar de forma genérica a todos los modelos como MDT.

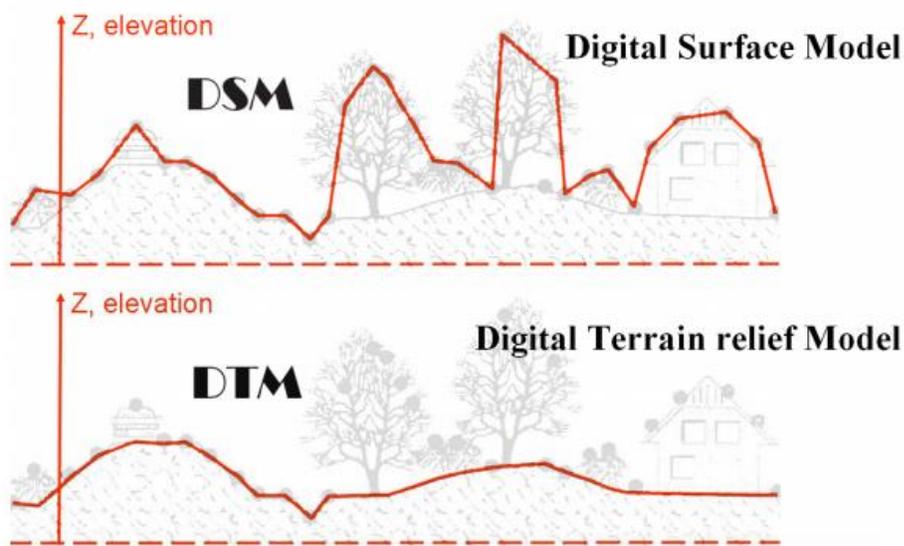


Fig. 17 Diferencia entre un Modelo de Superficies y un Modelo de Terreno (topográfico)

Fuente: *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook* (The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009)

Los modelos digitales de superficie (DSM) son una variante de los MDT, donde se tiene una representación de la superficie de un área donde no todos los puntos que la componen son, necesariamente, del suelo. Existen en la actualidad sensores remotos cuyo principal objetivo es obtener data para la construcción de modelos digitales de terreno (SRTM, SPOT-5 HRS, etc.). Estos sensores obtienen data tanto de la superficie

del suelo, donde sea posible ver terreno abierto, como también puntos en los objetos que se encuentran en la superficie de este; para la construcción del producto final se hace un filtrado del DSM para obtener la data buscada. Ver Fig. 17.

### **2.11.2. Modelos Digitales de Elevación (MDE)**

Cuando se trabaja con un MDT donde los valores de la coordenada Z se refieren a las elevaciones respecto a una superficie de referencia, se utiliza el nombre de Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés). MDE se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). Un MDE puede describirse de forma genérica del modo siguiente:

$$Z = f(x, y) \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde Z es la altitud del punto situado en las coordenadas x e y la función f relaciona la variable con su localización geográfica. Esta ecuación representa una superficie o campo escalar de una variable continua. Dado que esta superficie está formada por un número infinito de puntos no es posible su modelización sin alguna pérdida de información.

La unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud Z, al que acompañan los valores correspondientes x, y, expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial. Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de datos:

- i. Modelo de datos Vectorial: está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus vértices y nodos, se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos.

- ii. Modelo de datos Ráster: está basado en localizaciones espaciales, a cada una se le asigna el valor de la variable altitud. Los datos se representan en unidades llamadas celdas o en términos usados en proceso de imágenes píxeles.

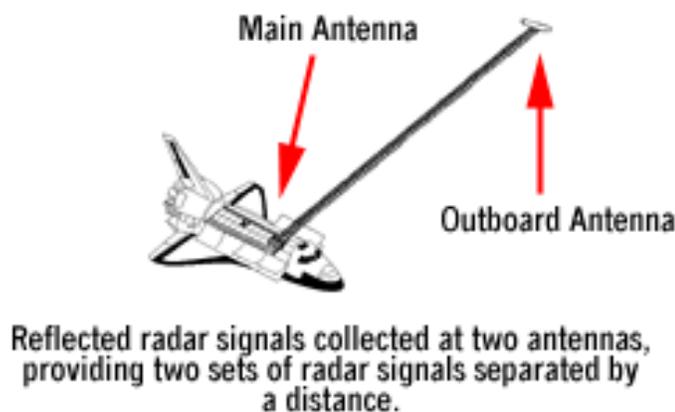
### **2.11.3. Shuttle Radar Topography Mission**

El Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es un proyecto en conjunto entre la NASA y NIMA para realizar el análisis de la superficie de la Tierra en tres dimensiones, a un nivel de detalle sin precedente para misiones con cubrimiento de grandes áreas del planeta (USGS - EROS Data Center, 2003).

El SRTM fue lanzado el 11 de febrero del 2000 y capturó data durante 11 días hasta el día 22 del mismo mes. Durante este período se obtuvo satisfactoriamente data del 80% de la superficie de la Tierra, para la mayoría del área entre las latitudes 60° N y 56° S. La nave orbitó la Tierra alrededor de 16 veces al día, terminó con 176 órbitas a la Tierra y almacenó más de 47,6 millones de millas cuadradas, lo que corresponde aproximadamente a 120.953.000  $km^2$ , de superficie terrestre.

La data del SRTM fue obtenida específicamente con la técnica conocida como Interferometría radar, que es el estudio de los patrones de interferencia causados por las señales del radar recibidas en dos antenas, esta técnica permite generar las imágenes tridimensionales de la superficie del planeta (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011).

El USGS EROS Data Center en Dakota del Sur es el encargado de manejar y distribuir los datos, donde proveen los archivos del SRTM al público en general y a la comunidad científica. Los datos disponibles para la comunidad de usuarios del mundo incluyen archivos con resoluciones de 1'' de arco (aproximadamente 30 m) y de 3'' de arco (aproximadamente 90 m) (USGS - EROS Data Center, 2003). En cuanto a la precisión vertical ronda entre los 6 y 16 metros.



*Fig. 18 Esquema general del SRTM*

*Fuente: Shuttle Radar Topography Mission (USGS - EROS Data Center, 2003)*

La clave del SRTM es que a través de la interferometría se comparan dos imágenes del radar tomadas en localizaciones levemente distintas para obtener información del relieve, y según las diferencias de ambas imágenes permitir el cálculo de la elevación y visualización de los cambios de la superficie. El sistema estaba compuesto de tres secciones, la antena principal, el mástil y la antena de radar externa, ver Fig. 18

## **2.12. Ortorrectificación**

Según Araque & Vásques, la rectificación es la proyección de datos en un plano de acuerdo a una proyección cartográfica, o dicho de otra manera, es transformar los datos de un sistema de cuadrícula en otro sistema de cuadrícula usando una transformación geométrica y realiza una corrección bidimensional; la ortorrectificación es una forma de rectificación, donde se remueven las distorsiones geométricas presentes en la imagen, mencionadas anteriormente, las que son producidas por la cámara o sensor, el desplazamiento debido al relieve y los errores sistemáticos asociados a la imagen.

Los parámetros geométricos requeridos en relación a la orientación del sensor en el momento de la adquisición de la imagen están determinados por medio de la información del modelo del sensor que se esté utilizando, los puntos de control en tierra (GCP) y la plataforma orbital o datos de vuelo (posición, velocidad y orientación). Para corregir los desplazamientos del terreno en la imagen, se necesita conocer la altura de cada punto en las imágenes, esto se logra por medio del uso de un MDE. Fig. 19.



*Fig. 19 Proceso general de Ortorrectificación*

*Fuente: Aplicación de la Metodología para la Actualización Cartográfica mediante la Ortorrectificación en bloques a partir de imágenes satelitales (Araque Ruiz & Vásquez Terán, 2011)*

La ortorrectificación, entonces, aplica la modelación geométrica y un MDE a la imagen cruda, luego la transforma a una proyección ortogonal en donde cada punto de la imagen aparece como si el observador estuviera mirando directamente hacia abajo. La imagen ortorrectificada se conoce como ortoimagen. Luego de realizar este proceso se obtiene una imagen con escala constante, sin importar la elevación de la ortoimagen y se puede medir correctamente las distancias y las direcciones.

## 2.13. Realces y mejoras de la Imagen

En cuanto se cuenta con la ortoimagen, o una imagen libre de errores geométricos y sistemáticos, se pasa al tratamiento de realce y mejoras de la imagen, donde se aplican distintas técnicas que están dirigidas hacia la mejora de la calidad visual de la imagen; es decir, se busca disponer mejor los datos para posterior análisis visual, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés de la imagen.

### 2.13.1. Ajuste de contraste

Cuando se refiere al término Ajuste de Contraste, usualmente se refiere a los procesos para adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización.

Los sensores utilizados en teledetección están calibrados para recibir valores muy altos de radiación sin llegar a saturarse, lo normal es que todos los valores recibidos estén muy por debajo de los máximos posibles. La consecuencia es que los valores de ND obtenidos son muy bajos y las imágenes se van a ver oscuras, muy poco contrastadas cuando se visualizan en un monitor (Alonso, 2006). Una forma de solventar este problema es ajustar el contraste de la imagen. Algunas de las técnicas más comunes para el ajuste de contraste son las siguientes:

- Expansión lineal: Es la forma más elemental de ajustar el contraste de la imagen al permitido por el equipo de visualización. Se puede lograr con este método una imagen más nítida, mejor contrastada, donde su histograma ofrece una distribución más equilibrada.

$$NV = \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \times 255 \quad \text{Ecuación 10}$$

Siendo NV el número de niveles de visualización y ND el número digital de cada píxel de la imagen.

- **Ecualización del histograma:** La expansión lineal del contraste no toma en cuenta las características del histograma de la imagen, sino sólo sus extremos. La ecualización del histograma es una técnica de realce más depurada, donde se considera la forma de la distribución de frecuencias en los ND originales. Según este criterio, el NV de cada ND está en proporción no solo a su valor, sino también a su frecuencia, de manera que aquellos valores de ND más frecuentes resultarán más ajustados que los menos frecuentes.
- **Expansión especial del contraste:** También conocida como expansión lineal restringida; radica en restringir el contraste a un rango específico de ND, en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés. La expansión espacial puede realizarse señalando un umbral máximo y mínimo, acorde con el rango digital de la cubierta que pretende realizarse, o limitando el histograma objeto a una ventana de la imagen donde esté presente dicha cubierta.

### **2.13.2. Composiciones de color**

Autores como Chuvieco (1990), Jiménez y García (1982) afirman que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos de color que intensidades de brillo. Entonces, el empleo del color puede facilitar notablemente el análisis, tanto visual, como la preparación de otros tratamientos digitales.

Una composición coloreada requiere el uso de tres bandas espectrales, aplicadas a cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul). Cuando se visualiza una imagen en blanco y negro, las tres columnas que representan los colores presentan el mismo valor, puesto que cada tono de gris supone una mezcla en partes iguales de los tres colores primarios.

Usando la información multispectral que generan los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios, a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio

y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite visualizar, simultáneamente, imágenes de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas.

Las bandas que se elijan para la composición de color y el orden de estas dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la aplicación última del proyecto. De las composiciones más habituales, luego de verdadero color, se tiene el falso color o falso color infrarrojo, donde se le aplican a los cañones rojo, verde y azul las bandas correspondientes al infrarrojo, rojo y verde, respectivamente.

#### **2.14. Análisis visual de imágenes**

Muchos autores señalan que el aspecto más importante de la teledetección es el aprovechamiento temático de las imágenes, por lo que se crea polémica en el método de análisis más idóneo para abordar un estudio de teledetección espacial. En este concepto, cabe definir los dos métodos para explorar el flujo de datos que la teledetección ofrece: el método visual y el digital.

Para convertir las imágenes en información, se requiere un conocimiento especializado que se inscribe en el campo de la interpretación de imágenes, que permite derivar información útil a partir de las imágenes primarias obtenidas de los sistemas de teledetección (Machado, Clase 8: Claves de Interpretación Visual de Imágenes, 2016).

Una de las principales ventajas del análisis visual es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos. Mientras el tratamiento digital se basa principalmente en la intensidad radiométrica de cada píxel, el análisis visual puede utilizar otros elementos, como son la textura, estructura o disposición (Chuvieco, 1990). Estos criterios permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral uniforme, aunque con un significado temático bien distinto.

Para cualquier intérprete, las características más importantes que pueden ser estudiadas en imágenes de percepción remota desde el punto de vista visual, con la finalidad de extraer información de utilidad, se generan mediante las llamadas claves o criterios de interpretación visual:

- Tono: se refiere a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. El tono se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda en particular con la que se trabaje.
- Color: Dado que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa, el color resulta un elemento básico en la interpretación visual de imágenes (Chuvienco, 1990). El color que aprecia el ojo humano es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de ondas.
- Textura: Esta cualidad se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen; en definitiva, el contraste espacial entre los elementos que la componen. La textura de un sensor viene de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor.
- Forma: Se refiere a la conformación o expresión topográfica de un elemento, tal como se observa en la fotografía bidimensional. El intérprete puede ir acostumbrándose a identificar por sus formas, ciertos fenómenos en las imágenes, los cuales ya le son familiares en el terreno.
- Tamaño: Se refiere a la dimensión volumétrica de un objeto tal cual como se observa en la imagen, sobre todo si ésta tiene la posibilidad de la tridimensionalidad. La comparación con otros objetos permite al intérprete medir y calibrar tamaños.
- Situación Espacial: Por situación o contexto espacial se quiere indicar la localización de las cubiertas de interés, así como su relación con elementos vecinos de la imagen.

La mayor parte de los especialistas están de acuerdo en que la observación sistemática de la superficie terrestre es una de las principales ventajas de la teledetección desde el espacio. La estabilidad y confiabilidad de los satélites permite que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones de observación similares, facilitando así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal. Es por esto que el período de adquisición debe ser tomado en cuenta al momento del análisis de las imágenes, en especial en estudios multitemporales.

## **2.15. Clasificación Digital**

Los números digitales adquiridos por el sensor, organizados en la imagen, no tienen sentido en sí mismos, sino en cuanto esos son interpretados; esto es, convertidos a categorías que supongan un mejor conocimiento del territorio. Esta interpretación puede hacerse visualmente, como se mencionó anteriormente, o digitalmente, empleando la potencia y rapidez de cálculo que proporciona un computador. Como fruto de la clasificación digital se obtienen una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio.

En cuanto a la clasificación digital se pueden diferenciar tres grandes categorías o fases principales: (i) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento), (ii) distribución de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación) y (iii) comprobación y verificación de resultados. Las técnicas de verificación son aplicables tanto al tratamiento digital como al análisis visual de las imágenes.

### **2.15.1. Clasificador de máxima probabilidad**

El clasificador de máxima probabilidad, también conocido como *clasificador de máxima verosimilitud*, y en inglés como *Maximum Likelihood Classification*, es uno de los clasificadores más empleados en la actualidad, ya que se ajusta con rigor a la

disposición original de los datos con los que se trabaje y está basado en el teorema de Bayes.

Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Es decir, esa función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que sirve para calcular la probabilidad de que un píxel (con un determinado ND) sea miembro de ella (Chuvieco, 1990). El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad.

En este método es preciso estimar el valor de probabilidad para cada categoría, a partir de las medidas realizadas sobre las áreas de entrenamiento. Para ello, se considera que los ND en el seno de cada categoría se distribuyen de acuerdo a la distribución normal, por lo que basta con conocer la media y la desviación típica de cada categoría, para calcular la probabilidad asociada con un determinado ND.

Para el caso de trabajar con una sola banda de un sensor en específico, la probabilidad se puede calcular mediante la siguiente fórmula, la cual está expresada linealmente para ser comprendida por un ordenador:

$$\ln p(x/A) = -0,5 \ln(2\pi) - 0,5 \ln(\sigma_A^2) - \left\{ \frac{(x - \overline{ND}_A)^2}{2\sigma_A^2} \right\} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde la probabilidad de un píxel  $x$ , definido por un determinado  $NDx$ , pertenezca a la clase  $A$ , puede calcularse a partir de la media  $NDa$  y la varianza  $\sigma_A^2$  de esa clase. Una vez determinada la probabilidad de pertenecer al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese píxel será asignado a la clase  $A$ , solo si:

$$p(x/A) \geq p(x/B) \quad \text{Ecuación 12}$$

Para todo  $A \neq B$ , variando  $B$  desde 1 hasta  $n$ , siendo  $n$  el número de categorías.

En muchas aplicaciones de la teledetección, algunas de las categorías cuentan con mayor extensión superficial, y por tanto, presentan mayor probabilidad de albergar píxeles desconocidos. Al considerar la probabilidad a priori de cada categoría  $p(A)$ , se introduce un nuevo factor en el criterio de decisión arriba enunciado (Ecuación 14). De esta forma un píxel pertenece a la clase A, si:

$$p(x/A) p(A) \geq p(x/B) p(B) \quad \text{Ecuación 13}$$

Para todo  $B \neq A$ , donde  $p(x/A)$  indica la probabilidad de que un píxel  $x$  con un ND determinado, pertenezca a la clase A, y  $p(A)$  la probabilidad a priori de que un píxel cualquiera se incluya en esa clase.

El interés de ponderar la probabilidad de cada clase se ha puesto en evidencia por distintos autores, pero también puede optarse por obviar este criterio, simplemente otorgando la misma probabilidad a priori a todas las categorías.

Un problema que se presenta con este método, y muchos otros de clasificación, es la asignación de los píxeles en áreas residenciales y urbanas muy heterogéneas, con distintos grados de edificación y entremezcla con espacios verdes. Por este motivo, la caracterización espectral de esta cubierta resulta especialmente problemático, ya que presenta, por un lado, una clase heterogénea, y por otro una actitud intermedia entre las cubiertas vegetales y los suelos desnudos (Chuvieco, 1990).

## **2.16. Verificación de los cálculos y resultados**

El producto final de una clasificación, ya sea visual o digital, es un mapa temático, en donde el territorio de estudio se encuentra segmentado en una serie de unidades espaciales, de significado coherente con la leyenda del trabajo (Chuvieco, 1990). Este documento puede luego integrarse con otras variables geográficas, para posteriores análisis, o servir como punto final del proyecto.

Toda clasificación lleva consigo un margen de error, en función a la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado. Por ello, resulta obligado aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error y, en función de este, valorar la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa.

Para evitar estimaciones subjetivas, normalmente se utiliza un análisis numérico de la matriz de confusión, lo que determina la precisión del método comparando el porcentaje de píxeles clasificados de cada clase con la clase verdad – terreno verificada, usualmente llamada de referencia, indicando posteriormente la evaluación correcta y los errores entre las clases estudiadas (Congalton R. G., Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information, 2001).

### **2.16.1. La Matriz de Confusión**

La matriz de confusión, también denominada matriz de error (*error matrix* en inglés), es una matriz cuadrada de números posicionados en columnas y filas  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de clases a evaluar, esta se denomina de confusión porque recoge los conflictos que se presentan entre las categorías (Chuvienco, 1990). En esta matriz bidimensional las columnas están ocupadas por las clases de referencia, adquiridas de observaciones de campo, inspección de estadísticas agrícolas, interpretación de fotos aéreas y otras clases de interés, y las filas por las categorías deducidas de la clasificación.

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación (Chuvienco, 1990). La fiabilidad global del mapa se ve en la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total. Los residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. Estos representan los errores de omisión y de comisión, respectivamente.

Un error de comisión es definido de manera sencilla como la inclusión de un área en una categoría cuando en realidad no pertenece a esa categoría. Error por omisión es excluir un área de la categoría a la que pertenece, es decir, cada uno de los errores es una omisión en la correcta categoría a la que pertenece el área, y una comisión en la categoría equivocada (Congalton & Green, 2009).

		Datos de Referencia				Total Filas	<b>Categorías de las cubiertas</b>
		D	C	AG	SB		
Datos Clasificados	D	65	4	22	24	115	D = Bosque caducifolio (deciduos) C = Conífera (conifer) AG = Agricultura (agriculture) SB = Arbusto (shrub)
	C	6	81	5	8	100	
	AG	0	11	85	19	115	
	SB	4	7	3	90	104	
Total Columnas		75	103	115	141	434	Confiabilidad Global = $(65 + 81 + 85 + 90)/434 =$ $321/434 = 74\%$

Exactitud del Productor

D = 65/75 = 87%  
 C = 81/103 = 79%  
 AG = 85/115 = 74%  
 SB = 90/141 = 64%

Exactitud del Usuario

D = 65/115 = 57%  
 C = 81/100 = 81%  
 AG = 85/115 = 74%  
 SB = 90/104 = 87%

Fig. 20 Ejemplo de Matriz de Confusión

Fuente: *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data - Principles and Practices* (Congalton & Green, 2009)

Por ejemplo, en la matriz de confusión que se aprecia en la Fig. 20, hay cuatro áreas que fueron clasificadas como *deciduous*, cuando la información de referencia, que es la que se supone como correcta, la posiciona en realidad como *conífera*. Por lo tanto, cuatro áreas fueron omitidas de la categoría correcta, en este ejemplo *conífera*, y asignadas de manera incorrecta a la categoría *deciduous*.

Además de indicar errores de omisión y de comisión, la matriz de confusión también es usada para calcular otras medidas de exactitud, como lo son las medidas

globales de confiabilidad y la exactitud del usuario y del productor (Congalton R. G., Accuracy Assessment: A User's Perspective, 1986).

La representación matemática de la matriz de confusión se muestra a continuación, como también las fórmulas para calcular la confiabilidad global, del productor y del usuario. Fig. 21.

		<b>j = Columnas (Referencia)</b>			<b>Total Filas</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>k</b>	<b><math>n_{i+}</math></b>
<b>i = Filas (Clasificación)</b>	<b>1</b>	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{1k}$	$n_{1+}$
	<b>2</b>	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{2k}$	$n_{2+}$
	<b>k</b>	$n_{k1}$	$n_{k2}$	$n_{kk}$	$n_{k+}$
<b>Total Columnas</b>		$n_{+1}$	$n_{+2}$	$n_{+k}$	$n$

Fig. 21 Ejemplo matemático de la Matriz de Confusión

Fuente: Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data - Principles and Practices (Congalton & Green, 2009)

Donde,

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij} \quad \text{Ecuación 14}$$

Es el número de muestras clasificadas en la categoría  $i$  en la clasificación del mapa obtenida por datos de teledetección, y

$$n_{+j} = \sum_{i=1}^k n_{ij} \quad \text{Ecuación 15}$$

Es el número de muestras clasificadas en la categoría  $j$  en los datos de referencia.

La confiabilidad global del mapa es simplemente la suma de la diagonal principal, dividida por el número total de áreas usadas en toda la matriz de confusión. Entonces, la confiabilidad global ( $F$ ) entre la clasificación del mapa y los datos de referencia es,

$$F = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad \text{Ecuación 16}$$

Aunque la confiabilidad global es un valor muy útil, también se deben tomar en cuenta para un análisis más riguroso las celdas marginales de la matriz. En el caso de las columnas, las últimas indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidas en ella, lo que se definió anteriormente como errores de omisión; desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud de usuario y del productor (Congalton R. G., Accuracy Assessment: A User's Perspective, 1986). La exactitud del productor está en relación inversa con los errores de omisión, donde:

$$F_{pj} = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Y la exactitud del usuario está en relación inversa con los errores de comisión:

$$F_{ui} = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad \text{Ecuación 18}$$

### 2.16.2. Índice Kappa

El coeficiente o índice Kappa (K) es otra medida de exactitud de la clasificación. Mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar, es decir, intenta delimitar el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Congalton R. G., Accuracy Assessment: A User's Perspective, 1986).

Esta técnica multivariada, definida por primera vez para el área de teledetección por Russell Congalton en 1981, considera en su cálculo el papel que pudo tener el azar en la coincidencia de las observaciones; el coeficiente Kappa viene dado por la siguiente ecuación,

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} \times n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} \times n_{+i}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

- $n$  es el número total de píxeles de referencia
- $n_{ii}$  es el número de observaciones en la fila  $i$  y columna  $i$
- $n_{i+}$  son los totales marginales de la fila  $i$
- $n_{+i}$  los totales marginales de la columna  $i$
- $k$  es el número de filas en la matriz.

Los valores máximos y mínimos de *kappa* dependen del contenido de todas las celdas de la matriz de confusión y no solo de los valores de la diagonal principal; de modo que si todos los elementos que se encuentran fuera de la diagonal principal fueran iguales a cero, se tendría una concordancia completa,  $K = 1$ . Si todos los valores de la diagonal principal fueran nulos se estaría en el caso de una completa discordancia, con  $K = -1$ . Algunos autores sugieren que un coeficiente Kappa de más de 0,8 indica claramente que una clasificación dada es poco probable que haya sido obtenida por azar, es decir, una alta correspondencia. Un valor de Kappa entre 0,4 a 0,8 (40 a 80%),

representa una concordancia moderada, y valores menores a 0,4 representan un grado de acuerdo muy pobre.

### **2.17. Áreas Metropolitanas**

El término de asentamientos humanos puede hacer referencia a lugares grandes o pequeños en tamaño, con una amplia variedad de funciones, y pueden ser temporales o permanentes en la naturaleza. Los términos como *urbano*, *ciudad* o *metrópolis* tienen varias definiciones, dependiendo del propósito y punto de vista del autor. La extensión espacial de una ciudad no está siempre representada por sus límites legales o fijos (Ridd & Hipple, 2006). Más bien, la transición entre las áreas urbanas y rurales es definida más apropiadamente como una continuación de los asentamientos.

Las aldeas dan paso a los pueblos, ciudades y a grandes áreas metropolitanas. En su mayoría, no hay grandes barreras naturales, sino más bien, una transición fluida entre una “clase” a la siguiente. Un desafío importante para la teledetección es reconocer la variedad de tamaños, formas y funciones de los asentamientos humanos, para su identificación y caracterización, como también para el mapeo y monitoreo de sus cambios a través del tiempo.

El fenómeno del crecimiento de las grandes ciudades es uno de los que posee mayor importancia, actualidad y generalidad hoy día, y es así desde hace varias décadas; este es un problema común en todas partes del mundo y da origen a la formación de las denominadas “áreas metropolitanas” (Gallardo Vaudo, 2018). Existen amplias definiciones sobre estas zonas, algunas de las principales y de las que aplican para la realidad venezolana se muestran a continuación.

Las áreas metropolitanas o distritos metropolitanos se pueden definir como entidades locales públicas formadas por la integración de varios municipios cuyas poblaciones se hayan extendido en forma tal, que lleguen a constituir una unidad geográfica, social y económica, (Brewer - Carías, 1967).

Se pueden incluir otros factores a esta definición como la establecida en México en el 2012 en la que precisan la zona metropolitana como “el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica. También se incluyen a aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planificación y política urbanas de las zonas metropolitanas en cuestión.” (INEGI, Conapo y Sedesol, 2012). También se puede incluir a esta definición que el 65% de su población económicamente activa está empleada en actividades no agrícolas.

También es usado el término de Área Urbana, siendo definido en el modelo AUDES (Áreas Urbanas de España), donde expresan que están formadas por uno o más municipios adyacentes situados alrededor de un núcleo urbano; la población total del área debe ser igual o superior a 20.000 habitantes y deben ser identificados y establecidos sus límites.

El concepto de área urbana también fue definido por autores venezolanos, donde se afirma que “espacios de uso urbano” o “áreas urbanas” son aquellos espacios (de actividades no agrícolas, ni mineras) caracterizados por una trama vial de cierto ordenamiento, con desarrollo continuo de estructuras. Además de las áreas de uso residencial, se incluyen aquellas donde se realizan funciones comerciales, gubernamentales (incluso militares), y también aquellas áreas de desarrollo urbano-rural donde la trama vial está menos diferenciada, pero que constituyen grupos de estructuras en conjuntos mayores a una hectárea, con pequeños arborizados o áreas de cultivo a sus alrededores (Rojas Grillo, 1980).

La palabra metrópoli deriva de los vocablos griego *meter* que significa madre y *polis* de ciudad, por lo que significa ciudad madre, en la cual se da la máxima

circulación de bienes, servicios y hombres. Su nacimiento es atribuido a la Oficina del Censo de los Estados Unidos de América a partir de 1958.

### **2.17.1. Características de la Metrópoli**

Para poder identificar la figura de metrópoli se expresarán algunas de sus características principales, condensadas por Catherina Gallardo, donde se toman en cuenta el desarrollo de estas áreas para nuevas poblaciones y las administraciones políticas:

- La existencia de una continuidad urbana entre la ciudad central y los diversos núcleos urbanos situados en sus inmediaciones, pertenecientes a otras circunscripciones administrativas, que se integran económica y socialmente al núcleo central.
- La existencia de interrelaciones cotidianas de carácter económico y social entre estos núcleos y la ciudad, sin que esta última pierda su hegemonía.
- La fragmentación político – administrativa de un centro urbano en crecimiento.
- La caracterización como fenómeno dinámico, que impide que mediante técnicas de planificación pretenda definirse su imagen final, sino que la misma se va perfilando y cambiando con el transcurrir del tiempo.
- La necesidad de un órgano superior de toma de decisiones, que tenga competencias sobre los aspectos que refieren a la metrópoli en su conjunto; así como el respeto de las competencias y decisiones de los órganos inferiores de poder, en lo que se refiera a los ámbitos que influyen en particular en cada uno de ellos.
- Existencia de un ambiente dinámico, en el cual existe un vertiginoso incremento poblacional, así como una población en continuo movimiento, un creciente volumen de actividades y una gran y compleja red de comunicaciones.
- Confluencia del sector industrial, comercial y habitacional, conjugados simultáneamente con ambientes de recreación y descanso.

Las áreas metropolitanas se crean entonces bajo la necesidad social y urbanística dada por el crecimiento de las ciudades, y de la búsqueda de sus habitantes de conseguir vivienda, en los centros urbanos y periféricos que los rodean, que den atención a la población que en ellos se desenvuelve. Por lo que uno de los grandes problemas de las metrópolis es su planificación a futuro, donde la prestación de servicios públicos es necesaria para lograr el funcionamiento ordenado de estos importantes centros poblados.

### **2.17.2. Áreas metropolitanas en Venezuela**

En la constitución vigente de la República Bolivariana de Venezuela, promulgada en el año 1999, se señala la vigencia de las áreas metropolitanas y su necesidad de organización, específicamente en los artículos 170, 171 y 172. El artículo 171 establece:

Capítulo IV – Del Poder Público Municipal, Artículo 171. Cuando dos o más Municipios pertenecientes a una misma entidad federal tengan relaciones económicas, sociales y físicas que den al conjunto características de un área metropolitana, podrán organizarse como distritos metropolitanos. La ley orgánica que al efecto se dicte garantizará el carácter democrático y participativo del gobierno metropolitano y establecerá sus competencias funcionales, así como el régimen fiscal, financiero y de control. También asegurará que en los órganos de gobierno metropolitano tengan adecuada participación los respectivos Municipios, y señalará la forma de convocar y realizar las consultas populares que decidan la vinculación de estos últimos al distrito metropolitano. La ley podrá establecer diferentes regímenes para la organización, gobierno y administración de los distritos metropolitanos atendiendo a las condiciones de población, desarrollo económico y social, situación geográfica y otros factores de importancia. En todo caso, la atribución de competencias para cada distrito metropolitano tendrá en cuenta esas condiciones.

En dicha constitución se establecieron dos áreas metropolitanas, una para la capital del país, Caracas, y la otra en el estado Apure. Es decir, desde el punto de vista legal y constitucional, solo existen Distritos y Áreas Metropolitanas en el Área Metropolitana de Caracas y el Área Metropolitana del Alto Apure (Gallardo Vaudo, 2018), a pesar que en muchas zonas están dadas las condiciones y requisitos para el establecimiento de distritos o áreas metropolitanas.

Sin embargo, existen en Venezuela, una serie de áreas metropolitanas creadas previo a la constitución de 1999, y que devienen de la realidad espacial existente en el país. “Esto se deriva del gran porcentaje poblacional que vive en las grandes ciudades y sus adyacencias, que ya para el año 1990 representaba el 84% de la población total del país, pudiendo mencionarse la existencia de áreas metropolitanas, como realidades espaciales, en ciudades como Acarigua – Araure, Puerto La Cruz – Barcelona, Maracaibo, Valencia, Maracay, Barquisimeto, Puerto Ordaz, entre otras.” (Gallardo Vaudo, 2018)

A pesar de solo haber dos entidades metropolitanas desde el punto de vista legal, desde el punto de vista urbano sí se han creado diversas áreas metropolitanas, a los fines de satisfacer los problemas urbanísticos, de servicios públicos y planificación territorial en diferentes zonas de Venezuela. Se mencionarán las dos zonas, definidas por Catherina Gallardo, que mantienen relación con este trabajo de investigación:

- Área Metropolitana Valencia – Guacara: creada por el Ministerio de Desarrollo Urbano mediante Resolución Nro. 1.029, de fecha 14 de octubre de 1992, para el desarrollo de aspectos como basura, conservación del agua, cloacas, drenajes, desechos sólidos, vialidad, transporte, entre otros. Igualmente se establecen parámetros respecto a algunas zonificaciones y se establece el plan de acción respecto a las actuaciones urbanísticas que han de ser desarrolladas por el sector público.

- Área Metropolitana de Maracay – El Limón – Turmero – Cagua – Palo Negro – Santa Cruz y San Mateo: creada por el Ministerio de Desarrollo Urbano mediante Resolución Nro. 2.964, de fecha 1ero de octubre de 1998, para el desarrollo de aspectos como industria, transporte ferroviario y transporte público, uso de las aguas, comercio, vialidad, acueductos, cloacas, drenajes, entre otros. Igualmente se establecen las áreas que por razones urbano – ambientales deben tener un tratamiento especial, así como algunos parámetros de zonificación y las obras y acciones urbanísticas que deben ser desarrolladas por los organismos públicos.

La definición del eje Maracay Valencia es tema de discusión entre los especialistas del tema; autores como Marco Negrón, el cual es uno, si no el principal, defensor del postulado de que existe efectivamente una megalópolis en el centro-norte del país, cuando se refiere a las ciudades Maracay y Valencia, afirma que: *...estas dos regiones colindantes aun cuando no existe continuidad del espacio construido, mantienen fuertes relaciones de interdependencia entre sí al punto que pueden ser consideradas una megalópolis....*

Marco Negrón, semejante a las observaciones de otros autores como lo es Luis Fernando Chaves, identifica dos grandes regiones metropolitanas (Ver Fig. 22): la región metropolitana de Caracas, integrada por las áreas metropolitanas de Caracas, Litoral Vargas, Guarenas-Guatire y Los Teques, y la región metropolitana Valencia-Maracay, integrada por las áreas metropolitanas de Valencia, Maracay, Puerto Cabello y La Victoria (Negrón, 2001), entendiendo “las regiones metropolitanas como realidades más vastas y complejas que las tradicionales áreas metropolitanas” (Capra Ribeiro, 2017).



Fig. 22 Ubicación de las ciudades centro-norte de Venezuela

Fuente: Actualización sobre la Megalópolis del centro-norte de Venezuela (Capra Ribeiro, 2017)

Estas áreas, al crecer sin mayor control estatal, se despliegan principalmente en las zonas populares, como afirman diversos autores: Ante la insuficiencia de los instrumentos existentes debido a la condición supramunicipal e incluso suprarregional de muchos de los problemas de esta agrupación urbana, se sigue desarrollando la ocupación depredadora de áreas agrícolas, parques nacionales, reservas forestales, etc. (Negrón, 2001). Un proceso de metropolización que, aunque sea o no atendido, continúa su curso “a través de su expresión más retrógrada, es decir, por el incremento de los cinturones de miseria en las periferias urbanas y su consolidación como áreas dormitorio con baja dotación de servicios y equipamientos colectivos” (Capra Ribeiro, 2017).

En cuanto al crecimiento de las ciudades en Venezuela, se puede afirmar que Valencia y Maracay están en los primeros puestos de la lista, Delgado Linero reconoce este fenómeno afirmando que “las tasas de crecimiento de la ciudad capital han sido inferiores al promedio nacional desde 1971. Mientras que Valencia, capitaneando ciudades como Puerto Cabello-Morón, San Carlos y San Felipe, ha tenido la tasa de crecimiento promedio más elevada entre 1950 y 2011, 4,2% anual”.

Esta, junto con Maracay, autores como Amaya, la definen como ámbitos *parachoque* de Caracas, es decir, encontrándose relativamente próximas a la capital, atraen población y absorben gran parte del crecimiento de la megalópolis.

## **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El presente Trabajo Especial de Grado se encuentra enmarcado en la modalidad de Investigación Documental, debido a que consiste en “el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente de trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos” (UPEL, 2006); una parte importante de esta investigación es la documentación de la zona de estudio, desde la búsqueda de cartografía del área hasta las ordenanzas y leyes creadas que la afectan, para así realizar un análisis mediante técnicas de teledetección del dinamismo del eje Maracay – Valencia.

### **3.2. SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio seleccionada fue el eje Maracay – Valencia, ciudades capitales de los estados Aragua y Carabobo, respectivamente. Abarcando desde el centro poblado Tocuyito, en el estado Carabobo, hasta la población de El Consejo, en el estado Aragua.

La zona de estudio se encuentra enmarcada en las cartas 1:100.000 identificadas con los números: 6546, 6646, 6746, ocupando una porción y no la totalidad de las cartas 6546 y 6746. Esta zona se encuentra limitada por un polígono, las coordenadas de sus vértices se muestran a continuación, las cuales tienen como Datum Provisional Sur Americano 1956 (PSAD 56) como se puede ver en la Fig. 23.

- 10°20' N ; 68°10' W
- 10°00' N, 68°10' W
- 10°20' N, 67°15' W
- 10°00' N ; 67°15' W

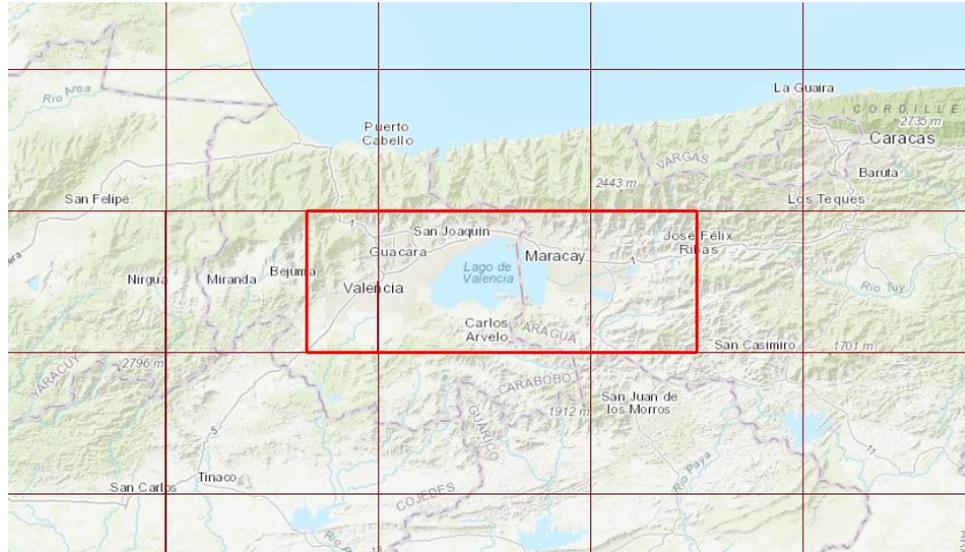


Fig. 23 Área de estudio en cuadrícula de 1:100.000

Fuente: Elaboración propia

El área de estudio está caracterizada por poseer un relieve variado, se cuenta con la depresión que rodea al lago de Valencia y las amplias zonas urbanas a sus adyacencias. La porción al norte de la zona de interés en la parte central está definida por el obstáculo natural que es el Parque Nacional Henri Pittier, el cual es un Área Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE).

El estado Carabobo cuenta con suelos altamente fértiles, posee grandes extensiones de tierras que solían ser ampliamente cultivadas en zonas próximas a la depresión central del Lago de Valencia, además tienen una historia de ser altos productores de maíz, leguminosa de grano, cacao, tabaco, algodón, caña de azúcar, hortalizas y coco.

En la zona de estudio coexisten áreas rurales y urbanas, también se encuentran importantes zonas industriales, principalmente en la zona de Valencia – Mariara, donde se encontraban grandes ensambladoras de vehículos, industrias alimenticias, metalmecánicas, trefilerías de alambres y cables eléctricos, plantas galvanizadoras,

cerámicas industriales, hilanderías, textiles, plásticos, pinturas, neumáticos, asfaltos, papel, electrodomésticos, entre otras. (Caballero Caguado, 2015).

En total, el área de estudio comprende 23 municipios pertenecientes a dos estados del país, como ya se mencionó, Aragua y Carabobo; estos municipios se presentan a continuación en la Tabla 5. Diez de los municipios corresponden al estado Carabobo, y trece al estado Aragua.

*Tabla 5 Municipios que se encuentran en el área de estudio*

<b>Municipios en Carabobo</b>	<b>Municipios en Aragua</b>
Bejuma	Bolívar
Carlos Arvelo	Francisco Linares Alcántara
Diego Ibarra	Girardot
Guacara	José Ángel Lamas
Libertador	José Félix Ribas
Los Guayos	José Rafael Revenga
Naguanagua	Libertador
San Diego	Mario Briceño Iragorry
San Joaquín	San Sebastián
Valencia	Santiago Mariño
	Sucre
	Tovar
	Zamora

*Fuente: Elaboración propia*

Según datos del último censo, realizado en el 2011 en Venezuela, el municipio que cuenta con mayor cantidad de habitantes (Ver Tabla 6) para el estado Carabobo y que es parte del área de estudio de este trabajo es Valencia, con 829.856 habitantes (habs.), un 37% de todo el estado. En cuanto a la cantidad de habitantes para los

municipios del estado Aragua, según el censo del 2011, el municipio Girardot ocupa el primer puesto con 407.109 habs., el 25% del total de Aragua.

*Tabla 6 Habitantes por municipios del área de estudio en los estados Carabobo y Aragua*

<b>Estado Carabobo</b>			<b>Estado Aragua</b>		
<b>Municipio</b>	<b>Población (habs.)</b>	<b>%</b>	<b>Municipio</b>	<b>Población (habs.)</b>	<b>%</b>
Valencia	829.856	37,0	Girardot	407.109	25,0
Guacara	176.218	7,8	Santiago Mariño	211.010	12,9
Libertador	166.166	7,4	Zamora	144.754	8,9
Naguanagua	157.437	7,0	José Félix Ribas	143.501	8,8
Los Guayos	149.606	6,7	Francisco L. A.	123.122	7,6
Carlos Arvelo	150.277	6,7	Sucre	114.509	7,0
Diego Ibarra	104.536	4,7	Libertador	114.355	7,0
San Diego	93.257	4,1	Mario B. I.	99.852	6,1
San Joaquín	64.124	2,9	José R. Revenga	48.800	3,0
Bejuma	48.538	2,2	Bolívar	38.047	2,3
			José A. Lamas	32.981	2,0
			San Sebastián	23.279	1,4
			Tovar	14.161	0,9

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.3. DATOS PARA EL ESTUDIO**

Para lograr el objetivo principal de este trabajo de investigación, el cual es analizar la dinámica del crecimiento urbano del eje Maracay – Valencia se dispuso de los siguientes insumos:

1. Escenas de sensores remotos espaciales que abarquen la zona de estudio definida, que comprendan desde el año 1988 hasta el año 2018, con un intervalo entre cada escena de 2 – 6 años.

2. Mapas preexistentes disponibles en diferentes escalas (1:100.000 y 1:25.000) que estén certificadas por el instituto rector, el cual en el presente caso es el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).
3. Imágenes satelitales previamente ortocorregidas de la zona de interés, las cuales fueron proporcionadas por la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), provenientes del satélite VRSS-1.
4. Modelos digitales de elevación que cubran en su totalidad la zona de estudio.
5. Un computador.
6. Software procesador de imágenes de satélite, el cual en este caso es el software de la casa Hexagon denominado ERDAS IMAGINE 2014.
7. Software de Sistema de Información Geográfica, siendo el seleccionado para este trabajo ArcGIS versión 10.4.1.

Las imágenes del satélite VRSS-1, también conocido como Miranda, fueron proporcionadas por la ABAE, tomadas el año 2013 y ortocorregidas ese mismo año por el ente, haciendo uso de GCP medidos en el terreno; las imágenes tienen una resolución espacial de 2,5 m en la banda Pancromática.

La selección de los software utilizados, ERDAS IMAGINE 2014 y ArcGIS 10.4.1, fue motivado por la disponibilidad para su uso por parte de la autora, y también por conocimientos previos del funcionamiento de ellos.

### **3.3.1. Definición de escala y leyenda**

La definición de la escala de trabajo se llevó a cabo tomando en cuenta los sensores que se utilizaron en este estudio, los cuales fueron los sensores del programa Landsat, específicamente Landsat 4, 5, 7 y 8; y también del satélite SPOT 4. Se trabajó principalmente con las bandas que tienen una resolución espacial de 30 m, por lo que se definió una escala máxima de trabajo de 1:100.000.

En la Tabla 7 que se presenta a continuación (Jensen & Cowen, 1999), los autores proporcionan una lista de los principales elementos de uso y cobertura, urbanos

y suburbanos, que se trabajan, donde se indican las resoluciones espaciales, espectrales y temporales apropiadas para obtener imágenes de estos atributos desde plataformas satelitales.

*Tabla 7 Atributos urbanos/suburbanos y las resoluciones en teledetección mínimas requeridas para obtener dicha información*

<b>Attributes</b> (atributos)	<b>Minimum Resolution Requirements</b> (resolución mínima requerida)		
	<b>Temporal</b> (en años)	<b>Spatial</b> (espacial)	<b>Spectral</b> (espectral)
<b>Land Use/Land Cover (uso y cobertura de la tierra)</b>			
<u>L1-USGS Level I</u>	5-10 years	20-100 m	V-NIR-MIR-Radar
L2-USGS Level II	5-10 years	5-20 m	V-NIR-MIR-Radar
L3-USGS Level III	3-5 years	1-5 m	Pan-V-NIR-MIR
L4-USGS Level IV	1-3 years	0,25-1 m	Panchromatic
<b>Building and Property Infrastructure</b>			
B1-building perimeter, area, height and cadastral information	1-5 years	0,25-0,5 m	Pan-V
<b>Transportation Infrastructure</b>			
T1-general road centerline	1-5 years	1-30 m	Pan-V-NIR
T2-precise road width	1-2 years	0,25-0,5 m	Pan-V
<b>Utility Infrastructure</b>			
U1-general utility line mapping and routing	1-5 years	1-30 m	Pan-V-NIR
U2-precise utility line width, right-of-way	1-2 years	0,25-0,6 m	Pan-V

Fuente: Tabla modificada de *Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes* (Jensen & Cowen, 1999)

Se puede observar que según esta clasificación de resoluciones mínimas, la resolución de 30 metros del programa Landsat se encuentra en la categoría de mapeo de Uso y Cobertura de la Tierras (Land Use/ Land Cover), específicamente en la categoría L1-USGS Level I. Adicionalmente, se definen las bandas del espectro electromagnético donde esta data debe estar contemplada para una mejor visualización de estos atributos; las bandas recomendadas son V (Espectro visible), NIR, MIR y Radar.

Uno de los sistemas de clasificación más utilizados en todo el mundo es el denominado *Anderson Land Cover Classification* (Anderson, Hardy, Roach, & Witmer, 1976) de la USGS, este sistema está definido tanto para uso como cobertura de la Tierra. El sistema es un arreglo jerárquico en donde se concretan dos amplias categorías principales, denominadas *levels* o niveles (ver Tabla 8 Clasificación de uso y cobertura de USGS (1976)). La clase Level I incluye las áreas urbanas o tierra edificada, zonas agrícolas, pastizales (rangeland), bosques, cuerpos de agua, pantano (wetland), tierra árida (barren land), tundra, nieve perenne o hielo.

Tabla 8 Clasificación de uso y cobertura de USGS (1976)

	<b><u>Level I</u></b>	<b><u>Level II</u></b>
1	<b>Urban or built-up land</b> (zona urbana)	Residential; Commercial and services; Industrial; Transportation, communication, and utilities; ...
2	<b>Agricultural land</b> (zona agrícola)	Croplands and pasture; orchards, groves, vineyards, nurseries and ornamental horticultural areas; ...
3	<b>Rangeland</b> (pastizales)	Herbaceous rangeland; shrub and brush rangeland; mixed range land
4	<b>Forest land</b> (bosques)	Deciduous forest land; evergreen forest land; mixed forest land
5	<b>Water</b> (agua)	Streams and canals; lakes; reservoirs; bays and estuaries
6	<b>Wetland</b> (pantano)	Forested wetland; nonforested wetland
7	<b>Barren land</b> (tierras áridas)	Dry salt flats; beaches; sandy areas other than beaches; bare exposed rock; ...
8	<b>Tundra</b>	Shrub and brush tundra; herbaceous tundra; bare ground tundra; ...
9	<b>Perennial snow or ice</b> (nieve perenne o hielo)	Perennial snowfields; glaciers

*Fuente: Tabla modificada de A Land use and land cover classification system for use with remote sensing data (Anderson, Hardy, Roach, & Witmer, 1976)*

Estas categorías pertenecientes al L1-USGS Level I serán los atributos presentes en la leyenda para el caso de las clasificaciones completas de la zona de estudio (1988 y 2018), siendo previamente adaptados a las condiciones de la zona de estudio, ya que no todos los atributos definidos por Anderson se encuentran en el área

de interés, como lo son tundra y nieve o hielo, que están referidos a zonas polares o de gran altitud.

Estas categorías representan únicamente coberturas de la Tierra (exceptuando el caso de zona urbana). Jensen & Cowen sugieren cuales son los sistemas que mejor se adaptan para la representación de estos atributos en esta amplia escala, incluyen Landsat MSS (79 m de resolución espacial), Landsat TM, ETM + y OLI (30 m resolución espacial), SPOT HRV XS (20 m resolución espacial), entre los principales.

La leyenda que se definió para la identificación y el análisis del dinamismo del eje Maracay – Valencia es la que se muestra a continuación, según la clasificación de Anderson L1-USGS Level I adaptada a la zona de estudio:

- Zona urbana
- Pastizal
- Cuerpos de agua
- Tierra agrícola
- Bosque

### **3.4. SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES**

Para la obtención de las imágenes satelitales necesarias para realizar el análisis del dinamismo urbano del eje Maracay – Valencia, fueron utilizados portales web de algunas de las principales agencias espaciales internacionales. Los sitios web utilizados fueron los siguientes:

- Earth Explorer, de la USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Se usó para la búsqueda, selección y descarga de las escenas Landsat utilizadas en el estudio.
- GloVis, de la USGS: <https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1>. Se usó para la búsqueda, selección y descarga de las escenas Landsat utilizadas en el estudio.
- Global Data Explorer (LP DAAC), de la USGS: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Utilizado para la búsqueda y descarga del MDE.

- Google Earth Engine, de Google LLC: <https://code.earthengine.google.com/>. Usado para la búsqueda y descarga de imágenes Landsat.

El único pre-requisito para usar estos servicios de la USGS fue la creación de una cuenta personal en Earthdata, para posteriormente realizar las descargas gratuitas de las imágenes en dichos portales. Las escenas se descargan como archivos comprimidos que tienen un tamaño de 400 a 900 MB cada uno. En cuanto a la plataforma de Google, el único pre-requisito fue el uso de una cuenta de correo electrónico Gmail.

El criterio establecido para la búsqueda y descarga de las imágenes está definido básicamente por cuatro grandes rasgos, que aplican para todos los buscadores usados en este trabajo: definición del área de interés, selección del intervalo de adquisición de las escenas, sensor o sensores del cual se busca la data y el nivel de procesamiento de esta.

La descarga de las imágenes Landsat en el buscador Earth Explorer siguió la siguiente metodología:

- a. Se definió la zona de interés sobre el mapa interactivo de Google en la plataforma web de la USGS, especificando, a grandes rasgos, las coordenadas de las esquinas de un polígono que abarcara el área de estudio.
- b. Se indicó el período en el cual se buscarían las imágenes, restringiéndolo principalmente a los meses de verano.
- c. Luego se seleccionaron los sensores de los cuales se requieren las imágenes, en este caso Landsat, y se definió el nivel de procesamiento de las imágenes, el cual fue Landsat Collection 1 Level-1 así como el satélite necesario, de Landsat 1-5 MSS a Landsat 7 ETM+.
- d. Finalmente se revisó el listado de imágenes disponibles y se descargaron las elegidas, en este caso se descargó la opción Level-1 GeoTIFF Data Product, la

cual contiene todas las bandas y metadata referente a la imagen en formato GeoTIFF en un archivo comprimido.

En cuanto a la descarga en la plataforma Google Earth Engine, los pasos fueron muy similares a los antes mencionados; se seleccionó el área de estudio en la base de datos en la nube de Google, los períodos de adquisición de las imágenes y los satélites necesarios. En el caso de este servicio web, solo se buscaron las imágenes para la zona de estudio del satélite Landsat 8 sensores OLI/TIRS, para los años 2014 y 2018, motivado por el nivel de procesamiento posible de descarga de estas imágenes.

El software de procesamiento de imágenes usado para las ortocorrecciones fue ERDAS IMAGINE 2014, esta versión del software no cuenta con el modelo para la corrección de las imágenes Landsat 8; por esta razón se realizó la descarga de las imágenes Landsat 8 desde la página web de Google Earth Engine con correcciones geométricas ya realizadas y calibrada a TOA.

Para cubrir en su totalidad la zona de interés, fue necesario descargar dos escenas del programa Landsat para cada año estudiado, las cuales están identificadas por los números 005/053 (Path: 05, Row: 53) y 004/053 (Path: 04, Row: 53), códigos asignados por el ente encargado de distribuir las imágenes para su fácil identificación usando una cuadrícula preestablecida (ver Fig. 24).



Fig. 24 Footprint de 5053 y 4053 de Landsat sobre la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

Se tomó en cuenta la búsqueda de imágenes con el menor porcentaje de nubosidad posible, y que si hubiese la existencia de nubes no se concentraran en el área de interés, se seleccionaron las imágenes que cumplieran con estos requisitos enmarcando el período de captura de las escenas a los meses de octubre a abril de los años de interés, empezando en el año 1988 hasta el año 2018. La proximidad en el día de captura entre las dos escenas del mismo año también fue un requerimiento que se tomó en cuenta al momento de la selección de las escenas.

Las imágenes del programa Landsat (con nivel de procesamiento L1G), VRSS-1 y los datos SRTM se encuentran en proyección UTM huso 19, Datum WGS84, y elipsoide WGS84.

### 3.4.1. Imágenes y datos descargados

Las imágenes del programa Landsat que fueron descargas se muestran en la siguiente tabla (Tabla 9), indicando el nombre del archivo, la fecha de toma y la misión Landsat a la que pertenecen, como también el sensor abordo encargado de la captura

de la imagen descargada; también se expone si la imagen es la 004/053 o 005/053, números de la cuadrícula preestablecida por la NASA para las imágenes Landsat.

*Tabla 9 Imágenes Landsat descargadas*

ID de la escena	Fecha de toma	Satélite Landsat	Sensor	Path/Row
LT40040531988118XXX01	27/04/1988	L4	TM	004/053
LT40050531988093XXX01	02/04/1988	L4	TM	005/053
LT50040531990019CPE02	19/01/1990	L5	TM	004/053
LT50050531990010CPE03	10/01/1990	L5	TM	005/053
LT50040531996292XXX00	18/10/1996	L5	TM	004/053
LT50050531996299XXX02	25/10/1996	L5	TM	005/053
LE70040532002364PFS00	30/12/2002	L7	ETM+	004/053
LE70050532002355EDC00	21/12/2002	L7	ETM+	005/053
LC80040532014069LGN01	10/03/2014	L8	OLI	004/053
LC80050532014076LGN01	17/03/2014	L8	OLI	005/053
LC80040532018080LGN00	21/03/2018	L8	OLI	004/053
LC80050532018071LGN00	12/03/2018	L8	OLI	005/053

*Fuente: elaboración propia.*

Las imágenes Landsat 4 al 7 fueron descargadas con un nivel de procesamiento Level 1G y todas las imágenes Landsat utilizadas cuentan con una resolución espacial de 30 metros en las bandas V, IR, NIR, SWIR; y se cuenta, en las imágenes de Landsat 7 y Landsat 8, con una banda pancromática de 15 m de resolución espacial.

El modelo digital de elevación usado fue producido por la NASA con su misión SRTM, el cual fue obtenido de la página LP DAAC, y se descargó un MDE de la zona de estudio con una resolución de 1'' (SRTM30). Este abarcó un área de cubrimiento mayor que la zona de estudio.

Las imágenes de la serie SPOT utilizadas fueron proporcionadas por el Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI) de la Fundación Instituto de Ingeniería, corresponden a la zona de estudio, y fueron capturadas por el sensor HRVIR del satélite SPOT 4. Especificaciones de las escenas se encuentran en la Tabla 10.

*Tabla 10 Imágenes SPOT 4 utilizadas*

ID de la escena	Fecha de captura	Identificadores K-J	Bandas	Nivel de Procesamiento
4 657-329 08-01-25 15:10:19 1 I	25/01/2008 15:10:23	657-329 1	XS1, XS2, XS3, XS4	2A
4 657-329 08-01-25 15:10:19 1 I	25/01/2008 15:10:26	657-329 2	XS1, XS2, XS3, XS4 y PAN	1A
4 658-329 10-02-09 14:54:04 1 I	09/02/2010 14:54:10	658-329	XS1, XS2, XS3, XS4 y PAN	2A

*Fuente: Elaboración propia.*

Las imágenes capturadas por los sensores del programa Landsat permiten realizar estudios multitemporales desde mediados de la década de los 70 hasta la actualidad, el cual cuenta con un catálogo de escenas muy amplio para casi todas las partes del mundo. Sin embargo, en mayo del 2003, el satélite Landsat 7 sufrió una avería en el sensor ETM+ abordo, lo cual resultó, desde ese momento, en escenas con bandas de información del terreno faltantes, generando imágenes con aproximadamente 22% de data perdida.

Por esta razón, para el período que transcurrió desde la avería del SLC (Scan Line Corrector) del sensor ETM+ de Landsat 7, hasta el lanzamiento del satélite Landsat 8, se buscaron imágenes de otro sensor para continuar con los intervalos establecidos para este trabajo especial. Las imágenes utilizadas para los años 2008 y

2010 fueron las mencionadas en la Tabla 10, del satélite seleccionado para este período, SPOT 4, el cual cuenta con una resolución espacial de 20 metros en las bandas XS.

Las imágenes del satélite VRSS-1 fueron proporcionadas por la Agencia Bolivariana de Actividades Espaciales (ABAE), estas seis escenas contenían la zona de estudio y contaron con una resolución espacial de 2,5 m en la banda que se trabajó, la cual fue la pancromática, ver Tabla 11.

*Tabla 11 Imágenes VRSS - 1 utilizadas*

ID del producto	ID de la escena	Fecha de toma	Sensor
15031060	7	08/02/2015	PAN-1
15031080	8	08/02/2015	PAN-1
150310180	3	21/03/2013	PAN-1
150409180	59	09/09/2013	PAN-1
1501051090	2	21/03/2013	PAN-2
150409100	60	09/09/2013	PAN-2

*Fuente: Elaboración propia.*

### **3.5. TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LAS IMÁGENES**

Antes de realizar la clasificación de las zonas urbanas y otras cubiertas que componen las escenas del área de estudio, es necesario realizar una serie de correcciones a dichas imágenes, para obtener un producto confiable en cuanto a su posicionamiento.

Las correcciones aplicadas se exponen a continuación, las cuales fueron realizadas usando el software de procesamiento de imágenes ERDAS.

#### **3.5.1. Ortocorrección de las imágenes**

Para llevar a cabo la ortocorrección de las escenas fue necesario contar con las escenas a corregir, y la cartografía o imágenes preexistentes las cuáles serán las bases para la obtención de los puntos de control (GCP). El modelo digital utilizado abarcó un cubrimiento mayor al de la zona de estudio.

La ortocorrección se realizó individualmente para cada imagen de cada año, se seleccionaron 9 GCP en cada imagen (004/053 y 005/053). Para la selección de los puntos de control se eligieron puntos que fuesen claramente identificables en las escenas a ortorrectificar como también en las escenas base, las cuales fueron las imágenes ya corregidas del satélite Miranda.

Dichos puntos de control fueron posicionados con una buena distribución geométrica en la zona de interés, siendo el área corregida definida por un polígono mayor al área de estudio antes mencionada. Esto se logró mediante la función de Inquire Box del software ERDAS, para realizar las correcciones únicamente en las porciones de interés de las imágenes (Ver Fig. 25Fig. 25).

Tras el posicionamiento de los GCP en las escenas a corregir, se tomaron en cuenta los valores de RMS de cada punto y los totales de cada modelo, para así asegurar posteriormente la exactitud del modelo.

El método de remuestreo que se utilizó fue el de *vecino más cercano* (nearest neighbour), ya que en este método se preservan los valores originales de los píxeles al no introducir promedios, y se seleccionó un tamaño de píxel de 28 metros.

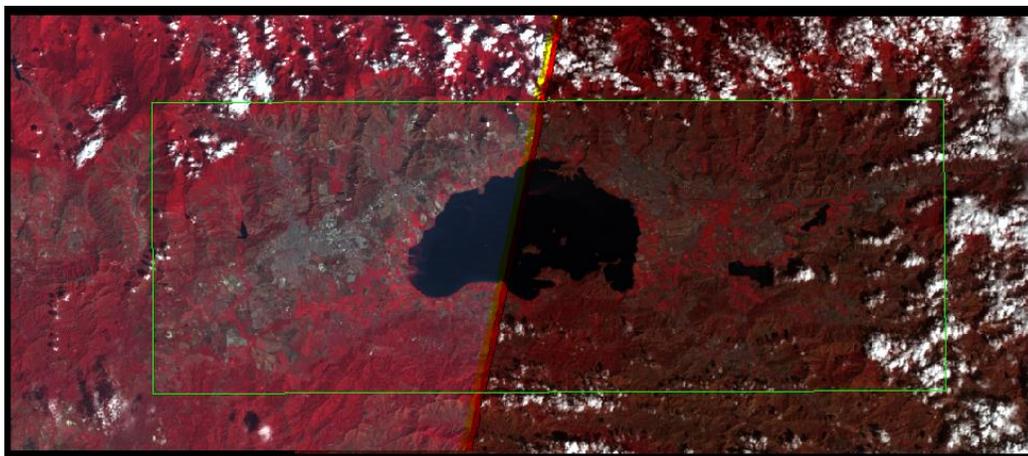


Fig. 25 Par ortocorregido de las imágenes 005053 y 004053 del año 1990. La zona delimitada por el polígono verde es el área de estudio en RGB: 432

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron 4 pares de imágenes satelitales ortocorregidas Landsat, siendo 8 en total de esta misión y 3 de SPOT, para un total de 11 imágenes; atendiendo a los valores de RMS y realizando verificaciones visuales con respecto a las cartas 1:100.000 y 1:25.000 de la zona de interés.

### **3.5.2. Validación de la exactitud posicional de las imágenes corregidas**

Luego de seleccionar los puntos en las escenas y realizar la ortocorrección de las imágenes se procedió a validar la exactitud posicional de estas, la cual se realizó de forma cuantitativa con los valores del error medio cuadrático (RMS).

El análisis cuantitativo de la exactitud posicional se inició a través de la valoración del RMS de los puntos de control utilizados y del modelo de ajuste de la ortocorrección. Se seleccionaron puntos de verificación y se obtuvieron también sus valores de RMS, los cuales fueron comparados con dos estándares oficiales, el primero fue el estándar internacional de la ASPRS denominado *Accuracy Standards For Digital Geospatial Data* y el segundo fue el *Manual de Procesos Técnicos de Cartografía Básica* del IGVSB.

Los puntos de verificación fueron seleccionados en la misma ventana de corrección del programa ERDAS, haciendo la distinción de que eran puntos de verificación (*check points* en inglés). Con la integración de estos puntos en el proceso de ortocorrección es posible valorar la bondad del ajuste del modelo generado a partir de los GCP (Caballero Caguado, 2015).

### **3.5.3. Mejoramiento de contraste**

El objetivo del mejoramiento de la imagen es hacer más sencillo extraer información de utilidad de las escenas. Al obtener las ortoimágenes se procedió a realizar técnicas de mejoramiento de contraste, para así lograr una mejor disposición visual de los elementos en las cubiertas presentes en las escenas corregidas, y de esta manera facilitar su detección y reconocimiento.

Estas técnicas fueron realizadas con el software ERDAS Imagine 2014, donde se aplicaron ajustes lineales de contraste y realces por ecualización del histograma. Dichos realces fueron realizados gracias a la herramienta *contrast adjust* que se encuentra en la ventana general *Contrast* ubicada en el menú de *General Contrast* de ERDAS.

### **3.6. DELIMITACIÓN DE LAS COBERTURAS**

Para realizar la delimitación de las diferentes coberturas presentes en la zona de estudio se hizo uso del software ArcGIS - ArcMAP versión 10.4.1, siendo las de mayor interés las áreas urbanas presentes.

Cada par de imágenes del mismo año del satélite Landsat fue tratado en conjunto, para así obtener el área urbana en dicho par; y exclusivamente para las imágenes de los años 1988 y 2018 las otras características de la cubierta, como las zonas de cultivo, suelo desnudo y cuerpos de agua.

Se crearon archivos Geodatabase para cada año del estudio, los cuales son los modelos primarios de almacenamiento de los datos de ArcGIS, en estos se definieron a priori las capas a utilizar, para contener todos los datos espaciales y sus atributos en el mismo archivo.

Se realizaron dos técnicas para la clasificación de las cubiertas, en primera instancia se hizo una clasificación digital supervisada y posteriormente se culminó con interpretación visual de la zona, motivado por la diversidad en las respuestas espectrales de las cubiertas en las áreas urbanas presentes.

#### **3.6.1. Clasificador de máxima probabilidad**

El método clasificador de máxima probabilidad es uno de los algoritmos más comúnmente utilizados en percepción remota, ya que es sencillo de aplicar, así como para interpretar los resultados que arroja, además de considerarse uno de los

procedimientos de discriminación más acertados y eficientes (García Mora, 2008). Este fue aplicado trabajando con el software ArcGIS, donde se seleccionaron las áreas de entrenamiento para el método, se realizó la clasificación, y más adelante su validación.

En primer lugar se realizó una clasificación exclusivamente para los cuerpos de agua presentes en las imágenes. El método fue aplicado para cada imagen utilizada individualmente, ya que cada imagen de diferente fecha fue tomada bajo condiciones atmosféricas y ángulo de elevación del sol diferentes, por lo que la respuesta espectral de las superficies presentes en las escenas no son exactamente las mismas entre ellas.

Para la identificación de los cuerpos de agua de todas las imágenes, se aplicó el método de máxima probabilidad, motivado por la constante y estable respuesta espectral que ofrece el agua, lo que permitió identificarla con alto grado de precisión en todas las imágenes.

Luego se realizó la clasificación supervisada de las imágenes 004/053 y 005/053 de los años 1988 y 2018, donde se utilizó el método para identificar todas las cubiertas seleccionadas en la totalidad de las escenas. Las clases elegidas para estos dos años fueron cuerpos de agua, cultivos, pastizales, suelos desnudos, zonas urbanas y bosques. También se definió una categoría para la identificación de las nubes, para así limitar la entremezcla de estas con las áreas urbanas presentes en la imagen. Los pasos a seguir para realizar todas las clasificaciones por este método fueron los siguientes:

Se seleccionaron las áreas de entrenamiento en la imagen con la herramienta *Training Sample Manager*, donde se buscaron áreas de las clases elegidas que fuesen representantes típicos de esta categoría en la imagen, estas zonas de entrenamiento fueron distribuidas por toda la escena donde se encontraran estas cubiertas. Las áreas de entrenamiento fueron definidas usando para su identificación, imágenes Landsat del mismo año (1988 o 2018) de otra fecha, visualizadas en Google Earth Engine, e

imágenes con mayor resolución espacial, como las imágenes del satélite VRSS-1 de la zona de estudio y también escenas en el software Google Earth.

Al elegir estas áreas se les asignó un nombre y un valor para la clase que pertenecían. En la herramienta también se visualizaron los histogramas de las zonas de entrenamiento para cada banda de la imagen, para determinar si las muestras eran representativas en el área y la separación de las respuestas espectrales en las diferentes bandas. Esto se realiza para obtener un archivo de firmas para dichas áreas de entrenamiento.

Obtenido el archivo de firmas de las áreas de entrenamiento para el método, se desplegó el menú de Geoprocesamiento de *Spatial Analyst Tools*, donde se seleccionó el clasificador de máxima probabilidad, que lleva por nombre en el software *Maximum Likelihood Classification*.

De esta manera se obtuvieron las clasificaciones para los cuerpos de agua desde 1988 hasta el 2018, pasando por todos los años del estudio, y para todas las cubiertas presentes en los pares de imágenes Landsat de 1988 y de 2018. Antes de realizar los análisis de cambio con estas clasificaciones, y con las realizadas mediante interpretación visual, se procedió a valorar las clasificaciones con respecto a un método de verificación estadística que se mencionará más adelante.

### **3.6.2. Interpretación visual**

Existe una gran complejidad al momento de clasificar digitalmente cubiertas que ofrecen una gran heterogeneidad espacial, el caso de las áreas urbanas es uno de ellos. Estas son zonas donde se mezclan techos, aceras, asfalto, jardines y espacios abiertos o deportivos (Chuvieco, 1990). Esta complejidad puede identificarse visualmente gracias a criterios que tienen mayor dificultad de expresar en las clasificaciones digitales, como la localización, textura, tamaño, formas, entre otros, los

cuales permiten que el intérprete identifique estas zonas que tienen gran variedad en las respuestas espectrales.

Luego de la delimitación de los cuerpos de agua de mayor tamaño de la zona, se realizó una interpretación visual de las áreas urbanas presentes. En primer lugar se utilizaron shapefiles de las cartas 1:100.000 números 6546, 6646 y 6746 reproyectadas a UTM Huso 19 con datum WGS84, donde se encontraban los polígonos de las áreas urbanas definidos en dichas cartas para su fecha de publicación.

Se realizó una superposición de los polígonos con las imágenes corregidas de cada zona, donde se obtuvo una primera aproximación de las áreas urbanas presentes.

Se utilizaron criterios visuales para la interpretación de las imágenes, específicamente para definir los límites de las zonas urbanas en el área de estudio. Se tomó en cuenta el tono y color de las cubiertas, habiendo en los grandes asentamientos humanos una entremezcla de distintos tonos y colores, ocasionada por la diversidad de superficies presentes; la situación y los patrones espaciales, las formas, los contornos y las texturas son también criterios que permitieron identificar el alcance de estas áreas.

La interpretación se llevó a cabo principalmente en dos composiciones de color en las imágenes Landsat utilizadas, las cuales fueron RGB 321 en L4, L5 y L7, y RGB 432 para L8, que componen imágenes en Color Verdadero, y también se usó la composición de Falso Color Infrarrojo, RGB 432 en L4, L5 y L7 y RGB 534 en L8.



Fig. 26 Vista de la Base Aérea Libertador en Maracay en escena de Landsat 5 de 1996. A la izquierda composición RGB 432, a la derecha RGB 321

Fuente: Elaboración propia

Las composiciones de Falso Color Infrarrojo permiten visualizar de manera clara las diferencias entre las cubiertas vegetales y las artificiales o suelos desnudos, esto sucede gracias a la respuesta espectral que presentan las plantas, donde se ven en tonos rojizos en composiciones como RGB 432 en L7, lo que permite obtener un alto contraste con las otras cubiertas, como lo son los espacios urbanos (Ver Fig. 26).

Se fueron delimitando los bordes de las áreas urbanas utilizando herramientas de digitalización del software ArcGIS y definiendo estas zonas como polígonos.

Cuando estuvieron delimitadas en polígonos todas las zonas urbanas en todos los años seleccionados para el estudio, se realizó una superposición con un archivo en formato GeoTIFF proporcionado por el Departamento de Geodesia del IGVSb con los límites de los municipios de los estados Aragua y Carabobo. Con este archivo se realizó una unión de atributos (*join*) entre la capa de Áreas Urbanas por medio de asociaciones espaciales entre las dos capas, usando la opción de “Hacer coincidir cada entidad dentro de la cual se encuentra”.

Realizada la acción *join* se obtuvieron todas las capas de áreas urbanas para todos los años de estudio con sus respectivos atributos de municipios. Posteriormente se convirtieron estas capas con características de polígonos a datos en formato *raster* y

se definió un tamaño de píxel de 28 m, ya que este fue el tamaño de píxel elegido cuando se realizó el remuestreo de las celdas al momento de las ortocorrecciones de las imágenes.

Es importante señalar que aunque la proyección cartográfica utilizada es la UTM, una proyección conforme, se consideró que la distorsión en las áreas presentes en la imagen no es significativa a la escala trabajada, por lo que dicha distorsión fue descartada.

Teniendo los datos de las clasificaciones digitales y por interpretación visual en formato *raster*, se procedió a realizar verificaciones de estas por medio de un método de verificación estadística denominado Matriz de Confusión.

### **3.7. VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN**

La verificación de la precisión es importante en cualquier proyecto de clasificación. Para realizar la validación de las clasificaciones de las imágenes se usó el método de Matriz de Confusión, el programa ArcMAP de ArcGIS cuenta con un complemento para realizar este análisis estadístico.

#### **3.7.1. Matriz de Confusión**

Las matrices de confusión se basan en análisis entre una serie de puntos seleccionados de manera aleatoria, a estos puntos se les asignan los datos reales del terreno y son comparados con los datos clasificados.

Las validaciones usando matrices de confusión fueron aplicadas en todas las clasificaciones realizadas, desde los análisis visuales hasta las clasificaciones por el método de máxima verosimilitud, en todos los años del estudio.

El análisis con la matriz de confusión empieza con la selección de los puntos de prueba, y se realizó con la herramienta de Geoprocesamiento del software

denominada *Create Accuracy Assessment Points*, en el apartado de Segmentación y Clasificación de Spatial Analyst Tools.

Para crear los puntos de evaluación de la exactitud se indicaron los archivos *raster* clasificados de donde se seleccionarían estos puntos y a que campo pertenecían, a los datos clasificados (*Classified*) o los de la realidad del terreno (*Ground Truth*). Se selecciona la cantidad mínima de puntos aleatorios que se usaron en la matriz y por último el método de muestreo para crear estos puntos de manera aleatoria, se optó por el método de Aleatorio Estratificado en el trabajo. Congalton sugiere, en cuanto al tamaño de la muestra, una superficie aproximada al 1% de la superficie cartografiada.

El método de muestreo utilizado es uno de los más recomendados por Russell Congalton, denominado Aleatorio Estratificado (*stratified random*), en el cual se crean puntos que se distribuyen aleatoriamente dentro de cada clase, donde cada una tiene un número de puntos proporcional a su área relativa, de esta manera se cercioró la existencia de puntos en todas las clases y que estas fueran tomadas en cuenta en la matriz.

Al tener el archivo de puntos creado, en el cual cada punto contaba con su valor de la clasificación, se procedió a asignarle a estos, los valores de la realidad del terreno. Estos valores fueron obtenidos de imágenes de alta resolución espacial, como lo son las imágenes del satélite VRSS-1 en la banda pancromática con 2,5 metros de resolución espacial, de imágenes Landsat de otras fechas en los mismos años de las clasificaciones, visualizadas en el portal web Google Earth Engine, y también haciendo uso del software Google Earth.

Teniendo los datos de la clasificación y de la realidad del terreno asignados a los puntos, se procedió a crear la matriz de confusión con la herramienta *Compute Confusion Matrix*, donde se obtuvieron tablas con los conteos de las categorías de los puntos, la exactitud del usuario y del productor y el valor estimado del estadístico *kappa*.

La exactitud del usuario muestra falsos positivos, donde los píxeles se clasifican incorrectamente como una clase conocida cuando deberían haberse clasificado como algo diferente. Esta también se conoce como errores de comisión, y los datos para calcular la tasa de error se leen en las filas de la tabla.

La exactitud del productor es un falso negativo, donde los píxeles de una clase conocida se clasifican como algo diferente a esa clase. Esta se conoce también como errores de omisión y los datos para calcular la tasa se leen en las columnas de la matriz.

Al contar con las precisiones asociadas a cada clasificación, las cuales fueron posteriormente exportadas a hojas de cálculo, se procedió a realizar los análisis de crecimiento urbano y de detección de cambio en la zona de estudio, como se comenta a continuación.

### **3.8. DETECCIÓN DE CAMBIOS POST-CLASIFICACIÓN**

Para realizar el análisis de cambios de coberturas en las imágenes de la zona de estudio se seleccionó como método para la comparación el denominado Comparación post-clasificación (*Post-classification comparison* en inglés) siguiendo las recomendaciones de Serra, Pons y Saurí (2003). Este método requiere que se ejecute la clasificación de cada imagen en cada fecha de interés individualmente Fig. 27Fig. 27Fig. 27; lo que fue realizado en el apartado 3.6, detallado en la sección anterior.

Las imágenes clasificadas por año son comparadas visualmente o mediante matrices para obtener el cambio entre las escenas. Un requerimiento para el uso exitoso de este método es que las ortocorrecciones de las imágenes, así como las clasificaciones individuales, deben ser bastante precisas, es decir, el error de registro de los datos debe ser mínimo.

Para lograr el éxito usando el método de comparación post-clasificación, es necesario seguir dos reglas primordiales: (i) usar métodos de clasificación idénticos

para cada fecha, y (ii) usar las mismas clases de coberturas para ambas escenas (Ridd & Hipple, 2006).

### Detección de Cambio: Comparación Post-clasificación

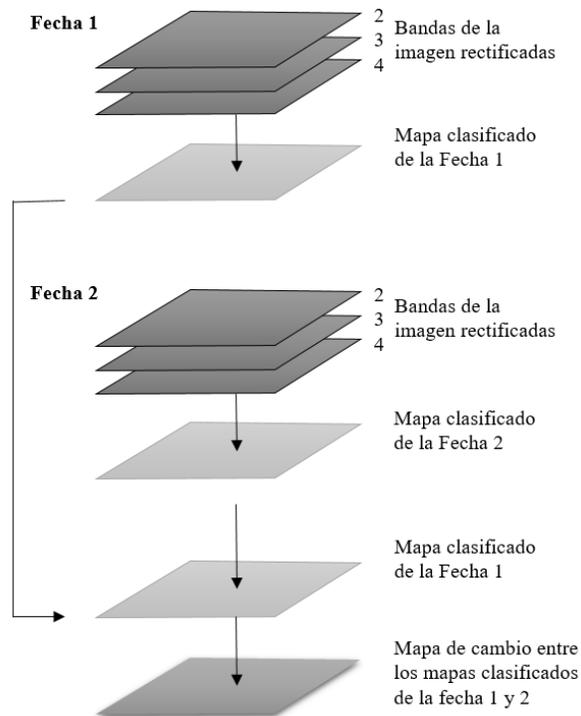


Fig. 27 Esquema del método Comparación post-clasificación

Fuente: Adaptado de *Remote Sensing of human settlements – Manual of Remote Sensing* (Ridd & Hipple, 2006)

Se contaba entonces con todas las capas de las zonas urbanas y cuerpos de agua para los años 1988, 1990, 1996, 2002, 2008-2010, 2014 y 2018, en formato *raster*, como también las clasificaciones de toda la zona de estudio de 1988 y 2018.

Las comparaciones entre las capas urbanas y de cuerpos de agua de cada fecha se realizaron entre los años consecutivos, se exportaron las tablas de atributos de las clasificaciones y se llevaron a una hoja de cálculo para su análisis. Las capas urbanas se encontraban divididas por municipios, y los cuerpos de agua por los nombres de los

mismos, gracias a estas tipificaciones se llevaron a cabo comparaciones municipales y estatales en cuanto al cambio urbanos presentes entre los años, como también para cada lago y embalse importante de la región.

También se utilizó la herramienta del software ArcGIS en ArcMAP de la ventana de Análisis de Imágenes (*Image Analysis*) donde se ingresaron los archivos *raster* de las clasificaciones. En esta ventana se usó la herramienta Diferencia (*Difference*), que se encuentra en la sección de Procesamiento de imágenes (*Processing*), de esta manera se realizó un algoritmo básico de detección de cambio, donde se restan los píxeles que componen las dos imágenes *raster* indicadas, ver Fig. 28. Así se realizó una comparación píxel a píxel de las clasificaciones.

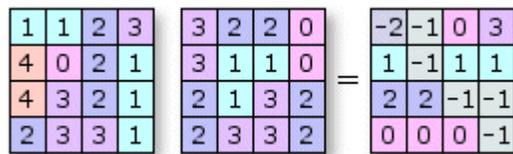


Fig. 28 Diferencia entre los valores de píxeles entre dos raster

Fuente: *Difference Arithmetic Function in ArcGIS 10.4.1*

Esto se realizó para las clasificaciones supervisadas de las imágenes de 1988 y 2018, donde se categorizaron las cubiertas de toda el área de estudio en seis clases principales y finalmente se obtuvo la diferencia entre los dos años.

### 3.9. ESQUEMA METODOLÓGICO

El esquema metodológico seguido durante el desarrollo de este trabajo de investigación se observa a continuación, ver Fig. 29. Se muestra desde la definición del problema de detección de cambios elegido hasta los productos generados al final de todas las etapas.

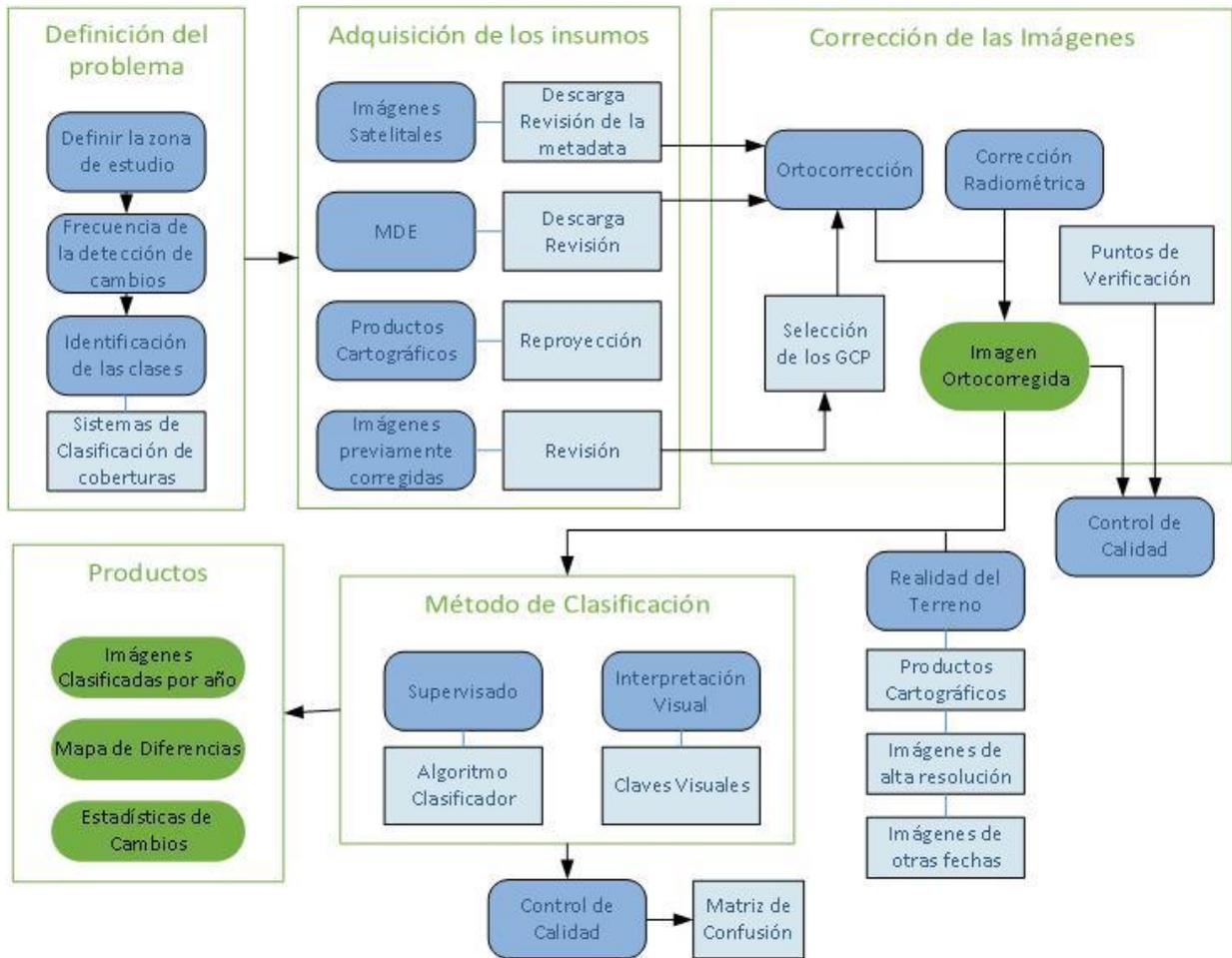


Fig. 29 Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al culminar todas las etapas del desarrollo y ejecución de este Trabajo Especial de Grado se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación, los cuales están seguidos por el análisis de los mismos.

### 4.1. VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para realizar la validación del posicionamiento horizontal de las escenas ortorectificadas se tomó como referencia el estándar internacional publicado por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)* llamado “*Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*” divulgado en el 2014.

En dichos estándares se dividen los datos horizontales en diferentes clases de precisión, los cuales se muestran en la Tabla 12, donde indican cuales son los valores del error medio cuadrático permitidos para pertenecer a cada clase mencionada.

Tabla 12 Estándares de precisión horizontal para datos planimétricos digitales

<b>Datos Horizontales Precisión de la Clase</b>	<b>Valores de RMS para componentes X, Y</b>
<b>I</b>	1,25% del factor de escala (0,0125 x factor de escala)
<b>II</b>	2,0 x Precisión de la Clase I (0,025 x factor de escala)
<b>III</b>	3,0 x Precisión de la Clase I
...	
<b>N</b>	N x Precisión de la Clase I

Fuente: *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (ASPRS, 2014)*

Donde el valor del RMS total del producto viene dado por,

$$RMS_{Total} = \sqrt{(RMS_X^2 + RMS_Y^2)} \quad \text{Ecuación 20}$$

En cuanto a estándares nacionales, el IGVSB cuenta con un documento llamado Manual de Procesos Técnicos de Cartografía, en el que se incluyen lineamientos según las diferentes escalas de trabajo cartográficas. En la denominada *categoría derivada*, categoría a la cual pertenece la escala 1:100.000, dicho manual establece los siguientes valores de tolerancia y de error medio cuadrático, respectivamente. (Ver Tabla 13).

Tabla 13 Tolerancia y RMS para mapas a escala 1:100.000 según el IGVSB

<b>Escala 1:100.000</b>	
$T_{XY} =$	$\pm 50,00 \text{ m}$
$RMS_p =$	$\pm 34,00 \text{ m}$

Fuente: Adaptado del Manual de Procesos Técnicos Cartográficos del IGVSB por (Caballero Caguado, 2015)

#### 4.1.1. Validación de la exactitud posicional de las imágenes

A medida que los puntos de control fueron posicionados en las escenas a corregir, se visualizaron los valores de RMS, los cuales aportan el error asociado a los puntos colocados y así se podía verificar los desplazamientos en el modelo de cada punto, esto se realizó tanto para los puntos de control (GCP) como para los puntos de verificación (*Check Points*) seleccionados para cada imagen.

Se tomaron en cuenta los valores de RMS totales, y de cada componente (*X* y *Y*) de cada punto; los valores de RMS máximos alcanzados en el modelo fueron de 0,5595 píxel, para las escenas Landsat, como se puede apreciar en la Tabla 14, y para las imágenes SPOT fue de 1,2655 píxel.

Se muestran a continuación los valores por escena del error medio cuadrático (en píxeles) con respecto a los puntos de control y los puntos de verificación. Los RMS de cada punto en cada una de las escenas también fueron tomados en cuenta, estos valores se encuentran expresados en el Anexo N°1, como también la distribución de los GCP en la porción de la imagen corregida.

Tabla 14 Valores de RMS en la ortocorrección de las imágenes Landsat (L) y SPOT en píxeles

Año	ID escenas	Puntos de Control del Modelo			Puntos de Verificación		
		$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$	$RMS_{C_X}$	$RMS_{C_Y}$	$RMS_{C_{TOTAL}}$
1988	004/053	0,1662	0,2792	0,3249	0,4979	0,3722	0,6217
1988	005/053	0,3765	0,2449	0,4492	0,4246	0,35004	0,5506
1990	004/053	0,4876	0,2622	0,5537	0,4518	0,3219	0,5548
1990	005/053	0,3196	0,2352	0,3969	0,4423	0,4398	0,6238
1996	004/053	0,3144	0,3452	0,4669	0,4698	0,4682	0,6632
1996	005/053	0,417	0,145	0,4415	0,3044	0,3683	0,4778
2002	004/053	0,4928	0,2648	0,5595	0,5426	0,4745	0,7208
2002	005/053	0,4074	0,0991	0,4193	0,3634	0,4687	0,5931
2008	657-329 1	1,1655	0,493	1,2655	0,5162	0,6298	0,8143
2008	657-329 2	1,0696	0,6298	1,2412	0,6639	0,5941	0,8909
2010	658-329	0,5432	0,8432	1,003	0,4973	0,6622	0,8281

Fuente: elaboración propia.

Los valores de RMS en metros se muestran a continuación (Ver Tabla 15), estos fueron expresados en unidades métricas para realizar la evaluación con respecto al estándar internacional publicado por la ASPRS llamada “*Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*”, mencionado anteriormente, para la evaluación de las precisiones planimétricas de los productos digitales geoespaciales.

Tabla 15 Valores de RMS en la ortocorrección de las imágenes Landsat y SPOT en metros

Año	ID escenas	Puntos de Control del Modelo (en m)			Puntos de Verificación (en m)		
		$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$	$RMS_{C_X}$	$RMS_{C_Y}$	$RMS_{C_{TOTAL}}$
1988	004/053	4,986	8,376	9,747	14,937	11,166	18,651
1988	005/053	11,295	7,347	13,476	12,738	10,5012	16,518
1990	004/053	14,628	7,866	16,611	13,554	9,657	16,644
1990	005/053	9,588	7,056	11,907	13,269	13,194	18,714
1996	004/053	9,432	10,356	14,007	14,094	14,046	19,896
1996	005/053	12,51	4,35	13,245	9,132	11,049	14,334
2002	004/053	14,784	7,944	16,785	16,278	14,235	21,624
2002	005/053	12,222	2,973	12,579	10,902	14,061	17,793
2008	657-329 1	23,31	9,86	25,31	10,324	12,596	16,286
2008	657-329 2	21,392	12,596	24,82	13,278	11,882	17,818
2010	658-329	10,864	16,864	20,06	9,946	13,244	16,562

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de RMS por escenas, obtenidos luego de realizar la ortocorrección de las imágenes, y el denominador de la escala de trabajo, el cual fue definido como 100.000 en secciones anteriores, se procedió a evaluar de acuerdo al estándar establecido. Para definir el valor de RMS para pertenecer a la Clase I, definida por la ASPRS, se tiene,

$$RMS\ admisible_{Clase\ I\ x,y} = 0,0125 \times 100.000$$

$$RMS\ admisible_{Clase\ I\ x,y} = 1.250\ cm$$

$$RMS\ adm_{Clase\ I\ Total} = 1.768\ cm$$

Es decir, para pertenecer a la Clase I según los valores de RMS de cada componente, estos no deberían superar el valor de 1.250 cm, es decir, 12,5 m. Como se puede ver, varios de los valores de RMS obtenidos luego de la ortocorrección de las imágenes superan este número, por lo que se realizó el cálculo para obtener el valor máximo para pertenecer a la Clase II del estándar.

$$RMS\ admisible_{Clase\ II\ x,y} = 2,0 \times 1.250\ cm$$

$$RMS\ admisible_{Clase\ II\ x,y} = 2.500\ cm$$

$$RMS\ adm_{Clase\ II\ Total} = 3.536\ cm$$

Al realizar la evaluación para la Clase II se obtuvo que el valor máximo admisible de RMS en cada componente para la escala trabajada es de 25 m, rango dentro del cual se localizan todos los valores del error medio cuadrático obtenidos en las ortocorrecciones realizadas a las imágenes satelitales del estudio, tanto del satélite Landsat como para las escenas SPOT; y el valor más elevado de RMS encontrado fue en la escena 657-329 1 del satélite SPOT, donde el valor de RMS total es de 25,31 m.

Esto indica, según el estándar de la ASPRS, que los productos se encuentran en la Clase II, que hace referencia a datos geoespaciales estándar, con alta precisión, cuyo uso se recomienda en aplicaciones de cartografía y SIG.

Además se realizó la valoración de los resultados de RMS obtenidos en las escenas con respecto al Manual de Procesos Técnicos de Cartografía mencionados anteriormente, en estos se define un valor de RMS máximo para la escala 1:100.000 de 34 metros. Entonces se puede afirmar que las imágenes ortocorregidas cumplen con las tolerancias indicadas en el manual del Instituto Geográfico de Venezuela.

#### **4.1.2. Validación de las clasificaciones**

Para que la detección de cambio resulte útil para las personas encargadas del manejo y planificación, las precisiones de estas clasificaciones y comparaciones deben ser evaluadas por algún método cuantitativo (Ridd & Hipple, 2006). Para obtener resultados que sean válidos estadísticamente, es decir, imparciales y con una probabilidad de error conocida, el mejor enfoque es seleccionar de manera aleatoria puntos con datos de la realidad que sean independientes a las áreas de entrenamiento de la clasificación.

El método cuantitativo utilizado en este trabajo de investigación fue el de la matriz de confusión, también llamada matriz de error. En la diagonal de esta matriz se encuentran los valores de las categorías que fueron correctamente clasificadas según los datos de referencia (realidad del terreno), y los elementos que están fuera de la diagonal representan los errores en la clasificación.

Algunos autores, como Campbell en 1996, recomiendan para las clasificaciones de una sola fecha, precisiones globales de 85%; también autores como P. Serra, Pons y Saurí recomiendan para clasificaciones individuales de una sola fecha valores de 80% de precisión global, y para los productos finales de la comparación de las dos clasificaciones, consideran acertado un umbral de 75% de precisión global, para así evitar resultados de excesiva baja calidad.

Las matrices fueron aplicadas para cada clasificación de cada año del estudio individualmente, arrojando su precisión global, la exactitud del productor y del usuario

de cada clase (errores de omisión y comisión respectivamente), y el valor de *kappa*. Un valor de *kappa* próximo a 1 (o a 100%) indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras que un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar (Chuvieco, 1990).

Se muestran entonces, en primer lugar, las matrices de confusión obtenidas de las clasificaciones de las áreas urbanas y cuerpos de agua realizados para todos los años del estudio. En este caso, se alcanzaron unos altos valores en las precisiones globales (*overall accuracy*) de todas las clasificaciones de estas dos categorías.

Tabla 16 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1988

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	1988					
	Áreas Urbanas	64	0	0	64	100
	Cuerpos de Agua	0	222	8	230	96,522
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	64	222	8	294	
Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 97,2789 %	
					Kappa	0,924808

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1990

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	1990					
	Áreas Urbanas	50	0	0	50	100
	Cuerpos de Agua	0	224	6	230	97,391
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	50	224	6	280	0
Exactitud del Productor (%)	100	100	0	0	Precisión Global 97,8571 %	
					Kappa	0,931091

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 1996

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	Áreas Urbanas	63	0	0	63	100
	Cuerpos de Agua	0	225	5	230	97,826
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	63	225	5	293	
	Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 98,2935 %
					Kappa	0,951377

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2002

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	Áreas Urbanas	62	0	1	63	98,413
	Cuerpos de Agua	0	224	6	230	97,391
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	62	224	7	293	
	Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 97,6109 %
					Kappa	0,932584

Fuente: Elaboración propia.

La clase *Otras cubiertas*, que se aprecia en las matrices de confusión desde la Tabla 16 hasta la Tabla 22, se utilizó para asignar los puntos aleatorios que correspondían a las *Áreas Urbanas* o a los *Cuerpos de Agua* en la clasificación que se realizó, pero estos puntos, según los valores de referencia no pertenecían a ninguna de estas dos clases, así que fueron asignados a la clases *Otras cubiertas*.

Tabla 20 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2008-2010

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	<b>2008-2010</b> Áreas Urbanas	62	0	1	63	98,413
	Cuerpos de Agua	0	224	6	230	97,391
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	62	224	7	293	
	Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 97,6109 %
					Kappa	0,932584

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2014

		Datos de Clasificación				
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)
Datos de Referencia	<b>2014</b> Áreas Urbanas	62	0	1	63	98,413
	Cuerpos de Agua	0	225	5	230	97,826
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0
	Total Columna	62	225	6	293	
	Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 97,9522 %
					Kappa	0,941775

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Matriz de Confusión para clasificación de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua de 2018

		Datos de Clasificación					
		Áreas Urbanas	Cuerpos de Agua	Otras cubiertas	Total fila	Exactitud del Usuario (%)	
Datos de Referencia	2018	Áreas Urbanas	61	0	2	63	96,825
	Cuerpos de Agua	0	223	7	230	96,957	
	Otras cubiertas	0	0	0	0	0	
	Total Columna	61	223	9	293		
	Exactitud del Productor (%)	100	100	0		Precisión Global 96,9283 %	
					Kappa	0,914149	

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que, para la clasificación de las áreas urbanas y cuerpos de agua, realizada para todos los años del estudio, se alcanzaron precisiones globales que superan los valores mínimos recomendados por distintos autores, 85 % y 80%, siendo el valor mínimo obtenido en estas clasificaciones de precisión global de 96,92 %, por lo tanto se pueden considerar las clasificaciones como confiables, pues aún el valor más bajo alcanzado supera las recomendaciones mencionadas.

Tabla 23 Valores de precisión global y kappa para las clasificaciones de Áreas Urbanas y Cuerpos de Agua

Año de las imágenes	Precisión Global (%)	Kappa
<b>1988</b>	97,2789	0,924808
<b>1990</b>	97,8571	0,931091
<b>1996</b>	98,2935	0,951377
<b>2002</b>	97,6109	0,932584
<b>2008 – 2010</b>	97,6109	0,932584
<b>2014</b>	97,9522	0,941775
<b>2018</b>	96,9283	0,914149

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los valores alcanzados por el indicador *kappa* el valor mínimo alcanzado fue de 0,91415, lo que indica que la clasificación efectuada es un 91,41%

mejor que la esperada por azar, ya que este indicador intenta delimitar el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios.

Luego se realizaron las clasificaciones de toda la zona de estudio para los años 1988 y 2018 de las imágenes 004/053 y 005/053, como se describió anteriormente. A estas clasificaciones también se les aplicó el método cuantitativo de precisión de las matrices de error. En estas clasificaciones se definieron siete clases, en las cuales se distribuyeron de manera aleatoria los puntos prueba. Se usó un promedio de 243 puntos de prueba para cada matriz de confusión.

En la Tabla 24 y en la Tabla 25 se muestran las matrices de confusión obtenidas de las clasificaciones de las dos imágenes Landsat 4 que componen la zona de estudio para el año 1988.

Tabla 24 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 004053 de 1988

<b>Imagen 1988 004/053</b>	Cuerpos de Agua	Cultivos	Pastizales	Suelo Desnudo	Zonas Urbanas	Bosques	Nubes	Total Fila	Exactitud del Usuario (%)
Cuerpos de Agua	20	0	0	0	0	0	0	20	100,0
Cultivos	0	8	1	0	1	1	0	11	72,727
Pastizales	0	0	53	0	1	3	0	57	92,982
Suelo Desnudo	0	0	0	86	3	0	0	89	96,629
Zonas Urbanas	0	8	3	0	9	0	8	28	32,143
Bosques	0	0	0	0	0	22	0	22	100,0
Nubes	0	0	0	0	0	0	18	18	100,0
Total Columna	20	16	57	86	14	26	26	245	
Exactitud del Productor (%)	100,0	50,0	92,982	100,0	64,285	84,615	69,231		Precisión Global 88,1633 %
								Kappa	0,849196

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 005053 de 1988

<b>Imagen 1988 005/053</b>	Cuerpos de Agua	Cultivos	Pastizales	Suelo Desnudo	Zonas Urbanas	Bosques	Nubes	Total Fila	Exactitud del Usuario (%)
Cuerpos de Agua	12	0	0	0	0	0	0	12	100,0
Cultivos	0	6	3	0	0	2	0	11	54,545
Pastizales	0	0	64	0	3	0	2	69	92,754
Suelo Desnudo	0	0	0	51	0	0	0	51	100,00
Zonas Urbanas	0	1	9	11	17	2	5	45	37,778
Bosques	0	0	0	0	0	39	0	39	100,0
Nubes	0	0	0	0	0	0	22	22	100,0
Total Columna	12	7	76	62	20	43	29	249	
Exactitud del Productor (%)	100,0	85,714	84,211	82,258	85,000	90,698	75,862		Precisión Global 84,7390 %
								Kappa	0,811360

Fuente: Elaboración propia.

Para las clasificaciones del año 1988 se contó con unos valores de precisión global de 88,16 y 84,74%, en la imagen 004/053 y 005/053 respectivamente. Al comparar estos valores con los recomendados en la bibliografía, la imagen 004/053 supera el valor mínimo recomendado por Campbell de 85%, sin embargo la imagen 005/053 no lo supera, pero sí es mayor a lo mínimo recomendado por Serra y Pons, por lo que ambas clasificaciones se consideran como bastante confiables.

Mediante las matrices de confusión se plasman también los conflictos entre las categorías. De esta forma, no solo se conoce la precisión global de la clasificación, sino también la confiabilidad para cada una de las clases y las principales confusiones entre ellas.

Para ambas imágenes de 1988, se muestra que las clases con mayores confusiones fueron las de áreas urbanas y cultivos. Para las zonas urbanas se consiguió con un valor de 32,1% y 64,3%, para la exactitud del usuario y del productor respectivamente, en la imagen 004/053; en cuanto la imagen 005/053 los resultados en esta clase son un ligeramente superiores, con una exactitud del usuario de 37,8% y del productor de 85%. Ya que la exactitud del usuario, o errores de comisión, son los que

tienen valores más bajos esto indica que para esta clase se realizó una delimitación excesivamente amplia mediante este método de clasificación.

A continuación se observan las matrices de confusión para las clasificaciones de las coberturas del par de imágenes Landsat 8 para el año 2018 en la Tabla 27 y Tabla 27.

Tabla 26 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 004053 de 2018

<b>Imagen 2018 004/053</b>	Cuerpos de Agua	Cultivos	Pastizales	Suelo Desnudo	Zonas Urbanas	Bosques	Nubes	Total Fila	Exactitud del Usuario (%)
Cuerpos de Agua	20	0	0	0	0	0	0	20	100,0
Cultivos	0	6	2	0	2	0	0	10	60,0
Pastizales	0	0	54	0	1	0	0	55	98,182
Suelo Desnudo	0	0	0	38	0	0	0	38	100,0
Zonas Urbanas	1	2	11	15	22	14	5	70	31,429
Bosques	0	0	0	0	0	14	0	14	100,0
Nubes	0	0	0	0	0	0	23	23	100,0
Total Columna	21	8	67	53	25	28	28	230	
Exactitud del Productor (%)	95,238	75,0	80,597	71,698	88,0	50,0	82,143		Precisión Global 76,9565 %
									Kappa 0,722418

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27 Matriz de Confusión de la clasificación de coberturas en la imagen 005053 de 2018

<b>Imagen 2018 005/053</b>	Cuerpos de Agua	Cultivos	Pastizales	Suelo Desnudo	Zonas Urbanas	Bosques	Nubes	Total Fila	Exactitud del Usuario (%)
Cuerpos de Agua	19	0	0	0	0	0	0	19	100,0
Cultivos	0	14	2	0	2	8	0	26	53,846
Pastizales	0	0	79	0	0	4	0	83	95,181
Suelo Desnudo	0	0	0	25	0	0	0	25	100,0
Zonas Urbanas	1	3	9	4	24	0	4	45	53,333
Bosques	0	0	0	0	0	38	0	38	100,0
Nubes	0	0	0	0	1	0	11	12	91,667
Total Columna	20	17	90	29	27	50	15	248	
Exactitud del Productor (%)	95,0	82,353	87,778	86,207	88,889	76,0	73,333		Precisión Global 84,6774 %
								Kappa	0,808424

Fuente: Elaboración propia.

La precisión global alcanzada en la clasificación de la imagen 005/053 del satélite Landsat 8 del año 2018, se muestra congruente con las obtenidas para el año 1988. En este caso las precisiones globales alcanzadas fueron de 76,9% para la escena 004/053 y de 84,7% para la imagen 005/053.

La escena 005/053 superó la recomendación mínima en la confiabilidad global del mapa de los autores Serra, Pons y Saurí. Lo que indica que esta clasificación cuenta con una confiabilidad bastante elevada. En el caso de la imagen 004/053, no fue alcanzado este valor mínimo de 80%, esto se puede deber a la existencia de mayor nubosidad en este imagen, lo que se tradujo en una mayor entremezcla en los píxeles de las clases, sin embargo, en esta clasificación se consideró tener un grado de fiabilidad suficientemente acertado para la mayoría de las clases que lo componen.

En cuanto a los valores de *kappa*, se obtuvieron valores mayores al 80% en tres de las escenas clasificadas, lo que indica una concordancia muy buena en dichas clasificaciones, las cuales fueron las realizadas para el año 1988 y la perteneciente a la escena 005/053 del año 2018. En cuanto a la imagen 004/053 del 2018, se obtuvo un

valor de *kappa* de 0,722 (72,2%), lo que indica que se obtuvo una buena concordancia en la clasificación.

Las clases con mayores confusiones fueron las de cultivos y las zonas urbanas, caso similar al encontrado en las clasificaciones del año 1988, teniendo valores de exactitud del usuario y productor para las zonas urbanas en la imagen 004/053 de 31,4 y 88% respectivamente; siendo los valores para la escena 005/053 de 53,3 y 88,8% respectivamente.

En el caso de las clasificaciones realizadas para las imágenes Landsat del año 1988 y 2018, se aprecia que las precisiones obtenidas varían considerablemente de una clase a otra. Las categorías de Cultivos y las Zonas urbanas son las que presentan mayores problemas, en el caso de las zonas urbanas se presume que estas confusiones en la clasificación son debidas a la variante respuesta espectral que tienen estas cubiertas, al ser áreas caracterizadas por tener variedad de materiales constructivos que las componen. Por otro lado, las clases de Cuerpos de Agua y Suelo Desnudo fueron las que presentaron valores más altos en las exactitudes del usuario y del productor, siendo en casi todos los casos, cercanos al 100%.

Debido a la confusión de las áreas urbanas entre los cultivos y algunas otras clases, se siguieron las recomendaciones de Serra, Pons y Saurí (2003), donde proponen que una de las soluciones para estos casos es la digitalización de las zonas problema mediante el uso de SIG y escenas donde el intérprete pueda identificar dichas áreas de manera acertada. Esta digitalización ya había sido realizada, como se indicó anteriormente, en el caso del presente trabajo de investigación, por lo que se procedió a aplicar una máscara al mapa final de clasificaciones de 1988 y 2018, con estas zonas urbanas que ya habían sido interpretadas en las imágenes de cada año.

De esta forma se obtuvieron los mapas de clasificaciones finales de ambos años extremos para el área de estudio, que se muestran más adelante en la sección 4.4.1.

## **4.2. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL CRECIMIENTO URBANO**

La detección de cambios es el proceso de identificación de las diferencias en cuanto a un objeto o fenómeno mediante su observación en diferentes fechas (Congalton & Green, 2009).

Se realizaron clasificaciones individuales para cada año de estudio, identificándose los cuerpos de agua y las áreas urbanas presentes. Cada clase mostraba la cantidad de píxeles que pertenecían a ella, las respectivas tablas de atributos generadas en ArcMAP fueron extraídas y llevadas a una hoja de cálculo para su correspondiente análisis. Adicionalmente, los *shapefiles* generados en el SIG fueron referenciados en Proyección UTM, Huso 19, con Datum REGVEN.

Las comparaciones entre las áreas urbanas de cada año fueron realizadas con el siguiente año consecutivo, empezando desde 1988. Las áreas que ocupa esta capa en las fechas estudiadas se presentan en píxeles y en hectáreas, tomando en cuenta que el tamaño de píxel es de 28 m, y también se muestran los porcentajes de crecimiento del área con respecto al año base en cada comparación. En la Tabla 28 se muestran las áreas urbanas totales por año de estudio en toda la zona de interés.

Tabla 28 Áreas totales y cambios de las zonas urbanas desde 1988 hasta 2018

AÑO	ÁREAS EN PÍXELES		ÁREAS EN HECTÁREAS		
	Cantidad Total	Diferencia entre años	Cantidad Total	Diferencia entre años	Cambio en área (%)
<b>1988</b>	467.527		36.654,117		
		10.588		830,099	2,2647
<b>1990</b>	478.115		37.484,216		
		36.693		2.876,731	7,6745
<b>1996</b>	514.808		40.360,947		
		21.145		1.657,768	4,1074
<b>2002</b>	535.953		42.018,715		
		23.886		1.872,662	4,4567
<b>2008-2010</b>	559.839		43.891,378		
		17.421		1.365,806	3,1118
<b>2014</b>	577.260		45.257,184		
		2.335		183,064	0,4045
<b>2018</b>	579.595		45.440,248		

Fuente: Elaboración propia

El período en que se presentó mayor crecimiento en las áreas urbanas en la zona de estudio fue desde el año 1990 hasta el año 1996, donde se observó un porcentaje de crecimiento, con respecto a la clasificación de 1990, de 7,67%, y siendo el área de diferencia entre los años, de 2.876,7 ha. Por el contrario, el período con menor porcentaje de crecimiento entre los 30 años estudiados fue el transcurrido entre 2014 y 2018, donde se observó un crecimiento de 0,40%, mostrando una diferencia en el último año de 183,1 ha con respecto al 2014.

Durante el período de 1996 al 2014 se observó una tasa de crecimiento estable, teniendo como porcentaje para el período de 1996 al 2002, de 4,10%, del 2002 al 2008-2010 de 4,45% para luego disminuir este valor entre el 2010 y 2014 a un 3,11% de crecimiento de la zona urbana en el área de estudio.

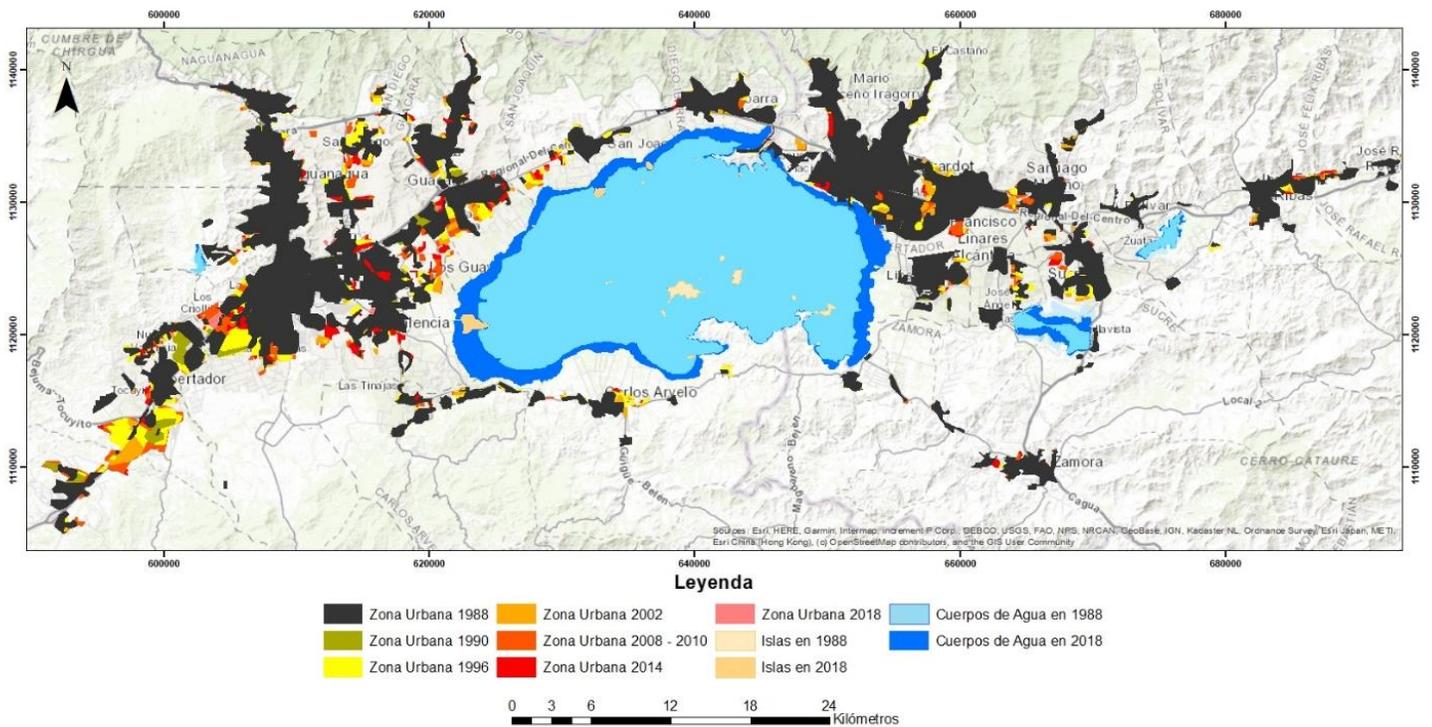


Fig. 30 Zonas urbanas del eje Maracay Valencia para cada año de estudio

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 30 se muestran las áreas urbanas presentes en el eje Maracay – Valencia para todos los años definidos para el estudio. Las zonas de color gris oscuro representan las áreas urbanas existentes para 1988. Como se puede observar, la parte oeste de la zona de estudio, es decir, la correspondiente al estado Carabobo, presenta un notable crecimiento en sus asentamientos urbanos.

Los mapas para cada año de las zonas urbanas y los cuerpos de agua se encuentran en el Anexo N°2 de este trabajo.

Tabla 29 Diferencia entre las áreas de la zona urbana entre 2018 y 1988

AÑO	ÁREAS EN PÍXELES		ÁREAS EN HECTÁREAS		Cambio en área (%)
	Cantidad Total	Diferencia entre años	Cantidad Total	Diferencia entre años	
1988	467.527		36.654,117		
		112.068		8.786,131	23,9704
2018	579.595		45.440,248		

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al crecimiento total del período de 30 años definido para el estudio, se obtuvo una diferencia de 8.786,1 ha, arrojando así un porcentaje de crecimiento entre los años 1988 y 2018 de 23,97%. Este porcentaje se encuentra en el rango de crecimiento de Maracay y Valencia indicados en el censo realizado por la Oficina Central de Estadística e Informática del 2001, el cual estaba en torno al 26%.

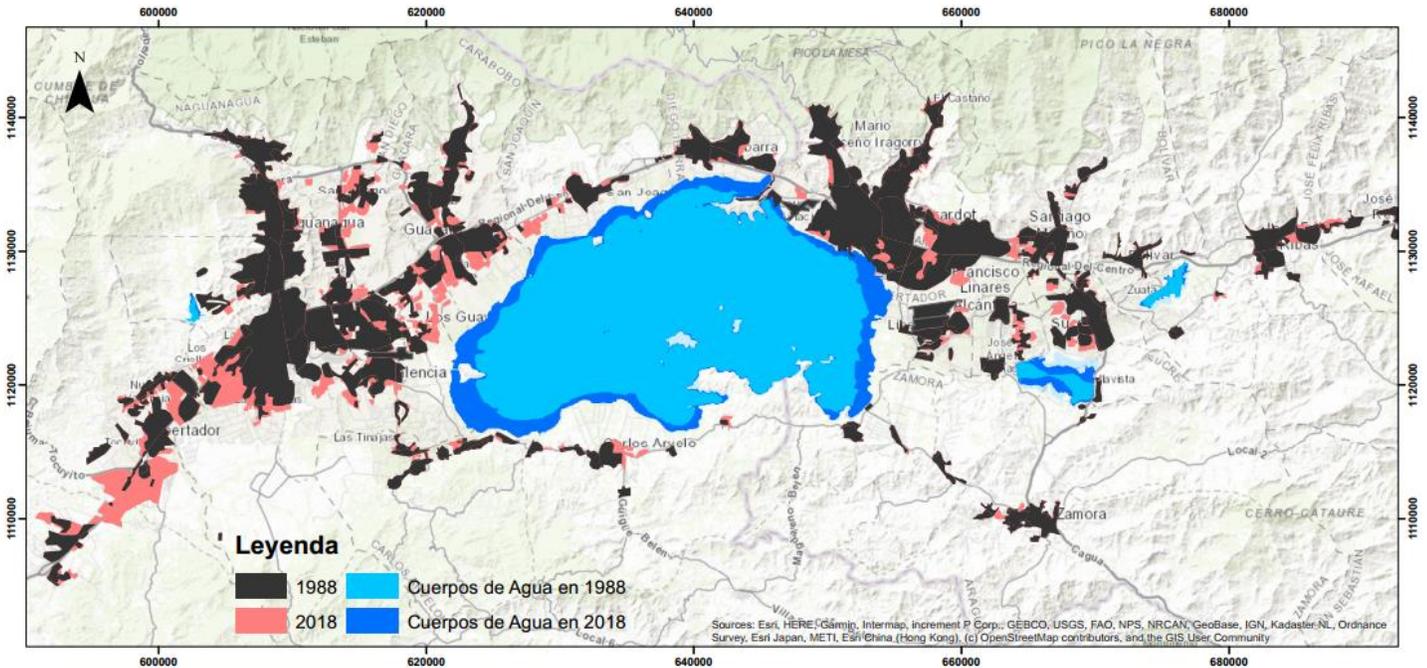


Fig. 31 Zonas urbanas del eje Maracay Valencia para los años 1988 y 2018

Fuente: Elaboración propia

Este crecimiento existente en la zona de estudio de 1988 al 2018, como se menciona en la Tabla 29, se visualiza en la Fig. 31. Las zonas grises corresponden al área urbana presente para 1988 y las áreas rosadas muestran el crecimiento existente para el año 2018.

Se observa cómo obstáculos naturales impiden el crecimiento urbano en algunas zonas, un ejemplo de esto es la presencia de áreas montañosas entre el municipio Diego Ibarra y Girardot, en la parte noreste del Lago de Valencia, en dicha zona se encuentra la Fila La Cabrera (a la que atraviesa el Túnel de La Cabrera), donde ha surgido un pequeño foco de nuevos asentamientos; sin embargo, existen estas barreras naturales que limitan las grandes expansiones que sí se observan en las planicies del oeste de la zona de estudio del estado Carabobo.

En la Fig. 31 se observa cómo en la zona oeste del área de estudio, en el tramo entre la ciudad de Valencia y la población de El Tocuyito, las nuevas áreas urbanas se congregan en torno al eje vial existente, la autopista Valencia – Campo Carabobo, que proporciona una vía para el desplazamiento de los individuos a lo largo del eje de estudio. Este comportamiento también se observa en los nuevos asentamientos en las zonas de Naguanagua y San Diego.

Este fenómeno es definido como *emplazamientos sobre ejes viarios*, donde la expansión urbana se ve en la prolongación de las redes de infraestructura (viaria, de los servicios urbanos) existentes, “como estrategia de contigüidad y aprovechamiento del capital social fijo” (Pérez Bustamante & Salinas Varela, 2007). Esta es una característica común en los crecimientos de los países Latinoamericanos, como afirman autores como Pérez y Salinas.

#### **4.2.1. Dinámica urbana por Municipio**

Además de contar con las áreas totales de zonas urbanas para el eje Maracay – Valencia, también se trabajó con la división político territorial de los municipios de los

estados Aragua y Carabobo. De esta manera se tienen las áreas urbanas para los municipios en la zona de estudio, para cada fecha de interés; estos resultados se muestran en la Tabla 30 en hectáreas.

Tabla 30 Área de los municipios de la zona de estudio para todos los años de interés en hectáreas

ÁREAS EN HECTÁREAS							
MUNICIPIO	1988	1990	1996	2002	2008-2010	2014	2018
<b>SANTIAGO MARÍÑO</b>	2439,65	2440,59	2500,41	2642,71	2753,02	2758,74	2758,74
<b>GIRARDOT</b>	4838,22	4847,47	4965,07	5167,66	5166,01	5169,23	5169,23
<b>MARIO BRICEÑO I.</b>	939,94	940,41	940,41	965,10	965,10	1021,32	1021,32
<b>GUACARA</b>	3089,90	3167,20	3458,46	3634,08	3826,70	4023,33	4034,07
<b>SAN DIEGO</b>	1393,01	1397,01	1673,92	1778,82	1975,68	2151,84	2178,19
<b>JOSE RAFAEL R.</b>	453,00	453,07	453,23	483,41	504,58	520,03	520,42
<b>JOSE FELIX RIBAS</b>	1181,72	1185,80	1239,66	1278,00	1297,52	1315,08	1315,08
<b>SAN JOAQUIN</b>	567,62	567,93	728,34	763,46	819,99	878,86	880,12
<b>NAGUANAGUA</b>	2117,58	2125,50	2159,76	2191,67	2217,54	2242,00	2242,24
<b>DIEGO IBARRA</b>	1266,87	1282,39	1311,16	1327,70	1320,18	1328,33	1328,72
<b>BOLIVAR</b>	336,26	339,00	345,59	345,59	346,61	346,61	346,61
<b>LIBERTADOR (C)</b>	2465,37	2981,94	3762,57	4122,35	4572,21	4671,54	4704,78
<b>VALENCIA</b>	8001,74	8117,77	8667,83	8811,14	9150,30	9544,81	9652,84
<b>LIBERTADOR (A)</b>	645,70	656,99	693,13	749,27	840,06	865,22	865,22
<b>LOS GUAYOS</b>	1345,34	1393,56	1484,66	1559,30	1734,76	1906,22	1906,77
<b>SUCRE</b>	1392,70	1393,72	1489,13	1530,05	1594,11	1628,84	1630,64
<b>JOSE ANGEL L.</b>	614,03	615,60	690,16	713,52	752,25	752,25	752,33
<b>ZAMORA</b>	1218,65	1222,80	1230,17	1233,86	1267,02	1305,99	1305,99
<b>CARLOS ARVELO</b>	1344,32	1352,56	1527,47	1621,00	1654,08	1691,95	1691,95
<b>FRANCISCO L. A.</b>	1002,50	1002,89	1039,82	1100,03	1133,66	1135,00	1135,00
<b>TOTAL</b>	36654,12	37484,22	40360,95	42018,72	43891,38	45257,18	45440,25

Fuente: Elaboración propia

Los municipios Valencia y Girardot, capitales de los estados Carabobo y Aragua respectivamente, cuentan con la mayor cantidad de área urbana en la zona de estudio (ver Fig. 32), seguidos por el municipio Libertador del estado Carabobo. Valencia presentó un crecimiento de 20,63% para el año 2018 con respecto a los valores presentes en 1988. En cuanto al municipio Girardot, tuvo un porcentaje de crecimiento de su área urbana de 6,84%.

En la Tabla 31 se muestran los porcentajes de crecimiento en las zonas urbanas de los municipios entre los años 1988 y 2018, organizados de mayor a menor cambio. El municipio con mayor porcentaje de crecimiento en sus áreas urbanas fue Libertador, perteneciente al estado Carabobo, con un aumento de 90,8% en su área urbana en el transcurso de los 30 años de interés de este trabajo. A Libertador le siguen los municipios San Diego con 56,4%, San Joaquín con 55,1% y Los Guayos con 41,7%, todos pertenecientes al estado Carabobo. El quinto municipio con mayor crecimiento en sus áreas urbanas pertenece al estado Aragua, siendo el otro municipio Libertador existente en la zona de estudio.

*Tabla 31 Porcentaje de crecimiento en las áreas urbanas por municipios entre 1988 y 2018*

<b>MUNICIPIO</b>	<b>1988 (HA)</b>	<b>2018 (HA)</b>	<b>CRECIMIENTO (%)</b>
<b>LIBERTADOR (C)</b>	2465,37	4704,78	90,835
<b>SAN DIEGO</b>	1393,01	2178,19	56,365
<b>SAN JOAQUIN</b>	567,62	880,12	55,055
<b>LOS GUAYOS</b>	1345,34	1906,77	41,731
<b>LIBERTADOR (A)</b>	645,70	865,22	33,997
<b>GUACARA</b>	3089,90	4034,07	30,557
<b>CARLOS ARVELO</b>	1344,32	1691,95	25,859
<b>JOSE ANGEL L.</b>	614,03	752,33	22,523
<b>VALENCIA</b>	8001,74	9652,84	20,634
<b>SUCRE</b>	1392,70	1630,64	17,085
<b>JOSE RAFAEL R.</b>	453,00	520,42	14,884
<b>FRANCISCO L. A.</b>	1002,50	1135,00	13,217
<b>SANTIAGO MARIÑO</b>	2439,65	2758,74	13,079
<b>JOSE FELIX RIBAS</b>	1181,72	1315,08	11,285
<b>MARIO BRICEÑO I.</b>	939,94	1021,32	8,658
<b>ZAMORA</b>	1218,65	1305,99	7,167
<b>GIRARDOT</b>	4838,22	5169,23	6,841
<b>NAGUANAGUA</b>	2117,58	2242,24	5,887
<b>DIEGO IBARRA</b>	1266,87	1328,72	4,883
<b>BOLIVAR</b>	336,26	346,61	3,078
<b>TOTAL</b>	36654,12	45440,25	23,970

*Fuente: Elaboración propia*

Los municipios que presentaron mayores porcentajes de crecimiento en sus zonas urbanas, a lo largo del período de estudio, se encuentran ubicados en las adyacencias de las capitales de estos dos importantes estados. Los municipios del estado Carabobo, Libertador, San Diego y Los Guayos, son entidades limítrofes con Valencia, capital de Carabobo; este fenómeno era esperado, ya que es común para los habitantes que realizan sus actividades económicas en una metrópoli, organizarse a su alrededor, no solo para la búsqueda de cobijo, sino también para el establecimiento de nuevas entidades de trabajo, cercanos a la capital del estado.

En las inmediaciones de la autopista Valencia – Campo Carabobo, en el municipio Libertador, que cuenta con un porcentaje de crecimiento de 90,8%, se observa una elevada dinámica espacial a lo largo de los 30 años estudiados, la mayor parte de este desarrollo es desordenado y no consolidado, como el que se aprecia en la zona norte de la autopista, en el barrio Pedro Camejo. El municipio Libertador del estado Carabobo no cuenta con un Plan de Desarrollo Urbano Local.

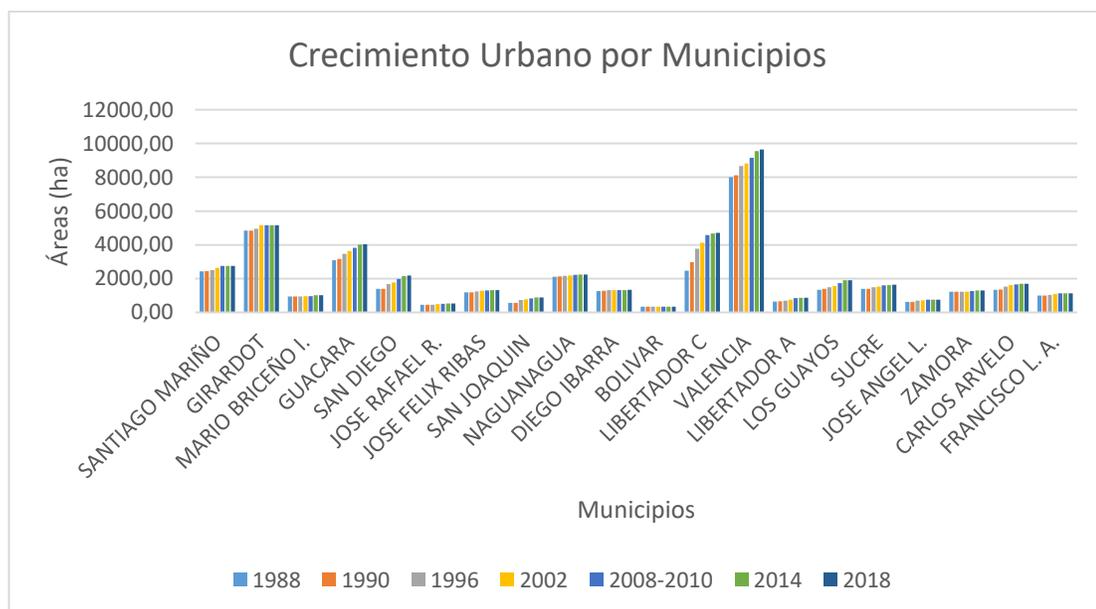


Fig. 32 Gráfico del crecimiento urbano por municipios en los años de estudio

Fuente: Elaboración propia

Los mapas con las zonas urbanas de cada año con las delimitaciones por cada Municipio presente se encuentran en el Anexo N°3.

En el caso del municipio San Joaquín que se encuentra en la depresión del valle formado en la parte superior del Lago de Valencia, estas características topográficas facilitan la construcción de nuevas estructuras en esta zona al sur de la Cordillera.



Fig. 33 Área Urbana del eje Maracay Valencia en 2002 por municipios

Fuente: Elaboración propia

También se contabilizó la diferencia de crecimiento entre los años consecutivos por cada municipio, donde se pudo observar cuáles municipios crecieron, cuáles se mantuvieron sin cambios aparentes y si existió algún municipio en el que las zonas

urbanas disminuyeran. Se muestran en la Fig. 33 las zonas urbanas divididas por municipios en el año 2002.

Tabla 32 Diferencia en las zonas urbanas por municipios entre los años de estudio en hectáreas

ÁREA DE DIFERENCIA ENTRE AÑOS EN HECTÁREAS						
MUNICIPIO	1990-1988	1996-1990	2002-1996	2010-2002	2014-2010	2018-2014
SANTIAGO MARIÑO	0,94	59,82	142,30	110,31	5,72	0
GIRARDOT	9,25	117,60	202,59	-1,65	3,21	0
MARIO BRICEÑO I.	0,47	0	24,70	0	56,21	0
GUACARA	77,30	291,26	175,62	192,63	196,63	10,74
SAN DIEGO	4,00	276,91	104,90	196,86	176,16	26,34
JOSE RAFAEL R.	0,08	0,16	30,18	21,17	15,44	0,39
JOSE FELIX RIBAS	4,08	53,86	38,34	19,52	17,56	0
SAN JOAQUIN	0,31	160,41	35,12	56,53	58,88	1,25
NAGUANAGUA	7,92	34,26	31,91	25,87	24,46	0,24
DIEGO IBARRA	15,52	28,77	16,54	-7,53	8,15	0,39
BOLIVAR	2,74	6,59	0	1,02	0	0
LIBERTADOR (C)	516,58	780,63	359,78	449,86	99,33	33,24
VALENCIA	116,03	550,05	143,32	339,16	394,51	108,04
LIBERTADOR (A)	11,29	36,14	56,13	90,79	25,17	0
LOS GUAYOS	48,22	91,10	74,64	175,46	171,46	0,55
SUCRE	1,02	95,41	40,92	64,05	34,73	1,80
JOSE ANGEL LAMAS	1,57	74,56	23,36	38,73	0	0,08
ZAMORA	4,16	7,37	3,68	33,16	38,96	0
CARLOS ARVELO	8,23	174,91	93,53	33,08	37,87	0
FRANCISCO L. A.	0,39	36,93	60,21	33,63	1,33	0

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 32, el área de estudio se caracterizó por un continuo aumento en casi todos sus municipios, a lo largo del período de estudio. Una excepción a este aumento se dio entre los años 2002 y 2008-2010, donde dos municipios sufrieron una disminución de su área urbana total, dichas entidades son los municipios Girardot, del estado Aragua, y Diego Ibarra, perteneciente al estado Carabobo.

Estos municipios se encuentran adyacentes el uno al otro y están en la parte norte del Lago de Valencia; esa zona del lago ha presentado un aumento constante de su nivel de agua, como se puede apreciar en la sección 4.3, y este aumento se aprecia principalmente en las planicies del norte y del oeste del lago. En la Fig. 34 se observan las zonas urbanas para el 2008 – 2010 divididas por municipios.

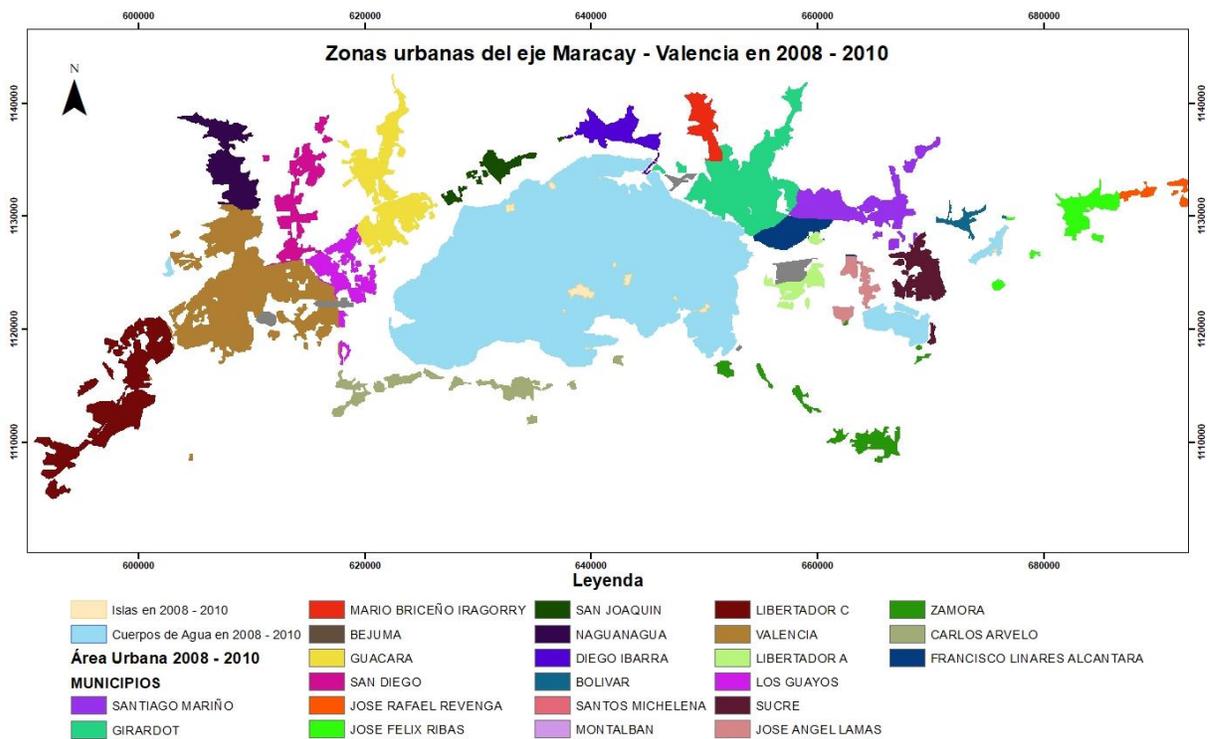


Fig. 34 Área Urbana del eje Maracay Valencia en 2008 - 2010 por municipios

Fuente: Elaboración propia

Existen Planes de Desarrollo Urbanos Locales en algunos de los municipios que componen la zona de estudio, dichos planes se ven principalmente para las capitales de los estados Carabobo y Aragua, Valencia y Maracay respectivamente; sin embargo, como se aprecia en las tablas anteriores, los municipios que tradicionalmente se asocian

con estas ciudades no son los que cuentan con un mayor porcentaje de crecimiento a lo largo del estudio.

Los municipios que cuentan con mayor porcentaje de crecimiento en sus áreas urbanas son los que se encuentran en las adyacencias de estas importantes ciudades, por lo que además de crear PDUL para estas capitales, sería oportuno planificar y ejecutar estos proyectos para las zonas adyacentes, ya que se muestra una tendencia en el crecimiento urbano asociado a las zonas cercanas a las capitales, que cuentan con superficies libres de estructuras para continuar con la expansión, usualmente desorganizada, de estas.

La expansión urbana presente en la zona de estudio se puede considerar dentro del tipo de Crecimiento Normal (Xiao, Shen, & Ge, 2004), este está causado principalmente por el desarrollo económico y el crecimiento poblacional en las tres últimas décadas, aunque se observa una importante disminución de la expansión urbana del eje desde el 2010 hasta el 2018, congruente con la creciente crisis económica que presenta Venezuela en la actualidad.

Aparte del comportamiento de crecimiento en torno a los ejes viales de la zona, se observa también *expansión del núcleo central*, en los límites de los municipios con mayores áreas urbanas, como lo son el municipio Girardot y Valencia y los municipios limítrofes a estos. La expansión del núcleo central se refiere a procesos de urbanización en las periferias que envuelven al núcleo central de la ciudad.

#### **4.2.2. Dinámica urbana por Estado**

Al contar con las áreas urbanas por cada municipio en la zona de estudio se procedió a calcular las áreas urbanas totales en los estados Carabobo y Aragua, para cada año trabajado. El período que tuvo mayor crecimiento en las zonas urbanas, como se mencionó anteriormente, fue entre 1990 y 1996; entre estos años el estado Carabobo creció 2.388,3 ha, y el estado Aragua 488,4 ha, como se observa a continuación en la Tabla 33.

Tabla 33 Diferencias en las zonas urbanas por estado en los años de estudio

AÑO	ESTADO CARABOBO			ESTADO ARAGUA		
	Píxeles	Hectáreas (ha)	Diferencia (ha)	Píxeles	Hectáreas (ha)	Diferencia (ha)
<b>1988</b>	275405	21591,752		192122	15062,365	
			794,114			35,986
<b>1990</b>	285534	22385,866		192581	15098,350	
			2388,299			488,432
<b>1996</b>	315997	24774,165		198811	15586,782	
			1035,350			622,418
<b>2002</b>	329203	25809,515		206750	16209,200	
			1461,925			410,738
<b>2008 - 2010</b>	347850	27271,440		211989	16619,938	
			1167,454			198,352
<b>2014</b>	362741	28438,894		214519	16818,290	
			180,790			2,274
<b>2018</b>	365047	28619,685		214548	16820,563	

Fuente: Elaboración propia

El estado Aragua tuvo un pico en su crecimiento entre 1996 y 2002, agregando 622,4 ha de áreas urbanas a su territorio dentro de la zona de estudio, en cambio para Carabobo el período con mayor crecimiento en sus zonas urbanas fue el mencionado arriba, de 1990 a 1996.

El intervalo donde se vio menor crecimiento, fue entre 2014 y 2018; como se mencionó en secciones anteriores, hubo una expansión en los suelos urbanos de 0,40%, esto se traduce en un aumento en el área urbana de Carabobo de 180,8 ha y para el estado Aragua de 2,274 ha, mostrando una significativa disminución en los valores de crecimiento que se venían observando.

Es responsabilidad de las gobernaciones de los estados de Venezuela, velar por la creación y cumplimiento de Planes de Ordenación del Territorio de cada uno de ellos. Las áreas metropolitanas del eje de Maracay – Valencia sobrepasan las fronteras de los municipios que originalmente contenían estas importantes ciudades, por lo que contar con Planes de Ordenación del Territorio actualizados y con base en información y datos

confiables, además de los PDUL, supondría una mejora en el futuro crecimiento de ciudades tan importantes como lo son Maracay y Valencia.

### 4.3. CRECIMIENTO DEL LAGO DE VALENCIA

De las clasificaciones individuales que se realizaron, se obtuvieron, además de las áreas urbanas, los píxeles de los cuerpos de agua. En la zona de estudio había cuatro principales cuerpos de agua, los cuales son de carácter permanente, se encontraron algunos otros pequeños cuerpos de agua pero estos no cuentan con una toponimia asignada, por lo que se condensaron en una misma categoría.

El Lago de Valencia, también llamado Lago de Tacarigua, es el cuerpo de agua más importante en estos dos estados. Durante los 30 años del estudio, se pudo observar un constante aumento en el área que ocupa el lago, ver Fig. 35.

*Tabla 34 Superficie y diferencias del Lago de Valencia en todos los años de estudio en píxeles y en hectáreas*

AÑO	ÁREAS EN PÍXELES		ÁREAS EN HECTÁREAS		Crecimiento (%)
	Cantidad Total	Diferencia entre años	Cantidad Total	Diferencia entre años	
<b>1988</b>	435666		34156,214		
		3573		280,123	0,820
<b>1990</b>	439239		34436,338		
		10048		787,763	2,288
<b>1996</b>	449287		35224,101		
		20116		1577,094	4,477
<b>2002</b>	469403		36801,195		
		24540		1923,936	5,228
<b>2008-2010</b>	493943		38725,131		
		19359		1517,746	3,919
<b>2014</b>	513302		40242,877		
		8680		680,512	1,691
<b>2018</b>	521982		40923,389		

*Fuente: Elaboración propia*

Como se ve en la Tabla 34, el lapso entre los años de estudio donde ocurrió mayor crecimiento en el área del Lago de Valencia fue entre el 2002 y el 2008-2010, donde hubo un aumento respecto al área del 2002 del lago de 5,23%. Este valor está en concordancia con los resultados obtenidos de la zona urbana para ese año en los municipios Girardot y Diego Ibarra, donde presentaron una disminución de su área urbana total, debido al crecimiento del Lago en su parte norte, lo que llevó a inundaciones en dichos municipios.

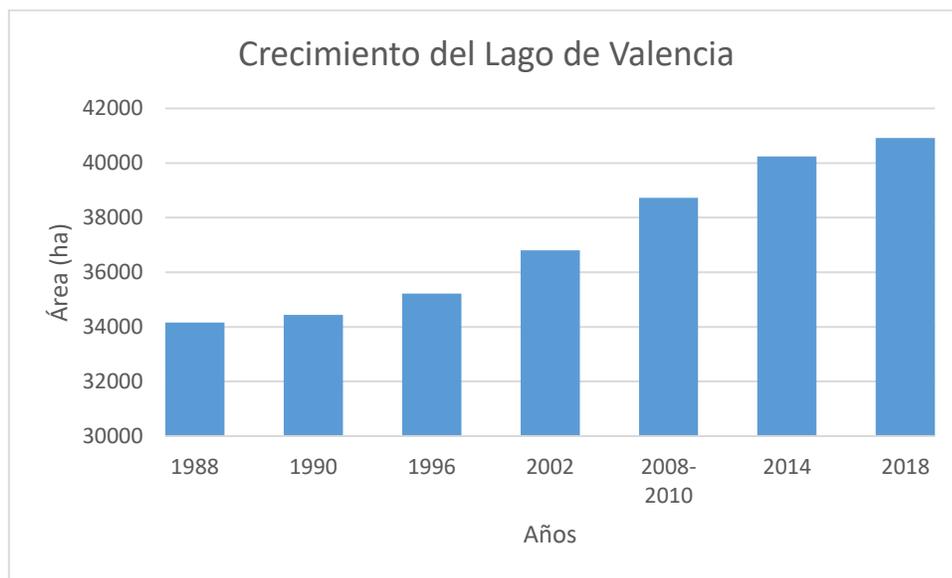


Fig. 35 Gráfico del crecimiento del Lago de Valencia desde 1988 hasta el 2018

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Fig. 35, el lago ha mantenido un crecimiento constante en su área. Este aumento se vio en menor porcentaje para el último par de años del estudio, cuando entre 2010 y 2014 fue de 3,9%, y para el período entre 2014 y 2018 disminuyó a 1,7 el porcentaje de crecimiento.

El área total del Lago de Valencia, para el período de 30 años definido en esta investigación, aumentó de 34.156,2 ha a 40.923,4 ha, como se aprecia en la Tabla 35, obteniendo así un porcentaje de crecimiento con respecto a 1988 de 19,812%.

*Tabla 35 Crecimiento del Lago de Valencia entre 1988 y 2018*

AÑO	ÁREAS EN PÍXELES		ÁREAS EN HECTÁREAS		Cambio en área (%)
	Cantidad Total	Diferencia entre años	Cantidad Total	Diferencia entre años	
<b>1988</b>	435.666		34.156,2		
		86.316		6.767,2	19,812
<b>2018</b>	521.982		40.923,4		

*Fuente: Elaboración propia*

El Lago de Valencia tuvo una expansión en su superficie hacia los cuatro puntos cardinales, ver Fig. 36. La zona que experimentó el menor crecimiento en el área a lo largo del estudio fue una sección del sureste del lago, cercana al límite entre los estados Carabobo y Aragua, en la parte norte de las poblaciones de El Milagro, Yuma, y Magdalena, esto se debe a la topografía presente en dicha zona, donde el relieve es montañoso; por lo tanto las zonas donde hubo mayor cubrimiento de agua fueron las áreas planas pertenecientes a la Cuenca del Lago de Valencia.

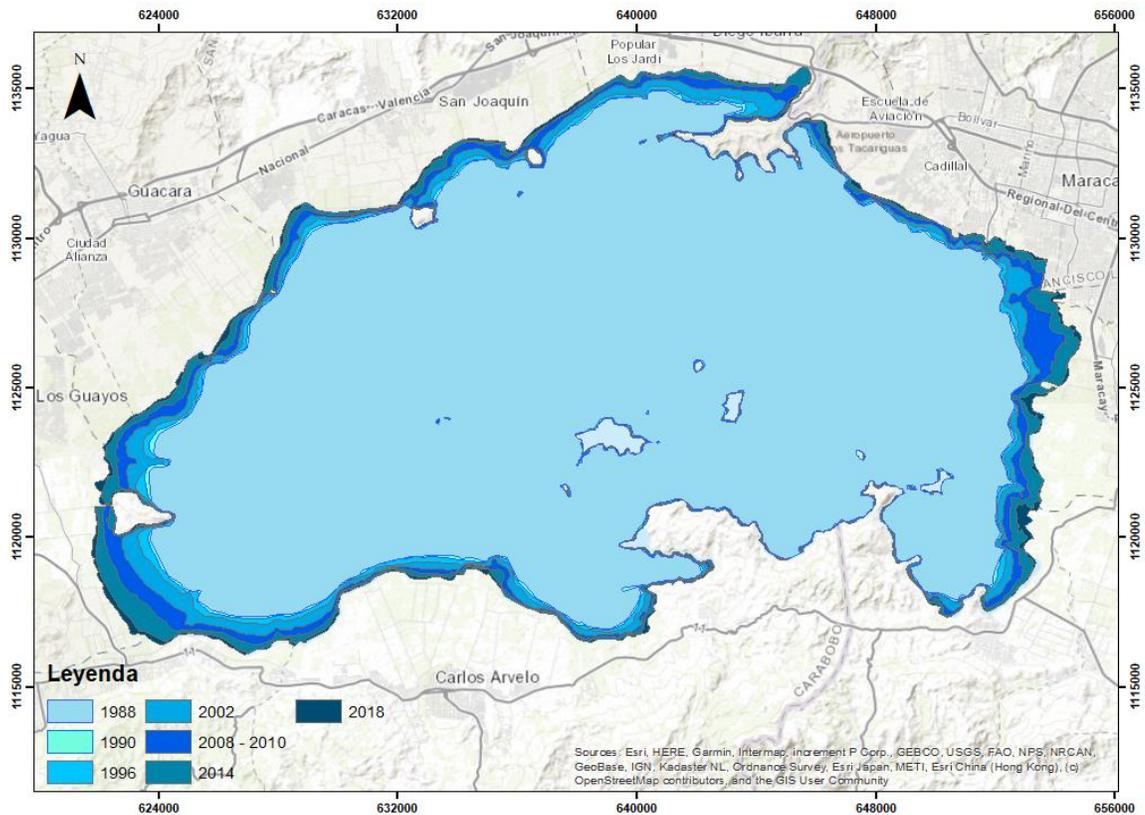


Fig. 36 Crecimiento del Lago de Valencia desde 1988 hasta el 2018

Fuente: Elaboración propia

El aumento del Lago de Valencia es un fenómeno que empezó en la década de los 80, anteriormente el lago pasaba por un período de descenso, como indican distintos autores, “el decrecimiento del lago (entre 1952 y 1978) se debió, principalmente, al aumento progresivo en el uso de las aguas superficiales y subterráneas, provenientes de la escorrentía natural de su cuenca tributaria, lo que originó un descenso en el aporte de los ríos año tras año, disminuyendo así los aportes naturales al lago” (Cañizales Navarro, 2006).

Cañizales indica que desde 1978, debido a que comienza la importación de volúmenes de agua de la Cuenca del Río Pao y del río Cabriales al Lago de Valencia,

empezó a notarse, en 1980, el aumento en el nivel del lago, y como se aprecia en los resultados arrojados por las clasificaciones de este trabajo, ha continuado en forma progresiva desde entonces, como se observa en la Fig. 35 y en la Fig. 37; alcanzando la mayor área que se tiene registrada en la actualidad, de 40.923 ha (409 km<sup>2</sup>), desde la década de 1960 con respecto a los registros de la Agencia de Cuenca del Lago de Valencia citados por Cañizales.

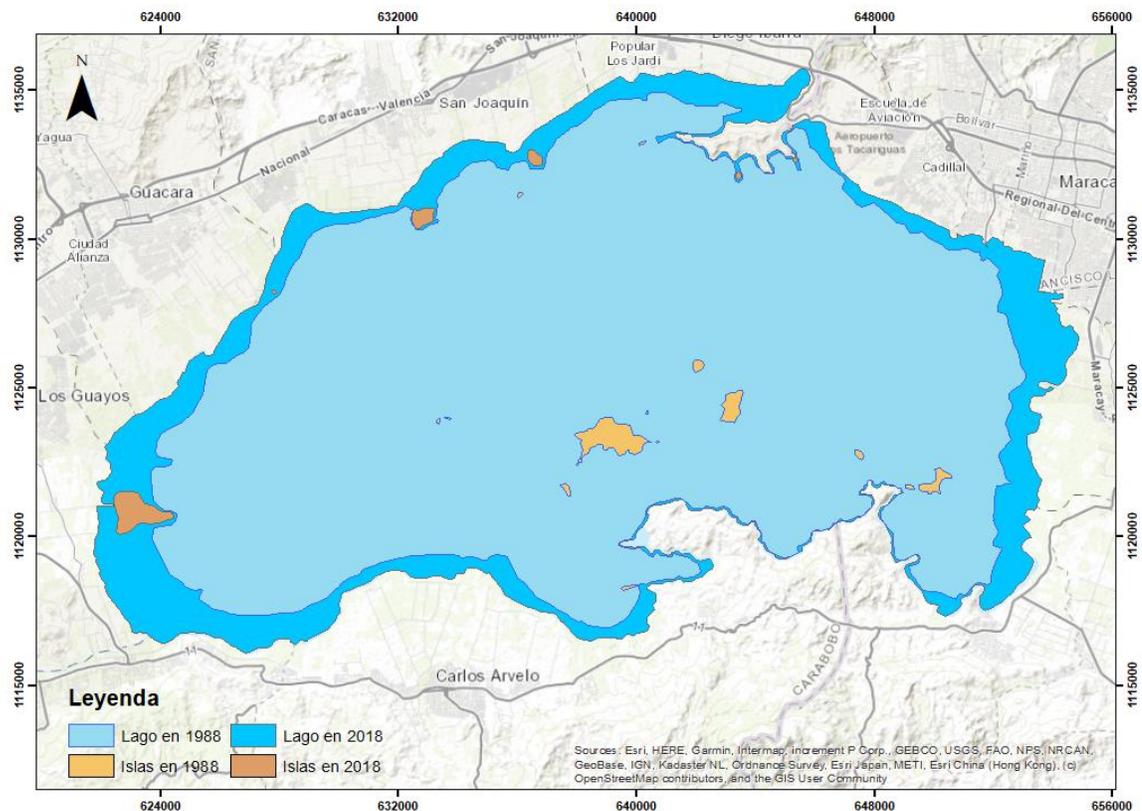


Fig. 37 Crecimiento del Lago de Valencia en 1988 y 2018

Fuente: Elaboración propia

El aumento de la superficie del lago también ha llevado a cambios en las áreas de las islas que se encuentran en sus aguas, disminuyendo algunas y hasta haciendo aparición otras, por la expansión de sus aguas a tierras anteriormente secas, como la

llamada Isla La Culebra, al oeste del Lago, la cual se encuentra conectada en la actualidad a Valencia únicamente por una vía del mismo nombre, como se observa en la Tabla 36.

Tabla 36 Comparación de las áreas de las islas del Lago de Valencia entre 1988 y el 2018

NOMBRE	ÁREAS EN HECTÁREAS (HA)		
	1988	2018	Diferencia 2018 - 1988
<b>ISLA BRUJA</b>	1,5647	-	Sumergida
<b>ISLA BRUJITA</b>	1,0539	-	Sumergida
<b>ISLA BURRITO</b>	6,6945	2,4572	-4,2373
<b>ISLA DE TACARIGUA (EL BURRO)</b>	181,9400	149,5360	-32,4040
<b>ISLA EL HORNO</b>	11,1368	7,3986	-3,7382
<b>ISLA OTAMA</b>	54,8798	42,3862	-12,4936
<b>ISLA DE CURA</b>	1,8495	-	Sumergida
<b>ISLA LOS CHIVOS</b>	1,5779	-	Sumergida
<b>ISLA EL ZORRO</b>	7,3617	5,7331	-1,6286
<b>ISLA CUCARACHA</b>	2,9528	0,8119	-2,1409
<b>ISLA CAIGÜIRE</b>	37,3041	28,3293	-8,9748
<b>ISLA EL FRAILE</b>	4,9805	2,6950	-2,2855
<b>ISLA SANTA CLARA</b>	-	19,5303	Nueva
<b>ISLA CHAMBERGO</b>	-	38,8126	Nueva
<b>ISLA LA CULEBRA</b>	-	159,9405	Nueva

Fuente: Elaboración propia

Las islas Bruja, Brujita, Los Chivos e Isla de Cura que se encontraban presentes en las imágenes satelitales de 1988, como también en la cartografía oficial de Venezuela 1:100.000 y 1:25.000, para el año 2018 no se apreciaban en las escenas, por lo que se supone que estas se encuentran inundadas debido al progresivo aumento del nivel del Lago de Valencia, en la Fig. 38 se observa el lago y sus islas para 1988 y para el 2018.

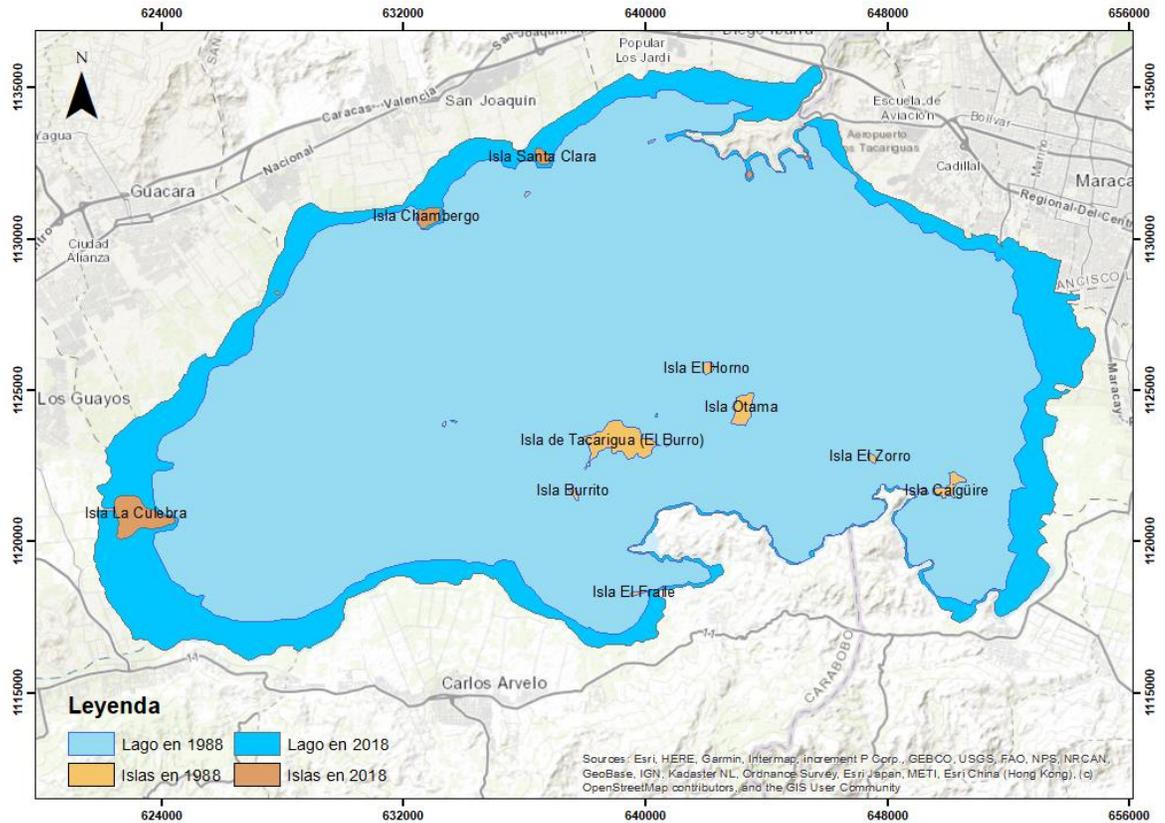


Fig. 38 Crecimiento del Lago de Valencia y cambio en sus islas en 1988 y 2018

Fuente: Elaboración propia

Todas las islas que se encontraron en 1988 sufrieron una disminución de su área, algunas, como las mencionadas en el párrafo anterior, se encuentran sumergidas en su mayoría; pero otras todavía presentan zonas superiores al nivel del agua del Lago, esto se ve representado por los valores negativos en la diferencia de las áreas entre 2018 y 1988 en la tabla anterior, donde dichos valores muestran el área en hectáreas que disminuyó cada isla.

En cuanto a las islas Santa Clara, Chambergó y La Culebra, estas tierras en 1988 formaban parte de las adyacentes al Lago de Valencia, pero debido a la ganancia en área de las aguas del lago, los alrededores de estas nuevas islas fueron inundados en el

transcurso de los años investigados. La Isla La Culebra cuenta todavía con una vía de comunicación entre ella y la ciudad de Valencia.

#### **4.3.1. Cambio en la superficie de los demás cuerpos de agua**

Además del uso de las aguas del Lago de Valencia al intensificarse los procesos de industrialización, urbanización y desarrollos agrícolas, también se usa, para satisfacer la demanda de agua para riego, el sistema de riego Zuata – Taguaiguay, constituido por los embalses que llevan dichos nombres. Sin embargo, es importante señalar que el área sembrada bajo riego ha disminuido considerablemente, producto del cambio en el uso de la tierra, pasando de ser agrícolas a tierras urbanas e industriales, debido a la alta concentración de población en la cuenca del Lago de Valencia. (Cañizales Navarro, 2006).

El comportamiento de los demás cuerpos de agua de importancia de la zona de estudio fue parecido entre sí, donde no presentaron un aumento constante, a diferencia del Lago de Valencia, sino que mostraron aumentos y disminuciones en sus áreas totales, que variaron a lo largo de los 30 años (ver Fig. 39). Estos cuerpos de agua son la laguna de Taguaiguay, y el embalse de Zuata, que se encuentran en el estado Aragua, y el embalse de Guataparó, perteneciente al estado Carabobo. En el Anexo N° 4 se aprecian las tablas con las áreas totales, para cada año de estudio, de los cuerpos de agua de la zona de interés.

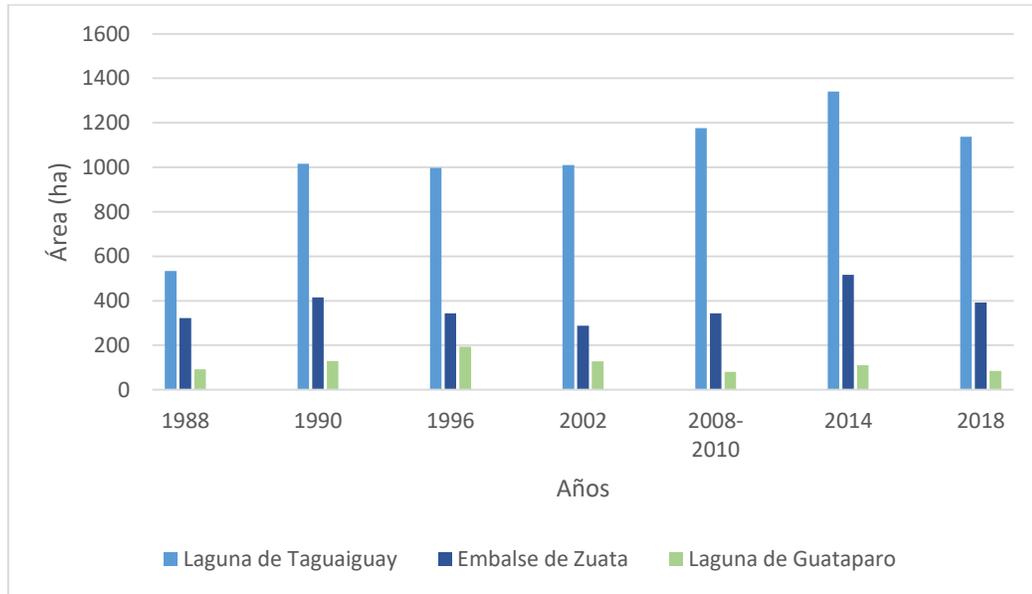


Fig. 39 Gráfico de las áreas en los cuerpos de agua de la zona de estudio desde 1988 hasta 2018

Fuente: Elaboración propia

La Laguna de Taguaiguay fue el receptor previsto de los efluentes de la planta de tratamiento del mismo nombre, por lo que ingresaron a él caudales adicionales del fluido desde 1988, lo cual explica el aumento de 1988 a 1990 de la superficie de la laguna; sin embargo, desde el 2012 fue denunciado por distintos expertos y medios de comunicación, que la Planta de Tratamiento Taguaiguay pasa meses sin prestar servicio y presenta deficiencias cuando lo presta (Albertti García & Abu Hadir, 2012).

#### 4.4. CAMBIOS DE COBERTURAS ENTRE 1988 Y 2018

Con las clasificaciones de toda la zona de estudio de 1988 y 2018 se realizó una comparación post-clasificación por medio del software ArcMAP. La comparación se llevó a cabo restando, píxel a píxel, las clasificaciones que se realizaron en estos dos años.

#### 4.4.1. Clasificaciones de 1988 y del 2018

Las cubiertas que se definieron para su identificación en la zona de estudio fueron cuerpos de agua, cultivos o zonas agrícolas, pastizales, suelo desnudo, zonas urbanas y bosques. Las clasificaciones se llevaron a cabo en los 3.700  $km^2$  que abarcó la zona de estudio seleccionada.

Además también se clasificaron en una categoría las nubes, para que no fuesen asignadas a ninguna de las otras clases, en especial a las zonas urbanas, ya que se encontró en las pruebas realizadas antes de las clasificaciones finales, que algunas zonas de las nubes se entremezclaban y eran asignadas de manera errónea a la clase urbana.

La categoría asignada para las nubes fue clasificada, sin embargo no se usó para el mapa final de las clasificaciones de cada año, ni para la comparación post-clasificación realizada, ya que estas no son un cubierta que pertenezca al terreno ni son estables en el tiempo.

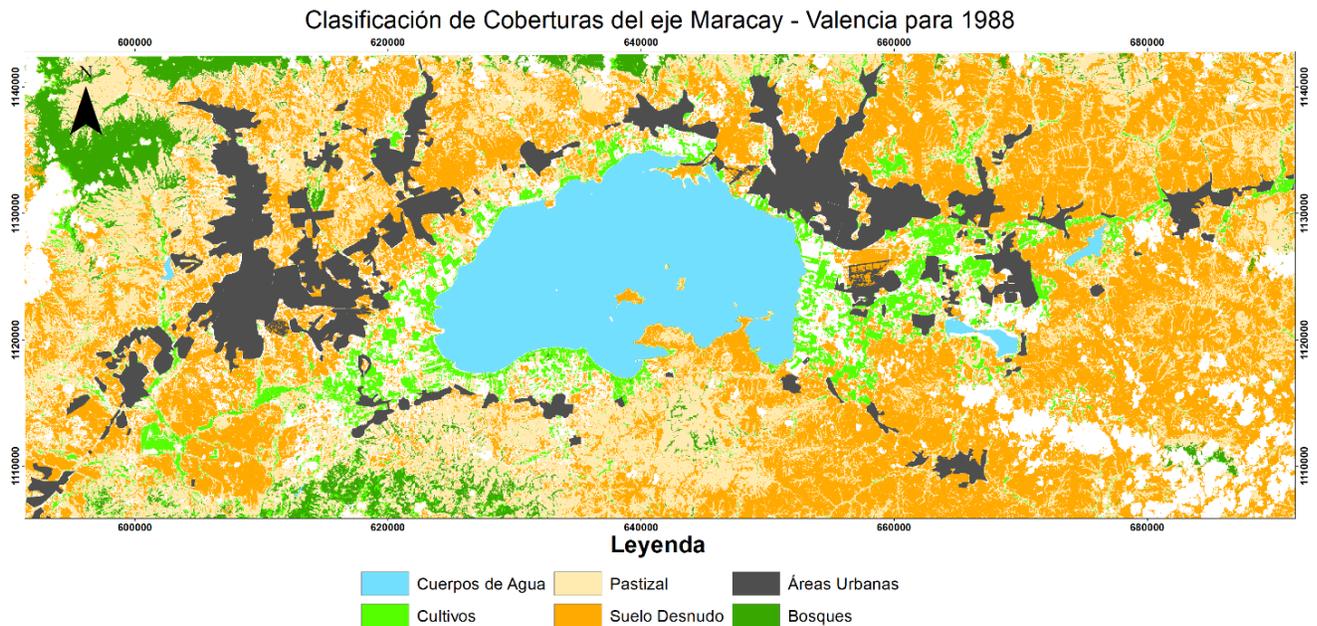
Tabla 37 Áreas clasificadas en cada clase para 1988 y 2018

CLASE	1988		2018	
	Área en píxeles	Área en ha	Área en píxeles	Área en ha
<b>CUERPOS DE AGUA</b>	449992	35279,373	545378	42757,635
<b>CULTIVOS</b>	246892	19356,333	285120	22353,408
<b>PASTIZAL</b>	1150560	90203,904	1258511	98667,262
<b>SUELO DESNUDO</b>	1555895	121982,168	868166	68064,214
<b>ZONA URBANA</b>	463544	36341,850	575180	45094,112
<b>BOSQUE</b>	189842	14883,613	110371	8653,086

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 37 se observan los valores obtenidos luego de las clasificaciones supervisadas por el método de máxima verosimilitud para los años 1988 y 2018. Se muestran los valores de las áreas para las clases utilizadas en hectáreas y cantidad de píxeles, la clase Urbana muestra un aumento en sus valores de área comparando los datos de 1988 con los clasificados en las imágenes del 2018, esto ocurrió en la mayoría

de las clases, siendo la clase de Bosques y de Suelo Desnudo las únicas que presentaron disminución en su área total en la zona de estudio.



*Fig. 40 Clasificación de Coberturas del eje Maracay - Valencia en 1988*

*Fuente: Elaboración propia*

En la Fig. 40 y en la Fig. 41 se observan las clasificaciones de coberturas realizadas en la zona de estudio para los años 1988 y 2018, respectivamente.

Para la clasificación de 1988 las clases que contaron con mayor área fueron las de Suelo Desnudo y Pastizal, teniendo 121.892 ha y 90.203 ha, como se puede observar en la Tabla 37. Para el 2018 estas dos clases fueron también las que presentaron mayor área en la zona de estudio, sin embargo, la clase de Pastizales, con 98.667 ha, fue la mayor de ambas, seguida por la clase de Suelo Desnudo, que mostró una disminución en su área para posicionarse con 68.064 ha.

La presencia de zonas agrícolas o cultivos, se observa principalmente en los alrededores del Lago de Valencia, y cercanos a las áreas urbanas clasificadas. La

cuenca del lago es considerada como suelo de alta fertilidad, sin embargo, como se puede apreciar en la clasificación llevada a cabo en las imágenes del 2018, estas zonas de cultivo se han visto reducidas por el crecimiento del Lago y también por el crecimiento de las zonas urbanas.

Clasificación de Coberturas del eje Maracay - Valencia para 2018

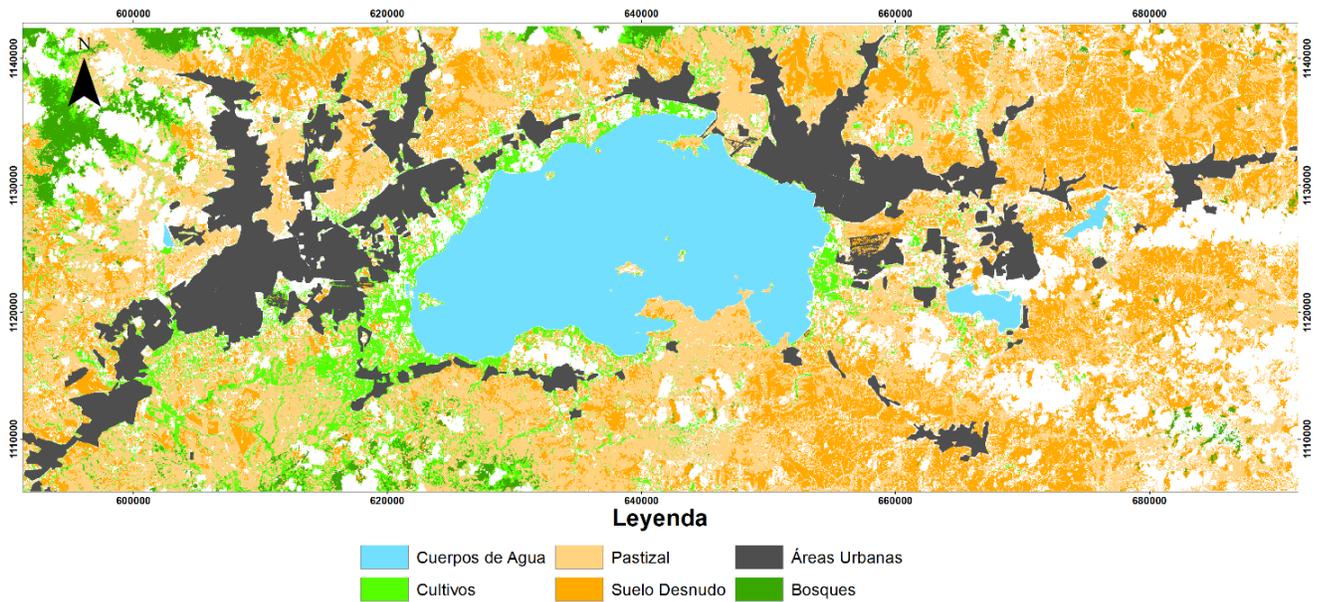


Fig. 41 Clasificación de Coberturas del eje Maracay - Valencia en el 2018

Fuente: Elaboración propia

En la zona este del Lago de Valencia en la clasificación del 2018 se observa la disminución de las zonas agrícolas, como también en el eje que se encuentra en la parte norte del Embalse Zuata, donde en 1988, se observaba una considerable presencia de cultivos, para luego pasar a formar parte de las clases de pastizales y suelos desnudos.

Los Cuerpos de Agua identificados fueron los cuatro principales lagos y embalses presentes en la zona de estudio, estos son el Lago de Tacarigua (Lago de Valencia), la Laguna de Taguaguay, el Embalse de Zuata y la Laguna de Guataparó. El Lago de Valencia, como ya ha sido mencionado, mostró un crecimiento en su área,

y en general en toda la clase, ese fue el comportamiento observado entre los dos años de las clasificaciones.

La mayor presencia de la clase de bosque se encuentra localizada en la zona norte y noroeste de las imágenes clasificadas, se presume que la disminución de esta clase, entre 1988 al 2018, se debe principalmente a la presencia de nubes en dichas zonas de la última imagen, que limitó la correcta clasificación de las cubiertas que se encuentran debajo de estas.

Estos crecimientos y disminuciones en las áreas de las seis clases trabajadas se observan en la siguiente sección, donde se aprecian los resultados de las diferencias entre estas clasificaciones.

#### **4.4.2. Diferencias en las clasificaciones de 1988 y 2018**

Teniendo ambas clasificaciones se procedió a realizar la diferencia de píxeles en estas, obteniendo 29 categorías según cuáles cambios se vieron entre las imágenes. Se presentan a continuación dichas categorías, donde se observan los píxeles y las áreas donde ocurrieron, o no, cambios en la cobertura.

Se muestran en la Tabla 38 los cambios en las coberturas de las clases, señalando a cuál clase pertenecía en la clasificación de 1988, y a cuál clase pasó a ser en la clasificación de las imágenes del 2018, además se muestran las áreas que no presentaron cambios en las clases a las que pertenecían.

Tabla 38 Diferencia en las clases de las clasificaciones entre 1988 y 2018

Cambios de Clases				Áreas		
				Píxeles	km <sup>2</sup>	ha
<i>De</i>	<b>Agua</b>	<i>a</i>	<b>Bosque</b>	74	0,058	5,802
<i>De</i>	<b>Cultivos</b>	<i>a</i>	<b>Bosque</b>	32752	25,678	2567,757
<i>De</i>	<b>Bosque</b>	<i>a</i>	<b>Pastizal</b>	34939	27,392	2739,218
<i>De</i>	<b>Bosque</b>	<i>a</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	2763	2,166	216,619
<i>De</i>	<b>Urbano</b>	<i>a</i>	<b>Agua</b>	1067	0,837	83,653
<i>De</i>	<b>Urbano</b>	<i>a</i>	<b>Cultivos</b>	41	0,032	3,214
<i>De</i>	<b>Bosque</b>	<i>a</i>	<b>Urbano</b>	645	0,506	50,568
<i>De</i>	<b>Urbano</b>	<i>a</i>	<b>Pastizal</b>	18	0,014	1,411
<i>De</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	<i>a</i>	<b>Agua</b>	6810	5,339	533,904
<i>De</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	<i>a</i>	<b>Cultivos</b>	39628	31,068	3106,835
<i>De</i>	<b>Urbano</b>	<i>a</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	17	0,013	1,333
<i>De</i>	<b>Pastizal</b>	<i>a</i>	<b>Agua</b>	12033	9,434	943,387
<i>De</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	<i>a</i>	<b>Pastizal</b>	454127	356,036	35603,557
<i>De</i>	<b>Pastizal</b>	<i>a</i>	<b>Cultivos</b>	91362	71,628	7162,781
<i>De</i>	<b>Cultivos</b>	<i>a</i>	<b>Agua</b>	36149	28,341	2834,082
<b>Sin cambios</b>				2212232	1734,390	173438,989
<i>De</i>	<b>Agua</b>	<i>a</i>	<b>Cultivos</b>	318	0,249	24,931
<i>De</i>	<b>Cultivos</b>	<i>a</i>	<b>Pastizal</b>	52663	41,288	4128,779
<i>De</i>	<b>Pastizal</b>	<i>a</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	165467	129,726	12972,613
<i>De</i>	<b>Agua</b>	<i>a</i>	<b>Pastizal</b>	36	0,028	2,822
<i>De</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	<i>a</i>	<b>Urbano</b>	54346	42,607	4260,726
<i>De</i>	<b>Cultivos</b>	<i>a</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	18571	14,560	1455,966
<i>De</i>	<b>Agua</b>	<i>a</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	27	0,021	2,117
<i>De</i>	<b>Pastizal</b>	<i>a</i>	<b>Urbano</b>	19956	15,646	1564,550
<i>De</i>	<b>Cultivos</b>	<i>a</i>	<b>Urbano</b>	7154	5,609	560,874
<i>De</i>	<b>Suelo Desnudo</b>	<i>a</i>	<b>Bosque</b>	3515	2,756	275,576
<i>De</i>	<b>Pastizal</b>	<i>a</i>	<b>Bosque</b>	25275	19,816	1981,560
<i>De</i>	<b>Bosque</b>	<i>a</i>	<b>Cultivos</b>	4800	3,763	376,320
<i>De</i>	<b>Bosque</b>	<i>a</i>	<b>Agua</b>	16	0,013	1,254

Fuente: Elaboración propia

Uno de los cambios más notables a lo largo de los 30 años del estudio fue la transición de zonas agrícolas o cultivos que pasaron a formar parte, principalmente, de las aguas del Lago de Valencia, siendo 2.834 ha las que pasaron por este proceso, estas

zonas se ven de color rojo en la Fig. 42. También se observó la pérdida de 83,6 ha de áreas urbanas al ser inundadas por estas aguas (ver Tabla 38).

La sección de áreas Sin Cambio, que se observan de color gris claro en la Fig. 42, son las que representan una mayor cantidad en la diferencia entre las clasificaciones, teniendo 173.439 hectáreas que se mantuvieron estables para el año 2018 con respecto a su clasificación original de 1988.

Las zonas del mapa de la Fig. 42 que se encuentran de color blanco representan las áreas donde no se contaba con una clasificación definida para uno o ambos años de la comparación, ya sea porque no fueron asignadas a ninguna categoría luego de la clasificación supervisada o porque hubo nubosidad en esas áreas en alguna de las imágenes satelitales usadas y no se pudo clasificar la cubierta.

Diferencia entre las Coberturas del eje Maracay - Valencia del 2018-1988

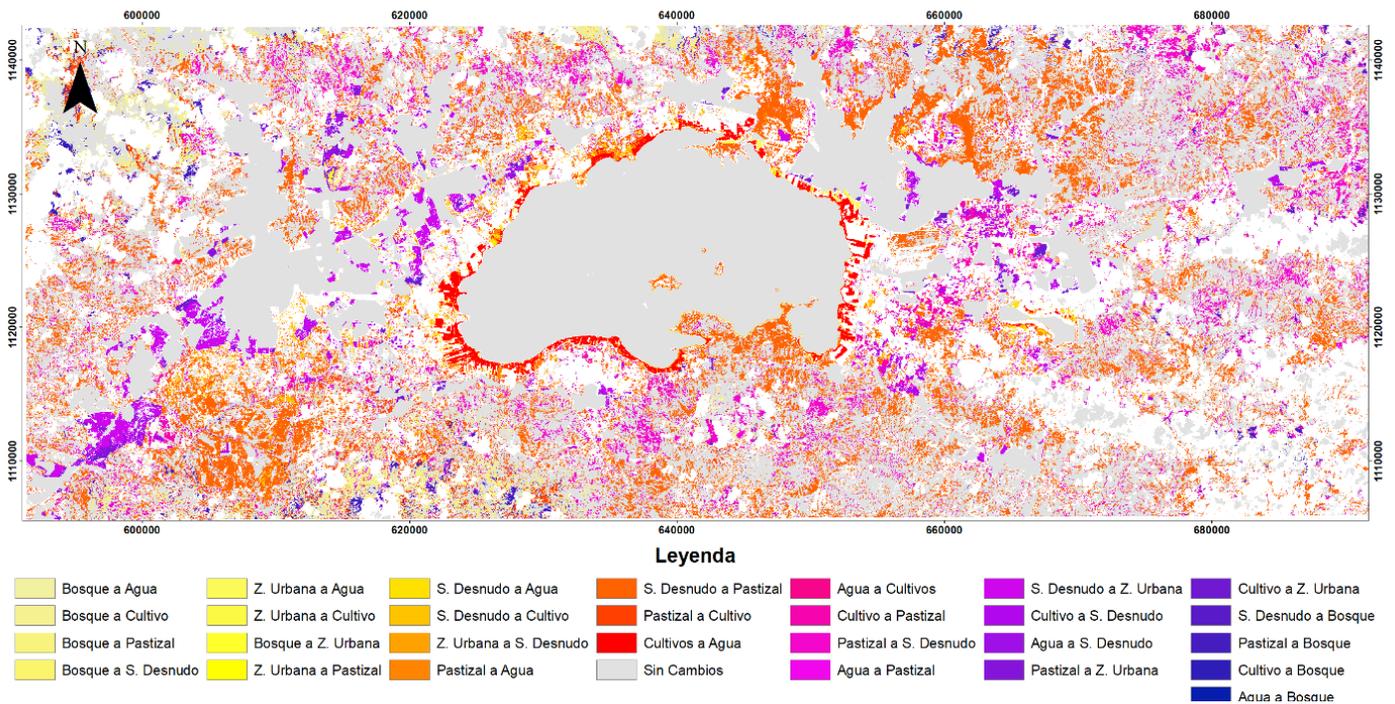


Fig. 42 Diferencias entre las clasificaciones de coberturas del eje Maracay - Valencia para 2018 y 1988

Fuente: Elaboración propia

Los cambios de Suelo Desnudo a Pastizal se observan a lo largo de todo el mapa de diferencias, 35.603,5 ha pasaron por este cambio a lo largo de los 30 años estudiados; como también el cambio inverso, donde 12.972,6 ha en la clasificación inicial que formaban parte de la clase de Pastizal pasaron a ser Suelo Desnudo. Estos dos escenarios fueron los cambios de clases más comunes en la zona de estudio.

Autores como Cañizales (2006), afirman que con base en los datos de la Agencia de Cuenca del Lago de Valencia (2001), el área sembrada bajo riego (en las adyacencias del Lago de Valencia) ha disminuido considerablemente, producto del cambio en el uso de la tierra, pasando de ser agrícolas a tierras urbanas e industriales; esto debido a la alta concentración de población en la Cuenca del Lago de Valencia, favorecida por el crecimiento industria de la región, la cercanía a los principales centros del mercado nacional, la proximidad a la Capital de la República, características físicas adecuadas y la existencia de una buena red vial que fortalece las relaciones funcionales con otros importantes centros urbanos del país, lo cual ha generado conflictos por el uso de la tierra.

Esta afirmación se ve reflejada en 560 ha de cultivos, que cambiaron para formar parte de la clase de áreas urbanas para la clasificación del 2018. También se aprecian 4.260,7 ha que estaban originalmente en la clase de Suelo Desnudo que luego fueron incluidas en las zonas urbanas. La clase de Pastizal también contó con secciones de su área total siendo clasificadas en el 2018 como áreas urbanas, específicamente 1.564,5 hectáreas de la zona de estudio.

Las áreas donde se observan cambios o choques entre las clases, presentan conflictos de uso de suelo; para establecer las áreas de conflicto es necesario comparar el mapa de uso actual de la zona, con mapas del uso potencial, que son responsabilidad de las alcaldías y gobernaciones. Mejoras e implementaciones de PDUL y Planes de Ordenamiento Estadales, permitirían conocer en detalle estas zonas de conflicto y trabajar para conseguir la correspondencia entre el uso existente y las capacidades productivas del ambiente.

## CONCLUSIONES

Luego de realizar los procedimientos técnicos planteados en la metodología y finalizado el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

El análisis realizado confirma, tomando en cuenta la resolución espacial (30x30) y la gran heterogeneidad espacial en la respuesta espectral de las zonas urbanas, la viabilidad de las imágenes Landsat 4 y 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI para la evaluación de los procesos de expansión urbana en las áreas metropolitanas y sus adyacencias. Las técnicas de teledetección son una alternativa ideal, rápida y económica para afrontar los problemas de planificación urbana y de cambio de coberturas sobre la superficie terrestre.

El análisis multitemporal realizado mostró un incremento importante de suelo de uso urbano, principalmente entre 1988 y 2010, considerado como tipo de Crecimiento Normal, causado por el desarrollo económico y el crecimiento poblacional de la zona, con un porcentaje de crecimiento para los 30 años estudiados de 23,97%, comparable con los arrojados por el Instituto Nacional de Estadística para el 2001.

Del 2010 al 2018, se observó una disminución en los porcentajes de crecimiento de las zonas urbanas, pasando de 3,11%, en el período 2010-2014, a 0,40% entre los años 2014 y 2018, esto se atribuye principalmente a la crisis económica que atraviesa Venezuela, lo que limita la capacidad de construcción y de desarrollo de la sociedad, como consecuencia de las políticas públicas del Estado.

La zona urbana del área de estudio se expande siguiendo principalmente dos tendencias, crecimiento en torno a los ejes viales de la zona y expansión del núcleo central de las metrópolis, siendo los municipios que presentaron mayores porcentajes de crecimiento los limítrofes a las capitales de los estados Carabobo y Aragua.

El Lago de Valencia presentó un continuo incremento en su área en el período estudiado, siendo la etapa con mayor porcentaje de crecimiento (de 5,23%) entre 2002 y 2010, y con un porcentaje total de crecimiento de 1988 a 2018 de 19,81%, debido principalmente a la entrada de nuevos caudales de agua, de ríos cercanos, desde 1978 al lago.

Los principales cambios en las cubiertas presentes en la zona de estudio fueron los de Suelos Desnudos a Pastizales, y viceversa, seguidos por el cambio de las clases de Zonas Agrícolas que pasaron a formar parte de los Cuerpos de Agua y las Zonas Urbanas, y además hubo un total de 173.439 ha que se mantuvieron estables, sin cambios en sus clases, entre los años 1988 y 2018.

La búsqueda de antecedentes e información respecto a la zona de estudio fue, en su mayor parte, infructuosa. La desinformación, la carencia de datos históricos y recientes sobre coberturas, usos y cambios de suelo en la región de estudio es notoria por parte de los entes gubernamentales encargados. Este vacío de información confiable y oportuna tiene como una de sus consecuencias la falta de PDUL en la mayoría de los municipios que componen el área de interés.

La interpretación y clasificación de las imágenes satelitales demostraron ser una herramienta de gran utilidad para analizar los patrones de la expansión urbana en el eje Maracay – Valencia, de la zona central de Venezuela, así como también para la identificación de las diferentes clases que componen las cubiertas de esta superficie heterogénea. El uso integrado de sensores remotos y SIG son tecnologías efectivas para entender las dinámicas espaciales de los asentamientos urbanos y sus cambios.

## RECOMENDACIONES

Considerando los resultados obtenidos, los análisis y las conclusiones presentadas en el trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones:

- La implementación de estudios multitemporales de este tipo en otras zonas de Venezuela que cuenten con significantes asentamientos humanos llevaría a importantes datos sobre el comportamiento del urbanismo en el país a lo largo de su historia.
- Continuar con la línea de investigación planteada en este trabajo tomando en cuenta sensores con mayores resoluciones espaciales, lo que permitiría obtener un mayor detalle para la evaluación de la conducta que presentan las coberturas, en especial las áreas urbanas.
- A partir de los resultados alcanzados en las precisiones del método de clasificación supervisada, se sugiere la evaluación de otros algoritmos de clasificación diferentes al utilizado, para intentar obtener mejores exactitudes en todas las clases que se busquen clasificar.
- Contrastar los datos de este trabajo, o realizar otros que tomen en cuenta las características poblacionales que presentan las metrópolis, para obtener resultados que tomen en consideración las densidades, migraciones internas y otros rasgos inherentes en los asentamientos humanos.
- Se invita a los entes rectores a la creación, implementación y cumplimiento de PDUL y Planes de Ordenamiento Estadales, como lo dicta la constitución, para así contar con un instrumento de control y planificación para las futuras expansiones en las áreas urbanas presentes en el país, incluyendo principalmente los municipios que rodean las áreas metropolitanas de los estados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albertti García, I. A., & Abu Hadir, O. M. (2012). *Propuesta de mejoramiento de la Planta de Tratamiento de agua residuales Taiguaiguay*. Valencia: Universidad de Carabobo. Obtenido de <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/7418>
- Alonso, J. (13 de Febrero de 2006). *Departamento de Geografía - UM*. Recuperado el Junio de 2019, de Universidad de Murcia: <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node72.html>
- Ambrosio, G., González, J., & Arévalo, V. (2002). *Corrección Radiométrica y Geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Málaga: Universidad de Málaga.
- Anderon, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*. U.S. Geological Survey Profesional Paper 964. Washington, D.C.: USGS.
- Arango Carvajal, R. A., Chilito Piamba, J. C., & Cifuentes Sanabria, A. (2016). *Análisis Multitemporal de la Expansión Urbana de la Ciudad de Popayán, Cauca entre los años 1989, 2002 y 2014*. Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Manizales: Universidad de Manizales.
- Araque Ruiz, M. S., & Vásquez Terán, C. G. (2011). *Aplicación de la Metodología para la Actualización Cartográfica mediante la ortorectificación en bloques a partir de imágenes satelitales*. Caracas: UCV.
- ASPRS. (2014). *Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. doi:10.14358/PERS.81.3.A1-A26
- Barnsley, M., Moller-Jensen, L., & Barr, S. (2001). *Inferring urban land use by spatial and structural pattern recognition*. Londres: J. -P. Donnay, M. Barnsley, & P. Longley (Eds.), Remote sensing and urban analysis. Taylor and Francis.
- Baudot, Y. (2001). *Geographical analysis of the population of fast-growing cities in the third world*. Londres: J. -P. Donnay, M. Barnsley, & P. Longley (Eds.), Remote sensing and urban analysis. Taylor and Francis.
- Brewer - Carías, A. (Octubre de 1967). El régimen de gobierno municipal en el Distrito Federal venezolano. *Crónicas del IV Congreso Hispano Luso Americano Filipino de Municipios*, 759-845.

- Caballero Caguado, O. D. (2015). *Propuesta Metodológica para la Fusión y Ortorección de imágenes del Satélite Miranda, Orientado a la Actualización Cartográfica*. Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura. Caracas: UCV.
- Canada Centre for Remote Sensing. (s.f.). *Fundamental of Remote Sensing*. Ontario: Natural Resources Canada.
- Cañizales Navarro, J. A. (2006). *Evaluación del riesgo de inundación por el ascenso del nivel de Lago de Valencia en la zona sur de Maracay Estado Aragua*. UCV, Departamento de Ingeniería Agrícola. Maracay: Universidad Central de Venezuela.
- Capra Ribeiro, F. (2017). *Actualización sobre la megalópolis del centro-norte de Venezuela*. Universidad central de Venezuela, Facultad de Arquitectura. Caracas: FAU - Trienal de Investigación.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Primera ed.). Madrid, España: Ediciones Rialp, S.A.
- CIAF. (2013). *Productos Landsat Data Continuity Mision - Landsat 8*. IGAC, Centro de Investigación y Desarrollo. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- CNES. (2016). *CNES Projects Library - SPOT*. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de Centre National D'Études Spatiales: <https://spot.cnes.fr/en/SPOT/index.htm>
- Congalton, R. G. (1986, Marzo). Accuracy Assessment: A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(3), 397-399.
- Congalton, R. G. (2001). Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 321-328.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (2da ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Delgado Linero, M. G. (2012). *Caracas, Maracaibo, Valencia, Barquisimeto, Maracay. Cambios demográficos en las metrópolis de Venezuela*. Políticas de Vivienda y Derechos Habitacionales. Reflexiones sobre la justicia Espacial en la Ciudad Latinoamericana. Bogotá: X Seminario Investigación Urbana y Regional.
- ESA. (2014). *eoPortal Directory - SPOT-4*. Recuperado el 07 de Julio de 2019, de EO - Sharing Earth Observation Resources: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-4>
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales de Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Badajoz: Universidad de Extremadura.

- Gallardo Vaudo, C. (2018). *Regimen Jurídico de las Áreas Metropolitanas y Distritos Metropolitanos*. Caracas: SaberULA. Obtenido de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/43443/articulo3.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- García Mora, T. J. (2008). *Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México*. Boletín del Instituto de Geografía, Investigaciones Geográficas. UNAM.
- Grey, W., Luckman, A., & Holland, D. (2003). *Mapping urban change in the UK using satellite radar interferometry*. Waller, UK: University of Wales Swansea.
- Houtman, V. (2001). *Actualización del Plan de Ordenamiento Local - Municipio San Diego*. Valencia: VHARQ Proyectos.
- IGVSB. (2002). *Manual de Procesos Técnicos de Cartografía Básica*. Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar, Caracas.
- INEGI, Conapo y Sedesol. (2012). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas*. México.
- Jensen, J. R., & Cowen, D. C. (5 de May de 1999). Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(5), 611-622.
- LANDSAT SPPA. (2015). *IDEAS - Landsat Products Description Document*. Bedfordshire: Telespazio VEGA UK Ltd.
- Machado, J. J. (2016). *Clase 7: Aspectos geométricos de las imágenes satelitales*. Fotointerpretación, DIGA. Caracas: UCV.
- Machado, J. J. (2016). *Clase 8: Claves de Interpretación Visual de Imágenes*. DIGA, Fotointerpretación. Caracas: UCV.
- Mahdi Sabet, S., Ab. Latif, I., & Pavlos, K. (2011). *Three decades of urban growth in the city of Shiraz, Iran: A remote sensing and geographic information systems application*. Malasia: Elsevier Ltd.
- Martinez, J. M. (2015). *Abordajes de la Problemática del Lago de Valencia durante el siglo XX e inicios del XXI*. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Molina, G. (2004). *Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando la teledetección: Maracay estado Aragua-Venezuela*. Mérida, Venezuela: Revista Geográfica Venezolana, Vol. 46(2). Universidad de Los Andes.

- NASA. (22 de Mayo de 2019). *A Landsat Timeline*. Recuperado el 3 de Junio de 2019, de Landsat Science: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/>
- Negrón, M. (2001). *Ciudad y Modernidad*. Caracas: Ediciones del Instituto de Urbanismo (FAU - UCV).
- Observatorio de la Sostenibilidad en España. (2006). *Cambios de la ocupación del suelo en España, implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, Madrid: Observatorio para la Sostenibilidad en España.
- OCEI. (2003). *XIII Censo General de Población y Vivienda Estado Aragua y Carabobo*. Venezuela: Oficina Central de Estadística e Informática.
- Ordenanza del Plan de Desarrollo Urbano Local, PDUL de la Ciudad de Maracay Municipio Girardot Estado Aragua. (2018). *Gaceta Oficial Municipal - República Bolivariana de Venezuela Estado Aragua Municipio Girardot*. N° 23.246 Extraordinario. Maracay: 09 de mayo de 2018.
- Pérez Bustamante, L., & Salinas Varela, E. (2007). *Crecimiento Urbano y Globalización: Trnasformación del área metropolitana de Concepción, Chile*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Plan Rector de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Valencia - Guacara. (1992). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*. Ministerio de Desarrollo Urbano, N° 4.479 extraordinario. Caracas: 20 de octubre de 1992.
- Recio, J. A., Pardo, J. E., Ruiz, L. A., Sarría, A., & Córcoles, P. (2005). *Detección y Cartografiado de los Procesos de Expansión Urbano mediante técnicas combinadas de teledetección y S.I.G*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Riazanoff, S. (2004). *SPOT 123-4-5 Geometry Handbook*. GAEL Consultant. Champs-sur-Marne: CNES.
- Ridd, M. K., & Hipple, J. D. (2006). *Remote Sensing of Human Settlements* (Tercera ed., Vol. 5). Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Rogan, J., & Chen, D. (2003). *Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change*. Clark University. Worcester, Massachusetts: Elseiver Ltd. doi:10.1016/S0305-9006(03)00066-7
- Rojas Grillo, Z. (1980). *Aplicación del análisis geomórfico para el estudio del crecimiento urbano en la Cuenca del Lago de Valencia*. Facultad de Humanidades y Educación, Escuela de Geografía. Caracas: UCV.

- Ruiz Fernández, L. Á., Pérez, A., Estornell Cremades, J., & Ruiz Marín, R. (2007). *La Teledetección como Herramienta de análisis del Crecimiento Urbano y su representación en 3D*. Universidad Politécnica de Valencia, Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Valencia: Arquitectura, Ciudad y Entorno.
- Serra, P., Pons, X., & Saurí, D. (2003). *Post-classification change detection with data from different sensors: Some accuracy considerations*. Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Geografia. Barcelona: International Journal of Remote Sensing. doi:10.1080/0143116021000021189
- The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. (2009). *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook*. Enschede, Holanda: ITC.
- UCLM. (2012). *AUDES - Modelo y Definiciones*. Obtenido de AUDES - Áreas Urbanas de España: <http://alarcos.esi.uclm.es/per/fruiz/audes/modelo.htm>
- UNESCO. (2005). *Educación y desarrollo urbano: Alianza por un futuro sostenible*. Educación para el Desarrollo Sostenible: Decenio de las Naciones Unidas 2005-2014.
- Universidad de Murcia. (2015). *Universidad de Murcia*. Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de Tema 3: Plataformas, sensores y canales: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>
- UPEL. (2006). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales* (3ra reimpresión ed.). Caracas: Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- USGS - EROS Data Center. (2003). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. Sioux Falls: USGS Fact Sheet 071-03.
- USGS. (2017). *Landsat 8 - Level 1 - Data Format Control Book (DFCB)*. US Geological Survey, Department of the Interior. South Dakota: EROS.
- USGS. (1 de Agosto de 2018). *Archivos USGS: Earth Observing 1 (EO-1)*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de Archivos USGS: <https://archive.usgs.gov/archive/sites/eo1.usgs.gov/hyperion.html>
- USGS. (2019). *LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook*. US Geological Survey, Department of the Interior. South Dakota: EROS.
- Venezuela. (1972). La Victoria - Carta: 6746. *Dirección de Cartografía Nacional, Edición 3 -DCN*. Mapa - Escala 1:100.000.

- Venezuela. (1976). Campo de Carabobo - Carta: 6546. *Dirección de Cartografía Nacional, Edición 1 -DCN*. Mapa - Escala 1:100.000.
- Venezuela. (1991). Lago de Valencia - Carta: 6646. *Dirección de Cartografía Nacional, Edición 3 - DCN*. Mapa - Escala 1:100.000.
- Viana, M. (2017). *La Construcción de la Autopista Regional Central y su Influencia en el Desarrollo Urbano-Industrial del eje Caracas-Maracay-Valencia*. Caracas: Universiad Católica Andrés Bello.
- Xiao, J., Shen, Y., & Ge, J. (2004). *Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing*. China: Chiba University.
- Zhe Zhu, & Woodcock, C. E. (2014). *Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data*. Boston University, Department of Earth and Environment. Boston: Center for Remote Sensing.
- Zhe Zhu, Wulder, M., Roy, D., Woodcock, C., Hansen, M., & Otros. (2019). *Benefits of the free and open Landsat data policy*. Connecticut: Elsevier inc.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>

## ANEXOS

### ANEXO N°1: Puntos de verificación para las imágenes Landsat y SPOT

Imagen	4053	Año		1988				
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #10	647397,712	1132908,83	647835,332	1132920,64	424,188	0,196	0,303	0,361
GCP #11	617696,324	1122308,18	617990,917	1122301,79	427,16	-0,778	0,24	0,814
GCP #12	652068,248	1115576,07	652070,117	1115568,55	487,014	-0,342	-0,539	0,638
GCP #13	666807,864	1128829,06	666815,587	1128834,88	467,586	0,115	-0,495	0,508
GCP #14	668939,806	1123707,14	668955,069	1123707,45	454,321	-0,843	0,005	0,843
GCP #15	622969,999	1139025,56	622987,051	1139036,78	493,332	-0,062	0,383	0,388
Check Point Error:						0,4979	0,3722	0,6217

Imagen	5053	Año		1988				
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #9	634872,986	1114818,01	634875,242	1114806,24	443,097	-0,48	-0,438	0,649
GCP #10	616313,847	1112568,04	616320,615	1112578,38	433,065	0,518	0,166	0,544
GCP #11	599264,717	1115167,21	599276,475	1115201,68	448,774	-0,559	0,125	0,573
GCP #12	610271,183	1120904,14	610264,649	1120923,95	455,951	-0,021	-0,63	0,63
GCP #13	613357,357	1130833,11	613333,662	1130851,95	460,251	-0,397	0,313	0,506
GCP #14	629105,4	1133054,49	629081,91	1133065,31	426,613	-0,336	-0,085	0,347
Check Point Error:						0,4246	0,35004	0,5506

Imagen	4053	Año		1990				
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #10	647397,712	1132908,83	647835,332	1132920,64	424,188	0,843	0,24	0,876
GCP #11	617969,324	1122308,18	617990,917	1122301,79	427,16	0,058	0,182	0,191
GCP #12	652067,264	1115576,07	652070,117	1115568,55	487,014	-0,065	-0,64	0,644
GCP #13	666809,059	1128829,06	666815,587	1128834,88	467,586	-0,044	-0,212	0,217
GCP #14	668939,806	1123707,14	668955,069	1123707,45	454,321	-0,281	-0,067	0,288
GCP #15	622969,999	1139025,56	622987,051	1139036,78	493,332	0,653	-0,268	0,706
Check Point Error:						0,4518	0,3219	0,5548

Imagen 5053		Año 1990						
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #9	634872,788	1114818,29	634875,843	1114806,24	443,097	0,321	-0,752	0,818
GCP #10	616313,847	1112568,04	616320,615	1112578,38	433,065	-0,204	0,276	0,343
GCP #11	599264,717	1115167,21	599276,475	1115201,68	448,774	-0,655	0,169	0,677
GCP #12	610271,183	1120904,14	610264,649	1120923,95	455,951	-0,336	-0,568	0,66
GCP #13	613357,357	1130833,11	613333,662	1130851,95	460,251	-0,38	0,325	0,5
GCP #14	629106,038	1133054,14	629081,91	1133065,31	429,613	-0,586	0,249	0,636
Check Point Error:						0,4423	0,4398	0,6238

Imagen 4053		Año 1996						
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #10	647397,722	1132908,84	647385,332	1132920,64	424,188	0,09	-0,144	0,168
GCP #11	622921,877	1120908,07	622935,454	112091,162	427,16	0,336	-0,672	0,751
GCP #12	652068,248	1115576,07	652070,117	1115568,55	487,014	-0,013	-0,567	0,567
GCP #13	666807,864	1128829,06	666815,587	1128834,88	467,586	-0,201	-0,423	0,469
GCP #14	668939,806	1123707,14	668955,069	1123707,45	454,321	-0,965	0,061	0,967
GCP #15	626979,001	1133108,01	626991,353	1133114,67	493,332	0,488	0,491	692
Check Point Error:						0,4698	0,4682	0,6632

Imagen 5053		Año 1996						
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #9	634870,08	1114818,11	634875,843	1114806,24	443,097	0,228	-0,352	0,419
GCP #10	616315,027	1112568,02	616320,615	1112578,38	433,065	0,139	0,035	0,144
GCP #11	599264,717	1115167,21	599276,475	1115201,68	448,774	-0,084	0,104	0,133
GCP #12	610271,183	1120904,14	610264,646	1120923,95	455,951	0,614	-0,708	0,937
GCP #13	613357,357	1130833,11	613333,662	1130851,95	460,251	-0,173	0,307	0,353
GCP #14	629103,878	1133054,2	629081,91	1133065,31	429,613	0,267	0,287	0,392
Check Point Error:						0,3044	0,3683	0,4778

Imagen 4053		Año 2002						
Punto	X (m)	Y(m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #10	647397,712	1132908,83	647385,332	1132920,64	424,188	0,09	-0,143	0,169
GCP #11	617969,324	1122308,18	617990,917	1122301,79	427,16	-0,39	0,192	0,39
GCP #12	652068,248	1115576,07	652070,117	1115568,55	487,014	-0,823	-0,48	0,953
GCP #13	666807,864	1128829,06	666815,587	1128834,88	467,586	0,413	-0,761	0,866
GCP #14	668939,806	1123707,14	668955,069	1123707,45	454,321	-0,65	-0,022	0,65
GCP #15	622969,999	1139025,56	622987,051	1139036,78	493,332	0,61	-0,696	0,925
Check Point Error:						0,5426	0,4745	0,7208

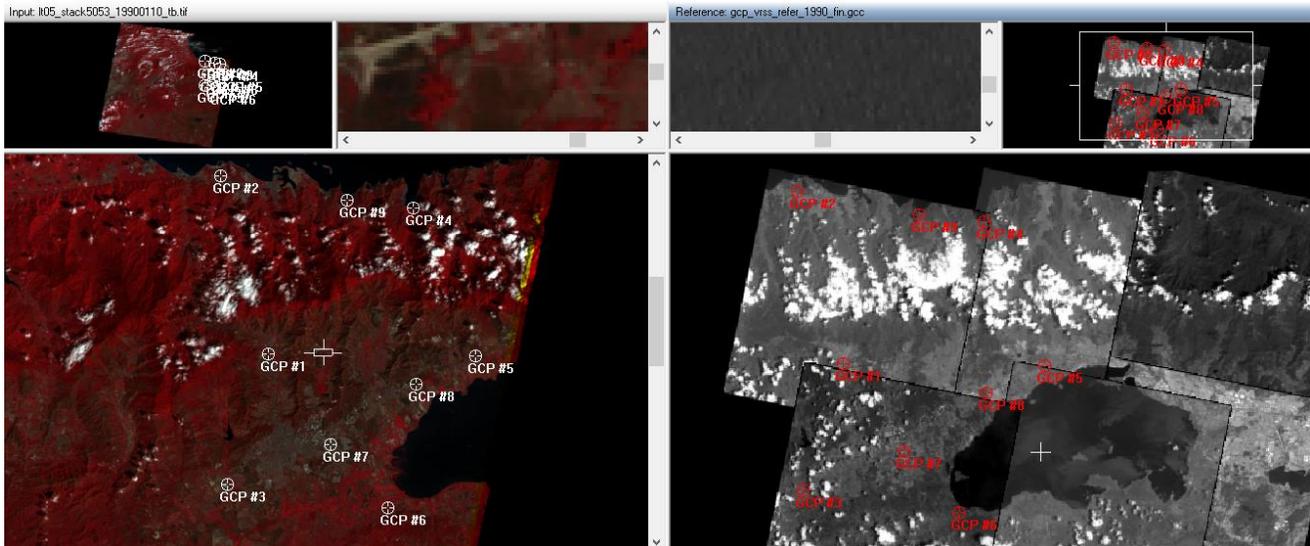
Imagen 5053		Año 2002						
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #9	634872,872	1114818,41	634875,843	1114806,24	443,097	0,14	-0,839	0,851
GCP #10	616313,847	1112568,04	616320,615	1112578,38	433,065	0,388	0,23	0,451
GCP #11	599264,717	1115167,21	599276,475	1115201,68	448,774	-0,39	0,149	0,418
GCP #12	610271,183	1120904,14	610264,649	1120923,95	455,951	-0,025	-0,589	0,59
GCP #13	313357,357	1130833,11	613333,662	1130851,95	460,251	-0,311	0,34	0,461
GCP #14	629106,038	1133054,14	629081,91	1133065,31	429,613	-0,61	0,275	0,669
Check Point Error:						0,3634	0,4687	0,5931

Imagen 887		Año 2010		SPOT 657-329 1				
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$
GCP #11	617696,324	1122308,18	617990,918	1122301,79	427,16	-0,135	0,606	0,621
GCP #12	652883,215	1117139,92	652386,397	1117064,66	427,303	0,037	0,95	0,95
GCP #13	656698,87	1115080,79	656229,721	1115014,5	460,059	0,477	-0,97	1,081
GCP #14	666346,568	1125084,5	665880,718	1125007,94	455,446	-0,238	-0,553	0,603
GCP #15	668835,104	1134068,5	668388,171	1133994,2	497,566	0,449	0,309	0,545
GCP #16	677761,962	1116847,91	677375,385	1116796,71	618,466	-0,825	-0,141	0,837
GCP #17	686612,836	1131164,81	686226,122	1131075,69	566,675	-0,825	-0,38	0,908
Check Point Error:						0,5162	0,6298	0,8143

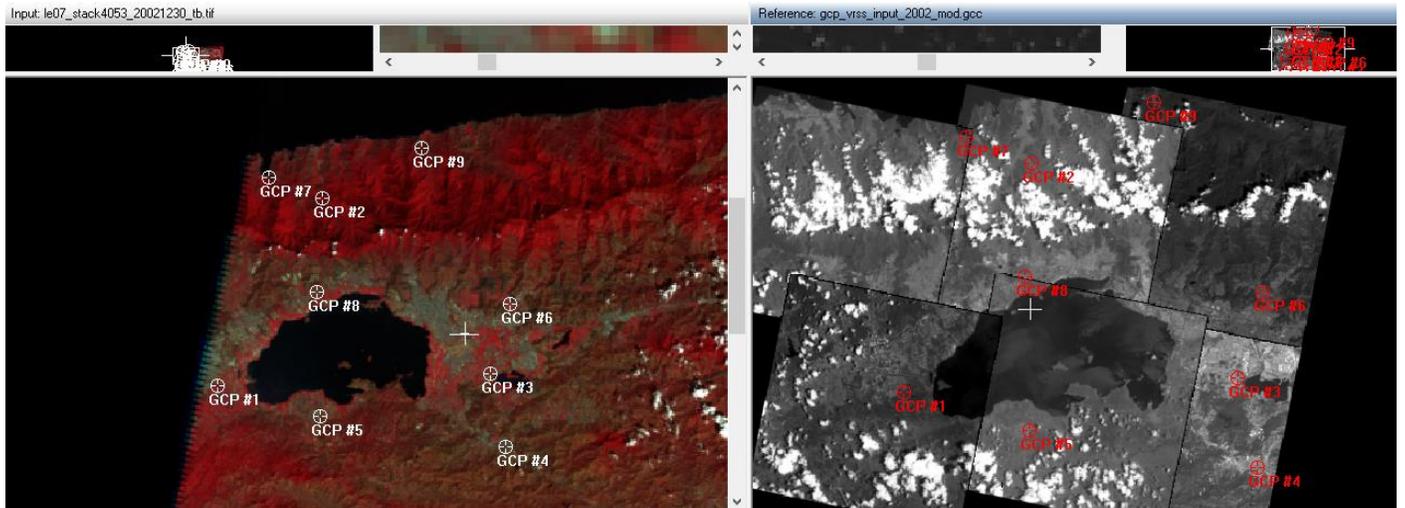
Imagen	3961	Año		2008	SPOT	657-329 2			
Punto	X (m)	Y (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura h (m)	$RMS_X$	$RMS_Y$	$RMS_{TOTAL}$	
GCP #13	609764,479	1129333,82	609349,754	1129110,12	478,876	0,64	0,574	0,859	
GCP #14	647192,865	1133721,88	646787,171	1133466,49	418,584	0,732	0,384	0,827	
GCP #15	650838,606	1137252,28	650413,949	1136990,01	457,123	0,382	0,614	0,724	
GCP #16	656773,35	1122266,81	656411	1122009,5	421,731	-0,216	0,618	0,655	
GCP #17	623121,631	1116409,11	622694,218	1116199,15	417,011	-0,528	-0,912	1,054	
GCP #18	627112,689	1132133,91	626687,724	1131912,21	430,056	0,259	-0,793	0,793	
Check Point Error:						0,4973	0,6622	0,8281	

**Distribución de los puntos de control terrestre (GCP) en las imágenes Landsat en la porción que fue corregida.**

**Imagen Landsat 5: 005/053 de 1990 con GCP**

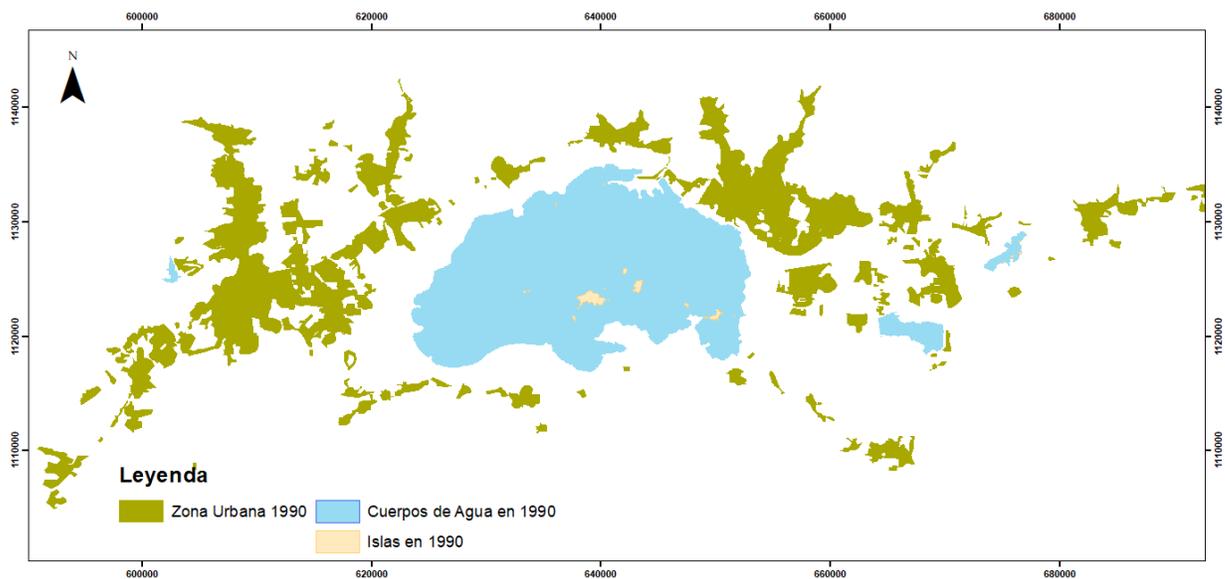
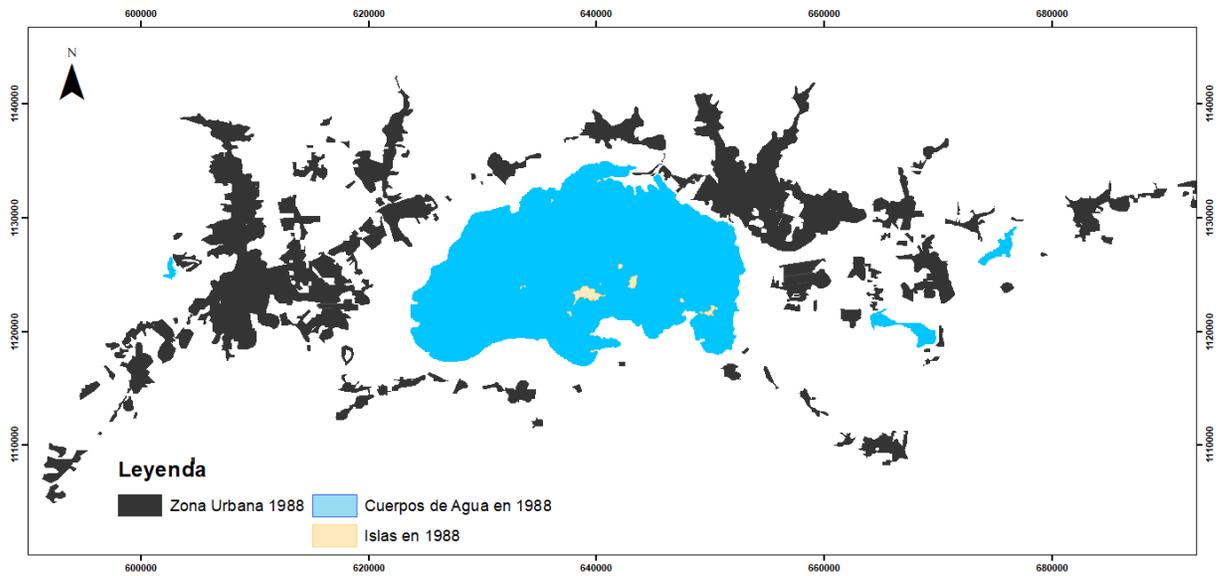


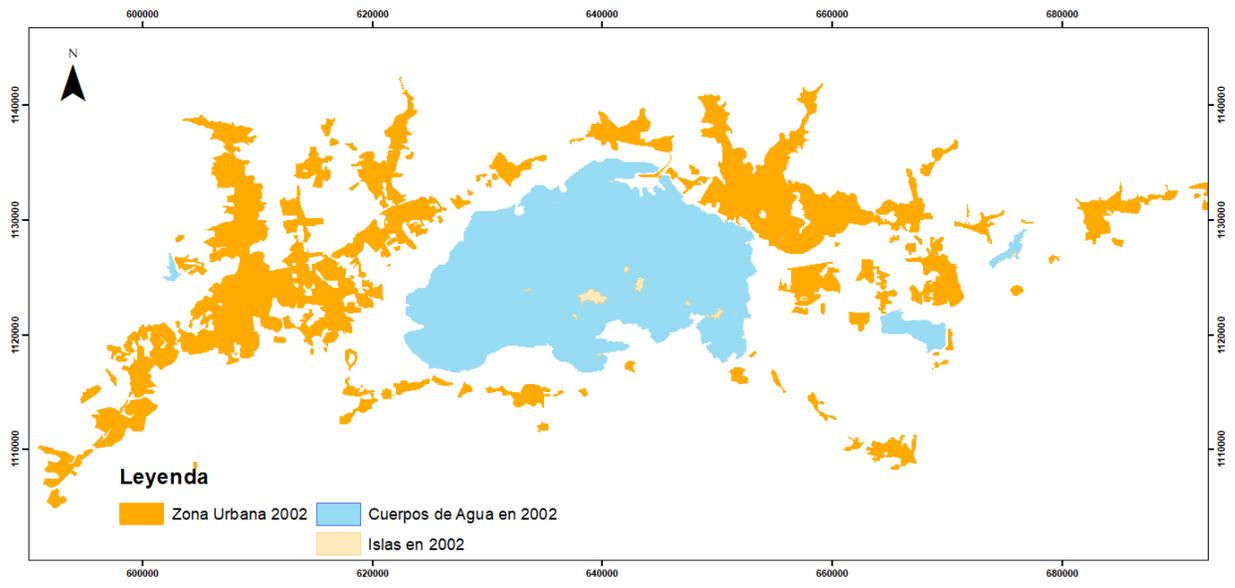
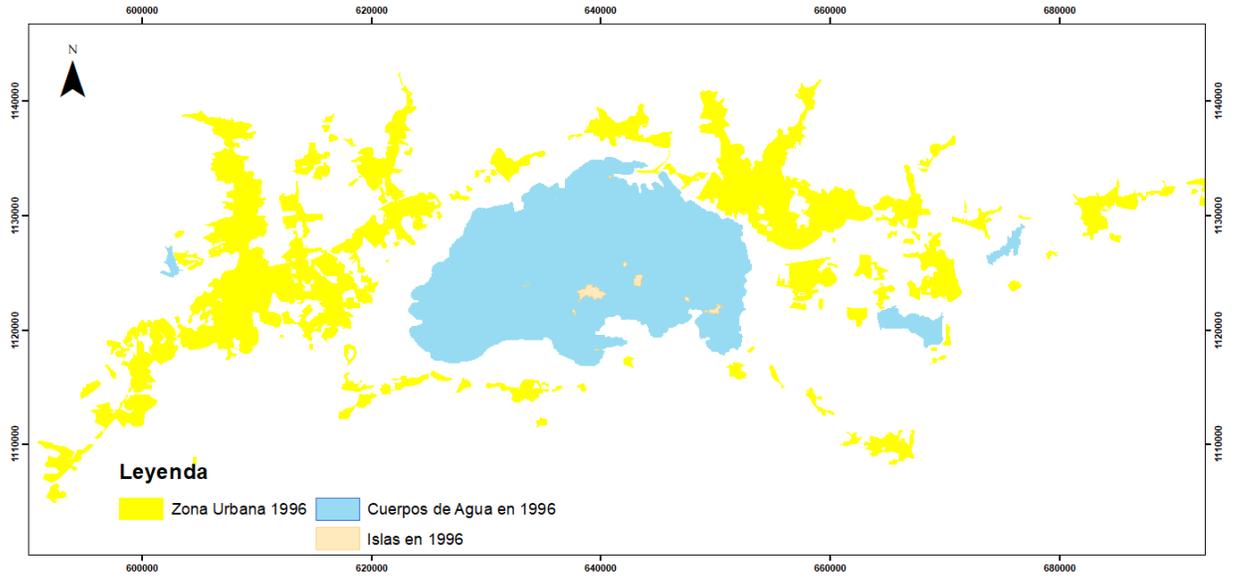
## Imagen Landsat 7: 004/053 de 2002 con GCP

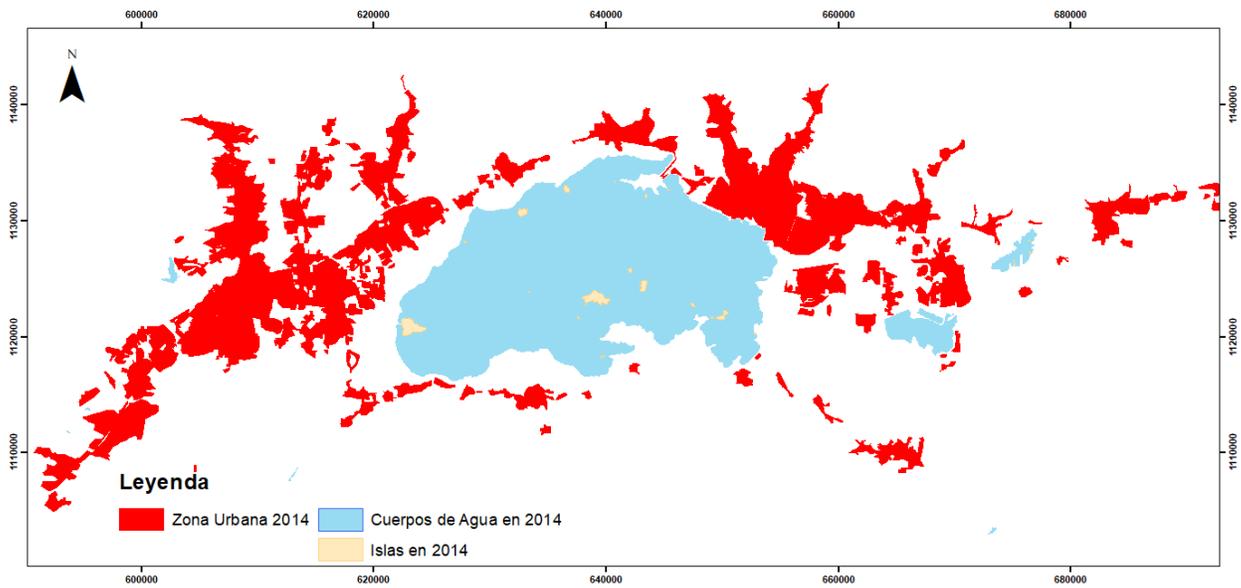
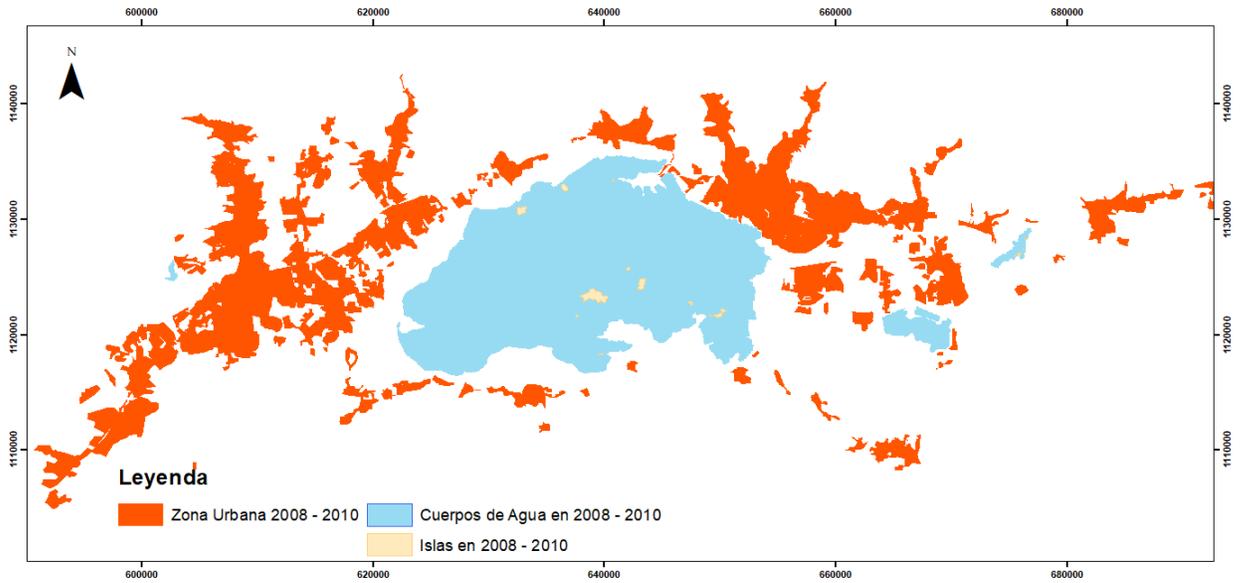


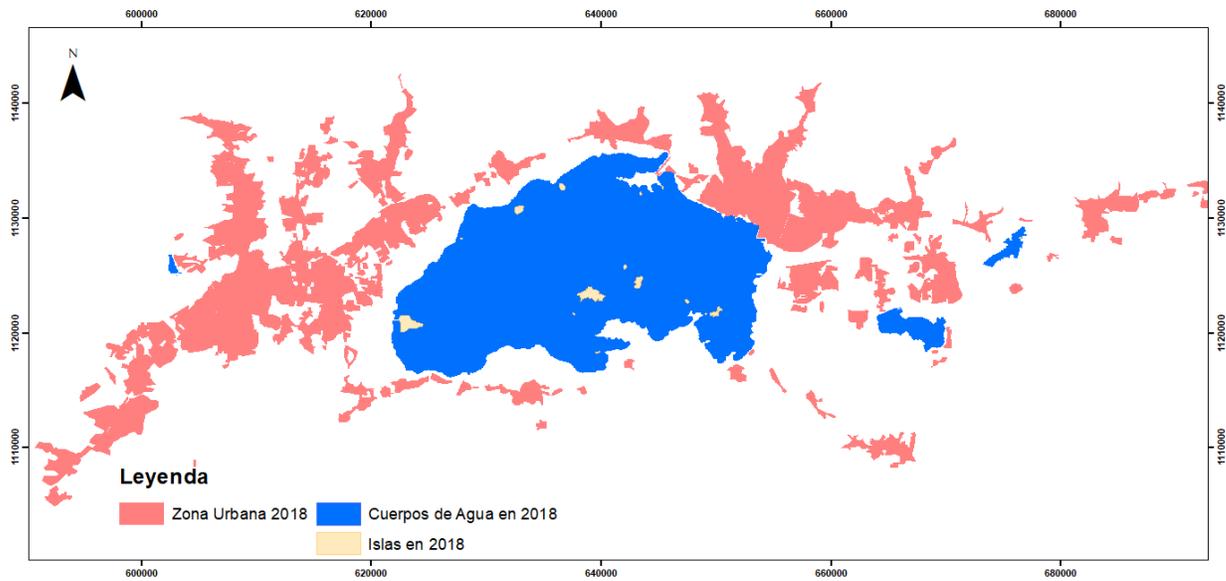
## ANEXO N°2: Mapas por año de las áreas urbanas de la zona de estudio

Mapas de las áreas urbanas en la zona de estudio desde 1988 hasta el 2018, en proyección UTM, Huso 19, Datum: REGVEN.

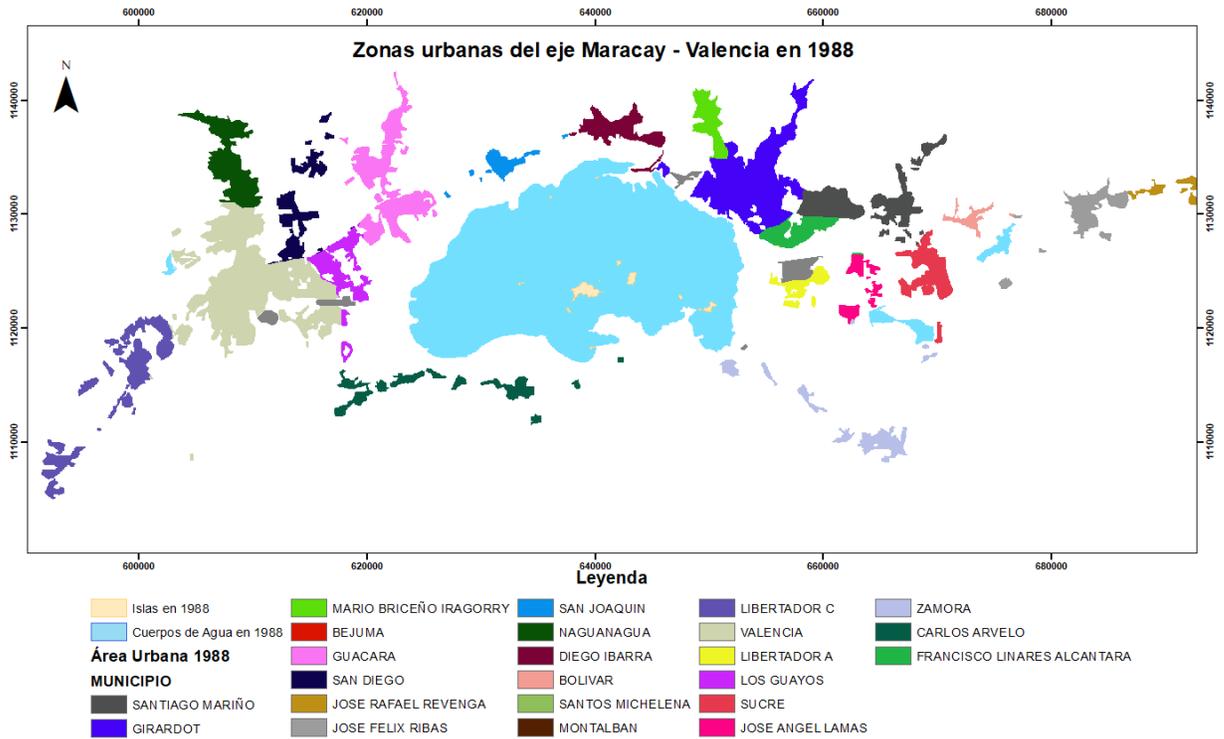


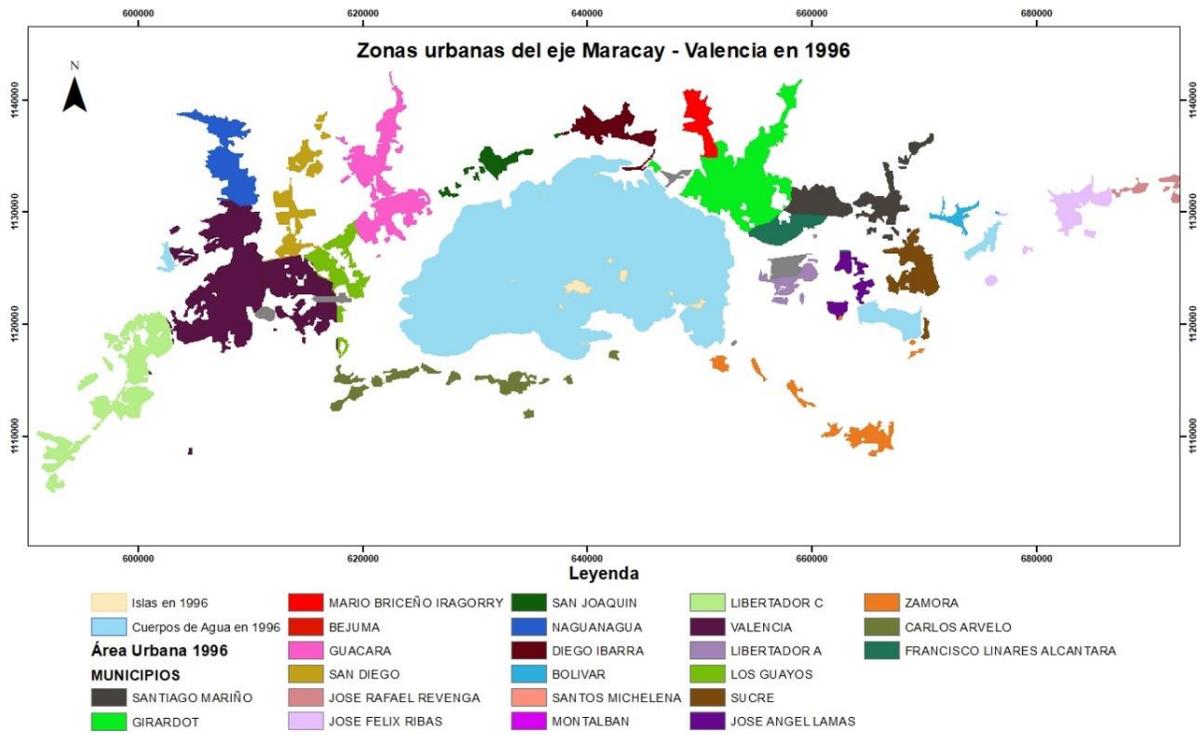
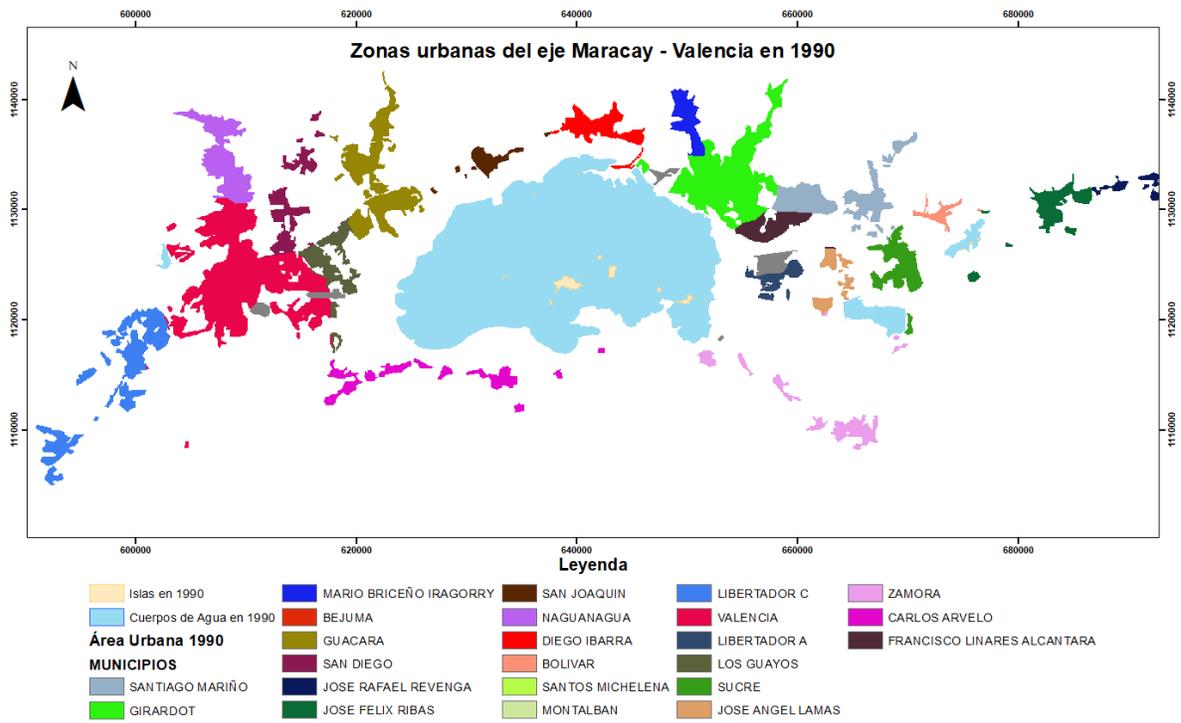


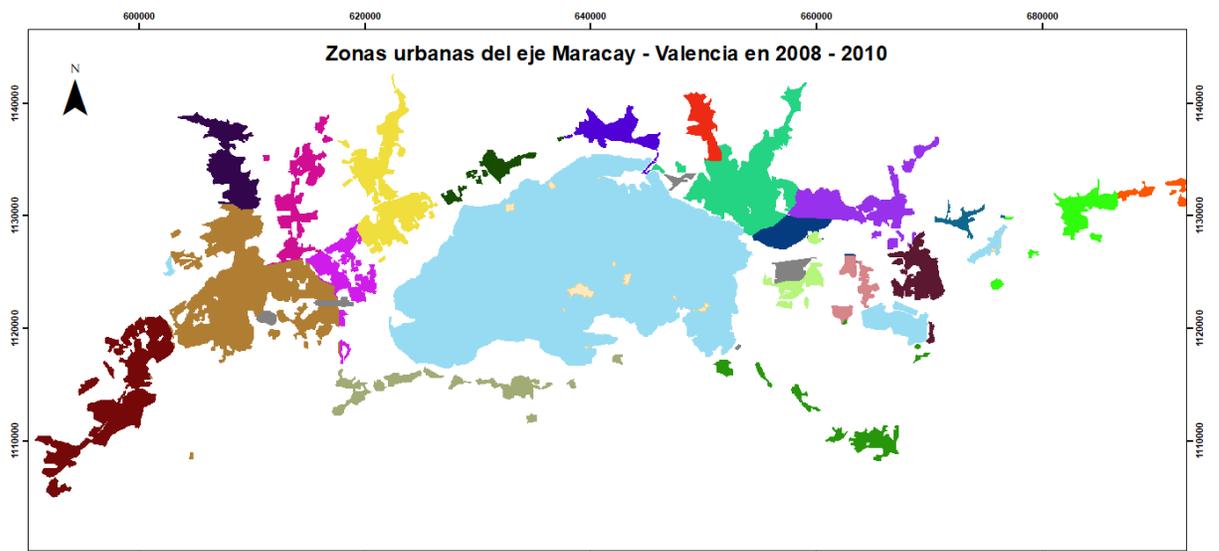
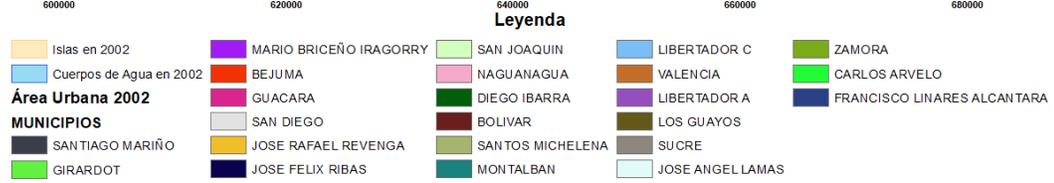
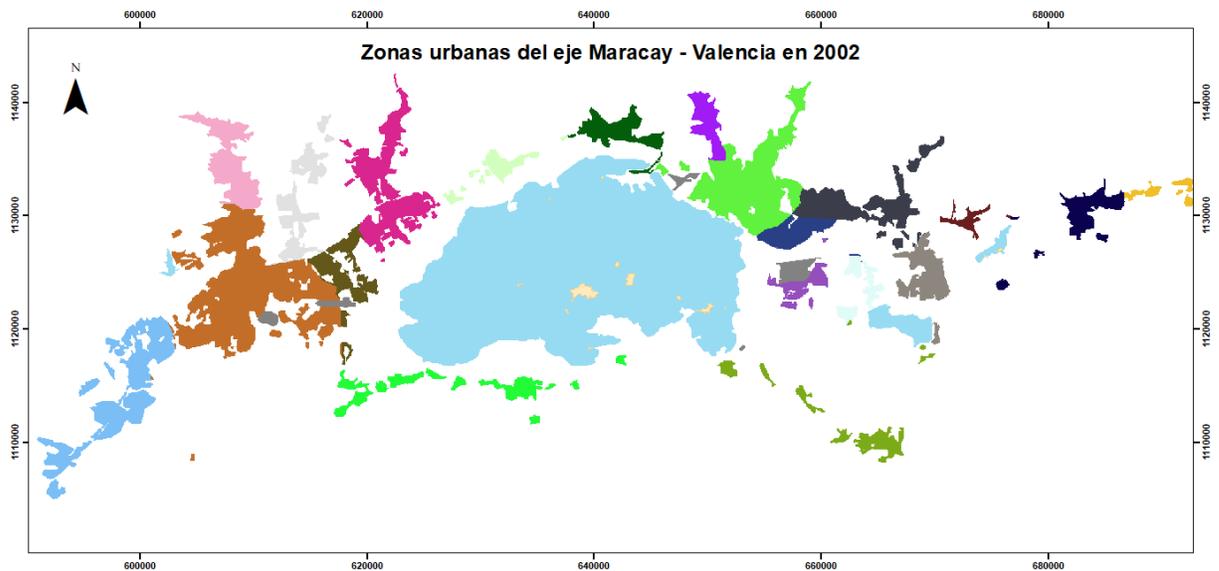


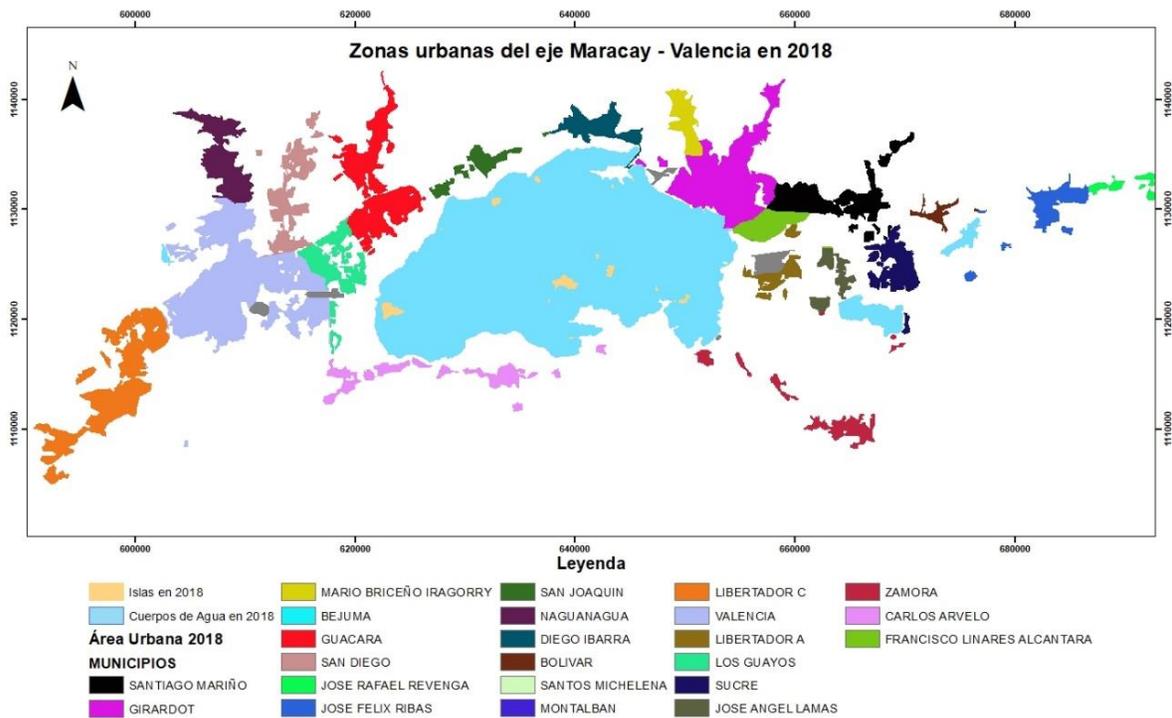


### ANEXO N°3: Mapas por municipios de las áreas urbanas de la zona de estudio









**ANEXO N°4: Áreas para los cuerpos de agua de la zona de estudio por año**

<b>Nombre</b>	<b>Cantidad de píxeles que componen cada cuerpo de agua según el año</b>						
	<b>1988</b>	<b>1990</b>	<b>1996</b>	<b>2002</b>	<b>2008 - 2010</b>	<b>2014</b>	<b>2018</b>
Lago de Valencia	435666	439239	449287	469403	493943	513302	521982
Laguna de Taguaiguay	6815	12955	12723	12877	14996	17099	14509
Embalse de Zuata	4116	5304	4379	3667	4390	6591	4998
Laguna de Guataparo	1171	1647	2473	1626	1033	1415	1076

<b>Nombre</b>	<b>Áreas de cada cuerpo de agua en hectáreas (ha) según el año</b>						
	<b>1988</b>	<b>1990</b>	<b>1996</b>	<b>2002</b>	<b>2008 - 2010</b>	<b>2014</b>	<b>2018</b>
Lago de Valencia	34156,214	34436,338	35224,101	36801,195	38725,131	40242,877	40923,389
Laguna de Taguaiguay	534,296	1015,672	997,483	1009,557	1175,686	1340,562	1137,506
Embalse de Zuata	322,694	415,834	343,314	287,493	344,176	516,734	391,843
Laguna de Guataparo	91,806	129,125	193,883	127,478	80,987	110,936	84,358