

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA EXPANSIÓN URBANA DEL MUNICIPIO
DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA EXPANSIÓN URBANA DEL MUNICIPIO
DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A Dios por ser mi guía y fortaleza

A mi familia, especialmente mi madre, Mercedes Magaña que siempre está para apoyarme incondicionalmente y que ha sentado las bases en mí de responsabilidad, deseo de superación y amor por lo que hago.

A mi novia, Lorena Bravo por su amor, apoyo y dedicación y ser gran aporte de la felicidad en mi vida.

Todo lo puedo en CRISTO

Fil: 4-13

CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	14
1.1. Ubicación y delimitación geográfica.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. Objetivo general.....	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. JUSTIFICACIÓN.....	20
4. MARCO TEORICO.....	21
4.1. Expansión urbana.....	21
4.2. Clasificación del suelo.....	22
4.3. Sistema ambiental.....	26
4.4. Teledetección.....	30
5. ANTECEDENTES.....	33
6. METODOLOGIA.....	37
6.1. Tipo de trabajo.....	37
6.2. Información disponible.....	37
7. PROCEDIMIENTO.....	38
7.1. Fase I. Levantamiento de la información.....	38

7.2.	Fase II. Pre – procesamiento.....	39
7.3.	Fase III. Tratamiento digital.....	41
7.4.	Fase IV. Análisis multitemporal de las Imágenes.....	42
7.5.	Análisis de los resultados.....	42
8.	RESULTADOS.....	43
9.	CONCLUSIONES.....	68
10.	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFIA.....	70
	ANEXOS.....	71

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Ubicación Geográfica de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.....	18
Figura 2. Expansión urbana de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.....	25
Figura 3. Estructura ecológica municipal de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.....	28
Figura 4. Imagen satelital Landsat 5 de 8 septiembre de 1986.....	38
Figura 5. Imagen satelital Landsat 5 de 20 de mayo de 1998.....	39
Figura 6. Imagen satelital Landsat 8 de 20 de agosto de 2014.....	39
Figura 7. Imágenes Satelitales con extensión .img de los años 1986, 1998 y 2014 respectivamente.....	42
Figura 8. Georeferenciación uniforme de la imagen satelital y vector de la ciudad de Santiago de Cali.....	43
Figura 9. Modelo para el cálculo de la radiancia de las 4 imágenes satelitales en Model Maker.....	45
Figura 10. Modelo para el cálculo de la reflectancia de las 4 imágenes satelitales en Model Maker.....	47
Figura 11. Corte de las 3 imágenes satelitales en Subset & Chip.....	48
Figura 12. Modelo de los Signature Name de las Imágenes Satelitales.....	50
Figura 13. Modelo de los Signature Name de la Imágenes Satelitales.....	50
Figura 14. Algoritmo de clasificación de la Imagen Landsat 8 del año 2014.....	51

Figura 15. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 5 del año 1998.....	52
Figura 16. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 5 del año 1998.....	52
Figura 17. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 8 del año 2014.....	53
Figura 18. Realce de la Imagen Landsat 5 del año 1986.....	54
Figura 19. Realce de la Imagen Landsat 5 del año 1998.....	55
Figura 20. Realce de la Imagen Landsat 8 del año 2014.....	55
Figura 21. Vector tipo polígono de la Imagen Landsat 5 del año 1986.....	57
Figura 22. Vector tipo polígono de la imagen Landsat 5 del año 1998.....	57
Figura 23. Vector tipo polígono de la imagen Landsat 8 del año 2014.....	58
Figura 24. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 1986.....	61
Figura 25. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 1998.....	62
Figura 26. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 2014.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Población total censada en Santiago de Cali.....	16
Tabla 2. Sistema Ambiental.....	26
Tabla 3. Imágenes Landsat seleccionadas.....	37
Tabla 4. Tasa de Expansión Urbana en el municipio de Santiago de Cali.....	59
Tabla 5. Incremento del área en el tiempo de estudio en el municipio de Santiago de Cali.....	60

LISTA DE GRAFICOS

	Pag.
Grafico 1. Expansión urbana del municipio de Santiago de Cali para los años de 1986, 1998 y 2014.....	59

ANEXOS

Pag.

ANEXO I. Metadato de la imagen satelital "LM50090581986251AAA03"68

ANEXO II. Metadato de la imagen satelital "LT50090581998140XXX02"72

ANEXO III. Metadato de la imagen satelital "LT50090581998140XXX02"75

GLOSARIO

Análisis multitemporal: Análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas y permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas.

Expansión Urbana: Es el aumento del área con infraestructura urbana hacia los borde de las ciudades y la densificación (aumento de viviendas por área) de las áreas urbanas.

Percepción remota: La percepción remota o teledetección es la ciencia y el arte de obtener información espacial, temporal espectral de un cuerpo u objeto sin entrar en contacto físico con este. Para obtener dicha información se emplean sensores, cámaras métricas y convencionales, cámaras de video y espectrorradiómetros de campo y laboratorio.

Radiancia: Es la intensidad por unidad de área proyectada o como la irradiancia por unidad de ángulo solido desde el área proyectada. La radiancia es una función de la posición y dirección.

Reflectancia: Es la relación entre la potencia electromecánica incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interfase. Por lo tanto la magnitud de la rfectancia es el cuadrado de la magnitud de la reflectividad.

RESUMEN

Debido al crecimiento acelerado y desordenado que se presenta en Santiago de Cali se realiza este estudio, cuyo objetivo principal es analizar la transformación del uso del suelo urbano del municipio, mediante el análisis multitemporal de las dinámicas de cambios sobre las coberturas del suelo para los años 1986, 1998 y 2014. Para el desarrollo de este estudio se utilizó como insumo 3 imágenes de satélite de los sensores Landsat 5 Mss de 1986, Landsat 5 TM de 1998 y Landsat 8 OLI_TIRS de 2014, a las cuales se les realizó el tratamiento digital, para la interpretación y clasificación supervisada de las coberturas del suelo clasificadas en 3 clases; Cobertura Vegetal, Urbano y Cuerpos de Agua.

Los resultados obtenidos en el periodo de tiempo del año 1986 a 1998 muestran que hubo un incremento en el área de la cobertura Urbano de 1252.68 Ha y en el periodo de 1998 a 2014 fue de 1503.92 Ha, viéndose reducida considerablemente la cobertura vegetal representada en cultivos, bosques y pastos. Donde la tasa anual de cambio correspondiente al total del área urbana es de 0.9845 Km/año indicando ganancia de área.

Palabras claves: Expansión Urbana, Tasa Anual de Cambio, Coberturas.

ABSTRACT

This study is conducted due to the Santiago de Cali's accelerated and disorderly growth. Its main objective is to analyze the transformation of urban land use in the city, by multi-temporal analysis of the changes dynamics on land cover for the years 1986, 1998 and 2014. For the development of this study, three satellite images of Landsat sensors 5 Mss 1986, Landsat 5 TM 1998 and Landsat 8 OLI_TIRS 2014, were used as input, on which a digital treatment was applied for interpretation and supervised classification of land cover classified into 3 classes; Vegetation Cover, Urban and Water Bodies.

The results obtained in the time period from 1986 to 1998 show that there was an increase of 1252.68 ha in the Urban coverage area and from 1998 to 2014 it was 1503.92 ha, resulting in significantly reduced vegetation cover represented in crops, forests and pastures. The annual rate of change corresponding to the total urban area is 0.9845 Km/year indicating area gain.

KEY WORDS: Urban Expansion, Annual Rate of Change, Hedges.

INTRODUCCIÓN

El municipio de Santiago de Cali se encuentra en constante crecimiento, esto se evidencia en el aumento de su estructura urbana y en la influencia que ejerce en el crecimiento de los municipios vecinos (área de influencia metropolitana). La capital del departamento del Valle del Cauca se ha destacado a lo largo de su historia por ser el epicentro de migraciones poblacionales procedentes de municipios cercanos como Palmira, Yumbo, Jamundí, Candelaria, así como de municipios pertenecientes a departamentos como el Cauca y Nariño, entre otros. La expansión urbana y crecimiento poblacional del municipio se puede evidenciar en el último censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – (DANE), que en el año 2005 se reporta una población total de 2.075.380 habitantes, 31,14% más comparado con el censo de 1985.

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis mediante el uso de herramientas de percepción remota de la expansión urbana del municipio de Santiago de Cali, en un periodo comprendido entre los años 1976 y 2015. Por medio del procesamiento digital de imágenes de satélite, en el cual se empleará imágenes de la constelación Landsat. Su evolución busca captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores. Las imágenes de satélite son de gran utilidad para la planificación de patrones de uso del suelo, dando pautas para una adecuada toma de decisiones debido a que las ciudades están en constante crecimiento.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

1. ÁREA PROBLEMATICA

Con el pasar de los años se ha hecho evidente el incremento poblacional y urbano de forma acelerada y desordenada que ha sufrido el municipio de Santiago de Cali. Tal fenómeno ha traído consigo el deterioro de la estructura ecológica municipal. Este deterioro se hace evidente en la estructura ecológica principal; como por ejemplo la invasión que se presenta en la zona ambiental del río Cauca, la minería y asentamientos ilegales en el Parque Nacional Natural los Farallones de Cali, entre otros. Las consecuencias más notorias de la expansión urbana se encuentran el aumento demográfico, la mala planificación urbana y pobreza estructural.

El límite territorial entre el suelo urbano y rural es de difícil percepción para los habitantes del Municipio de Santiago de Cali, situación que ha generado un desarrollo inadecuado e indeseado del borde, causando la aparición de edificaciones y desarrollos de vivienda con características urbanas pero localizadas en el suelo rural.

Actualmente el Municipio presenta porciones de suelo urbano y rural afectadas por procesos de crecimiento social, económico y urbano no contemplados en la planificación territorial. Dichos procesos constructivos, principalmente localizados en las laderas del Municipio, no son adecuados y han incrementado los niveles de amenaza por movimientos en masa. Sin embargo, como consecuencia y respuesta a las demandas de crecimiento urbano y económico, se han generado dinámicas de desarrollo y construcción de las porciones de suelo urbanizable que aún se encontraba sin desarrollar, las cuales, si bien cumplen con las normas generales del POT, no presentan claridad en su estado de legalidad.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Corporación Autónoma del Valle del Cauca - CVC, como autoridades ambientales, han solicitado la justificación de la expansión o no de la ciudad hacia las zonas determinadas como áreas de régimen diferido, teniendo en cuenta que el corredor Jamundí - Cali (con

una extensión de 1.652,85 Has) no se ha desarrollado y que para considerar otras zonas de expansión urbana debe primar el análisis de las condiciones ambientales. La sustentación de dicha propuesta debe basarse además en consideraciones demográficas, urbanísticas y económicas, tales como el crecimiento de la población, indicadores de demanda para usos de vivienda, espacio público, equipamiento, disponibilidad de suelo en el perímetro urbano, etc.

Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, en los últimos cien años ha presentado un crecimiento poblacional representativo según las cifras presentadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – (DANE). El comparativo unificado desde el año 1912 de la población total censada por área fue de 27.747 habitantes y con respecto al año 1918 donde el total de habitantes fueron 45.525 generó un incremento porcentual representativo del 39.05% equivalente a 17.778 personas.

En el año 1938 la estimación presentada por parte del censo poblacional total fue de 101.883. La sectorización difiere que la mayor concentración de personas se encuentra en la cabecera Municipal con 88.366 representando el 86.7% de los habitantes comparándose con el resto de personas que vivieron en lugares aledaños que fueron el 13.3% restante, donde el incremento de la población promedio en los últimos veinte años había sido de 2850 habitantes por año, lo que se puede considerar una variable constante en el crecimiento.

Ya para los años posteriores de 1951 se contaba con 284.186 habitantes y al año de 1973 se registra una población de 991.549, evidenciando un incremento poblacional cercano al 71.33%.

En el año de 1985 la ciudad contaba con una población total de 1.429.026 habitantes, de los cuales el 98.2% corresponden al sector de la cabecera municipal y el restante a otros sectores.

El último censo realizado por el DANE en el año de 2005, Santiago de Cali tenía una población total de 2.075.380 habitantes, 31.14% más que en el año de 1985.

Tabla 1. Población total censada en Santiago de Cali, por áreas según fecha de realización, 1912, 1918, 1938, 1951, 1964, 1973, 1985, 1993, 2005.

Año	Mes	Día	Población total	Tasa %	Población cabecera	%	Población resto	%
1912	3	5	27,747	-	nd	nd	nd	nd
1918	10	14	45,525	7.49	nd	nd	nd	nd
1938	7	5	101,883	4.08	88,366	86.7	13,517	13.3
1951	5	9	284,186	7.98	241,357	84.9	42,829	15.1
1964	7	15	637,929	6.13	618,215	96.9	19,714	3.1
1973	10	24	991,549 ^a	4.75	971,891	98.0	19,658	2.0
1985	10	15	1,429,026 ^a	3.05	1,402,893	98.2	26,133	1.8
1993	10	24	1,847,176 ^a	3.20	1,809,054	97.9	38,122	2.1
2005	11	11	2,075,380	0.97	2,039,626	98.3	35,754	1.7

Fuente: DANE – Censos, cálculos DAP

a Con ajuste por cobertura

nd Cifra no disponible

1.1. Ubicación y delimitación geográfica

El municipio de Santiago de Cali, capital del Departamento del Valle del Cauca – Colombia, ubicado en las coordenadas 3°27'00"N 76°32'00"O. Comprende una superficie de 560.3 Km², de las cuales 120.9 Km² corresponde a comunas, 437.3 Km² a corregimientos y 2.2 Km² a la protección del río Cauca. La ciudad es plana con una elevación promedio de 995 m.s.n.m. Geográficamente Cali está en el Valle del río Cauca, es la tercera en importancia del país. A la altura de Cali este valle tiene 35 km de ancho y la zona urbana está sobre el costado occidental del río. La parte occidental de la ciudad se encuentra custodiada por los Farallones de Cali, que hacen parte de la cordillera occidental de los Andes colombianos.

El municipio de Santiago de Cali limita al norte con Yumbo y la Cumbre, al nororiente con Palmira y al oriente con Candelaria y Puerto Tejada, al sur se encuentra el municipio de Jamundí, el área rural de Buenaventura al suroccidente y Dagua al noroccidente.

La ciudad de Santiago de Cali es uno de los principales centros económicos e industriales de Colombia, además de ser el principal centro urbano, cultural, económico, industrial y agrario del suroccidente del país y el tercero a nivel nacional.

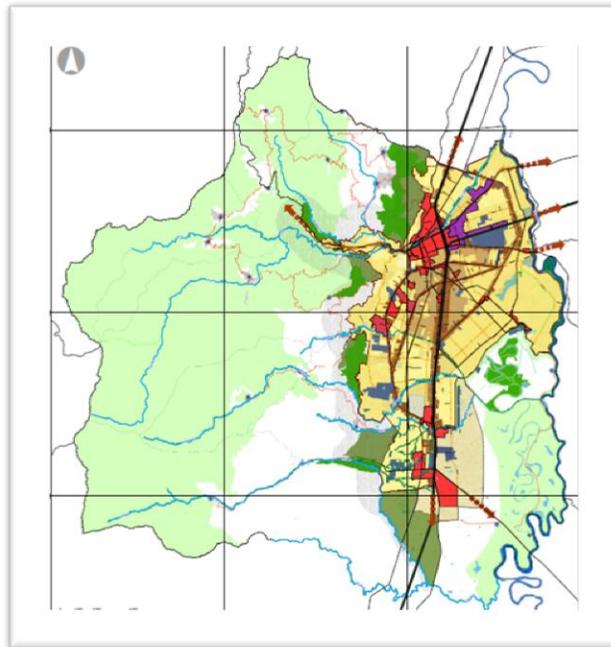
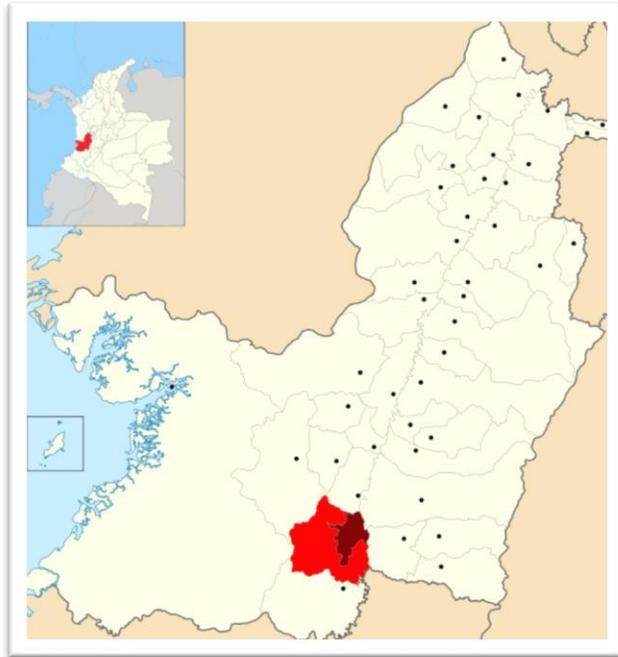


Figura 1. Ubicación Geográfica de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.
Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Municipal - Santiago de Cali
http://www.cali.gov.co/publicaciones/cartografia_oficial_del_acuerdo_del_pot_pub

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar la expansión urbana en el municipio de Santiago de Cali, mediante el uso de herramientas de percepción remota, en un periodo comprendido entre los años 1986 y 2014.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar la detección de cambios a partir de la clasificación de las imágenes satelitales Landsat, por medio de análisis estadístico y multitemporal.
- Cuantificar la tasa de expansión y la dinámica de crecimiento urbano, mediante la determinación de los factores generadores en el aumento de la cobertura; construcciones, en el municipio de Santiago de Cali para el periodo 1986 – 2014.
- Generar mapas temáticos del municipio de Santiago de Cali.

3. JUSTIFICACIÓN

El uso de la percepción remota a través de imágenes de satélite para el análisis multitemporal de la expansión urbana es de gran importancia ya que permite identificar y cuantificar las zonas donde hubo crecimiento poblacional y estructural, asimismo el impacto que esto produce en los ecosistemas y la identificación de zonas de deterioro de la estructura ecológica del municipio.

Para el estudio de las diferentes características se hace un tratamiento visual y digital de imágenes satelitales de la constelación LANDSAT y sistemas de información geográfica, aplicando un análisis multitemporal evaluando los cambios que sufrió la cobertura, además utilizando una técnica de lectura espectral, esto para analizar las firmas correspondientes a cada recurso natural y la expansión urbana, con el fin de clasificarlo, para ello se lleva a cabo una calibración de las imágenes de tipo radiométricas espaciales y corrección atmosféricas y geométricas para obtener un mejor posicionamiento del lugar.

La planificación de las ciudades requiere establecer políticas y herramientas claras y concretas, con el fin de realizar de manera óptima la gestión de los recursos naturales. Una eficiente evaluación de la cobertura de la tierra y la habilidad de monitorear sus cambios, son actividades fundamentales para el manejo sostenible de los recursos.

4. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1. Expansión Urbana

El crecimiento poblacional en las ciudades, es el aumento del área con infraestructura urbana hacia los borde de las ciudades y la densificación (aumento de viviendas por área) de las áreas urbanas (Jiménez, 2002).

A medida que el crecimiento urbano continúa es necesario extender la infraestructura de la ciudad; vías de transporte, equipamiento, servicios públicos, entre otros; para satisfacer las necesidades de la población que llega a ocupar estas nuevas áreas (Giraldo, 1999). El crecimiento puede darse de dos formas, esto dependiendo de la naturaleza de los procesos de urbanización que se den; urbanización planeada y urbanización no controlada (Molina, 1982).

La expansión urbana acarreará consecuencias alterando significativamente el paisaje natural, creando un gran impacto en el ambiente y en los ecosistemas a todas las escalas geográficas (Lambin y Geist, 2001). Entre los impactos se encuentra el cambio en el uso de la tierra, las zonas aledañas a la ciudad que antes eran rurales pasan a convertirse en urbanas, al ser transformadas con el establecimiento de la infraestructura (He *et al* 2008). Afectando el suministro de agua, la fauna y flora y la calidad y disponibilidad de hábitat alterando los patrones y procesos en los ecosistemas (Alig *et al* 2004).

Como resultado de lo anterior, la vegetación natural o las áreas protegidas adyacentes y dentro de los asentamientos urbanos por extensión son más susceptibles a la invasión por especies no nativas y muchos se vuelven dominados por dichas especies (Robinson *et al*, 2005).

4.2. Clasificación del suelo

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 31, 32 y 33 de la Ley 388 de 1997, el territorio de Santiago de Cali se clasifica en suelo urbano, rural y de expansión urbana; este último se entenderá incorporado al perímetro urbano en los términos del artículo 31 del Decreto Nacional 2181 de 2006, o las normas que lo modifiquen, adicionen o sustituyan. (POT Santiago de Cali 2014).

El suelo de protección podrá estar localizado en cualquiera de las clases de suelo antes señaladas.

4.2.1. Suelo urbano

La Ley 388 de 1997 define en el Capítulo IV, Artículo 31 lo siguiente con respecto a la Clasificación del Suelo; “Constituyen el suelo urbano, las áreas del territorio distrital o municipal destinadas a usos urbanos por el plan de ordenamiento, que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, posibilitándose su urbanización y edificación, según sea el caso. Podrán pertenecer a esta categoría aquellas zonas con procesos de urbanización incompletos, comprendidos en áreas consolidadas con edificación, que se definan como áreas de mejoramiento integral en los planes de ordenamiento territorial. Adicionalmente, dice que: “En ningún caso el perímetro urbano podrá ser mayor que el denominado perímetro de servicios públicos o sanitario.” (POT Santiago de Cali 2014).

4.2.2. Suelo rural

La Ley 388 de 1997 define en el Capítulo IV, Artículo 32. Constituyen esta categoría los terrenos no aptos para el uso urbano, por razones de oportunidad, o por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales, de explotación de recursos naturales y actividades análogas.

4.2.3. Suelo de expansión urbana

La Ley 388 de 1997 define en el Capítulo IV, Artículo 33. Constituido por la porción del territorio municipal destinada a la expansión urbana, que se habilitará para el uso urbano durante la vigencia del plan de ordenamiento, según lo determinen los Programas de Ejecución. La determinación de este suelo se ajustará a las previsiones de crecimiento de la ciudad y a la posibilidad de dotación con infraestructura para el sistema vial, de transporte, de servicios públicos domiciliarios, áreas libres, y parques y equipamiento colectivo de interés público o social. Dentro de la categoría de suelo de expansión podrán incluirse áreas de desarrollo concertado, a través de procesos que definan la conveniencia y las condiciones para su desarrollo mediante su adecuación y habilitación urbanística a cargo de sus propietarios, pero cuyo desarrollo estará condicionado a la adecuación previa de las áreas programadas. (POT Santiago de Cali 2014).

El suelo de expansión urbana del Municipio de Santiago de Cali, de conformidad con las previsiones de crecimiento de la ciudad, la necesidad de su planificación a escala intermedia, y a la posibilidad de dotación con infraestructura para el sistema vial, de transporte, de servicios públicos domiciliarios, se encuentra en el sur de la ciudad y está conformado por el Corredor Cali – Jamundí, con un área 1629 Ha.

4.2.4. Suelo de protección.

Constituido por las zonas y áreas de terreno localizados dentro de cualquiera de las anteriores clases, que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.

Las categorías del suelo de protección se establecen en los términos del Decreto Nacional 3600 de 2007 y la Ley 388 de 1997, (POT Santiago de Cali 2014).constituyéndose como normas urbanísticas de carácter estructural, y en el presente Acto corresponden a:

- a. Áreas de amenaza y riesgo no mitigable
- b. Áreas de conservación y protección ambiental (Estructura Ecológica Principal)
- c. Áreas del sistema de servicios públicos domiciliarios
- d. Áreas e inmuebles considerados patrimonio cultural
- e. Áreas para la producción agrícola y ganadera y de explotación de los recursos naturales.

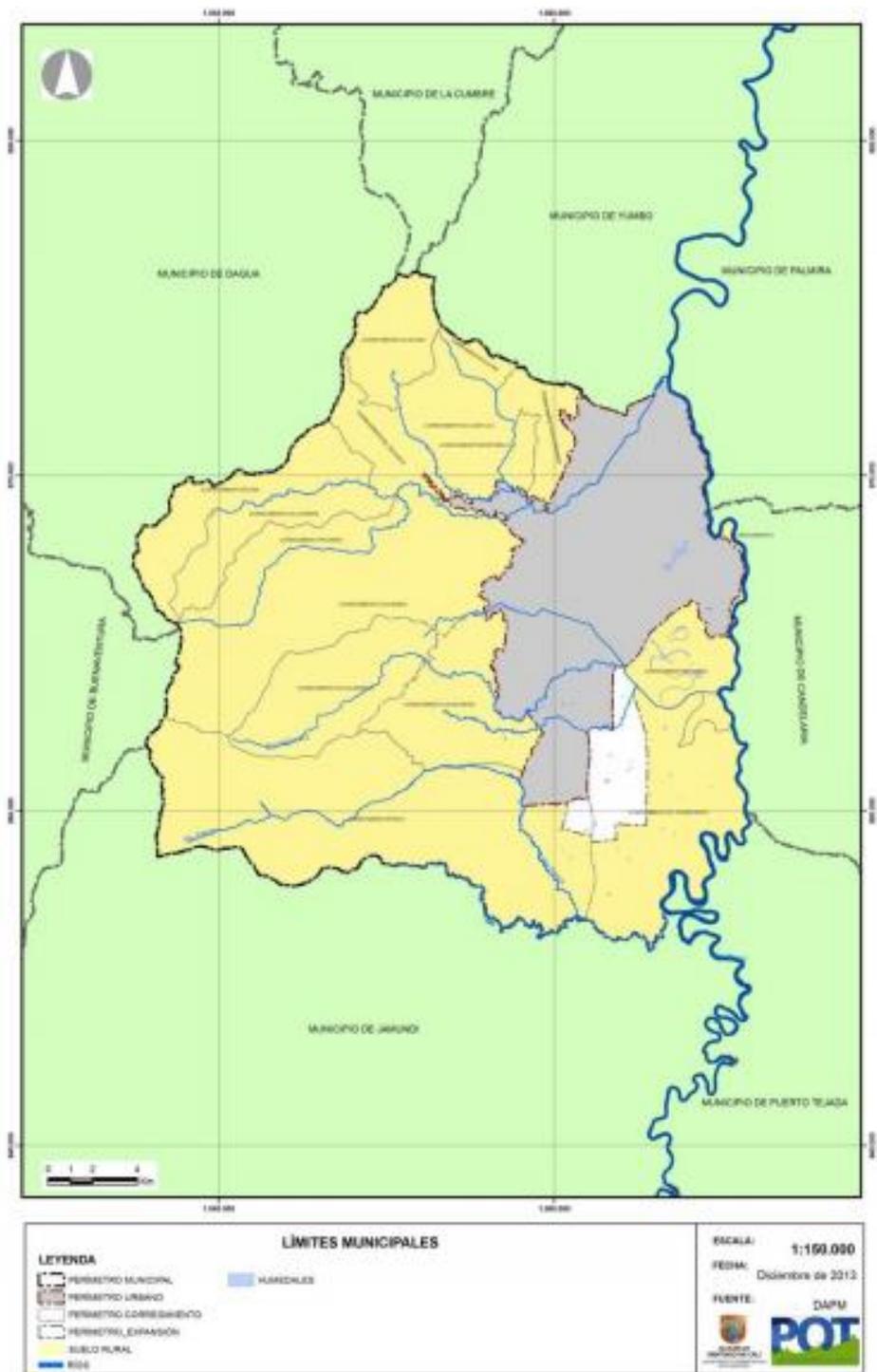


Figura 2. Expansión urbana de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.
Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Municipal - Santiago de Cali
http://www.cali.gov.co/publicaciones/cartografia_oficial_del_acuerdo_del_pot_pub

4.3. Sistema Ambiental

Son los procesos e interacciones de un conjunto de elementos y factores que lo componen, incluyéndose, además de los elementos físicos, biológicos y socio-económicos, los factores políticos e institucionales.

Estos sistemas pueden reunirse en dos grandes grupos:

- Sistemas ambientales naturales:

Estos sistemas forman la ecósfera, es decir, la parte de la Tierra donde existe vida sin apoyo artificial; reúne a todas las formas de vida y a su soporte ambiental (tanto viviente como inerte).

- Sistemas ambientales artificiales:

Los sistemas ambientales artificiales proceden de la historia de la humanidad y su desarrollo y diversidad cultural. Desde un enfoque biocéntrico podrían englobarse dentro de la Ecósfera, al ser la especie humana un elemento más de este sistema.

En el Sistema Ambiental del municipio de Santiago de Cali, confluyen la base ecosistémica y la apropiación cultural del territorio e incluye los componentes descritos en la tabla 2.

SISTEMA AMBIENTAL	
AMENAZAS Y RIESGOS	Suelo de protección por amenazas y riesgos no mitigables
	Zonas de amenazas y riesgos mitigables
	Acciones y reglamentación para la prevención y mitigación de riesgos
ESTRUCTURA ECOLOGICA MUNICIPAL (EEM)	Estructura Ecológica Principal (EEP) - Suelos de Protección Ambiental
	Estructura Ecológica Complementaria (EEC)
CALIDAD AMBIENTAL	Determinantes territoriales de calidad ambiental

Tabla 2. Sistema Ambiental

Fuente. Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali 2014.

http://www.cali.gov.co/publicaciones/cartografia_oficial_del_acuerdo_del_pot_pub

4.3.1. Amenazas y riesgos

El termino amenaza corresponde a un factor de riesgo externo de un sujeto o un sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestare en un sitio especifico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes, y/o el Medio Ambiente (Cardona, 1993). Mientras tanto el Riesgo es cualquier fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una determinada comunidad, que sea vulnerable a este fenómeno.

4.3.2. Estructura Ecológica

Es el eje estructural del Ordenamiento Territorial Municipal, en tanto contiene un sistema espacial, estructural y funcionalmente interrelacionado que define corredores ambientales de sustentación, de vital importancia para el equilibrio ecosistemico del territorio en el cual se consolida un conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos renovables del municipio de Santiago de Cali.

4.3.2.1. Estructura Ecológica Municipal

La Estructura Ecológica es el conjunto de elementos naturales y construidos, cuya calidad ambiental y/o ecosistémica, aporta a la conformación de una malla verde que conecte, recupere y conserve la Base Ecosistémica asegurando a largo plazo los procesos que sustentan la vida humana, la biodiversidad, el suministro de servicios ambientales y la calidad ambiental del Municipio de Santiago de Cali. (Figura 3).

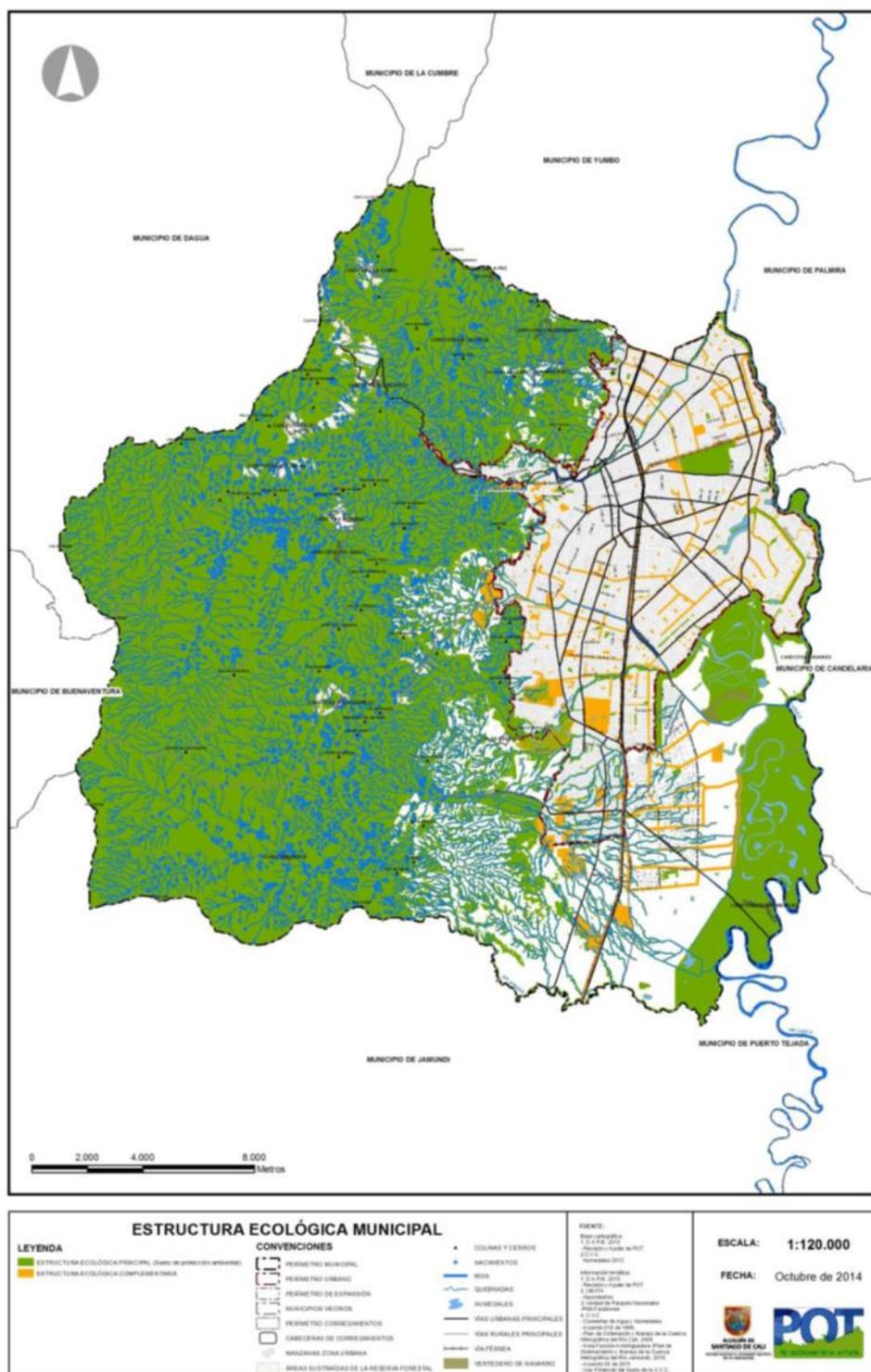


Figura 3. Estructura ecológica municipal de Santiago de Cali con respecto al Valle del Cauca.

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Municipal - Santiago de Cali

http://www.cali.gov.co/publicaciones/cartografia_oficial_del_acuerdo_del_pot_pub

4.3.2.2. Componentes de la Estructura Ecológica Municipal

La Estructura Ecológica Municipal está conformada por el conjunto de la Estructura Ecológica Principal y la Estructura Ecológica Complementaria, constituyendo así la base territorial ambiental para el desarrollo sostenible. Nuevos elementos pueden ser incorporados a la Estructura Ecológica Municipal mediante la declaratoria de áreas protegidas y estrategias de conservación del Sistema Municipal de Áreas Protegidas (SIMAP Cali). Las áreas seleccionadas para ser incluidas en la Estructura Ecológica Municipal cumplen con criterios ecológicos y/o ambientales que aportan al cumplimiento de los objetivos de dicha estructura. El Mapa “Estructura Ecológica Municipal” presenta los elementos que conforman la Estructura Ecológica Municipal.

4.3.2.3. Estructura Ecológica Complementaria

Está conformada por los elementos del territorio construido y semi-construido que tienen características y funciones ecológicas y/o ambientales, lo cual les permite fortalecer y apoyar la definición de la Estructura Ecológica Municipal y la conservación de los recursos naturales. Las áreas que pertenecen a la Estructura Ecológica Complementaria no constituyen suelo de protección.

Se incluyen en la Estructura Ecológica Complementaria los siguientes elementos:

1. Elementos del Sistema de Espacio Público con alto valor ambiental
2. Elementos del Sistema de Equipamientos con alto valor ambiental
3. Elementos del Sistema de Drenaje Pluvial
4. Elementos del Sistema de Movilidad con valor ambiental

La Estructura Ecológica Principal del municipio de Santiago de Cali está compuesta por las áreas de protección y conservación ambiental en los términos del artículo 4 del Decreto 3600 del 2007 y del artículo 35 de la Ley 388 de 1997 y se constituye como suelo de protección ambiental, y como determinante ambiental del ordenamiento territorial de conformidad con lo establecido en el artículo 15 de la misma ley. A esta categoría pertenecen los elementos del territorio que mantienen características de composición, estructura y/o función que les permite prestar servicios ecológicos y/o ambientales y cuyas características permiten mantener los procesos ecológicos esenciales del territorio convirtiéndose en el principal componente de la Estructura Ecológica Municipal.

4.3.3. Calidad Ambiental

La Calidad Ambiental incluye temáticas como la calidad de aire (emisiones atmosféricas y ruido), contaminación por publicidad exterior visual, calidad de las aguas subterráneas, manejo del espacio público y movilidad entre otros. También se presenta una mirada ambiental a elementos urbanísticos como las Unidades de Planificación Intermedia (UPU y UPR), las centralidades y tratamientos, para determinar cómo estos inciden en la calidad ambiental del territorio.

4.4. Teledetección

La teledetección es la ciencia y el arte de adquirir información espacial, temporal y espectral de la superficie terrestre sin entrar en contacto físico con este. Para obtener dicha información se emplean sensores instalados en plataformas espaciales, cámaras métricas y convencionales, cámaras de video y espectrorradiómetros de campo y laboratorio. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable en la tierra.

4.4.1. Imágenes satelitales

Es la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y que procesada convenientemente, entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

4.4.2. Imágenes de la serie Landsat

La constelación de satélites LANDSAT (LAND= Tierra y SAT= Satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un

canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

El satélite LANDSAT-8, lanzado al espacio en agosto de 2012, por sus 11 bandas y amplias posibilidades de combinación lo que permite un mayor aprovechamiento.

4.5. Análisis Multitemporal de Imágenes de Satélite

El seguimiento a los procesos dinámicos de información adquirida por medio de la percepción remota, es fundamental para estudiar los cambios que se producen en la cubierta terrestre ya sea por ciclos estacionales de la superficie, catástrofes naturales o alteraciones de origen antropocéntrico.

Las características orbitales de los satélites permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación facilitando el estudio requerido a nivel temporal.

El análisis multitemporal involucra un cruce digital de imágenes de satélite con características similares y con fechas determinadas. Al realizar este cruce digital de las imágenes permite detectar los cambios que ha sufrido en la cobertura, ya sea que gane o pierda área.

5. ANTECEDENTES

La Percepción Remota (PR) es una herramienta de exploración terrestre donde se adquiere, procesa e interpreta imágenes y datos obtenidos a partir de imágenes de satélite y fotografías aéreas. Permitiendo el estudio de la cubierta terrestre, desde las superficies continentales hasta los cuerpos de agua como mares, ríos, lagunas, etcétera. Se ha realizado diversidad de estudios investigativos utilizando metodologías descritas por Jesen (1996) y Chuvieco (1996), entre otros.

Los estudios multitemporales se han utilizado en una gran variedad de actividades, como la minería, urbanismo, hidrología, agricultura, entre otras; En la cual se puede encontrar aplicaciones como en la planeación de zonas urbanas, deforestación, concentración de clorofila, uso de suelo, estudios de agua, etcétera.

El objeto de estudio de este trabajo investigativo es analizar la acelerada expansión urbana y demográfica que se presenta en el municipio de Santiago de Cali, por medio de la percepción remota, utilizando imágenes de satélite. El cual es causado por diferentes factores, entre ellos están los procesos económicos, sociales, políticos, funcionales, etcétera, lo que conlleva a concentrar la población en determinados lugares.

Las principales falencias que esto ocasiona son en los sectores como los de infraestructura y servicios, provocado por la expansión urbana del área metropolitana a zonas de protección hídrica; ríos, humedales, lagunas, quebradas, nacimientos y sus áreas forestales protectoras, reservas forestales y naturales y sobre la producción agrícola.

5.1. Crecimiento Urbano

5.1.1. Análisis multitemporal del crecimiento urbanístico del municipio de la Calera, Cundinamarca, Colombia.

Analizar el proceso de transformación de uso del suelo urbano en el municipio e identificar las variantes más relevantes que han llevado al área actual del centro poblado de la calera. El estudio de los cambios de uso del suelo en la zona, dará pauta para una adecuada toma de decisiones debido a que es un área creciente. De esta manera será de gran utilidad para planificar los patrones de uso de los recursos hacia un desarrollo ordenado del territorio. Mediante la utilización de herramientas de análisis de Imágenes satelitales del software PCI Geomatics, y para este caso se utilizaron imágenes Landsat. Detectando las coberturas de Construcciones, zonas de Vegetación Natural Herbácea y la interacción de estos dos en los últimos años. (Poveda, 2015)

Resultados del estudio

- La expansión urbana del Municipio de La Calera se ha venido presentando desde hace ya bastante tiempo pero en los últimos años su crecimiento ha sido bastante acelerado como se puede observar en este estudio un perímetro urbano de casi 48 Hectáreas para el año de 1995, prácticamente se duplico en 10 años, ya que las aproximadamente 90 Hectáreas del año 2005 son el reflejo de un crecimiento desordenado que se presentó durante este periodo de tiempo, y como se puede observar las zonas de expansión que se utilizaron son las correspondientes a zonas de pastos con destinación para la explotación agropecuaria.
- En los últimos 10 años se ha venido realizando una expansión de forma más controlada buscando la forma de unificar la zona urbana del Municipio

en un solo polígono, por tal razón vemos que para el año 2014 el crecimiento ha sido más homogéneo y hacia las zonas donde se encontraban los polígonos dispersos pertenecientes al Área Urbana del Municipio para el Año de 1995 y 2005.

- Las zonas con presencia de Vegetación Natural herbácea dentro del polígono general del Área urbana del Municipio del año 2014 pertenecen a las Zonas deportivas y zonas que se encuentran destinadas a vivienda urbana pero q a la fecha no han sido utilizadas como tal.
- Las áreas boscosas localizadas al oriente del Municipio y que sirven como límite natural para el crecimiento se han mantenido a través de los años, ya que se encuentran en zonas de alta pendiente.

5.1.2. Análisis Multitemporal de la dinámica en el cambio de uso del suelo rural-urbano en la región Atlixco, Puebla.

Las transformaciones que sufren los ecosistemas cada vez son más graves. Los cambios del uso del suelo ya sean legales o ilegales son cada día más frecuentes (Pineda et al, 2009). Las modificaciones en el uso del suelo que se han venido dando a lo largo de la historia en el Municipio de Atlixco, Puebla, son producto de los procesos de reestructuración socioeconómica, de difusión, de descentralización industrial a partir de la década de los 70's, así como de políticas que han legislado los recursos naturales como el suelo y agua. En las últimas décadas el cambio de uso del suelo se ha acrecentado en la región de Atlixco, el cual expresa serias implicaciones en el medio ambiente; ya que paulatinamente está transformando sus actividades agrícolas a zonas de vivienda y servicios. Estos cambios no sólo presentan altos costos ecológicos, sino también afectan en las adaptaciones humanas. (Luna Fernández, 2011).

Resultados del estudio

- El análisis multitemporal del cambio de uso de suelo permite evaluar y medir la complejidad de los procesos de cambio en la región de Atlixco, la cual tiene una clara manifestación sobre la cobertura de la vegetación.
- Se observa que, el crecimiento urbano y la evolución de las actividades agrícolas tienen una estrecha relación con las transformaciones del uso de suelo.
- En las últimas décadas, las zonas destinadas a zonas urbanas han incrementado drásticamente y, una disminución de las áreas destinadas a la agricultura; lo que confirma la transformación del uso del suelo agrícola-urbano en la región a lo largo de 30 años.

6. METODOLOGIA

6.1. Tipo de Trabajo

Debido al desordenado y acelerado crecimiento del municipio de Santiago de Cali en los últimos 30 años, es necesario conocer la dinámica de cambios en el uso de suelo y el impacto que esto genera en el ecosistema. Con este propósito se estableció como objetivo de este estudio la cuantificación y delimitación del área de expansión del municipio por medio de imágenes satelitales. Donde las herramientas geoinformáticas se convierten en una de las mejores alternativas para una interpretación visual y digital de imágenes de satélite.

Las imágenes satelitales que se utilizó como insumo para el desarrollo del análisis multitemporal son de la constelación Landsat de los años 1986, 1998 y 2014.

6.2. Información Disponible

Para observar el comportamiento presentado en la ciudad de Santiago de Cali en el periodo de 1986 a 2014, se cuenta como insumo imágenes de satélite de diferentes años. En este caso se tiene imágenes de la constelación Landsat (Tabla 3) que fueron obtenidas del United States Geological Survey (USGS).

Path 9 – Row 58 utilizado para descargar las imágenes satelitales.

FIGURA	SATELITE	SENSOR	PATH	ROW	FECHA	NUBOSIDAD
4	LANDSAT 5	TM	9	58	08-sep-86	43
5	LANDSAT 5	TM	9	58	20-may-98	20
6	LANDSAT 8	OLI_TIRS	9	58	20-ago-14	47.93

Tabla 3. Imágenes Landsat seleccionadas.

6.2.1. Selección de las imágenes de satélite

Las imágenes seleccionadas se obtuvieron de forma gratuita en la plataforma <http://earthexplorer.usgs.gov/> perteneciente al United States Geological Survey (USGS), cuyos Path y Row se describen a continuación:

PATH = 9

ROW = 58

Las imágenes a estudiar presentan un porcentaje de nubosidad bajo en el área de estudio, para facilitar el análisis de estas.

- LM50090581986251AAA03
Landsat 5 del Sensor: MSS

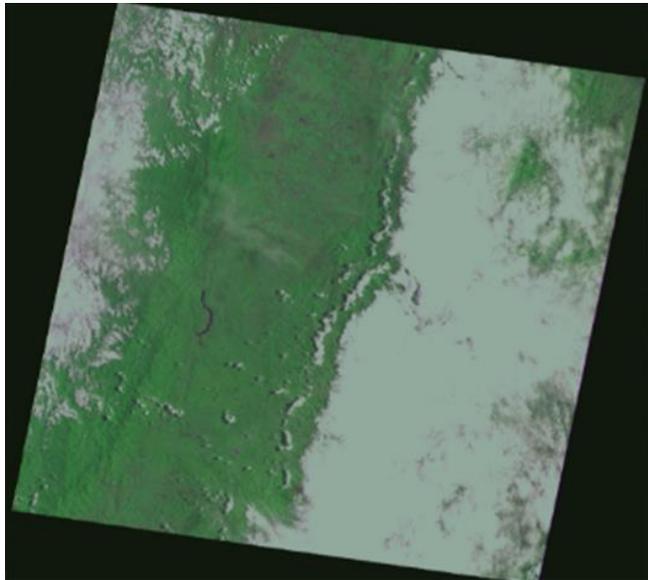


Figura 4. Imagen satelital Landsat 5 de 8 septiembre de 1986.

- LT50090581998140XXX02
Landsat 5 del Sensor: TM

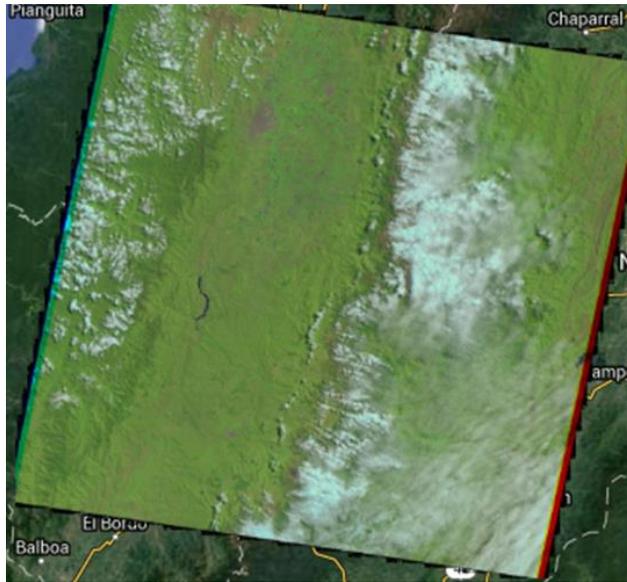


Figura 5. Imagen satelital Landsat 5 de 20 de mayo de 1998.

- LC80090582014232LGN00
Landsat 8 del Sensor: OLI_TIRS



Figura 6. Imagen satelital Landsat 8 de 20 de agosto de 2014.

6.3. Procedimiento

Para una adecuada revisión de los cambios presentados en el área urbana del municipio de Santiago de Cali en el periodo comprendido entre los años 1986 a 2014, es indispensable tener información de tales años. Por ello se cuenta con imágenes satelitales Landsat obtenidas por medio del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

El desarrollo metodológico del estudio de la expansión urbana y por ende de un cambio en el paisaje del municipio de Santiago de Cali se describe a continuación. Las imágenes seleccionadas para realizar el proyecto se relacionan en la tabla N° 3.

6.3.1. Fase I. Levantamiento de la información

6.3.1.1. Delimitación del área de estudio

El área donde se realizó el presente estudio es el municipio de Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, De igual manera se utilizó el formato vectorial del límite municipal de Santiago de Cali, para sobreponerlo en cada una de las imágenes satelitales e identificar la zona a trabajar, el cual se utilizó como referencia un vector de la ciudad del POT del año 2014 para delimitar la parte urbana, zona de expansión y su estructura ecológica.

6.3.1.2. Periodo de tiempo de análisis

El periodo de análisis comprende desde el año 1986 donde el municipio contaba con 1.453.837 personas hasta el año 2014 donde la población llega a ser de 2.349.756 personas, durante este espacio de tiempo se presentó una importante

dinámica de desarrollo y crecimiento urbano en el municipio de Santiago de Cali. (DANE, 2014).

6.3.1.3. Selección de las imágenes de satélite

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó como insumo 3 imágenes de satélite de la plataforma Landsat (Tabla 3), obtenidas de forma gratuita del portal United States Geological Survey (USGS). Se buscó que las imágenes seleccionadas tuvieran el menor porcentaje nuboso en el área de estudio.

6.3.1.4. Información disponible

6.3.1.4.1. Información Primaria; Imágenes Landsat.

6.3.1.4.2. Información Secundaria; Cartografía, POT, Documentación de la ciudad.

6.3.2. Fase II. Pre – procesamiento

6.3.2.1. Cambio de formato de la imagen

Consiste en el cambio del formato del archivo original de las imágenes de .Tiff (Tagged Image File Format) a .img, con el fin de comprimir y reducir el número de bit, sin que esto implique disminuir la calidad de la imagen. La transformación se realizó en el programa Erdas Imagine, en el módulo Interpreter y comando Utilities Layer Stack con el fin de producir una imagen de salida que agrupa las bandas según el tipo de imagen y como resultado obtenemos una con extensión .img.

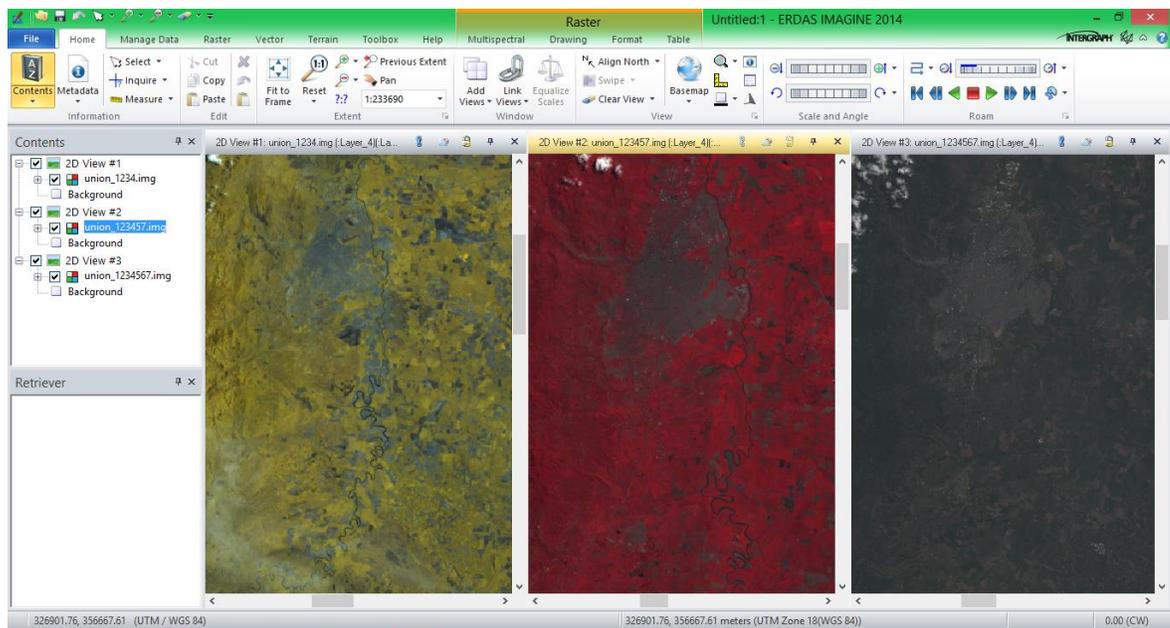


Figura 7. Imágenes Satelitales con extensión .img de los años 1986, 1998 y 2014 respectivamente.

Fuente: El autor, Erdas Imagine 2014

6.3.2.2. Correcciones

Las correcciones que se deben realizar sobre las imágenes tienden a eliminar los ruidos causados a la señal que llega al satélite luego de haber atravesado la atmósfera, el efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los ND de los píxeles. Pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de forma que no coincida con el tono, posición y tamaño de los objetos. Algunas técnicas, para corregir estos efectos, son incorporadas de modo rutinario por las estaciones receptoras de las imágenes, pero en otros casos se requieren correcciones más detalladas como en los estudios multitemporales o cuando se requiere incorporar información auxiliar (Chuvieco, 1996).

6.3.2.2.1. Correcciones geométricas

Este proceso permite que en las imágenes satelitales se eliminen desplazamientos y distorsiones geográficas indeseadas, causadas por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la captura), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados a la imagen. Es decir, tiene la finalidad de adaptar las imágenes a una proyección cartográfica específica y un sistema de coordenadas asociado.

Sistema de Coordenadas: MAGNA_Cali_Valle_del_Cauca_2009

Proyección: WGS_84_UTM_zone_18N

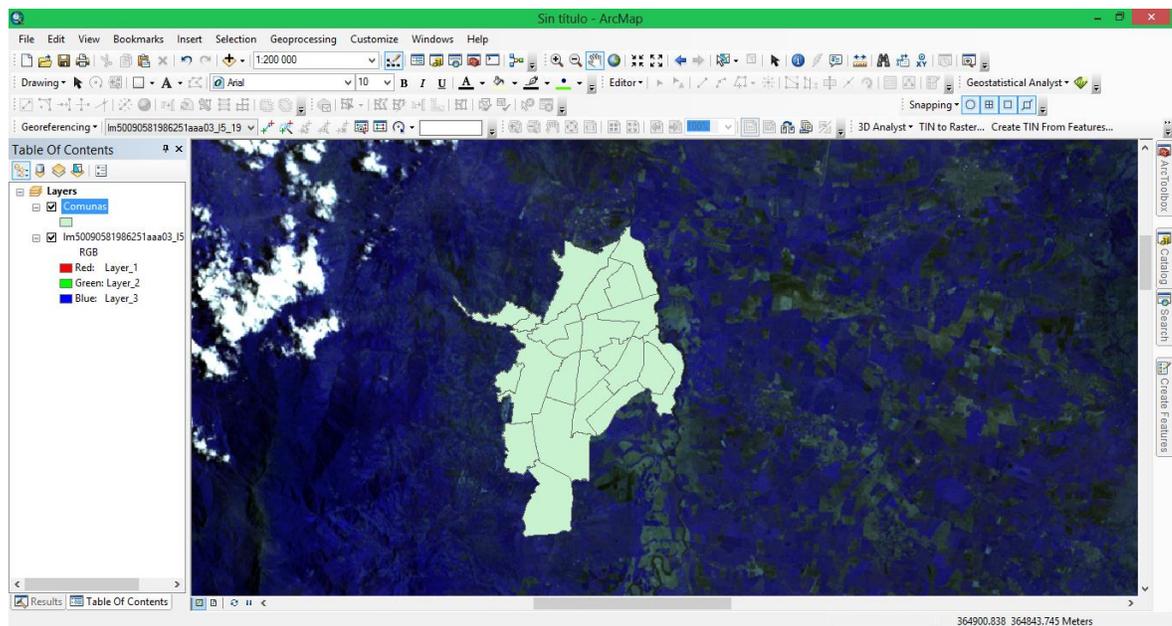


Figura 8. Georeferenciación uniforme de la imagen satelital y vector de la ciudad de Santiago de Cali.

Fuente: El autor, ArcGis.

6.3.2.2.2. Calibración radiométrica

Es un error que influye en la radiación o el valor radiométrico de un elemento de la escena. Es decir, trata de corregir problemas mecánicos en el sensor que implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen.

6.3.2.2.3. Correcciones Atmosféricas

Las imágenes satelitales se ven oscurecidas por efectos atmosféricos como la neblina, debido a las condiciones existentes en la atmósfera en el momento que se realiza la captura de la imagen. El objetivo de la corrección atmosférica es eliminar los efectos atmosféricos y del terreno para recuperar los parámetros físicos de la superficie terrestre incluyendo la reflectancia de la superficie, la visibilidad del suelo y la temperatura. Esta corrección es importante en este caso ya que es necesario comparar y analizar imágenes de diferentes fechas y una multiplicidad de sensores y condiciones.

6.3.2.2.4. Calculo de la radiancia o calibración radiométrica

Para interpretar los valores de las imágenes satelitales es necesario llevar los valores de los N.D. (Niveles Digitales) a magnitudes físicas de radiancia, como medida de la cantidad de energía que llega al satélite (L_{sat}) y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$L: (Gain * N.D.) + Bias$$

Dónde:

L: Radiancia

Gain: Ganancia de la banda

Bias: Perdida

En los anexos I, II, III y IV se presentan los metadatos de las 3 imágenes satélites que se utilizó para el desarrollo de este procedimiento.

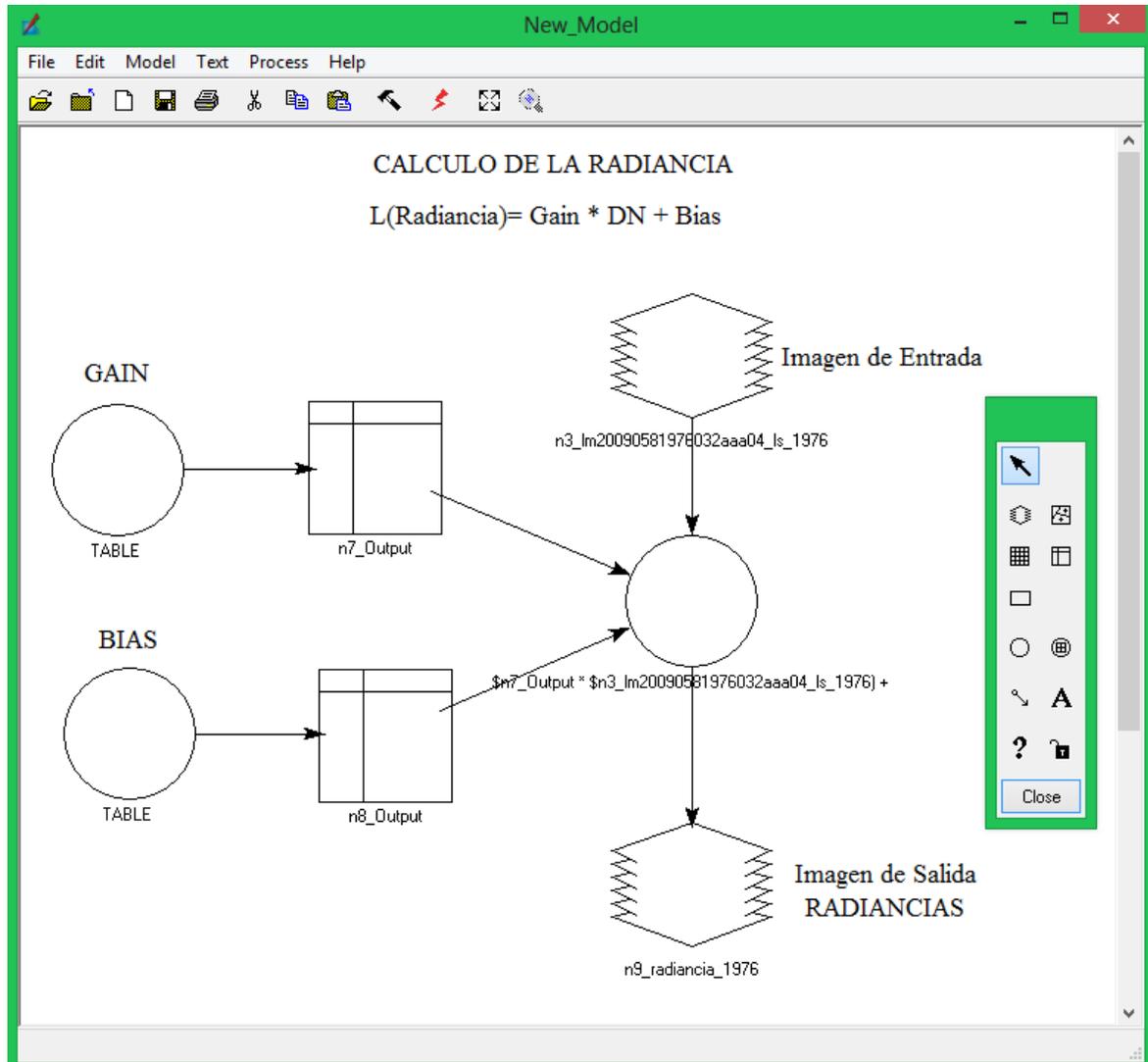


Figura 9. Modelo para el cálculo de la radiancia de las 4 imágenes satelitales en Model Maker.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

6.3.2.2.5. Calculo de la reflectancia o corrección atmosférica

Una vez obtenida la radiancia, nos permite modelar las propiedades de reflectancia de los objetos o procesos biofísicos en la superficie y la atmosfera, este procedimiento se realiza con la herramienta Model Maker, en el software Erdas Imagine 2014. La reflectancia nos indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada, esta es calculada con la siguiente ecuación:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L_{sat} d^2}{E_o \cos \theta}$$

Dónde:

π : Hipótesis de blanco labertino (3.141592654)

L_{sat} : Radiancia ($L_{sat}: (N.D. * Gain) + Bias$)

d^2 : Distancia tierra sol en unidades atómicas ($d: 1 - 0.001673 \cos(2 * \pi (\text{dia juliano} - 3) / 365)$)

E_o : Irradiancia solar espectral a tope de la atmosfera

θ : Ángulo cenital solar

En los anexos I, II, III y IV se presentan los metadatos de las 3 imágenes satélites que se utilizó para el desarrollo de este procedimiento.

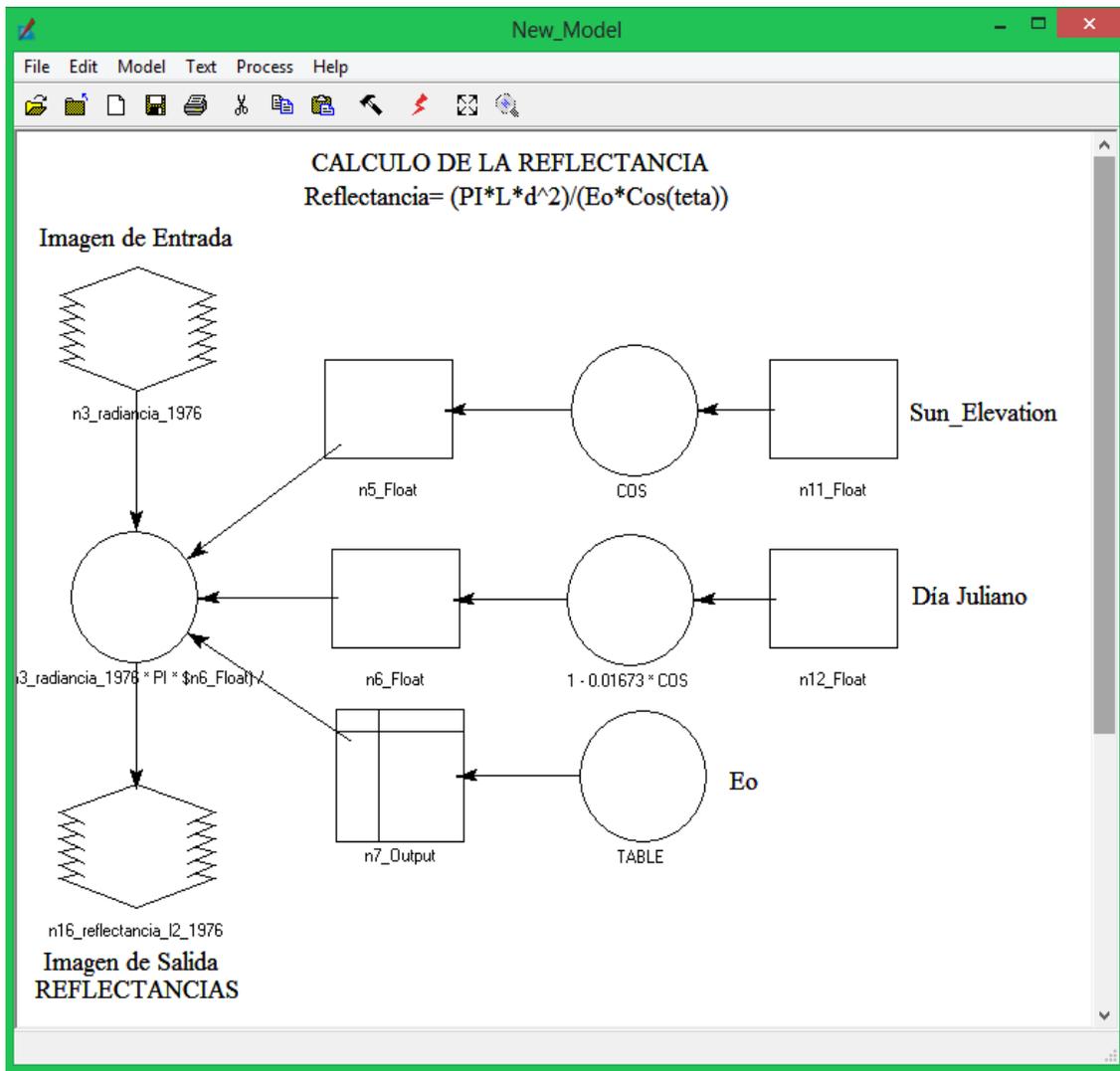


Figura 10. Modelo para el cálculo de la reflectancia de las 4 imágenes satelitales en Model Maker.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

El resultado de la reflectancia es la relación de energía incidente y la reflejada, cuyo resultado se da en porcentaje. Esta se obtiene a partir del modelo de radianza. Para su cálculo se ingresa en cada imagen satelital la elevación solar y el año juliano que corresponde a la fecha de la captura de la imagen; por medio de este proceso la reflectancia que se obtiene se convierte en valores digitales.

6.3.2.3. Corte de las imágenes

Luego de realizar las correcciones Geométricas y Radiométricas se procede a realizar el corte de las imágenes. Se realiza un ajuste o recorte (subset) a las 3 imágenes de satélite en el sitio específico de estudio que es el parte urbana y el área de expansión del municipio de Santiago de Cali.

Este procedimiento se realiza en el software Erdas Imagine, en el comando Interpreter, opción Subset, en el cual se ingresa la imagen en formato .img y se carga el vector del municipio asegurando que las imágenes satelitales y el vector tengan las mismas unidades de georeferenciacion, se aplica Subset y se guarda la nueva imagen con el área deseada.

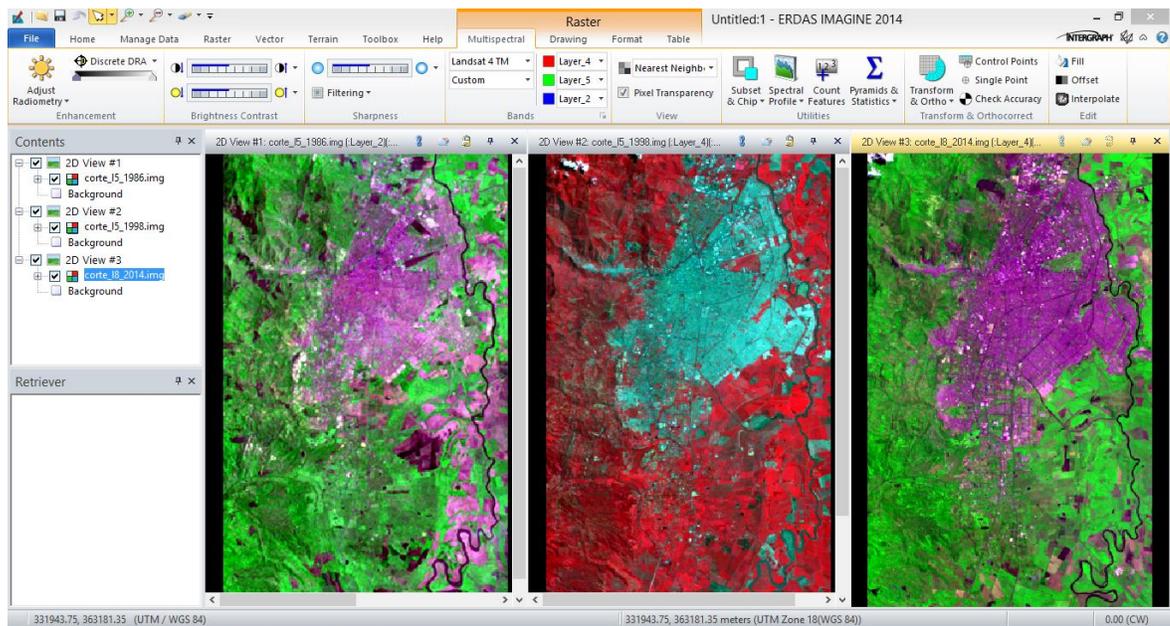


Figura 11. Corte de las 3 imágenes satelitales en Subset & Chip.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

6.3.3. Fase III. Tratamiento digital

6.3.3.1. Clasificación supervisada

Partiendo de un conocimiento previo del área de estudio, para este caso el municipio de Santiago de Cali, nos permite tener un parámetro de referencia. En este proceso los pixeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida.

En la clasificación supervisada se realiza una identificación de muestras, es decir, se necesita determinar físicamente cuales son los pixeles bases para generar las clases. Se seleccionó áreas representativas de cada cobertura del suelo con el fin de obtener su valor espectral. Es necesario realizar diferentes combinaciones de bandas que permitiera distinguir mejor las coberturas a tratar.

La clasificación supervisada involucra las siguientes etapas:

6.3.3.1.1. Etapa de entrenamiento:

Se seleccionan áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés, en este caso las coberturas del suelo que se utilizó para la creación de los Signature en el software Erdas Imagine y posterior clasificación supervisada son:

- **Cuerpos de agua:** ríos y lagunas.
- **Urbano:** infraestructuras, construcciones, vías, entre otras.
- **Cobertura vegetal:** Bosques medios, cultivos, pastos, entre otros.

Con la herramienta AOI se crea las firmas espectrales, estas firmas son paramétricas, ya que tienen información estadística.

Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
9	a9	Dark Blue	#####	0.000	0.369	9	9	14	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
10	a10	Dark Blue	#####	0.000	0.467	10	10	9	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
11	a11	Dark Blue	#####	0.000	0.413	11	11	13	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
12	a12	Dark Blue	#####	0.000	0.378	12	12	6	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
13	a13	Dark Blue	#####	0.000	0.375	13	13	10	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
14	a14	Dark Blue	#####	0.000	0.395	14	14	10	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
15	a15	Dark Blue	#####	0.000	0.381	15	15	11	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
16	a16	Dark Blue	#####	0.208	0.248	16	16	18	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
17	a17	Dark Blue	#####	0.000	0.391	17	17	12	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
18	v1	Green	#####	0.667	0.126	18	18	73	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
19	v2	Green	#####	0.568	0.169	19	19	215	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
20	v3	Green	#####	0.576	0.332	20	20	208	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
21	v4	Green	#####	0.676	0.337	21	21	133	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
22	v5	Green	#####	0.579	0.269	22	22	82	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
23	v6	Green	#####	0.718	0.292	23	23	202	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
24	v7	Green	#####	0.589	0.202	24	24	110	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
25	v8	Green	#####	0.950	0.349	25	25	96	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
26	v9	Green	#####	1.000	0.295	26	26	98	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
27	v10	Green	#####	0.901	0.377	27	27	117	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
28	v11	Green	#####	0.750	0.341	28	28	120	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
29	v12	Green	#####	0.893	0.365	29	29	57	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
30	v13	Green	#####	0.824	0.219	30	30	124	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
31	v14	Green	#####	0.824	0.219	31	31	124	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
32	v15	Green	#####	0.545	0.328	32	32	122	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
33	v16	Green	#####	0.465	0.273	33	33	262	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
34	v17	Green	#####	0.638	0.411	34	34	189	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
35	v18	Green	#####	0.589	0.269	35	35	138	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
36	v19	Green	#####	0.705	0.369	36	36	65	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
37	v20	Green	#####	0.698	0.296	37	37	121	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
38	u1	Blue	#####	0.080	0.802	38	38	90	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
39	u2	Blue	#####	0.112	0.816	39	39	109	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
40	u3	Blue	#####	0.211	0.812	40	40	59	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
41	u4	Blue	#####	0.172	0.814	41	41	36	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
42	u5	Blue	#####	0.197	0.795	42	42	56	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
43	u6	Blue	#####	0.141	0.626	43	43	50	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
44	u7	Blue	#####	0.276	0.605	44	44	88	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
45	u8	Blue	#####	0.463	0.908	45	45	33	1.000	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 12. Modelo de los Signature Name de las Imágenes Satelitales.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
1	Cuerpos_Agua	Blue	0.000	0.000	1.000	50	50	1021	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
2	Cobertura_Vegetal	Green	0.000	1.000	0.000	62	111	62416	1.000	✓	✓	✓	✓	✓
3	Urbano	Red	1.000	0.000	0.000	52	162	23446	1.000	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 13. Modelo de los Signature Name de la Imágenes Satelitales.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

6.3.3.1.2. Selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación.

Se le asigna a cada pixel de la imagen una de las clases antes seleccionadas, como resultado se obtiene una segunda imagen, donde los Niveles Digitales (ND) expresan una categoría de acuerdo al algoritmo elegido, en este caso de Máxima Probabilidad, cuyo principio es asignarle el pixel a la clase con mayor probabilidad de pertenencia.

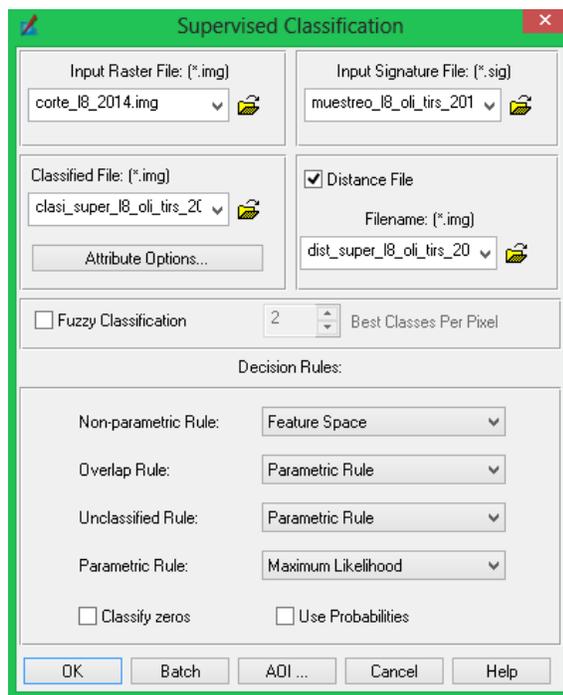


Figura 14. Algoritmo de clasificación de la Imagen Landsat 8 del año 2014.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

La combinación de bandas utilizada para el muestreo de la imagen Landsat 5 del sensor MSS fue de 2 – 3 – 1

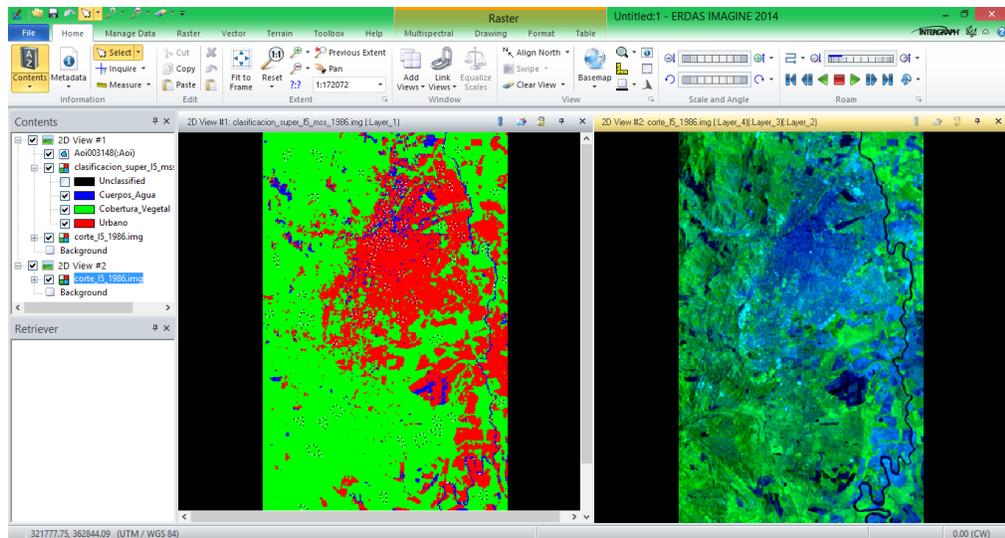


Figura 15. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 5 del año 1998.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

La combinación de bandas utilizada para el muestreo de la imagen Landsat 5 del sensor TM fue de 2 – 4 – 1

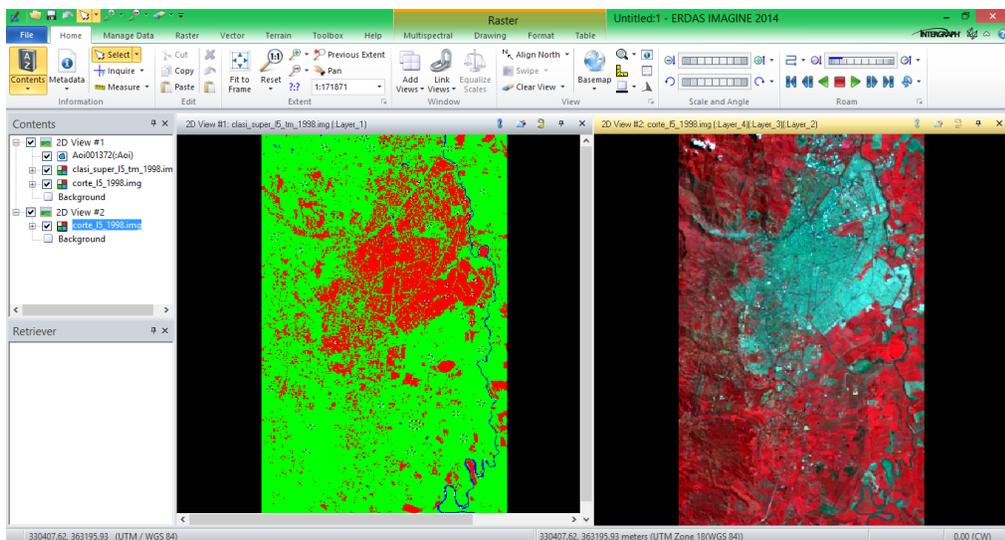


Figura 16. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 5 del año 1998.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

La combinación de bandas utilizada para el muestreo de la imagen Landsat 8 del sensor OLI_TIRS fue de 4 – 5 – 2

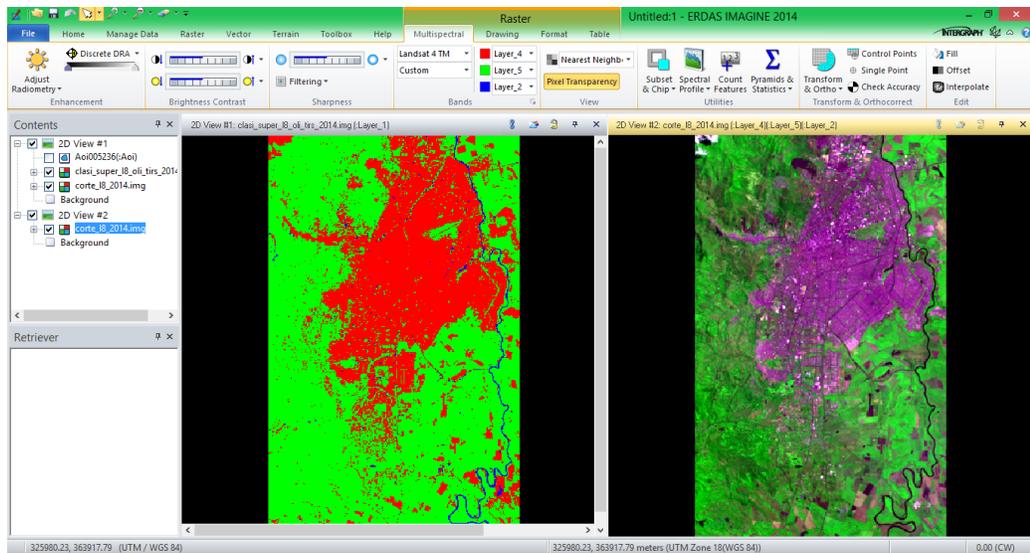


Figura 17. Clasificación Supervisada de la Imagen Landsat 8 del año 2014.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

Una vez realizado el muestreo de la clasificación supervisada se obtiene las firmas espectrales con la herramienta Signature Statistics.

Se realiza la recodificación a la clasificación supervisada de las imágenes satelitales, a las coberturas previamente seleccionadas. Se asigna a cada pixel de la imagen una de las clases seleccionadas, generando una nueva imagen, donde los pixeles se asignan a aquella clase con mayor probabilidad de pertenencia.

6.3.3.2. Operaciones de post clasificación.

6.3.3.2.1. Suavizado de los resultados

La imagen resultante de la clasificación supervisada presenta problemas por una desordenada asignación de píxeles, lo que se conoce como efecto Sal y Pimienta. Para corregir este inconveniente se realiza un suavizado con el objetivo de reasignar los píxeles que están aislados y de esta manera hacer más nítida las diferentes categorías de la imagen.

El suavizado se realiza con la herramienta Neighborhood y el método de interpolación de filtro de paso bajo de Moda de 3 x 3 píxeles que permite asignar el valor del píxel más frecuente entre los píxeles vecinos.

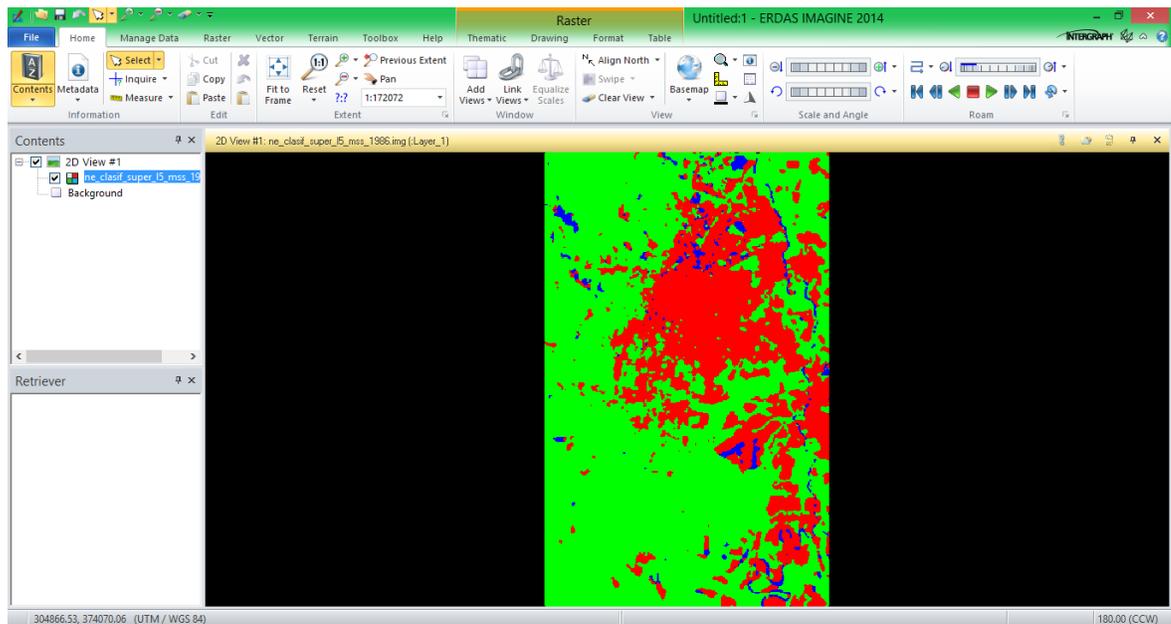


Figura 18. Realce de la Imagen Landsat 5 del año 1986.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

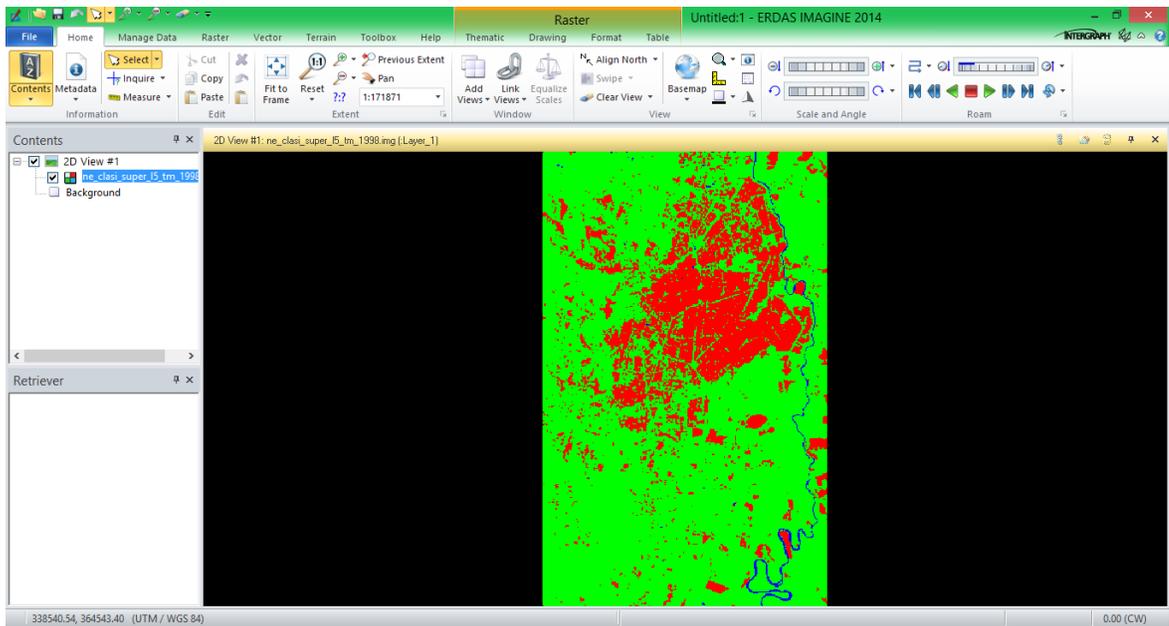


Figura 19. Realce de la Imagen Landsat 5 del año 1998.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

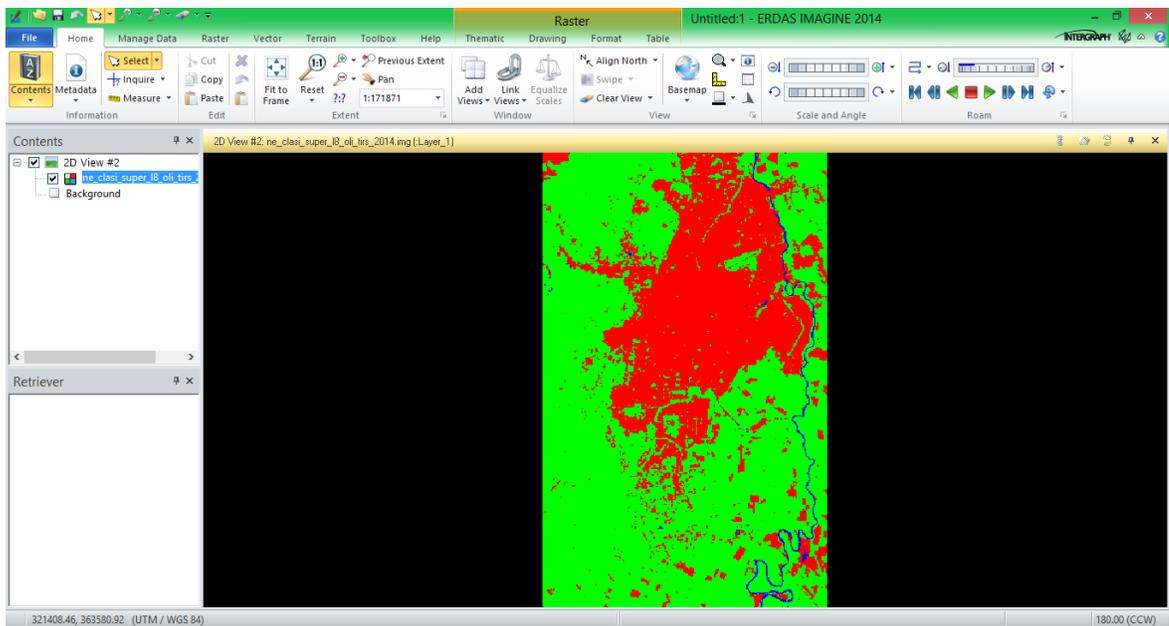


Figura 20. Realce de la Imagen Landsat 8 del año 2014.

Fuente: El Autor, Erdas Imagine 2014.

6.3.4. Fase IV. Análisis multitemporal de las Imágenes

El análisis multitemporal involucra un cruce digital de imágenes de satélite con características similares y con fechas determinadas. Al realizar este cruce digital de las imágenes permite detectar los cambios que ha sufrido en la cobertura, ya sea que gane o pierda área.

La información raster obtenida en los procedimientos anteriores se convierte en vectorial de tipo polígono en el software Erdas Imagine, con el fin de determinar el área de interés (expansión urbana) y los cambios en la cobertura que ha venido presentando el municipio de Santiago de Cali.

En este tipo de estudios se evalúan los cambios que ocurren en las coberturas del suelo, en este caso la vegetal, cuerpos de agua e infraestructura, ya sea de tipo estacional de las cubiertas, desastres naturales o modificaciones causadas por la mano del hombre. Esta comparación se realiza pixel a pixel de los niveles digitales de las diferentes imágenes.

Una vez realizada la clasificación de las imágenes de satélite del municipio de Santiago de Cali, lo que se pretende es identificar posibles dinámicas de cambios que se presenten en las coberturas Vegetal, Urbano y cuerpos de agua para los años de 1986, 1998 y 2014. En el software ERDAS Imagine el procedimiento que se realiza es el traslape de las 3 imágenes para generar una nueva, en formato .img, en esta se observa los cambios ocurridos en el tiempo de estudio.

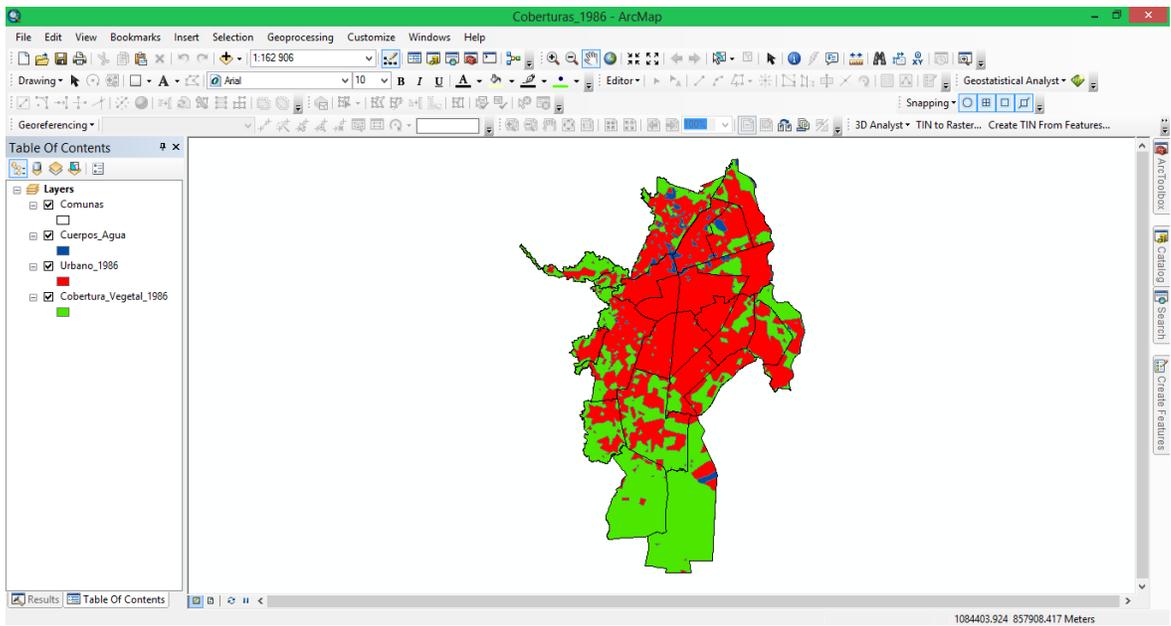


Figura 21. Vector tipo polígono de la Imagen Landsat 5 del año 1986.

Fuente: El Autor, ArcMap.

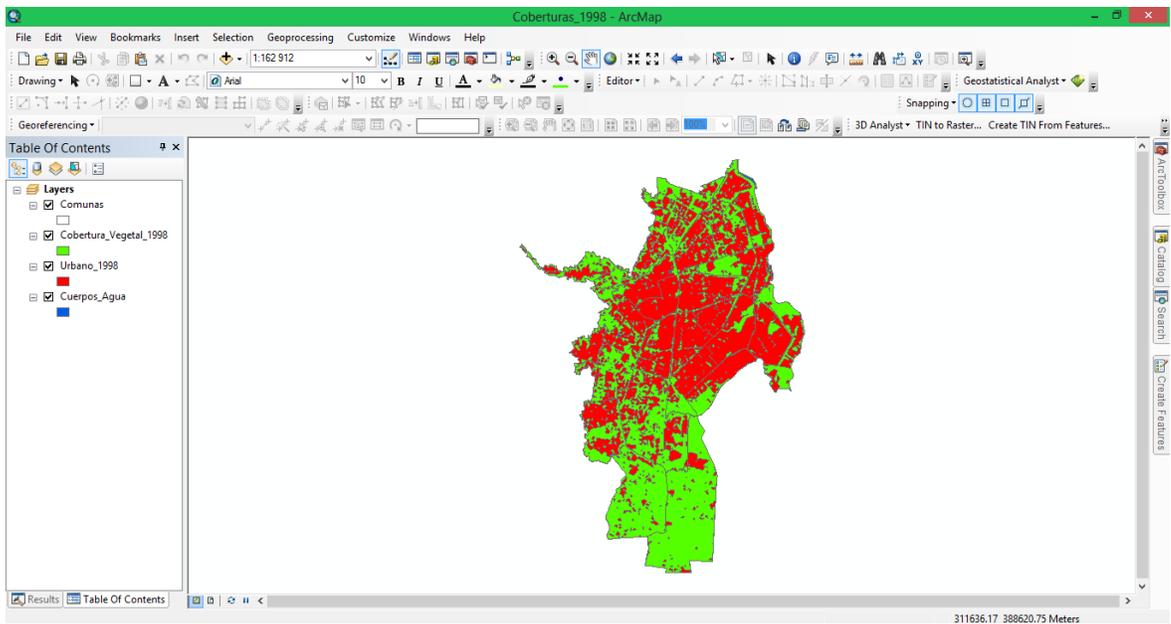


Figura 22. Vector tipo polígono de la imagen Landsat 5 del año 1998.

Fuente: El Autor, ArcMap.

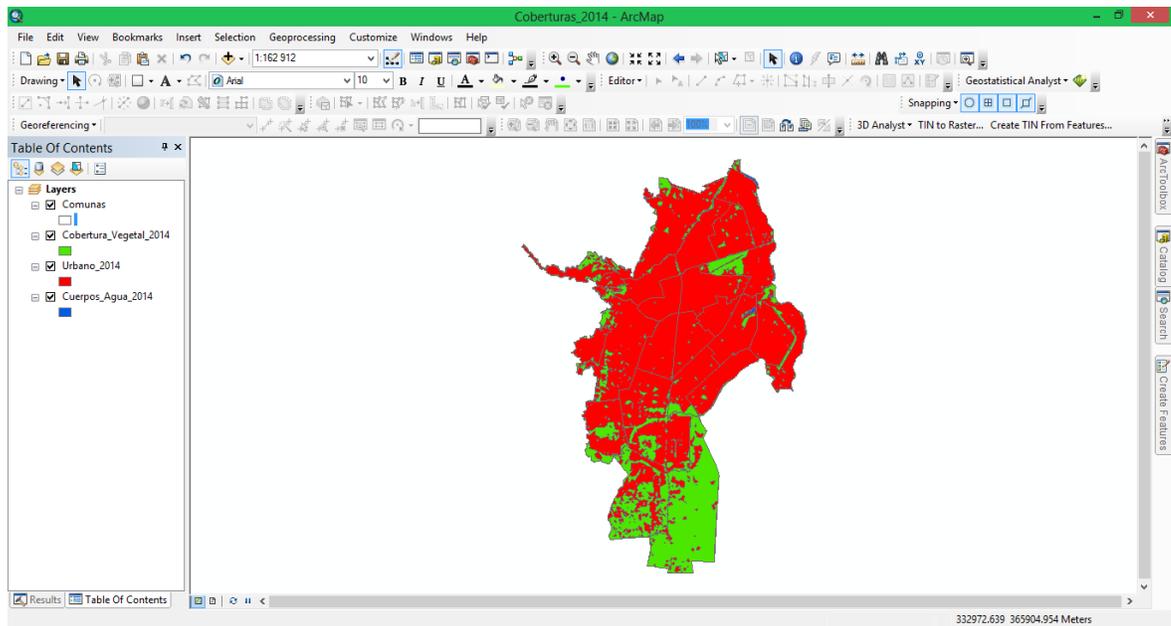


Figura 23. Vector tipo polígono de la imagen Landsat 8 del año 2014.

Fuente: El Autor, ArcMap.

6.4. Análisis de los resultados

- El análisis multitemporal de la expansión urbana del municipio de Santiago de Cali permitió determinar las áreas de la cobertura Urbana para los años de 1986, 1998 y 2014. El parámetro utilizado para determinar la dinámica de cambios fue la ganancia y pérdida respecto al área que poseía cada clase en los diferentes años de estudio. El porcentaje de área ganado o perdido se estima mediante el cálculo de la Tasa Anual de Cambio.

AÑO	ÁREA (Ha)	RAZÓN DE CAMBIO (%)
1986	7472.17	0
1998	8724.85	116.76
2014	10228.77	136.89

Tabla 4. Tasa de Expansión Urbana en el municipio de Santiago de Cali.

Fuente: El Autor.

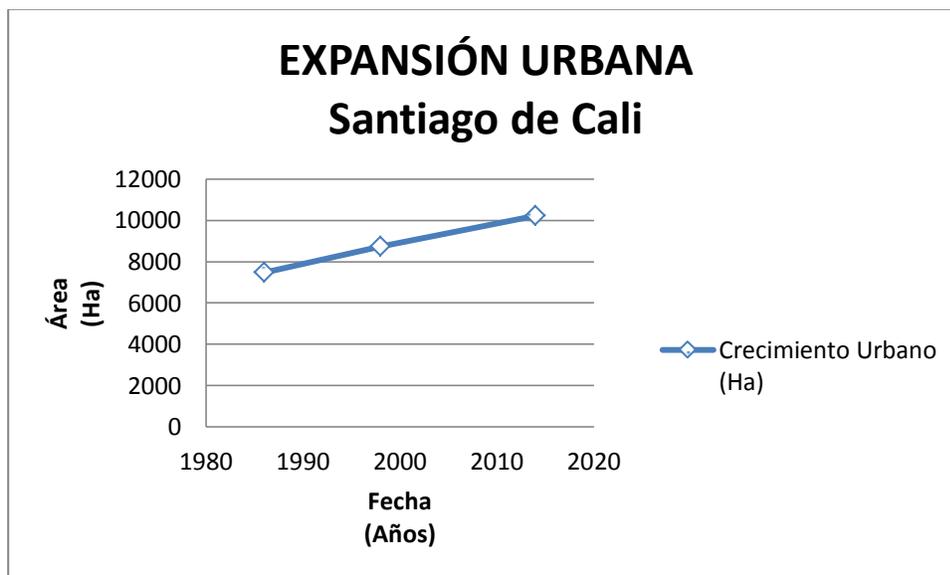


Gráfico 1. Expansión urbana de Santiago de Cali para los años de 1986, 1998 y 2014.

Fuente: El Autor.

PERIODO DE TIEMPO	AÑOS	ÁREA (Ha)	ÁREA (Km)	EXPANSIÓN (Km)	TASA ANUAL DE CAMBIO (Km/Año)
1986	0	7472.17	74.7217	0	0
1986 - 1998	12	8724.85	87.2485	12.5268	1.0439
1998 - 2014	16	10228.77	102.2877	15.0392	0.93995
1986 - 2014	28	2756.60	27.5660	27.5660	0.9845

Tabla 5. Incremento del área en el tiempo de estudio en el municipio de Santiago de Cali.

Fuente: El Autor.

- Entre los años de 1986 y 1998 la cobertura urbana presentó un incremento de 1252.68 Ha, ocurrido en un periodo de 12 años y una tasa anual de cambio de 1.0439 Km/año. Presentando una mayor expansión hacia el sur y oriente de la ciudad. Este último con construcciones artesanales de invasión hacia el río Cauca.
- Para el periodo de 1998 a 2014 se hace más notorio el incremento de la cobertura urbana, pasando de 8724.85 Ha a 10228.77 Ha, con una tasa anual de crecimiento de 0.93995 Km/año. Extendiéndose hacia el oeste sobre los cerros de Santiago de Cali y la salida al mar (Buenaventura) y al sur de ciudad, hacia el municipio vecino de Jamundí y el departamento del Cauca, zona dispuesta por el Plan de Ordenamiento Territorial – POT para su expansión de forma controlada.
- Las zonas donde se presenta la cobertura vegetal dentro del perímetro urbano del municipio de Santiago de Cali, corresponde principalmente a la rivera de los ríos Cali y Meléndez, Base Aérea Marco Fidel Suárez, espacios deportivos y al sur de la ciudad el área de expansión.

Área urbana del municipio de Santiago de Cali en el año de 1986.

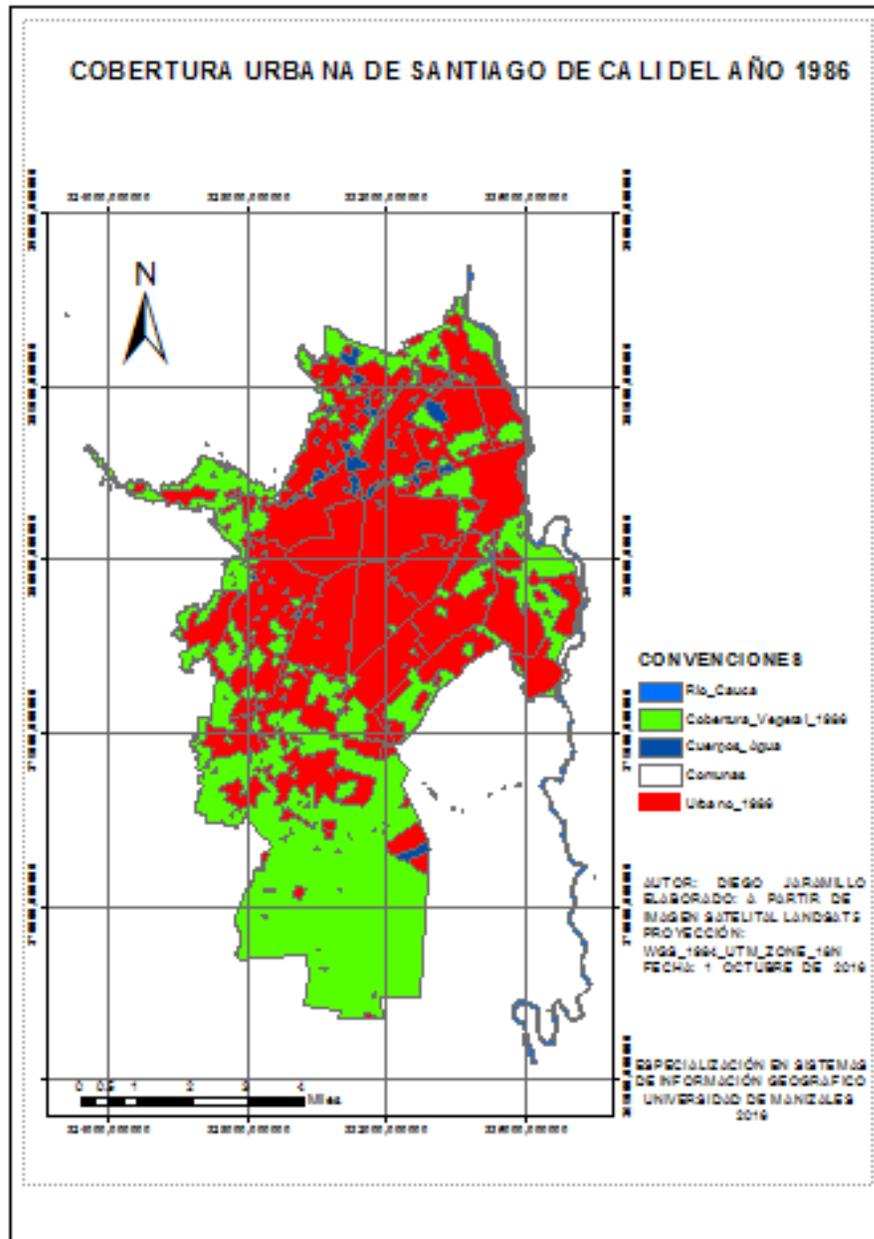


Figura 24. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 1986

Fuente: El Autor, ArcMap

Salida gráfica del área urbana del municipio de Santiago de Cali para el año 1998.

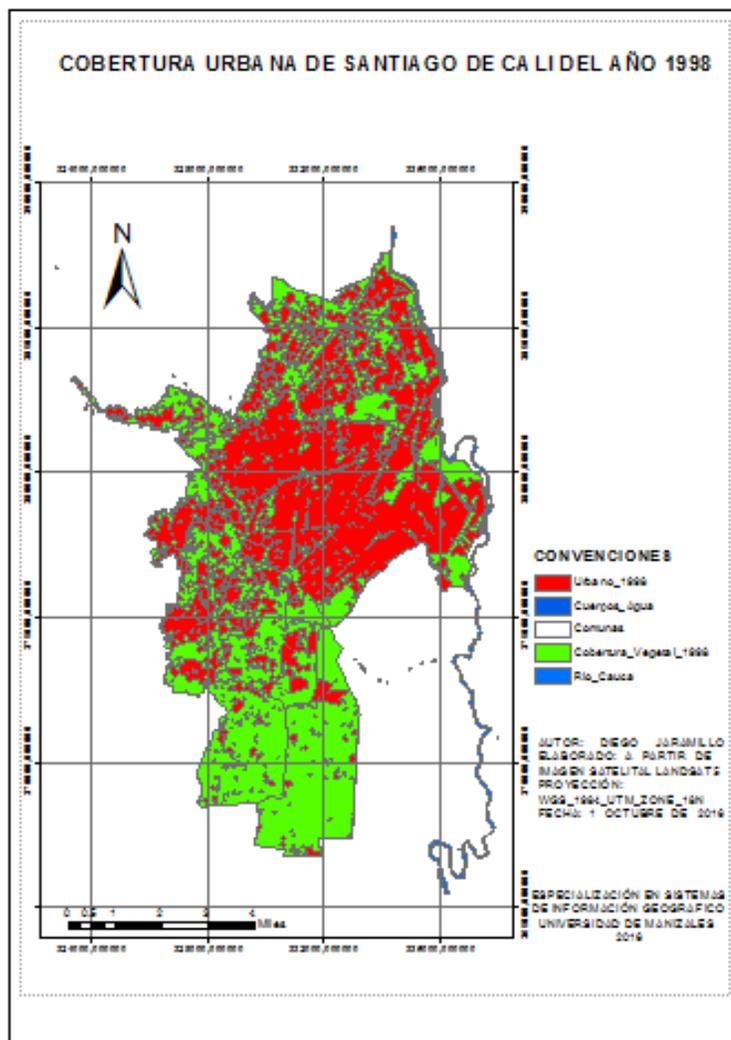


Figura 25. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 1998.

Fuente: El Autor, ArcMap

Salida gráfica del área urbana del municipio de Santiago de Cali para el año 2014.

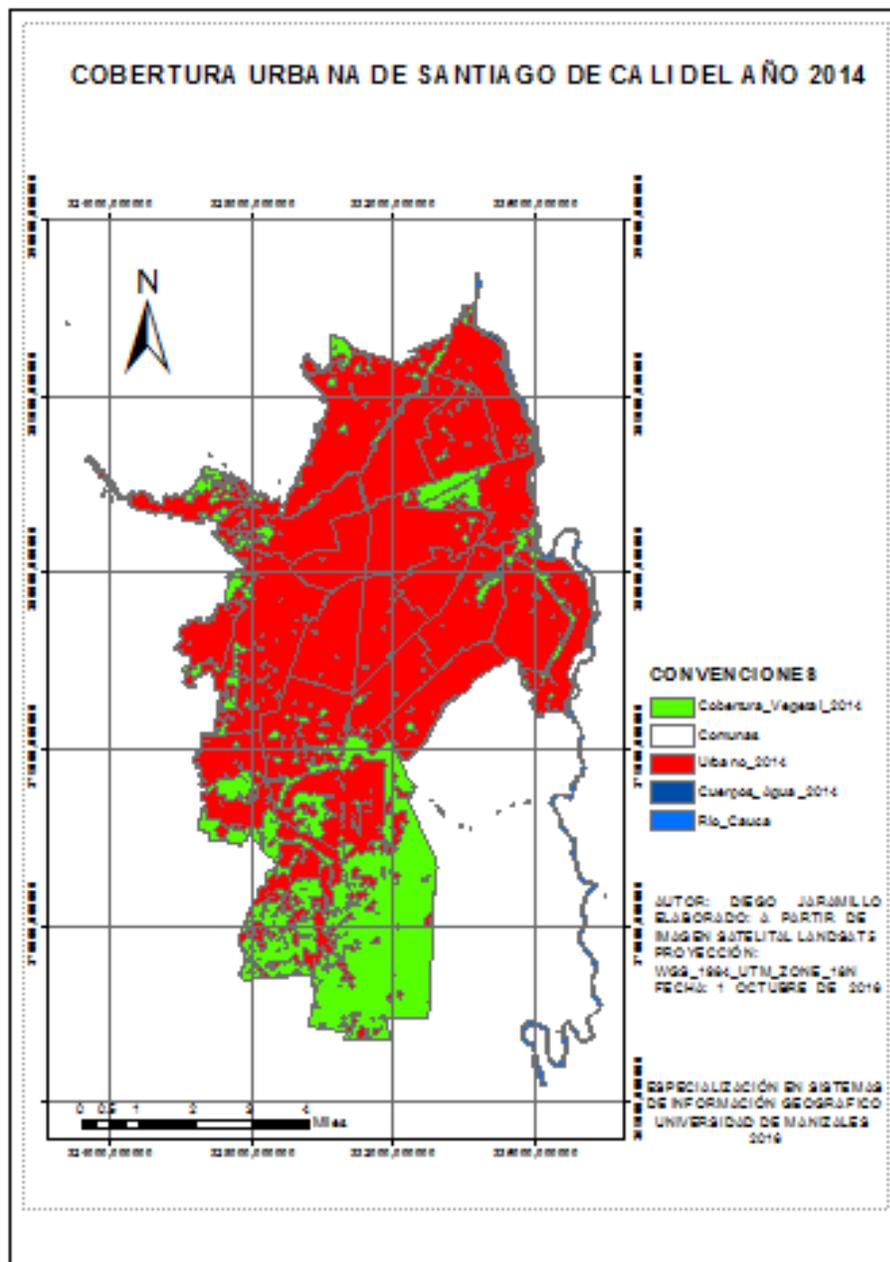


Figura 26. Cobertura urbana del municipio de Santiago de Cali para el año de 2014.

Fuente: El Autor, ArcMap

7. CONCLUSIONES

- El análisis multitemporal de la cobertura Urbana del municipio de Santiago de Cali para los años de 1986, 1998 y 2014 evidencia un aumento de esta en el tiempo, presentando una tasa anual de cambios de 0.9845 Km/año, lo que indica una ganancia en área urbana en 2756.6 Ha. desde el año 1986 a 2014.
- El estudio temporal de ciudades requiere de un nivel de resolución alto, a pesar de esto las imágenes satelitales Landsat utilizadas para el desarrollo de este estudio presento información necesaria para generar los productos requeridos.
- La Expansión Urbana del municipio de Santiago de Cali para el periodo comprendido de 1986 a 2014 se presentó principalmente a los proyectos de vivienda, escenarios deportivos y equipamiento vial en el sur de la ciudad, además de los asentamientos ilegales que se daban en el oriente, junto al río Cauca.

8. RECOMENDACIONES

- El conocimiento previo de la zona de estudio permite tener mayor claridad en la ubicación de las coberturas a trabajar.
- Contar con imágenes de mayor resolución facilita la identificación de las diferentes coberturas presentes en el suelo, esto permitiría realizar un análisis más detallado de la zona de estudio.
- El análisis multitemporal de la expansión urbana de Santiago de Cali nos abre la posibilidad de tener una base para una adecuada toma de decisiones en la planificación y uso de los recursos hacia un desarrollo regulado del municipio.

BIBLIOGRAFIA

Servicio Geológico de Estados Unidos, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. [Último acceso: 15 Diciembre 2014].

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección. 3^a edición revisada ed. Ediciones RIALP, Madrid.

Chuvieco, E. Aportaciones de la Teledetección Espacial a la Cartografía de Ocupación del Suelo.

<http://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC8585110029A>

Chuvieco, E. 2008 Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio. 3^o ed. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona, España.

Molina G.Z., Chuvieco, E. (1997) Detección del crecimiento urbano de la ciudad de Maracaibo – Venezuela mediante análisis multitemporal de imágenes MSS y TM. Teledetección y aplicaciones. Universidad de Valladolid – España.

V. Luna, Análisis multitemporal de la dinámica en el Cambio de uso del suelo rural – urbano en la región de Atlixco, Puebla. Puebla. México, 2011.

Mendoza, E. García, P. Análisis multitemporal de uso y cobertura de suelo en el municipio de Manaure – Guajira – Colombia, Implementando imágenes Landsat. Bogotá – Colombia, (2009).

<http://idesc.cali.gov.co/geovisor.php>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Proyecciones de población. Página del DANE:http://www.dane.gov.co/#twoj_fragment1-4 fecha de consulta 7-Nov-2016.

Fernández - Coppel, I. A., & Herrero Llorente, E. (2001). El Satelite Landsat. Análisis Visual De Imágenes Obtenidas Del Sensor Etm+. Valladolid: Universidad de Valladolid.

A. Gómez, «Estudio Multitemporal de la dinámica de transformación espacial de la cobertura por crecimiento Urbano, en la zona de la Localidad de Suba, Bogotá - Colombia, en el periodo de 1955 - 2006.,» Bogotá, Colombia, 2009.

**ANEXO I. METADATO DE LA IMAGEN SATELITAL
"LM50090581986251AAA03"**

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "9991602140001_18548"
LANDSAT_SCENE_ID = "LM50090581986251AAA03"
FILE_DATE = 2016-02-14T05:12:23Z
STATION_ID = "AAA"
PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_12.7.0"
DATA_CATEGORY = "NOMINAL"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
DATA_TYPE = "L1T"
DATA_TYPE_LORP = "MSSA_LORP"
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
EPHEMERIS_TYPE = "PREDICTIVE"
SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_5"
SENSOR_ID = "MSS"
WRS_PATH = 009
WRS_ROW = 058
DATE_ACQUIRED = 1986-09-08
SCENE_CENTER_TIME = "14:40:04.4990000Z"
CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.84221
CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.33465
CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.84537
CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.26174
CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 2.00791
CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.33086
CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 2.00956
CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.26131
CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 240720.000
CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 425040.000
CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 470940.000
CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 425040.000
CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 240720.000
CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 222120.000

CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 470940.000
CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 222120.000
REFLECTIVE_LINES = 3383
REFLECTIVE_SAMPLES = 3838
FILE_NAME_BAND_1 = "LM50090581986251AAA03_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LM50090581986251AAA03_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LM50090581986251AAA03_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LM50090581986251AAA03_B4.TIF"
PRESENT_BAND_1 = "Y"
PRESENT_BAND_2 = "Y"
PRESENT_BAND_3 = "Y"
PRESENT_BAND_4 = "Y"
GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME = "LM50090581986251AAA03_GCP.txt"
REPORT_VERIFY_FILE_NAME = "LM50090581986251AAA03_VER.txt"
BROWSE_VERIFY_FILE_NAME = "LM50090581986251AAA03_VER.jpg"
METADATA_FILE_NAME = "LM50090581986251AAA03_MTL.txt"
CPF_NAME = "LM5CPF19841109_19940428.05"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 43.00
IMAGE_QUALITY = 5
SUN_AZIMUTH = 84.34060352
SUN_ELEVATION = 54.25987938
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0073863
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 3
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 115
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 36.895
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 25.664
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 26.507
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 87
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 0.514
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UL = 0.610
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UR = 0.543
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LL = 0.499
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LR = 0.596
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 220.800
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = 2.500
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 163.600

RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = 2.700
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 140.300
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = 4.700
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 117.500
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = 2.900
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 0.380925
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = 0.004313
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 0.328454
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = 0.005421
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 0.362187
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = 0.012133
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 0.437322
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = 0.010793
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_GAIN_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_4 = "CPF"
GAIN_BAND_1 = "L"
GAIN_BAND_2 = "L"
GAIN_BAND_3 = "L"
GAIN_BAND_4 = "L"
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 8.5945E-01
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 6.3346E-01
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 5.3386E-01

```
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 4.5118E-01
RADIANCE_ADD_BAND_1 = 1.64055
RADIANCE_ADD_BAND_2 = 2.06654
RADIANCE_ADD_BAND_3 = 4.16614
RADIANCE_ADD_BAND_4 = 2.44882
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 1.4827E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 1.2718E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 1.3782E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 1.6792E-03
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = 0.002830
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = 0.004149
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = 0.010755
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = 0.009114
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"
ELLIPSOID = "WGS84"
UTM_ZONE = 18
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 60.00
ORIENTATION = "NORTH_UP"
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
MAP_PROJECTION_LORA = "SOM"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = L1_METADATA_FILE
END
```

**ANEXO II. METADATO DE LA IMAGEN SATELITAL
"LT50090581998140XXX02"**

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "0101405197727_00001"
LANDSAT_SCENE_ID = "LT50090581998140XXX02"
FILE_DATE = 2014-05-21T04:27:24Z
STATION_ID = "XXX"
PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_12.4.1"
DATA_CATEGORY = "NOMINAL"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
DATA_TYPE = "L1T"
DATA_TYPE_LORP = "TMR_LORP"
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_5"
SENSOR_ID = "TM"
SENSOR_MODE = "SAM"
WRS_PATH = 009
WRS_ROW = 058
DATE_ACQUIRED = 1998-05-20
SCENE_CENTER_TIME = 14:56:49.6150500Z
CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.87255
CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.34662
CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.87577
CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.24770
CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 1.97426
CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.34267
CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 1.97591
CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.24728
CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239400.000
CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 428400.000
CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 472500.000
CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 428400.000
CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239400.000

CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 218400.000
CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 472500.000
CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 218400.000
REFLECTIVE_LINES = 7001
REFLECTIVE_SAMPLES = 7771
THERMAL_LINES = 7001
THERMAL_SAMPLES = 7771
FILE_NAME_BAND_1 = "LT50090581998140XXX02_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LT50090581998140XXX02_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LT50090581998140XXX02_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LT50090581998140XXX02_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LT50090581998140XXX02_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 = "LT50090581998140XXX02_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LT50090581998140XXX02_B7.TIF"
GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME = "LT50090581998140XXX02_GCP.txt"
REPORT_VERIFY_FILE_NAME = "LT50090581998140XXX02_VER.txt"
BROWSE_VERIFY_FILE_NAME = "LT50090581998140XXX02_VER.jpg"
METADATA_FILE_NAME = "LT50090581998140XXX02_MTL.txt"
CPF_NAME = "L5CPF19980401_19980630.09"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 20.00
IMAGE_QUALITY = 9
SUN_AZIMUTH = 58.25916252
SUN_ELEVATION = 55.05100660
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 148
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 4.195
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 3.292
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 2.600
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 1083
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 0.172
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UL = 0.160
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UR = 0.178
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LL = 0.168
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LR = 0.211
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 193.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -1.520
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 365.000

RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -2.840
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 264.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -1.170
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 221.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -1.510
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 30.200
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.370
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 15.303
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = 1.238
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.500
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.150
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_GAIN_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_4 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_5 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_6 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_GAIN_BAND_7 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_4 = "CPF"

```
CORRECTION_BIAS_BAND_5 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_6 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_7 = "CPF"
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 0.766
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.448
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.044
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 0.876
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 0.120
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 0.055
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 0.066
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -2.28583
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -4.28819
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -2.21398
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -2.38602
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -0.49035
RADIANCE_ADD_BAND_6 = 1.18243
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0.21555
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"
ELLIPSOID = "WGS84"
UTM_ZONE = 18
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
ORIENTATION = "NORTH_UP"
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
MAP_PROJECTION_LORA = "NA"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = L1_METADATA_FILE
END
```

**ANEXO III. METADATO DE LA IMAGEN SATELITAL
"LT50090581998140XXX02"**

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "0501408203918_00007"
LANDSAT_SCENE_ID = "LC80090582014232LGN00"
FILE_DATE = 2014-08-21T02:54:13Z
STATION_ID = "LGN"
PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_2.3.0"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
DATA_TYPE = "L1T"
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8"
SENSOR_ID = "OLI_TIRS"
WRS_PATH = 9
WRS_ROW = 58
NADIR_OFFNADIR = "NADIR"
TARGET_WRS_PATH = 9
TARGET_WRS_ROW = 58
DATE_ACQUIRED = 2014-08-20
SCENE_CENTER_TIME = 15:19:24.2035667Z
CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.94033
CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.34950
CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.94361
CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.29906
CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 1.83595
CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.34518
CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 1.83748
CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.29851
CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239100.000
CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 435900.000
CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 466800.000
CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 435900.000
CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239100.000
CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 203100.000

CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 466800.000
CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 203100.000
PANCHROMATIC_LINES = 15521
PANCHROMATIC_SAMPLES = 15181
REFLECTIVE_LINES = 7761
REFLECTIVE_SAMPLES = 7591
THERMAL_LINES = 7761
THERMAL_SAMPLES = 7591
FILE_NAME_BAND_1 = "LC80090582014232LGN00_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LC80090582014232LGN00_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LC80090582014232LGN00_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LC80090582014232LGN00_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LC80090582014232LGN00_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 = "LC80090582014232LGN00_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LC80090582014232LGN00_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_8 = "LC80090582014232LGN00_B8.TIF"
FILE_NAME_BAND_9 = "LC80090582014232LGN00_B9.TIF"
FILE_NAME_BAND_10 = "LC80090582014232LGN00_B10.TIF"
FILE_NAME_BAND_11 = "LC80090582014232LGN00_B11.TIF"
FILE_NAME_BAND_QUALITY = "LC80090582014232LGN00_BQA.TIF"
METADATA_FILE_NAME = "LC80090582014232LGN00_MTL.txt"
BPF_NAME_OLI = "LO8BPF20140820145145_20140820152355.01"
BPF_NAME_TIRS = "LT8BPF20140820144751_20140820152448.01"
CPF_NAME = "L8CPF20140701_20140930.01"
RLUT_FILE_NAME = "L8RLUT20130211_20431231v09.h5"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 47.93
IMAGE_QUALITY_OLI = 9
IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
ROLL_ANGLE = -0.001
SUN_AZIMUTH = 69.26395605
SUN_ELEVATION = 61.35779060
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0118138
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 196
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 7.314
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 5.040
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 5.301
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 100
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 5.867

```
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 742.41742
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -61.30907
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 760.24451
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -62.78124
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 700.55884
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -57.85238
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 590.75067
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -48.78438
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 361.50995
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -29.85361
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 89.90424
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.42432
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 30.30254
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.50239
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 668.56714
RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -55.21049
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 141.28629
RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -11.66747
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_6 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.099980
```

REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_8 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_9 = -0.099980
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_8 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_8 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_9 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_9 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_10 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_10 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_11 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2264E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2559E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1573E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7588E-03
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9719E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4852E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0058E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1044E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3340E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04

RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.32134
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.79380
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.86395
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.79414
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.85958
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.42581
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.50289
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.22154
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.66980
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.89
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.89
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.08
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.14
END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"

```
ELLIPSOID = "WGS84"  
UTM_ZONE = 18  
GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00  
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00  
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00  
ORIENTATION = "NORTH_UP"  
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"  
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
END_GROUP = L1_METADATA_FILE  
END
```