



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

PROYECTO DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

**ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO, EN LA SUBCUENCA DEL  
RÍO PENSATIVO, SACATEPÉQUEZ, GUATEMALA**

OTONIEL ALEJANDRO ECHEVERRÍA CASTELLANOS

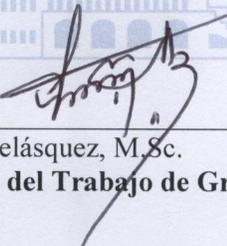
TURRIALBA, COSTA RICA

2017

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor del estudiante, como requisito para optar por el grado de

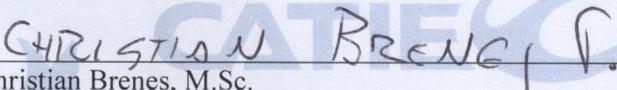
**Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**FIRMANTES:**



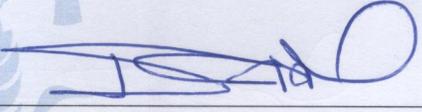
---

Sergio Velásquez, M.Sc.  
**Director del Trabajo de Graduación**



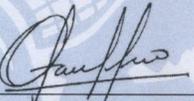
---

Christian Brenes, M.Sc.  
**Segundo lector**



---

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.  
**Decana del Programa de Posgrado**



---

Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos  
**Candidato**

## Tabla de contenido

Índice de tablas.....	vi
Índice de figuras.....	vii
Lista de acrónimos, abreviaturas y unidades .....	viii
1. Resumen.....	ix
2. Abstract .....	xi
3. INTRODUCCIÓN .....	1
3.1. Objetivos .....	6
Objetivo General .....	6
Objetivos Específicos.....	6
4. MARCO CONCEPTUAL.....	7
4.1. Cuenca hidrográfica .....	7
4.2. Cuenca Urbana .....	7
4.3. Cuencas Hidrográficas de Guatemala .....	7
4.4. Caracterización morfométrica de la Subcuenca .....	8
Superficie y perímetro de la cuenca.....	9
Índice o factor de forma de una cuenca (F) .....	9
Índice de compacidad (Índice de Gravelious).....	9
Red de drenaje.....	9
4.5. Cobertura de la tierra y cambios de uso .....	11
4.6. Crecimiento urbano y rural (variables e impactos del crecimiento urbano y rural).....	12
4.7. Estudios de cambio de cobertura de suelo en Guatemala .....	14
4.8. El papel de la teledetección en estudios de cambio de cobertura de suelo .....	15
4.9. Teledetección.....	16
4.10. Metodología para análisis de cambio de cobertura de suelo .....	17
4.10.1. Sensores Landsat 5, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 Oli.....	17

4.10.1.1.	Landsat 5 .....	18
4.10.1.2.	Landsat 7 ETM+.....	19
4.10.1.3.	Landsat 8 OLI.....	19
4.10.2.	Clasificación de Imágenes para la determinación de la cobertura del suelo .....	20
4.10.2.1.	Análisis visual de imágenes satelitales.....	20
4.10.2.2.	Clasificación supervisada de imágenes satelitales .....	22
4.10.2.2.1.	Clasificación por mínima distancia .....	22
4.10.2.2.2.	Clasificación por paralepipedos .....	23
4.10.2.2.3.	Clasificación por máxima probabilidad o Máxima Verosimilitud .....	24
4.10.2.2.4.	Clasificación Mapeo del Angulo Espectral (SAM por sus siglas en ingles)	24
4.10.2.3.	Clasificación no supervisada de imágenes satelitales .....	25
4.10.3.	Validación de la clasificación de imágenes.....	25
4.10.3.1.	Matriz de confusión.....	25
4.10.4.	Análisis de cambio de cobertura del Suelo .....	26
4.10.5.	Fuentes de error en una clasificación temática.....	28
4.10.6.	Aplicación del análisis categórico multivariante.....	28
5.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	29
5.1.	Fases Metodológicas .....	29
5.2.	Delimitación, reconocimiento y ubicación del área de estudio.....	29
5.3.	Elaboración de mapas de cobertura de suelo.....	34
5.3.1.	Obtención de imágenes satelitales.....	34
5.3.2.	Análisis y clasificación de las imágenes satelitales.....	35
5.3.2.1.	Carga y corte de imágenes satelitales.....	35
5.3.2.2.	Corrección radiométrica .....	37
5.3.2.3.	Creación de firmas espectrales.....	38

5.3.2.4.	Clasificación de imágenes .....	42
5.3.2.5.	Filtrado de imágenes clasificadas .....	43
5.3.3.	Reporte y verificación de resultados .....	45
5.3.3.1.	Reporte de la clasificación .....	45
	Tasas de cambio de cobertura de suelo .....	46
5.3.3.2.	Análisis de cambio de cobertura de suelo .....	46
5.3.3.3.	Precisión de la clasificación .....	48
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	49
6.1.	Morfometría de la subcuenca .....	49
6.2.	Análisis multitemporal de cambio de cobertura de suelo entre los años 1990-2001 y 2001-2016	50
6.3.	Matrices de cambio de cobertura de suelo .....	51
6.4.	Validación de la información obtenida .....	52
6.5.	Análisis de cambios de cobertura de suelo.....	53
7.	Conclusiones .....	59
8.	Literatura Citada .....	61
9.	Anexos .....	65
	Anexo 1. Mapa de cobertura de suelo año 1990 .....	65
	Anexo 2. Mapa de cobertura de suelo año 2001 .....	66
	Anexo 3. Mapa de cobertura de suelo año 2016 .....	67
	Anexo 6. Mapa cambio de cobertura de suelo 1990 – 2001 .....	68
	Anexo 7. Mapa cambio de cobertura de suelo 2001 – 2016 .....	69

## Índice de tablas

Tabla 1. Nivel de urbanización de grandes regiones del mundo, 1925 -2050 (Lattes 1995).....	12
Tabla 2. Nivel de urbanización por país de la región centroamericana y medidas de posición del año 1950 a 2000 (Lattes 1995).....	13
Tabla 3. Constelación de Satélites Landsat (Inegi y Ambiente s.f.).....	18
Tabla 4. Características Landsat 5 (Inegi y Ambiente s.f.).....	18
Tabla 5. Características Landsat 7 ETM+ (INEGI y Ambiente s.f.).....	19
Tabla 6. Características Landsat 8 OLI (USGS. 2013).....	19
Tabla 7. Esquema general de la matriz de confusión (Boca y Rodríguez 2012). .....	26
Tabla 8. Matriz general de tabulación cruzada para comparar dos mapas de diferentes tiempos (Rocha <i>et al.</i> 2009).....	27
Tabla 9. Historial de inundaciones y daños causados por el Río Pensativo .....	32
Tabla 10. Definición de macro clases y categorías para las firmas espectrales.....	38
Tabla 11. Cobertura de suelo del año 1990, 2001, 2016.....	50
Tabla 12. Matriz de tabulación cruzada 1990-2001.....	51
Tabla 13. Matriz de tabulación cruzada 2001-2016.....	51
Tabla 14. Matriz de error e índices Kappa del año 2016 .....	52
Tabla 15. Cobertura de suelo del año 2016.....	56

## Índice de figuras

Figura 1. Vertientes de Guatemala (Suarez 2011) .....	8
Figura 2. Esquema de definición para el número de orden de un río (Linsley <i>et all.</i> 1977).....	10
Figura 3. Países de urbanización muy baja (Lattes 1995).....	13
Figura 4. Componentes de un sistema de teledetección (Martínez y Martín 2010).....	17
Figura 5. Grafico ejemplo clasificación por mínima distancia (Angelini s.f.).....	23
Figura 6. Grafico ejemplo clasificación por paralelepípedos (Angelini s.f.).....	24
Figura 7. Fases de trabajo de la metodología.....	29
Figura 8. Vertiente del Pacifico (Suarez 2011).....	30
Figura 9. Cuenca del río Achíguate (Suarez 2011).....	31
Figura 10. Ubicación y Localización de la subcuenca del Río Pensativo.....	32
Figura 11. Sitio web <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a> .....	34
Figura 12. Criterios de selección y búsqueda de sitio.....	34
Figura 13. Selección de imagen satelital.....	35
Figura 14. Carga de imagen satelital y delimitación de área de estudio.....	36
Figura 15. Recorte de múltiples rasters.....	36
Figura 16. Carga de imagen satelital cortada y corrección atmosférica .....	37
Figura 17. Combinación de bandas espectrales .....	39
Figura 18. Creación capa de entrenamiento.....	40
Figura 19. Panel de Clasificación .....	40
Figura 20. Ejemplo Algoritmo de Región Incremental (Congedo 2017) .....	41
Figura 21. Toma de firmas espectrales .....	42
Figura 22. Verificación de firmas espectrales.....	42
Figura 23. Selección de algoritmo de clasificación .....	43
Figura 24. Generación de imagen clasificada .....	43
Figura 25. Comparación de imagen sin filtrar e imagen filtrada .....	44
Figura 26. Aplicación del Majority filter (ESRI 2016).....	44
Figura 27. Majority Filter.....	45
Figura 28. Reporte de la clasificación.....	46
Figura 29. Cruce de matrices .....	48
Figura 30. Precisión de la clasificación .....	49

Figura 31. Comparación Imagen Clasificada Año 1990 - 2001 .....	54
Figura 32. Comparación Imagen Clasificada Año 2001 - 2016 .....	54
Figura 33. Comparación de áreas para las tres clasificaciones .....	54
Figura 34. Tendencia de la dinámica forestal de Guatemala durante los períodos 91-01 y 01-06 (Universidad del Valle de Guatemala <i>et al.</i> 2011).....	55
Figura 35. Crecimiento área urbana de la ciudad de La Antigua Guatemala .....	57
Figura 36. Tasa de cambio de cobertura de suelo 1990-2001 .....	58
Figura 37. Tasa de cambio de cobertura de suelo 1990-2001 .....	58

### **Lista de acrónimos, abreviaturas y unidades**

ANACAFE	Asociación Nacional Del Café
ERTS	Earth Resources Rechnological Satellite
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INE	Instituto Nacional de Estadística
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MIC	Mínima unidad cartografiable
ND	Valor radiométrico o espectral
OLI	Operational Land Imager
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
TM	Thematic Mapper
TIRS	Thermal Infrared Sensors

## 1. Resumen

### **Análisis de cambio de cobertura del suelo de la subcuenca del Río Pensativo, Sacatepéquez, Guatemala**

Otoniel Alejandro Echeverría<sup>1</sup>

El desarrollo urbano ha provocado una nueva dinámica poblacional, de acuerdo a esa dinámica se requiere estudios que precisen como debe de realizarse el ordenamiento del territorio para identificar y evitar futuras problemáticas. De acuerdo a esto es que se ve la necesidad de identificar y cuantificar la magnitud de estos cambios y con ello prevenir futuros desastres provocados por el crecimiento descontrolado.

El trabajo se desarrolló en la subcuenca del Río Pensativo está circunscrita en la parte alta de la subcuenca del río Guacalate.

Debido a las características que presenta la subcuenca constantemente genera problemas en la ciudad, ya que tiene una gran tendencia a la generación de inundaciones, provocadas por el Río Pensativo.

El estudio corresponde a un análisis de cambio de cobertura de suelo en la subcuenca del Río Pensativo, cuyo objetivo principal es la dinámica de cambios de cobertura. Para el análisis de cambio de cobertura se utilizaron imágenes satelitales de tres años, 1990, 2001 y 2016. Se utilizaron imágenes de enero ya que es uno de los meses donde hay menor contaminación visual por nubes. El estudio se complementó con el uso del programa QGIS (Sistema de información Geográfica), sensores remotos y procesamiento de imágenes a través de la teledetección.

En las clasificaciones realizadas se obtuvo que para el año 1990 la principal cobertura de suelo era el bosque con un 48.88%, en comparación con el año 2001 que tenía un 42.07 % lo que implica que existe una reducción del área boscosa, lo que implica una tendencia decreciente la cual se afirma para el año 2016 con un 41.74%, la tasa disminuye, pero a una menor tasa de decrecimiento.

En cuanto a el área urbana se presenta una tendencia creciente con un 3.17% para el año 1990, un 8.37% para el año 2001 y al año 2016 un 10%, por lo que se presenta un mayor porcentaje de cambio entre los años 1990 y 2001.

El área urbana presento tasas de cambio positivas del 9.21% y 1.20% para cada período, por lo que se identifica un crecimiento, este crecimiento está conformado por los aumentos de población y el desarrollo de infraestructura. Según el instituto Nacional de Estadística la tasa de crecimiento poblacional total para del 2010 al 2016 es de 2.4%, por lo que se puede ver que la subcuenca al presentar un mayor índice de urbanidad presenta una menor tasa de cambio con respecto al crecimiento poblacional.

**Palabras clave:** clasificación supervisada, firmas espectrales, Landsat, cobertura de suelo, Río Pensativo, ángulo de mapeo espectral, morfometría.

## 2. Abstract

### **Analysis of land cover change from 1990 to 2016, in the Pensativo River sub-basin, Sacatepéquez, Guatemala**

Otoniel Alejandro Echeverría

The urban development has provoked a new population dynamics, conforming to this dynamics requires studies that specify how the ordering should be carried out to identify and avoid future problems. Accordingly, it is necessary to identify and quantify the magnitude of these changes and with this to prevent future disasters caused by uncontrolled growth.

The work developed in the sub-basin of the Pensativo River is circumscribed in the upper part of the Guacalate river basin.

Due to the characteristics presented by the sub-basin it constantly generates problems in the city, since it has a since it has a greater tendency to the generation of floods, provoked by the Pensativo river.

The study corresponds to an analysis of land cover change in the Pensativo river basin, whose main objective is the dynamics of coverage changes. For the analysis of change of coverage, three-year satellite images, 1990, 2001 and 2016 were used. January images were used since it is one of the months where there is less visual pollution by clouds. The study was complemented by the use of the QGIS (Geographic Information System) program, remote sensing and image processing through remote sensing.

In the classifications made it was obtained that for the year 1990 the main land cover was the forest with 48.88%, compared to the year 2001 that had 42.07% which implies that there is a reduction of the forest area, which implies a declining trend which is affirmed for the year 2016 with 41.74%, the rate decreases, but at a lower rate of decrease.

As for the urban area, there is a growing trend, with 3.17% for 1990, 8.37% for 2001 and 10% for 2016, which presents a higher percentage of change between the years 1990 and 2001.

The urban area had positive exchange rates of 9.21% and 1.20% for each period, so that growth is identified, this growth is made up of population increases and infrastructure development. According to the National Institute of Statistics, the total population growth rate for 2010 to 2016 is 2.4%, so that it can be seen that the sub-basin, when presenting a higher urbanity index, has a lower rate of change with respect to population growth.

**Keywords:** supervised classification, spectral signatures, Landsat, soil cover, Pensativo River, spectral mapping angle, morphometry.

### 3. INTRODUCCIÓN

La subcuenca del Río Pensativo está circunscrita en la parte de la subcuenca del río Guacalate y ésta a su vez forma parte de la cuenca del río Achiguate, la cual está ubicada en la vertiente que desemboca en el Pacífico. La subcuenca está ubicada entre los meridianos  $90^{\circ}45'48''$  y  $90^{\circ}39'39''$  de longitud oeste y los paralelos  $14^{\circ}27'53''$  y  $14^{\circ}36'29''$  de latitud norte tiene como límites geográficos, al norte, las cuencas del río Motagua y María Linda, al este y al sur nuevamente la cuenca del río María Linda, al sur y oeste la subcuenca del río Guacalate.

En la subcuenca del Río Pensativo se maneja una serie de problemáticas debido a varios factores, entre los cuales se puede mencionar la variación de la cobertura de suelo con respecto al tiempo, es necesario hacer referencia a que el hombre de acuerdo a sus intereses ocupa y transforma de diferentes formas el espacio geográfico, sin medir las consecuencias que esto puede generar en la interacción de la naturaleza misma. Debido a estas transformaciones surge la preocupación y el interés de estudiar la dinámica y los impactos que puede tener la expansión urbana y la expansión agrícola, que son causa de problemas tales como deforestación, erosión del suelo, etc. (Rojas 2004).

Debido a que dentro de la subcuenca del Río Pensativo se encuentra la ciudad de La Antigua Guatemala y otras poblaciones periféricas, se considera una subcuenca urbana. La ciudad de La Antigua Guatemala es el principal destino turístico del país, la ciudad fue declarada “Patrimonio de la Humanidad” por la UNESCO en 1979 (Invest In s.f.). Anualmente recibe más de un millón de visitantes, entre extranjeros y nacionales, aproximadamente el 28% del turismo que ingresa al país. Al ser una ciudad turística se genera lo que se conoce como turismo residencial (Salvá 2014), que implica el crecimiento temporal o permanente de la población y que tiene como consecuencia el aumento de la demanda de vivienda y servicios para su atención. Según el INE (2002) la población residente de Antigua Guatemala crece a razón del 2.14%, relacionada con la tasa de crecimiento departamental que es del 3.68% y la nacional que equivale al 3.47%. Lo cual indica que la población del municipio de La Antigua Guatemala tiene un índice de crecimiento medio. Esto implica que hay una expansión urbana y existen transformaciones de la cobertura de suelo en la subcuenca que tienen como consecuencia impactos al medio ambiente.

En general todo el planeta, está sufriendo una modificación notable de los usos y de las ocupaciones del suelo. En cualquier caso, la descripción detallada de este proceso es un paso esencial para entender la dinámica, su aplicación y la identificación de diferentes factores, por lo que es necesaria la descripción y análisis de esos cambios, además de determinar las consecuencias que conlleva, ya que son claves para la generación de estrategias de desarrollo territorial, que busquen la orientación para mantener y proteger el territorio (Rocha *et al.*2009).

Otro aspecto importante y de hacer notar es que el desarrollo poblacional demanda una gran cantidad de servicios y recursos, lo cual podría ser una causa o impacto negativo al ambiente y podría deteriorar la calidad de vida, ya que se acelera el crecimiento incontrolado, únicamente guiado por la necesidad de las personas y no por un correcto ordenamiento del territorio, lo cual genera impactos que perjudican el desarrollo normal de una ciudad.

Los avances tecnológicos de las últimas décadas aportan nuevas herramientas para el tratamiento de la información espacial. Para el tratamiento de esta información se utilizan los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales han aportado un gran avance y presentan una revolución conceptual y práctica, ya que a través de ellas es posible realizar una reconstrucción de alteraciones que se han dado a través del tiempo. Además, es de resaltar el importante papel de la teledetección y los satélites de observación de la Tierra, ya que a través de ellos se obtienen y clasifican datos, lo que permite determinar la dinámica de ocupación del suelo, así como otras características de la superficie terrestre (Rocha *et al.*2009).

Con el uso de los sistemas de información geográfica y la diversidad de imágenes obtenidas desde plataformas satelitales, permite analizar el territorio desde una perspectiva cada vez más completa. La variedad de resoluciones espaciales hace posibles estudios de diferentes escalas. 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 *et al.*2007).

Para el desarrollo del proyecto es necesaria la realización de un análisis multitemporal, lo que permite la detección de cambios entre diferentes fechas de referencia, cuyo fin principal es determinar la evolución del medio natural o en su defecto las repercusiones de la acción humana

sobre el mismo (Chuvienco 1996), otro aspecto que se logra determinar con el análisis es el crecimiento de las zonas urbanas, el cual constituye uno de los ejemplos más importantes de cambio de ocupación del suelo en el mundo entero (Rocha *et al.* 2009).

El crecimiento urbano y agrícola generan importantes cambios en la dinámica del uso del suelo, lo cual afecta el comportamiento y la dinámica natural de una ciudad, consecuentemente a raíz de esta problemática se han desarrollado diferentes estudios que han sustentado importantes políticas y leyes, las cuales se han orientado al ordenamiento territorial, el objetivo principal radica en la disminución del impacto y la determinación de los causales que ha provocado la modificación del uso de suelo y su cobertura (Jiménez *et al.* 2011).

Se han desarrollado diferentes estudios en cuanto al crecimiento urbano como variable indispensable para determinar la dinámica del cambio del uso del suelo y su impacto a nivel de cuenca hidrográfica. Dichos trabajos han sustentado importantes políticas y leyes a nivel nacional e internacional.

El incremento de la población urbana es un factor importante en el crecimiento urbano, pero no es un factor determinante, también afectan variables como las vías de acceso, pendientes de terrenos y cercanía con cuerpos de agua, lo cual ayudaría a estimar áreas de expansión (Jiménez *et al.* 2001). Estarrón (2008) propone el análisis de la dinámica del cambio de uso utilizando matrices de Markov, el cual se basó en el desarrollo de cartografía con la distribución de cambio de uso de suelo y vegetación. En Argentina se utilizó los sistemas de información geográfica para el desarrollo de cartografía y la aplicación de matrices de tabulación cruzada, con lo que se logró visualizar el avance urbano y la variación en la cobertura forestal (Schweitzer y Farinelli 2014)

Otro aspecto a tomar en cuenta corresponde a la pérdida de cobertura forestal que se ha presentado debido a diferentes causas tales como la expansión de la frontera agrícola, el crecimiento urbano y turismo, entre otras (Armenteras y Rodríguez 2014), estos aspectos lograron la identificación de tasas promedio de deforestación entre los años 2001 al 2010 para Latinoamérica, esta tasa asciende a un -1.54, en donde Guatemala presenta una tasa de -0.40; es importante hacer referencia a que hay dos países centroamericanos que presentaron una recuperación de área boscosa, Costa Rica con una tasa de 0.17 y El Salvador con una tasa de 1.87.

Guatemala en la actualidad cuenta con el desarrollo de planes de ordenamiento territorial, los cuales se están trabajando con base a las necesidades de las comunidades y una adecuada interacción entre el medio ambiente y las comunidades. Se ha trabajado la teledetección y el uso de imágenes satelitales, para encontrar la dinámica de cobertura forestal para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos (Aide *et al.* 2013).

En Guatemala se han desarrollado estudios sobre la dinámica de cambio de uso de suelo, y los impactos que ha tenido en el comportamiento del ciclo hidrológico, en el cual se desarrolló una caracterización del suelo con el fin de mejorar el uso de la tierra, en el mismo se utilizó la metodología propuesta por el Instituto Agustín Codazzi de Colombia (Tacam 2008). Este estudio identificó importantes diferencias en la dinámica del cambio de uso de la tierra y presentó un aumento en centros poblados, lo cual afectó zonas agrícolas y áreas forestales, generando un aumento de escorrentía lo cual provoca el aumento de los caudales máximos de escorrentía (López 2008).

En la subcuenca existe información sobre hidrología y riesgos geológicos (Rojas 2004). Pero es importante resaltar que la subcuenca produce una gran cantidad de sedimento, el cual se deposita en la parte baja, esta erosión es principalmente causada por cultivos cuya erosión excede al nivel de tolerancia permisible, las mismas se encuentran en San Mateo Milpas Altas, Vuelta Grande y agua Colorada y San Miguel Milpas Altas (Arana 1992)

La Antigua Guatemala ha sufrido de varias problemáticas causadas por el Río Pensativo, las cuales han sido provocadas por fenómenos naturales, cuya principal causa es el cambio de cobertura de suelo, ya que por las modificaciones que se han dado dentro de la subcuenca, ha provocado que haya mayor escorrentía, así como mayor arrastre de sedimentos, lo que provoca que existan inundaciones constantes en la misma. Actualmente el Río Pensativo se le ha dado el crédito de ser el causante de las inundaciones, atentando contra el patrimonio nacional, infraestructura, salud pública y la vida de sus habitantes (Rojas 2004).

La importancia del proyecto radica en la generación de un documento que sirva de guía y como un eje de trabajo para la Municipalidad de La Antigua Guatemala, ya que pretende generar una línea base para la aplicación de la gestión de recursos, y con ello dar herramientas para que la

comunidad amplíe su espectro de trabajo, con el fin de generar un bienestar común y con ello generar proyectos para la restauración de los cambios de cobertura que se han dado en la subcuenca.

Además, busca que las autoridades encargadas de la planificación territorial conozcan e implemente metodologías de la planificación espacial para detectar y establecer las posibles modificaciones del crecimiento urbano y el cambio de cobertura de suelo con el fin de reorientar y minimizar los impactos bajo el contexto de sostenibilidad. Se busca generar una caracterización espacial y temporal de la dinámica del crecimiento urbano con cierta precisión y detalle, cuya finalidad es generar conocimiento en la planificación y el ordenamiento adecuado del territorio (Jiménez *et al.*2011).

### **3.1. Objetivos**

#### *Objetivo General*

Analizar la dinámica de cambios de cobertura de suelo en la Subcuenca del Río Pensativo, Sacatepéquez, Guatemala.

#### *Objetivos Específicos*

- Caracterizar morfométricamente la subcuenca del Río Pensativo
- Realizar una clasificación supervisada de tres imágenes LANDSAT en tres fechas distintas 1990, 2001 y 2016.
- Realizar un análisis multitemporal de los cambios de cobertura de suelo para los períodos seleccionados.
- Identificar las principales variables motoras que provocan los cambios de uso del suelo en la subcuenca del Río Pensativo.

## 4. MARCO CONCEPTUAL

### 4.1. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o “divisoria de aguas” se define naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río (Ramakrishna 1997).

Se pueden reconocer dos tipos de cuenca, endorreicas y exorreicas. Las cuencas endorreicas son aquellas que terminan en un lago central y cuenca exorreicas son aquellas cuencas que drenan fuere de la unidad hidrológica (Bateman 2007).

La cuenca por su tamaño se puede dividir en subcuenca y microcuenca. La subcuenca es toda área que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de la cuenca. La microcuenca se define como una pequeña cuenca de primer orden, en donde vive un cierto número de familias utilizando y manejando los recursos del área, principalmente el suelo, agua, vegetación, incluyendo cultivos y vegetación nativa y fauna (Wambeke 2003).

### 4.2. Cuenca Urbana

La cuenca urbana está representada por el incremento de la impermeabilización y la reducción de la infiltración debido al revestimiento del suelo, como consecuencia de la construcción de infraestructura y la remoción de cobertura vegetal. Estos factores incluyen en el incremento del volumen y la velocidad de escorrentía produciendo variaciones hidrológicas, como caudales pico mayores en comparación con cuencas no intervenidas (Gutierrez y Raúl s.f.).

### 4.3. Cuencas Hidrográficas de Guatemala

Según Suarez (2011), los sistemas montañosos determinan tres grandes regiones hidrográficas las que se conocen con el nombre de vertientes:

- Vertiente del pacífico: cuenta con la mayor cantidad de ríos, los ríos de la vertiente hidrográfica del Pacífico se caracterizan por tener ríos cortos y de curso rápido.

- Vertiente del golfo de México: esta vertiente es la que más área geográfica posee con aproximadamente el 47% del territorio nacional, de la cuenca hidrográfica del Golfo de México sobresalen el río de la Pasión y el Chixoy o Negro, todos afluentes del Usumacinta, el más largo y caudaloso de Centroamérica, y frontera natural entre Guatemala y México.
- Vertiente del Atlántico: los ríos que desembocan en el golfo de Honduras son extensos y profundos, propios para la navegación y la pesca, entre los más importantes el Motagua o río Grande y el Río Dulce, desagüe natural del lago Izabal.

A continuación, se observan las tres vertientes de Guatemala.



Figura 1. Vertientes de Guatemala (Suarez 2011)

#### 4.4. Caracterización morfométrica de la Subcuenca

El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permiten conocer las características físicas de una cuenca, lo cual sirve para realizar comparaciones entre varias cuencas, además de dar herramientas para la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo (Gaspari *et al.* 2012).

### *Superficie y perímetro de la cuenca*

Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular; se obtiene después de delimitar la cuenca (Villón 2002). Este parámetro indica la superficie del área drenada que cubre el perímetro de la cuenca y generalmente se indica en km<sup>2</sup>. El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud total del parteaguas (Breña y Jacobo 2006).

### *Índice o factor de forma de una cuenca (F)*

Se expresa por la relación entre el área de la cuenca y su longitud (Villón 2002).

$$F = \frac{\text{Area}}{\text{longitud}^2} = \frac{A}{L^2}$$

### *Índice de compacidad (Índice de Gravelious)*

Expresa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro equivalente de una circunferencia que tiene la misma área de la cuenca. Se determina con la siguiente expresión:

$$K = \frac{\text{perímetro de la cuenca}}{\text{perímetro de un circulo de igual area}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

A = Área de la cuenca

P = Perímetro de la cuenca

K = Índice de compacidad

### *Red de drenaje*

Se refiere a la trayectoria o al arreglo que guardan entre sí los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, esto quiere decir la rapidez con que desaloja la cantidad de agua que recibe.

Las características de una red de drenaje, pueden describirse principalmente de acuerdo con:

- El orden de las corrientes

Esta es una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica.

Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden y así

sucesivamente. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal, (Linsley *et all.* 1977)

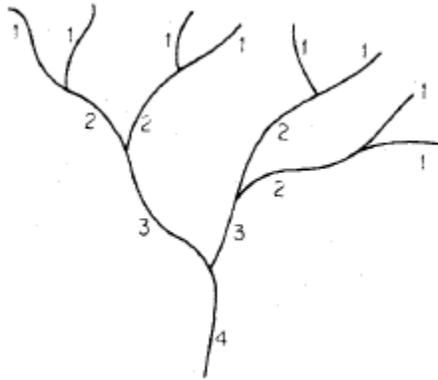


Figura 2. Esquema de definición para el número de orden de un río (Linsley *et all.* 1977)

- Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se define como la longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida por el área total de drenaje. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación, (Linsley *et all.* 1977). Se determina mediante la siguiente expresión.

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde  $D_d$  es la densidad de corriente, en 1 /km; L es la suma de las longitudes de las corrientes, en km; y A es el área de la cuenca, en  $\text{km}^2$ .

- Pendiente de la cuenca

Este parámetro mide la pendiente media en dos ejes principales (x, y) y a partir de estos valores se determina la pendiente media de la cuenca, definida como la inclinación o declive promedio de su topografía.

El método de mayor aplicación es el de Horton y para estimar la pendiente media de la cuenca de análisis se traza una malla cuyo eje principal (x) siga aproximadamente el sentido del cauce principal. (Breña y Jacobo 2006)

#### 4.5. Cobertura de la tierra y cambios de uso

La cobertura de la tierra comprende todos los elementos que se encuentran sobre la superficie del suelo ya sean naturales o creados por el ser humano a lo cual también se denomina uso de la Tierra, esto toma como referencia aspectos morfológicos y tangibles del suelo (Ministerio de Agricultura 2011), esta categorización de la superficie terrestre tiene en cuenta propiedades biofísicas tales como la superficie urbana, los diferentes cultivos, así como coberturas forestales, etc. (Alcántara 2014).

El cobertura de suelo se caracteriza de acuerdo a la dimensión funcional o su dedicación socioeconómica, como ejemplo el uso industrial, comercial, recreativo, etc., básicamente el uso de suelo se relaciona con las actividades socio-económicas que realizan las personas en el territorio (Alcántara 2014).

A partir de la cobertura de la tierra surgen los cambios en la superficie y del uso del suelo los cuales son temas relevantes para determinar y analizar el comportamiento y los efectos que provoca la sociedad humana con respecto a los ecosistemas en donde se desarrolla la actividad. Además de la influencia del tamaño de la población y los patrones de consumo, los cuales tienen una influencia directa en la transformación de los ecosistemas (Vitouseck *et al.* 1986).

El cambio de cobertura de suelo y uso de suelo son considerados como los factores que van a tener mayor impacto global sobre la biodiversidad al año 2100, debido a sus devastadores efectos sobre la disponibilidad de hábitat y extinción de especies (Sala *et al.* 2000). Estos impactos en su mayoría se han producido por la pérdida y/o transformación de ecosistemas boscosos y praderas naturales, en terrenos habilitados para diferentes usos tales como el desarrollo agrícola, ganadero, forestal y urbano (Sala *et al.* 2000). De acuerdo a lo anterior los factores que inducen a esta degradación son diversos dentro de los cuales se hace referencia a la interacción de factores económicos, políticos y ecológicos.

#### 4.6. Crecimiento urbano y rural (variables e impactos del crecimiento urbano y rural)

En el año 1925 el nivel de urbanización de América Latina se ubicaba en una posición equidistante entre los niveles de las regiones más o menos desarrolladas en el mundo, la urbanización de la región se aceleró entre los años 1925 a 1975, con lo que se aproximó al nivel de las regiones más desarrolladas, a continuación se muestra una tabla que refleja los porcentajes de urbanización de las regiones del mundo, donde se aprecia que los niveles de porcentaje de crecimiento de América Latina se comportan de forma creciente, llegando a niveles muy altos, esto produce que haya una gran demanda en territorio urbano (Lattes 1995).

Tabla 1. Nivel de urbanización de grandes regiones del mundo, 1925 -2050 (Lattes 1995)

<b>Regiones</b>	<b>1925</b>	<b>1950</b>	<b>1975</b>	<b>2000</b>	<b>2025</b>
<b>Total mundial</b>	20.5	29.3	37.7	47.5	61.1
<b>Regiones más desarrolladas</b>	40.1	54.7	69.8	76.3	84.0
<b>Regiones menos desarrolladas</b>	9.3	17.3	26.7	40.7	57.0
<b>África</b>	8.0	14.7	25.2	37.3	53.8
<b>América Latina</b>	25.0	41.6	61.3	76.6	84.7
<b>América del Norte</b>	53.8	63.9	73.8	77.4	84.8
<b>Asia</b>	9.5	16.8	24.6	37.7	54.8
<b>Europa</b>	47.8	52.2	67.1	75.1	83.2

La urbanización y la concentración territorial de la población pueden ser una condición necesaria para el desarrollo, pero no siempre ocurre el mismo, considerando las tendencias más recientes, es la pobreza urbana la que más se ha incrementado en América Latina, esto ha provocado que la pobreza se convierta en un problema, ya que los gobiernos presentan dificultades las cuales se relacionan con problemas socioeconómicos, ambientales y administrativos, los cuales a su vez están asociados con la rápida urbanización, el alto ritmo de crecimiento de las poblaciones urbanas y problemas derivados de movimientos migratorios internos y externos (Lattes 1995).

Actualmente en medio de acciones gubernamentales que afectan la organización territorial de las sociedades y la no existencia de políticas explícitas de redistribución de la población, provoca cambios importantes en la distribución territorial de la misma. A raíz de la problemática existen los

niveles y las tendencias de urbanización, al hacer referencia a estos aspectos, es necesario hacer énfasis en la notable diferencia entre las modalidades de la urbanización de los países, ya que es una expresión del desigual desarrollo existente en América Latina. Por ejemplo países como Haití, Honduras, Guatemala y El Salvador, presentan los niveles más bajos de urbanización y también los niveles más bajos de desarrollo humano, mientras que Venezuela, Uruguay, Argentina y Chile, son los cuatro países más urbanizados y presentan los niveles de desarrollo humano más alto de la región. A continuación se muestra una tabla la cual da el nivel de urbanización por país, así como la medida de posición con respecto a los países de Latinoamérica, es importante identificar la situación de Guatemala, ya que pasa de estar en la posición 17 para el año 1950 a la posición 21 para el año 2000, lo cual implica que no se ha dado un desarrollo del nivel de urbanización, otros países han presentado un mayor desarrollo en el área (Lattes 1995), Guatemala se encuentra entre los países con más baja tasa de crecimiento urbano (Ver Figura 3).

Tabla 2. Nivel de urbanización por país de la región centroamericana y medidas de posición del año 1950 a 2000 (Lattes 1995)

No.	País	1950	País	1960	País	1970	País	1980	País	1990
1	El Salvador	36.5	Nicaragua	39.5	Nicaragua	47	Nicaragua	53.4	Nicaragua	59
2	Nicaragua	34.9	El Salvador	38.3	Costa Rica	39.7	Costa Rica	43.1	Costa Rica	47
3	Costa Rica	33.5	Costa Rica	36.6	El Salvador	39.4	El Salvador	41.5	El Salvador	43
4	Guatemala	29.5	Guatemala	32.4	Guatemala	35.5	Guatemala	37.4	Honduras	40
5	Honduras	17.6	Honduras	22.8	Honduras	28.9	Honduras	34.9	Guatemala	39

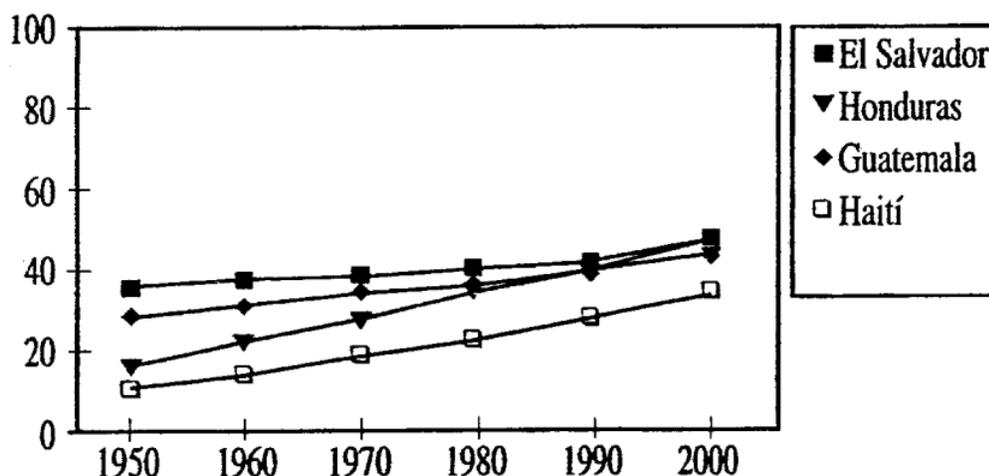


Figura 3. Países de urbanización muy baja (Lattes 1995)

Guatemala presenta entre los períodos del año 1990 al 2000, una tasa de crecimiento total equivalente al 2.8 %, de lo cual el 4.0 es para el crecimiento urbano y el 2.0 es para el crecimiento rural, por lo que se observa que el crecimiento urbano es el doble del crecimiento rural, la tasa de urbanización es equivalente al 1.1 %, lo cual implica un índice de urbanización del 7.7%, lo que implica que Guatemala es el país menos urbanizado de Centroamérica de acuerdo a un informe del Banco Mundial, el cual indica que 51 de cada 100 habitantes viven en centros urbanos.

#### *4.7. Estudios de cambio de cobertura de suelo en Guatemala*

Actualmente los recursos naturales en el mundo se encuentran deteriorados, alcanzando en algunas partes del planeta un estado crítico. Su acelerada degradación repercute en la minimización o anulación completa de flora, fauna, capa fértil del suelo y/o contaminación de los afluentes de agua. Es importante conocer la capacidad de uso de la tierra, lo que la superficie posee para contribuir con un manejo adecuado en las actividades en cada una de los usos (Lemus 2011).

Guatemala no es la excepción a dicho fenómeno, debido a que no existe cultura ecológica y las necesidades en el área rural y urbana son tan grandes que se sobre utilizan los recursos naturales. Este es un país eminentemente agrícola y con una alta demanda de vivienda, por lo que el cambio de uso y cobertura de suelo es considerado como una de las principales problemáticas a las que se afronta. Los primeros esfuerzos por tener un mapa forestal del territorio se llevaron a cabo por una iniciativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, FAO hacia el año 1988, con la que se utilizó la clasificación visual de imágenes Landsat-TM (Universidad del Valle de Guatemala 2006).

Posteriormente el Instituto Nacional de Bosques en el año 1999 determinó bosques y otros usos de suelo, al mismo tiempo el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación generó un Mapa del uso de la Tierra (Universidad del Valle de Guatemala 2006).

A partir de los trabajos realizados se desarrollaron varios proyectos, cuyo fin era la identificación de procesos gestados en materia de uso de la tierra y el espacio geográfico, el ordenamiento territorial, con el fin de explicar la importancia técnica y social con la variabilidad climática, desarrollando la recopilación de información a través de agricultores, instituciones que se

desarrollan en las áreas de trabajo, con el objetivo de conocer los cambios posibles percibidos durante ciertos períodos de tiempo (Ochoa, s.f.).

Alvarado y Araya (2013), demostraron la presión que ejerce la expansión urbana sobre los suelos con una alta vocación agrícola y sobre el medio natural, especialmente sobre las áreas protegidas y bosques, debido a la falta de una planificación estratégica territorial. Las Municipalidades tienen competencia en el ordenamiento territorial de acuerdo con la Constitución Política de la República, la Ley de Parcelamientos Urbanos y el Código Municipal. Sin embargo por la carencia de planes de ordenamiento, reglamentación y la debilidad financiera se ha provocado una expansión urbana desordenada (Martínez 2010).

Otro de los principales estudios desarrollados buscaba la evaluación del impacto del cambio climático (González 2016). Así como las dinámicas de cobertura forestal para el desarrollo de proyectos de infraestructura como el estudio desarrollado por Andrade (2013), sobre la dinámica de cobertura forestal en las microcuencas de los ríos tributarios de la hidroeléctrica Palo Viejo, con el propósito de obtener información vectorial a base de imágenes satelitales y programas de información geográfica.

Existe también información de evaluaciones desarrolladas en áreas protegidas de Izabal con el objetivo de determinar las tasas de cambio en las áreas protegidas que se encuentran dentro del departamento (Ortiz 2008). De acuerdo a López (2008) es importante además de la determinación de las tasas, la cuantificación del impacto que causa el cambio de uso de la tierra ya que estos cambios provocan problemas tales como el aumento de la escorrentía superficial, la disminución de la recarga hídrica, lo cual se discute en Dinámica del cambio de uso de la tierra y su impacto en el comportamiento del ciclo hidrológico de la parte sur de la subcuenca del Alto Guacalate y apoyo a la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo-UPGGR-del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación-MAGA-, Guatemala.

#### *4.8. El papel de la teledetección en estudios de cambio de cobertura de suelo*

Desde el lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, los sistemas de observación de la Tierra han venido demostrando su enorme potencial como fuentes de datos y como herramientas

para el análisis, la investigación o la definición y control de políticas medio ambientales (Fernández *et al.* 2013)

La teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de procesos y la adquisición de conocimiento de la naturaleza. El procesamiento de datos e imágenes de satélite es una herramienta útil para la realización de estudios a pequeña y gran escala, tales como: estudios de degradación de suelos, caracterización de suelos, observación de fluorescencia para el estudio del estado de la vegetación terrestre y los usos del suelo, entre otros (Fernández *et al.* 2013, Pérez y García 2013).

La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, la cual se basa en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre. Por esta razón cada elemento que se encuentra en la naturaleza tiene su propia respuesta espectral, su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su respuesta espectral (Romero 2006).

Los métodos basados en la teledetección son una herramienta eficaz para la detección de los cambios en el uso del suelo, los cuales se utilizan para cuantificar el ecosistema natural y urbano, con lo que proporcionan una visión integral de la dinámica espacio temporalidad de la cobertura, así como los patrones del uso del suelo (Jiménez *et al.* 2011).

#### 4.9. Teledetección

La teledetección identifica y caracteriza los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma. La reflectividad espectral está íntimamente relacionada con la naturaleza del material, esto hace referencia a los rasgos de absorción en función de los constituyentes químicos de los materiales, lo que hace posible el reconocimiento de los mismos en Teledetección (Gilabert *et al.* 1997). En la siguiente figura se muestra los componentes de un sistema de teledetección.

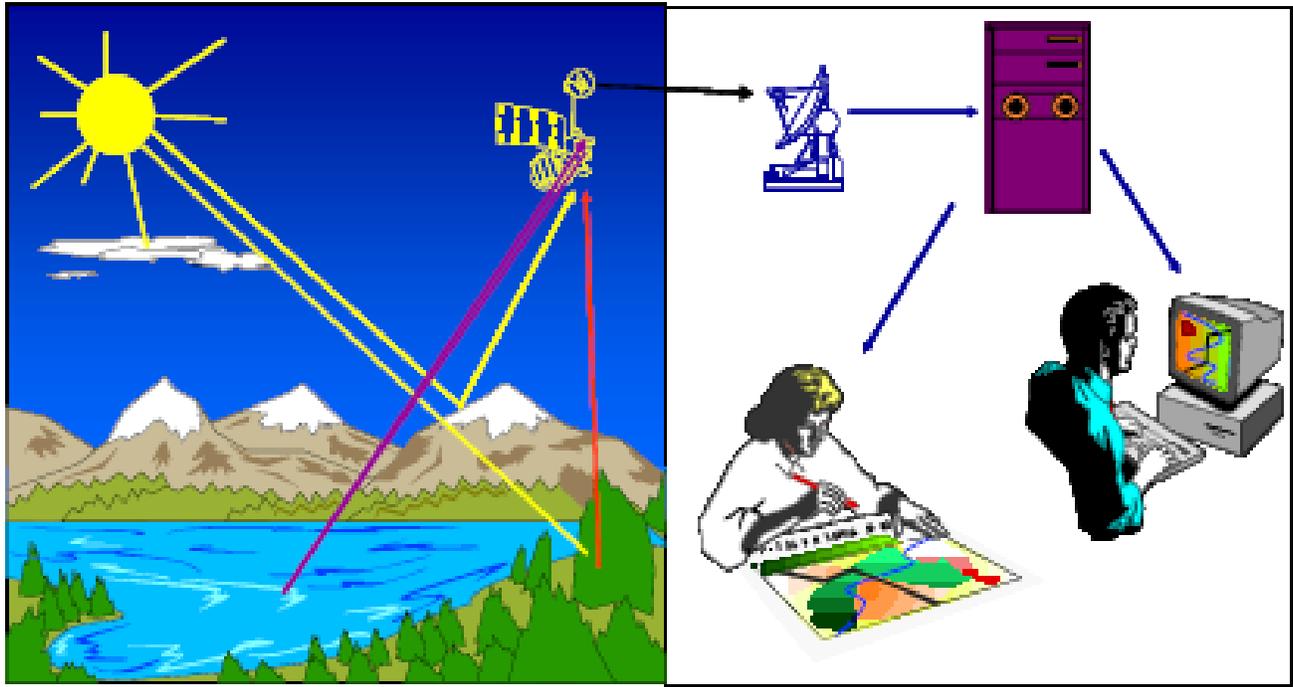


Figura 4. Componentes de un sistema de teledetección (Martínez y Martín 2010)

#### 4.10. Metodología para análisis de cambio de cobertura de suelo

##### 4.10.1. Sensores Landsat 5, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 Oli

A partir del lanzamiento del satélite ERTS-1 en 1972 (renombrado luego como Landsat 1) se inició una revolución en el mapeo de la cobertura/uso del suelo, evolucionando con el paso del tiempo a sensores de más alta resolución para obtener información detallada de la superficie (Mena 2014).

En la tabla 3 se muestra la constelación de satélites Landsat, la fecha de su lanzamiento y fin de operación, así como las características de Landsat 5, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI, que son los que se utilizarán para el desarrollo del análisis de cambio de uso y cobertura de suelo.

Tabla 3. Constelación de Satélites Landsat (Inegi y Ambiente s.f.)

Satélite	Fecha de lanzamiento	Fin de operación
<b>ERTS 1</b>	23/julio/1972	05/enero/1978
<b>LANDSAT 2</b>	22/enero/1975	27/julio/1983
<b>LANDSAT 3</b>	05/marzo/1978	07/septiembre/1993
<b>LANDSAT 4</b>	16/junio/1982	1983
<b>LANDSAT 5</b>	01/marzo/1984	En operación
<b>LANDSAT 6</b>	03/octubre/1993	03/octubre/1993
<b>LANDSAT 7 ETM+</b>	1998	En operación
<b>LANDSAT 8 OLI</b>	11/febrero/2013	En operación

En las tablas 4, 5, 6 se detallan las características de resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de los sensores utilizados en este estudio.

#### 4.10.1.1. Landsat 5

Tabla 4. Características Landsat 5 (Inegi y Ambiente s.f.)

Modo espectral	Espacial (metros)	Esppectral (micras)	Radiométrica	Temporal	
<b>Multiespectral</b>	30	Banda 1 azul:	0.45 – 0.52	8 BITS	16 Días
		Banda 2 verde:	0.52 – 0.60		
		Banda 3 roja:	0.53 – 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1:	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2:	1.55 – 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio:	2.08 – 2.35		
		Banda 6 Infrarrojo térmico	10.4 – 12.5		

4.10.1.2. Landsat 7 ETM+

Tabla 5. Características Landsat 7 ETM+ (INEGI y Ambiente s.f.)

Modo espectral	Espacial (metros)	Esppectral (micras)		Radiométrica	Temporal
Pancromática	15	Banda 8. Pancromática	0.52 – 0.90	8 BITS	16 Días
Multiespectral	30	Banda 1. Azul	0.45 - 0.52		
		Banda 2 verde	0.53 – 0.61		
		Banda 3 roja	0.63 – 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.78 – 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75		
		Banda 6 Infrarrojo medio	2.09 – 2.35		

4.10.1.3. Landsat 8 OLI

Tabla 6. Características Landsat 8 OLI (USGS. 2013)

Modo espectral	Espacial (metros)	Esppectral (micras)		Radiométrica	Temporal
Multiespectral	30	Banda 1. Aerosol costero	0.43 – 0.45	12 BITS	16 Días
	30	Banda 2. Azul	0.45 - 0.52		
	30	Banda 3. Verde	0.53 – 0.61		
	30	Banda 4. Roja	0.63 – 0.69		
	30	Banda 5. Infrarrojo cercano	0.85 – 0.89		
	60	Banda 6. Infrarrojo de onda corta 1	1.56 – 1.66		

	30	Banda 7. Infrarrojo de onda Corta 2	2.10 – 2.30		
<b>Pancromática</b>	15	Banda 8. Pancromática	0.50 – 0.68		
<b>Multiespectral</b>	30	Banda 9. Cirrus	1.36 – 1.39		
	100	Banda 10. TIRS 1	10.6 – 11.2		
	100	Banda 11. TIRS 2	11.5 – 12.5		

#### 4.10.2. Clasificación de Imágenes para la determinación de la cobertura del suelo

Para el análisis de imágenes satelitales conviene considerar la escala y nivel de desagregación requerida para el trabajo. La escala de trabajo condiciona la unidad mínima de información que se debe incluir en el mapa (MIC). La leyenda no está en función de la escala y la complejidad del territorio, por lo que es habitual emplear leyendas particulares para cada zona de estudio (Chuvieco 1996). Para la identificación de las leyendas se utilizará como base el mapa de bosques y uso de la tierra 2012 y el mapa de cambios en uso de la tierra 2001 – 2010 del grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosque y Uso de la Tierra, de Guatemala.

##### 4.10.2.1. Análisis visual de imágenes satelitales

Cuando se habla de un análisis visual se requiere abordar tres aspectos importantes: (i) soporte material de la imagen, (ii) escala y (iii) número de banda o combinación de bandas seleccionadas. El número de bandas depende directamente del fenómeno que se desea estudiar. El análisis visual de imágenes en la actualidad no requiere inversiones económicas importantes y puede garantizar un nivel de precisión suficiente para una determinada aplicación (Chuvieco 1996).

Las características específicas útiles para un determinado estudio dependen del campo de aplicación. Según García (2007) la mayor parte de las aplicaciones consideran las características básicas tales como:

- Tono, el cual se refiere al brillo relativo de los objetos. La expresión tonal de los objetos en la imagen está directamente relacionada con la cantidad de energía reflejada por la superficie.
- Color, el color tiene una ventaja con respecto al tono, ya que el ser humano es más sensible a las variaciones cromáticas versus la variación de intensidad luminosa. Con esta característica existe la posibilidad de mezclar varias bandas del espectro en una composición de color para la interpretación visual de las imágenes de satélite.
- Textura, es la frecuencia con la que suceden cambios tonales, el contraste espacial entre los elementos que componen la imagen. Esta característica se produce por una agregación de rasgos unitarios que pueden ser demasiado pequeños para diferenciarse individualmente, pero que juntos marcan una diferencia respecto al resto de la foto.
- Forma, se refiere a la forma de los objetos, la forma de su perímetro.
- Tamaño, el tamaño de los objetos en las imágenes se tiene que considerar siempre en el contexto de la resolución espacial y de la escala en la que está impresa o desplegada la imagen.
- Patrón, se refiere a la distribución espacial de los objetos, a la repetición de formas cada cierto espacio.
- Sombras, es la oscuridad en un área o espacio debido a que los rayos de una fuente de energía no llegan a ella por la interposición de un cuerpo opaco que forma parte del terreno o una construcción.
- Localización, se refiere a la posición topográfica o geográfica en la que se encuentra un objeto o elemento respecto a un marco de referencia.
- Visión estereoscópica, la impresión de profundidad que se encuentra en el mundo real también se puede adquirir con dos imágenes de la misma zona tomadas desde diferentes posición. Los estereogramas son pares de fotos dispuestos para la visión estereoscópica.
- Aspectos temporales, están relacionados con los fenómenos naturales son de gran importancia en la interpretación porque factores como el crecimiento vegetativo y el contenido en humedad del suelo varían durante el año.

#### 4.10.2.2. Clasificación supervisada de imágenes satelitales

De acuerdo con Ordoñez y Serna (2015) la clasificación supervisada de imágenes satelitales corresponde a un proceso en el cual píxeles de identidad conocida, ubicada dentro de las áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar píxeles de identidad desconocida. La clasificación de este tipo involucra las siguientes etapas:

- Etapa de entrenamiento: selecciona áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre delineándolas sobre la imagen digital bajo formas de rectángulos o polígonos, cuyos datos numéricos quedan almacenados.
- Selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación: se debe de tener un conocimiento previo del área de estudio, sea por reconocimiento de campo o consulta en mapas.
- Operación de post clasificación: es la adjudicación de cada uno de los píxeles de la escena a alguna clase, para lo que se utilizan los siguientes algoritmos.

##### 4.10.2.2.1. Clasificación por mínima distancia

La clasificación por mínima distancia busca clasificar un píxel en una categoría que lo incluye en la más cercana a él, es decir, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase. Esta es una distancia espectral que resulta de la comparación entre el ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías. Este algoritmo es relativamente rápido de ejecutar, ofrece buenos resultados cuando no existe un solape entre clases y no deja píxel sin clasificar (Soto y Gómez 1994).

El método presenta la ventaja de que todos los píxeles serán incorporados en alguna de las clases. La desventaja del mismo es que al ser paramétrico, no toma en cuenta la variabilidad de cada clase y es propenso a realizar clasificaciones erróneas, en la siguiente figura se muestra como se realiza la clasificación (Angelini s.f.).

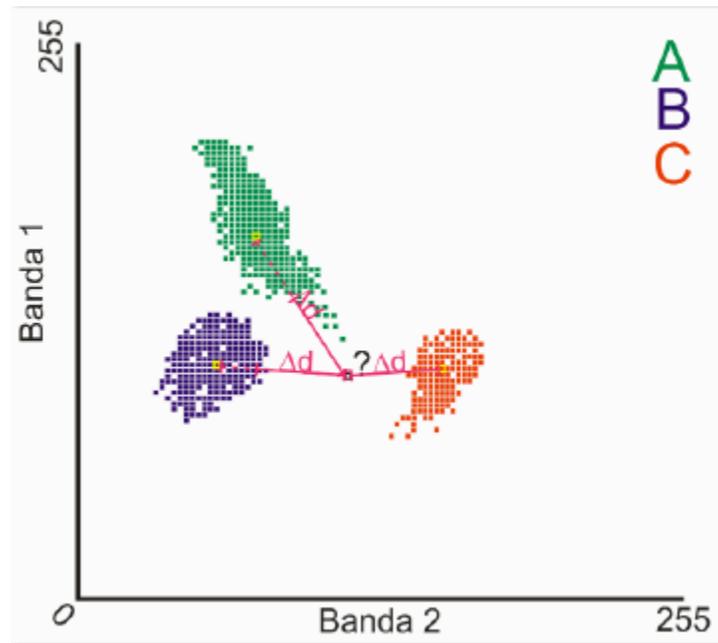


Figura 5. Grafico ejemplo clasificación por mínima distancia (Angelini s.f.)

#### 4.10.2.2.2. Clasificación por paralelepípedos

Esta clasificación define un subespacio en forma de paralelepípedo para cada clase. Para el procedimiento se introduce sensibilidad respecto a la varianza de las clases, los límites de cada paralelepípedo son definidos por el rango de valores para cada área de entrenamiento, dichos límites se definen tomando cierto número de desviaciones standard para ambos lados de la media del área de entrenamiento. Este clasificador tiene la ventaja de ser rápido y fácil de implementar. También tiene fuentes de error asociadas al solapamiento de paralelepípedos (Ordoñez y Serna 2015).

En la siguiente figura se puede apreciar algunos de los problemas que presenta este método, se parecía pixeles que quedan fuera de toda clase, por lo que el mismo no será clasificado. También se observa un área de confusión entre las clases A y B. Las áreas de superposición entre clases no pueden ser resueltas y por lo tanto no pueden clasificarse por este método. La ventaja del mismo se enmarca en la sencillez y rapidez de procesamiento (Angelini s.f.).

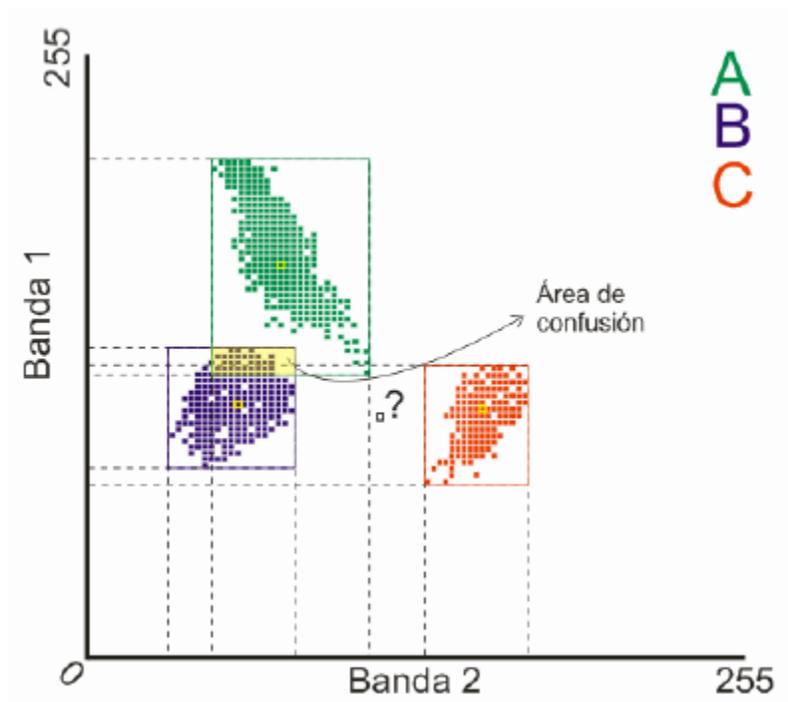


Figura 6. Grafico ejemplo clasificación por paralelepípedos (Angelini s.f.)

#### 4.10.2.2.3. Clasificación por máxima probabilidad o Máxima Verosimilitud

Este método considera que los ND de cada clase se ajustan a una distribución normal, lo que permite la descripción de esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza – covarianza. El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Es el más empleado por su robustez y el ajuste que puede llegar a tener (Chuvieco 1996, Del Toro *et al.* 2015).

#### 4.10.2.2.4. Clasificación Mapeo del Angulo Espectral (SAM por sus siglas en ingles)

Es un algoritmo de clasificación físicamente basado en la comparación de la similitud espectral entre (superficie) reflectancia espectral de la imagen y los espectros de referencia, tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. Este método permite un rápido mapeo mediante el cálculo de la similitud espectral entre los espectros de imagen para espectros de reflectancia de referencia. El método difiere de los demás, ya que compara

cada pixel de la imagen con cada endmember para cada clase y le asigna un valor de ponderación entre 0 (baja semejanza) y 1 (alta semejanza) (Arezo 2010).

#### 4.10.2.3. Clasificación no supervisada de imágenes satelitales

La clasificación no supervisada, agrupa píxeles de manera automática a una clase que no ha sido entrenada previamente. El método es utilizado para aquellas áreas donde no se conoce detalles de la zona de estudio, generando un número arbitrario de clase consideradas por el investigador. Tiene en cuenta parámetros estadísticos, que buscan minimizar las desviaciones de las clases y maximizar la distancia al centro de cada grupo de píxeles (Rodríguez 2011).

#### 4.10.3. Validación de la clasificación de imágenes

##### 4.10.3.1. Matriz de confusión

Es una matriz cuadrada en la que se compara la clasificación de la imagen con la verdad de terreno. A través de esta matriz se evalúa la exactitud de la clasificación, en las filas se colocan las clases o categorías del mapa y en las columnas las mismas clases para la verdad del terreno o campo. Se construye una comparación matricial de clases realizadas de la clasificación, ubicada generalmente en diferentes sectores o en la totalidad del mapa, confrontando las clases de cada clasificación (Boca y Rodríguez 2012, Rodríguez 2011).

La matriz presenta una visión general de las asignaciones, tanto de las clasificaciones correctas como de las migraciones o fugas, además recoge los denominados errores de omisión que son los elementos que no perteneciendo a una clase aparecen en ella y los de comisión que son los elementos que perteneciendo a esa clase no aparecen en ella por esta erróneamente incluidos en otra. A continuación, se muestra el esquema general de la matriz de confusión (Boca y Rodríguez 2012).

Tabla 7. Esquema general de la matriz de confusión (Boca y Rodríguez 2012).

		Clases en el Campo						
		A1	A2	...	AM	Total mapa	EXACTITUD USUARIO	ERROR COMISIÓN
Clases Mapa	A1	$a_{11}^*$	$a_{12}$	...	$a_{1m}$	$a_{.1}$	$a_{.1}/a_{..}$	$1-(a_{.1}/a_{..})$
	A2	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2m}$	$a_{.2}$	$a_{.2}/a_{..}$	$1-(a_{.2}/a_{..})$
	...			...				
	AM	$a_{m1}$		...	$a_{mm}$	$a_{.m}$	$a_{.m}/a_{..}$	$1-(a_{.m}/a_{..})$
	Total mapa	$a_{1.}$	$a_{2.}$	...	$a_{.}$	$a_{..}$		
	EXACTITUD PRODUCTOR	$a_{1./a_{..}}$	$a_{2./a_{..}}$	...	$a_{m./a_{..}}$			
	ERROR OMISIÓN	$1-(a_{1./a_{..}}$	$1-(a_{2./a_{..}}$	...	$1-(a_{m./a_{..}}$			

#### 4.10.4. Análisis de cambio de cobertura del Suelo

La matriz de tabulación cruzada es un punto de partida fundamental en el análisis del cambio de uso de la tierra, se utiliza para determinar los procesos que definen un patrón de cambio de la tierra. Proporciona las categorías de la tierra de acuerdo con dos pares de componentes: el cambio neto y el intercambio, así como ganancias brutas y pérdidas brutas (Pontius *et al.* 2004).

Esta metodología permite obtener para cada categoría de uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales. Así mismo permite valorar el cambio total tomando como referencia las persistencias y así evaluar cuales fueron las transiciones sistemáticas más significativas entre categorías (Rocha *et al.* 2009).

El análisis de estos componentes puede distinguir entre una transición del paisaje claramente sistemática y una transición del paisaje aparentemente aleatoria. Este método permite a los científicos centrarse en las señales más fuertes de las transiciones sistemáticas del paisaje, que es necesario en última instancia para vincular el patrón al proceso (Pontius *et al.* 2004).

La manera más pragmática de analizar el cambio de la tierra es mediante la obtención de mapas desde el tiempo 1 y el tiempo 2, examinar los cambios con una matriz de transición para identificar las transiciones más importantes. La matriz de tabulación cruzada tradicional o matriz de transición sigue el formato del cuadro 2, donde las filas muestran las categorías de tiempo 1 y las columnas muestran las categorías de tiempo 2 (Pontius *et al.*2004).

Tabla 8. Matriz general de tabulación cruzada para comparar dos mapas de diferentes tiempos (Rocha *et al.* 2009)

	Tiempo 2				Tiempo total 1	Pérdida
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
Tiempo 1						
Categoría 1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{1+}$	$P_{1+} - P_{11}$
Categoría 2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{2+}$	$P_{2+} - P_{22}$
Categoría 3	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$P_{3+}$	$P_{3+} - P_{33}$
Categoría 4	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	$P_{+}$	$P_{4+} - P_{44}$
Tiempo total 2	$P_{+1}$	$P_{+2}$	$P_{+3}$	$P_{+4}$	1	
Ganancia	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$		

La diferencia entre la última columna se denomina "cambio neto", es importante si no se presenta un cambio neto no implicaría que necesariamente falta de cambio en el paisaje. Es posible que el cambio ocurra de tal manera que la ubicación de una categoría cambie entre el tiempo 1 y el tiempo 2, mientras que la cantidad permanece igual. Debido a su formato, los datos pueden utilizarse para calcular el cambio neto anual de la superficie de cualquier tipo de cobertura territorial. Las entradas diagonales de la Tabla 1 indican la cantidad total de persistencia que domina la mayoría de los paisajes (Pontius *et al.*2004). Una vez obtenida la matriz de tabulación cruzada, es posible calcular una serie de parámetros de gran importancia en el análisis de los cambios de usos del suelo: las ganancias, pérdidas, cambio neto, intercambio, cambio total el cual resulta de la suma de las ganancias y las pérdidas (Rocha *et al.* 2009).

#### 4.10.5. Fuentes de error en una clasificación temática

Toda clasificación lleva emparejada un cierto margen de error, en función de la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado. Por ello es necesaria la aplicación de algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error y en función de él, valorar la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa. La exactitud de uno y otro método está influenciada por los recursos externos aplicados sobre la interpretación, como es el caso de la experiencia del interprete o de la calidad del equipo de tratamiento con que se cuente (Chuvieco 1996).

Las fuentes de error de una clasificación en varios grupos, se distinguen de la siguiente manera: (i) relacionados con el terreno que se analiza, (ii) con el nivel de precisión requerido en la leyenda, (iii) con la adquisición de la imagen, y (iv) con factores medio-ambientales externos (Chuvieco 1996). Cuando se analizan los errores posibles en una clasificación se hace referencia a los errores por omisión y los errores por comisión. Los errores por omisión se presentan cuando un pixel correspondiente a una clase de cobertura pero no fue clasificado de esa manera, el complemento de este error está dado por la precisión del productor. El error de comisión corresponde a un pixel clasificado como una clase de cobertura a la que no pertenece, el complemento de este error está dado por la precisión del usuario.

#### 4.10.6. Aplicación del análisis categórico multivariante

Para conocer la fiabilidad de los resultados obtenidos en la matriz de tabulación cruzada, se utiliza la técnica del análisis categórico multivariante. Para este análisis unos de los índices más empleados, es el estadístico Kappa (k), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa – realidad observada y el que cabría esperar simplemente por azar. Intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Chuvieco 1996). La estimación de k se obtiene a partir de la siguiente formula:

$$K_{hat} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Donde  $X_{ii}$  indica el acuerdo observado, y  $X_{i+}$ ,  $X_{+i}$  el acuerdo esperado. El acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz, mientras que el esperado sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. La estimación de  $k$  sirve para conocer el grado de significación de este estadístico y si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado al azar. Esta evaluación evalúa si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvieco 1996).

## 5. MATERIAL Y MÉTODOS

### 5.1. Fases Metodológicas

A continuación se presenta un resumen de las fases que constituyen el proyecto.



Figura 7. Fases de trabajo de la metodología

### 5.2. Delimitación, reconocimiento y ubicación del área de estudio

La subcuenca del Río Pensativo está circunscrita en la parte alta de la subcuenca del río Guacalate y ésta a su vez forma parte de la cuenca del río Achiguate (Ver figura 9), estas forman parte de la vertiente del Pacífico (Ver figura 8). La subcuenca está ubicada entre los meridianos  $90^{\circ}45'48''$  y  $90^{\circ}39'39''$  de longitud oeste y los paralelos  $14^{\circ}27'53''$  y  $14^{\circ}36'29''$  de latitud norte tiene como límites geográficos, al norte, las cuencas del río Motagua y María Linda, al este y al sur nuevamente la cuenca del río María Linda, al sur y oeste la subcuenca del río Guacalate (Rojas 2014) como se muestra en la figura 8.

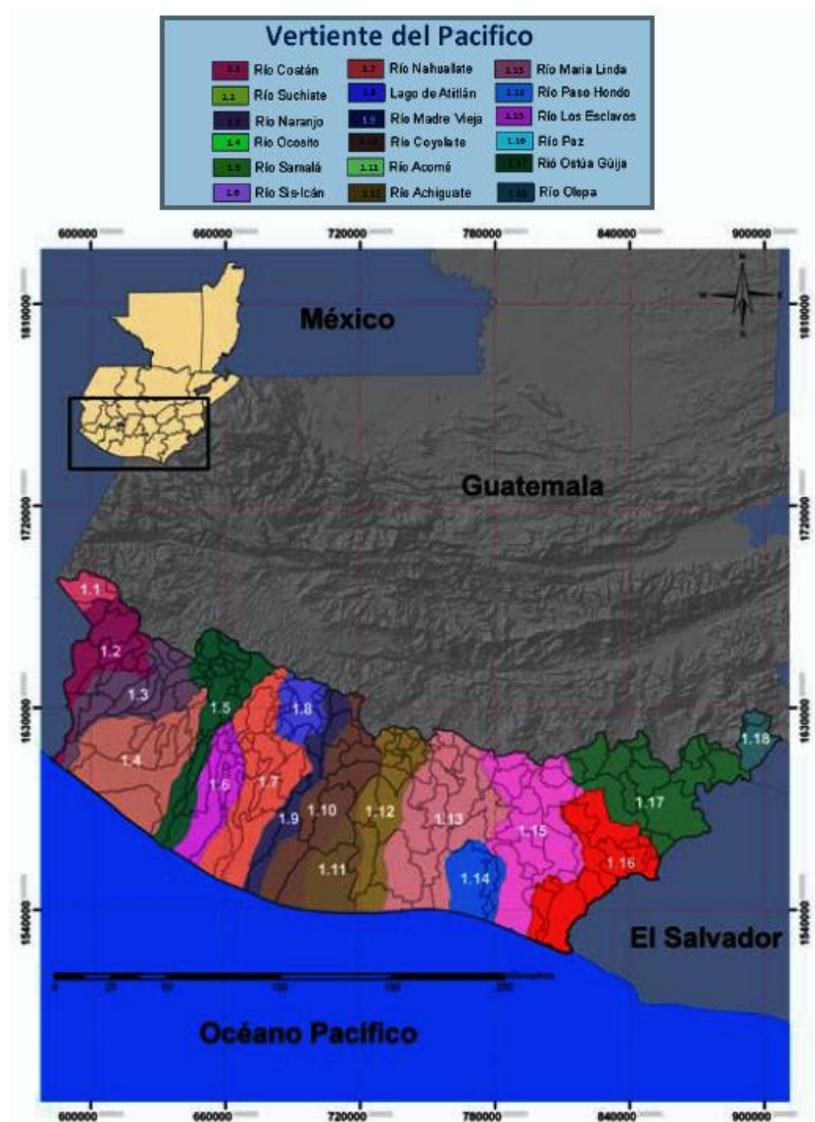


Figura 8. Vertiente del Pacífico (Suarez 2011)

La superficie de la subcuenca cubre los municipios de Ciudad Vieja, Santa María de Jesús, La Antigua Guatemala, Santa Lucía Milpas Altas y Magdalena Milpas Altas todos los departamentos de Sacatepéquez (Rojas 2004).

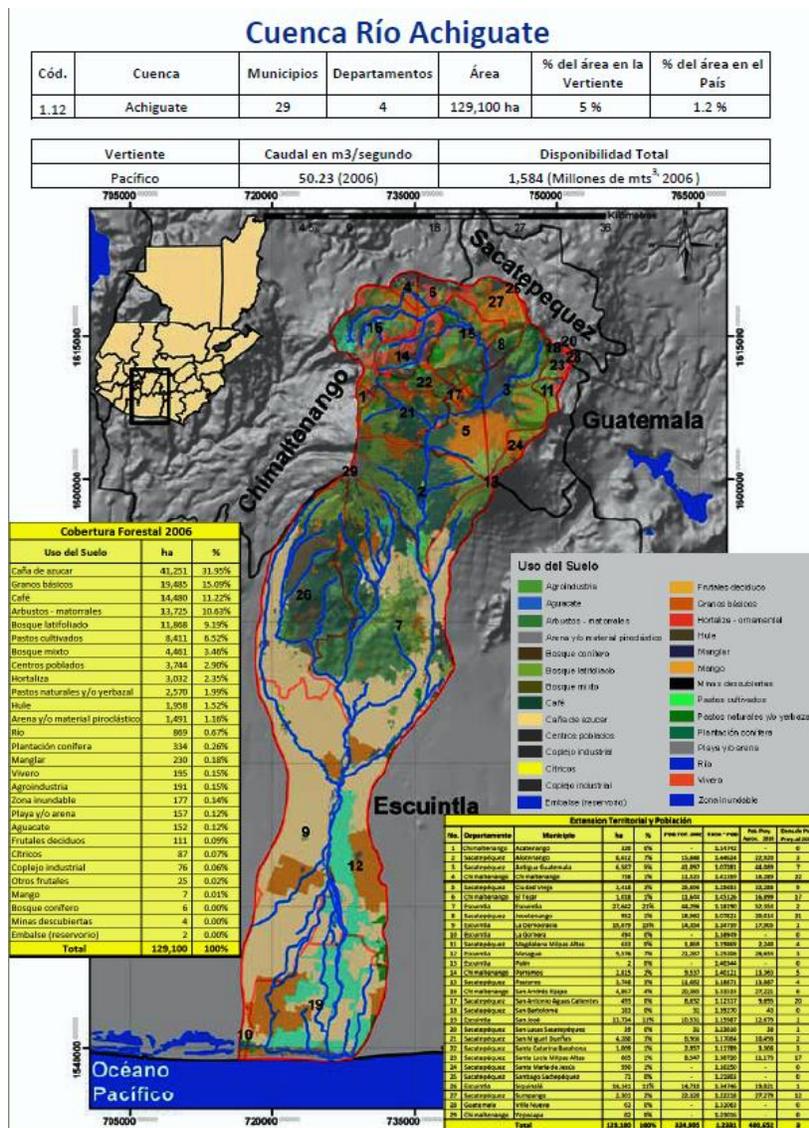


Figura 9. Cuenca del río Achiguate (Suarez 2011)

El departamento de Sacatepéquez cuenta con una extensión territorial de 465 km cuadrados y una población de 248,019 habitantes, es una zona montañosa y volcánica, con la existencia de algunas mesetas y llanuras. Se caracteriza por poseer tierras muy fértiles, los principales productos agrícolas son el café, maíz, frijol, trigo y algunas legumbres. El clima presente en el área es templado, semi-cálido con invierno benigno y poca humedad. La lluvia media anual sobre la cuenca es de 1024.55 mm y la temperatura media es de 20°C (Rojas 2014).

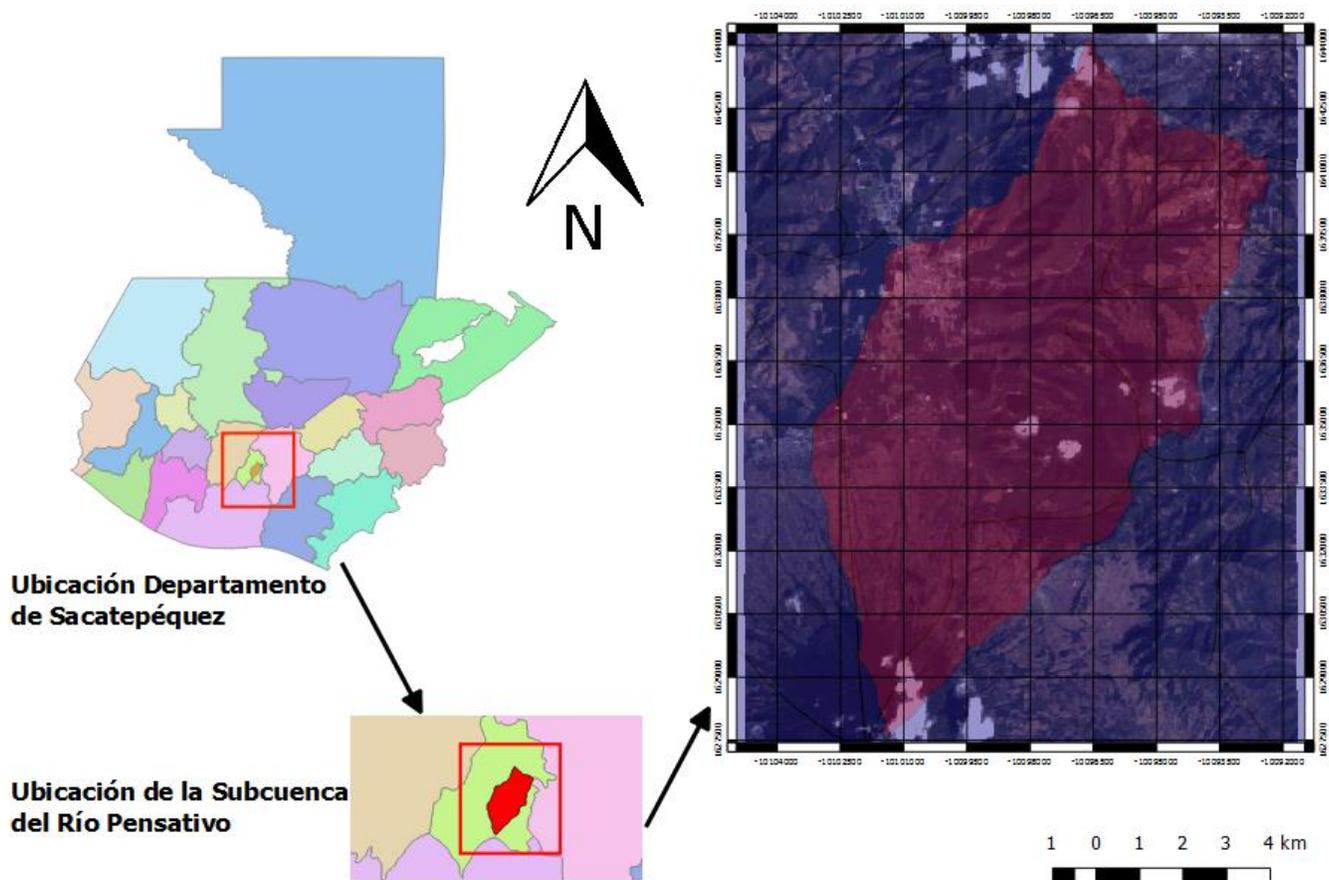


Figura 10. Ubicación y Localización de la subcuenca del Río Pensativo

Debido a las características que presenta la subcuenca constantemente genera problemas en la ciudad, ya que tiene una gran tendencia a la generación de inundaciones, a continuación se presenta el historial de inundaciones provocadas por el Río Pensativo.

Tabla 9. Historial de inundaciones y daños causados por el Río Pensativo

Fecha	Descripción
<b>06/octubre/1881</b>	Temporada de invierno, por las altas lluvias ocasiona pérdidas de puentes, fincas cafetaleras y provoca derrumbes.
<b>29/septiembre/1896</b>	Dos días de lluvia fuerte, provoca inundaciones en varios lugares en La Antigua Guatemala. Afecta fincas dejando pérdidas considerables.

<b>14/septiembre/1929</b>	El Río Pensativo provoca serios daños en Ciudad Vieja
<b>8,11,17/septiembre/1933</b>	La Antigua Guatemala se inunda por corriente del Río Pensativo, es necesario hacer énfasis a que en ese mismo año el Río Pensativo causo 3 inundaciones en la ciudad.
<b>9/octubre/1933</b>	La Antigua Guatemala queda inundada por dos corrientes del Río Pensativo.
<b>01/septiembre/1944</b>	Desbordamiento del Río Pensativo en el barrio de Chipilapa.
<b>30/septiembre/1949</b>	Inundación en La Antigua Guatemala.
<b>28/septiembre/1950</b>	Alerta debido a la amenaza de inundación.
<b>08/septiembre/1951</b>	Desborde del Río Pensativo, arrolla puente de acero.
<b>20/septiembre/1951</b>	Inundación en La Antigua Guatemala.
<b>09/octubre/1953</b>	Inundación del Río Pensativo, daños en las calles por una fuerte correntada.
<b>06/septiembre/1969</b>	50 personas murieron y 100 personas resultaron heridas debido a inundaciones en La Antigua Guatemala
<b>30/julio/1979</b>	Desbordamiento del río, causando inundaciones en viviendas, calles y avenidas
<b>1985</b>	Desbordamiento del Río Pensativo

Fuente (INSIVUMEH, 1988)

En esta etapa se delimito el área de la subcuenca, que corresponde a la ciudad de La Antigua Guatemala la cual está unida a la capital del país por una excelente carretera asfaltada, distante de la misma a 43 kilómetros. Su altura sobre el nivel del mar es de 1,530 metros y su extensión superficial de 78 kilómetros cuadrados (Rojas 2004). La subcuenca se encuentra ubicada dentro de la Ciudad de la Antigua Guatemala, por ello la importancia del desarrollo del análisis del crecimiento urbano y el cambio de cobertura de suelo.

Para el cálculo del área de la cuenca se utilizó el mapa de cuencas hidrográficas proporcionado por el Maga, a través de esta información se determina el área y el perímetro de la misma.

### 5.3. Elaboración de mapas de cobertura de suelo

#### 5.3.1. Obtención de imágenes satelitales

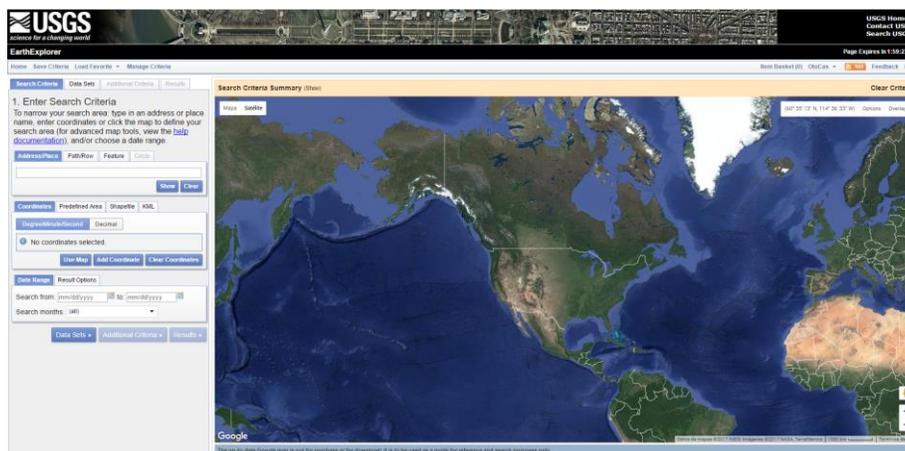
La recopilación de información secundaria se realizó mediante la descarga de imágenes satelitales las cuales se obtuvieron del sitio web <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Las imágenes que se descargaron del sitio web corresponden a las siguientes fechas y satélites:

- 19 de enero de 1990 capturada por el satélite Landsat 5
- 23 de enero de 2001 capturada con el satélite Landsat 7 ETM+
- 27 de enero de 2016 capturada con el satélite Landsat 8 Oli.

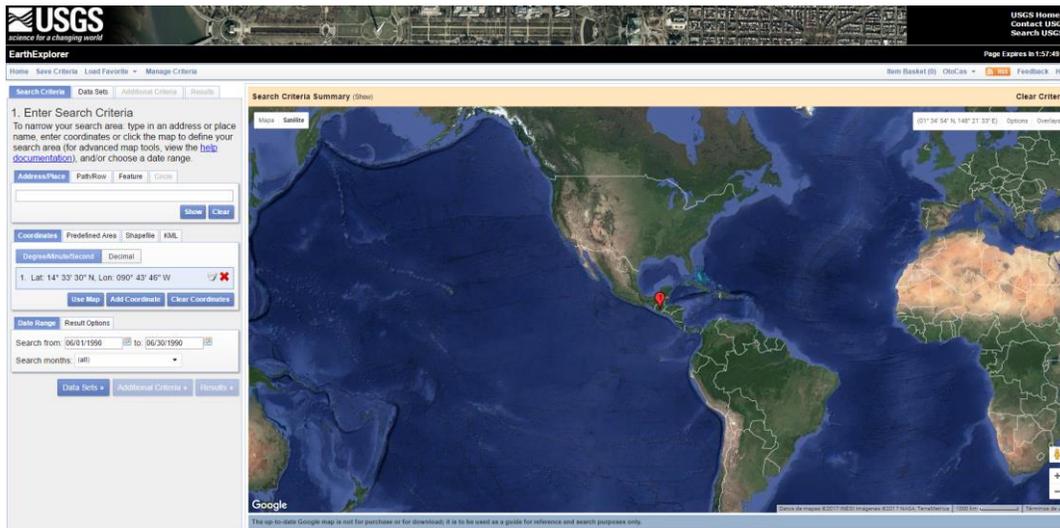
Se utilizaron imágenes de enero ya que es uno de los meses donde hay menor contaminación visual por nubes. A continuación se muestra una imagen del sitio web de descarga.

Figura 11. Sitio web <http://earthexplorer.usgs.gov/>



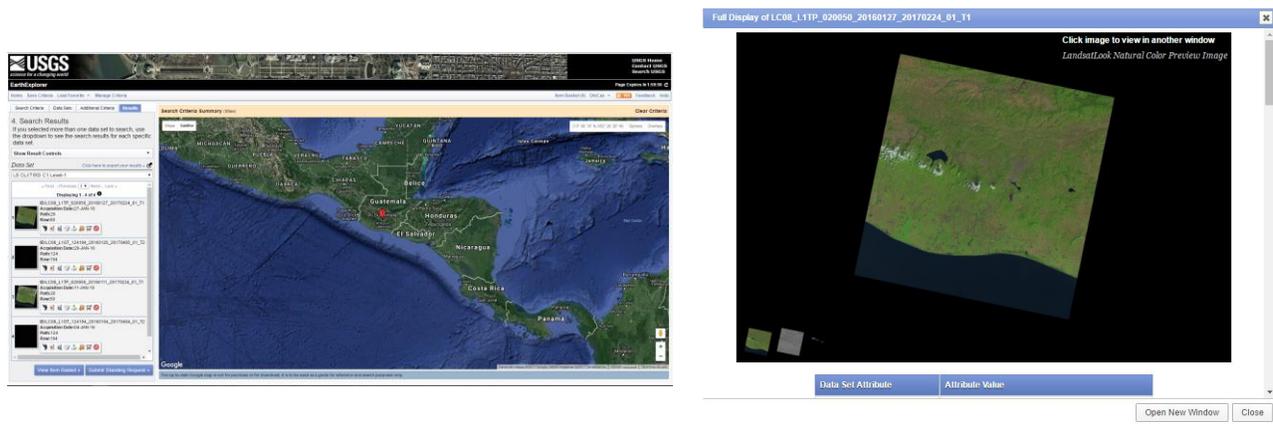
Para la descarga de las imágenes satelitales fue necesario ubicar el sitio de estudio, estableciéndolo en los criterios de búsqueda, así como las fechas para las cuales se realizaría el análisis (ver figura 12).

Figura 12. Criterios de selección y búsqueda de sitio



Se realizó la selección del satélite según la fecha de la imagen buscada, el sitio web muestra una serie de opciones en las cuales se buscan las imágenes más claras y con menor contaminación visual, a continuación se muestra una figura representativa del procedimiento.

Figura 13. Selección de imagen satelital



a) Selección de imágenes

b) Vista previa de la imagen a descargar

### 5.3.2. Análisis y clasificación de las imágenes satelitales

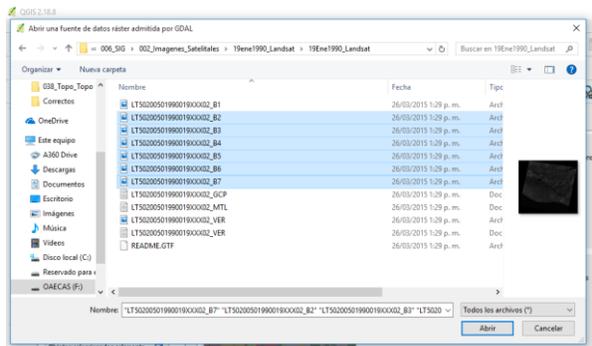
Para la clasificación de imágenes satelitales se utilizó el programa QGIS y un complemento llamado Clasificación Semi-automática (SCP), con el cual se desarrolló el análisis de las imágenes descargadas. Continuación se realiza una descripción del procedimiento para el análisis de cada fecha.

#### 5.3.2.1. Carga y corte de imágenes satelitales

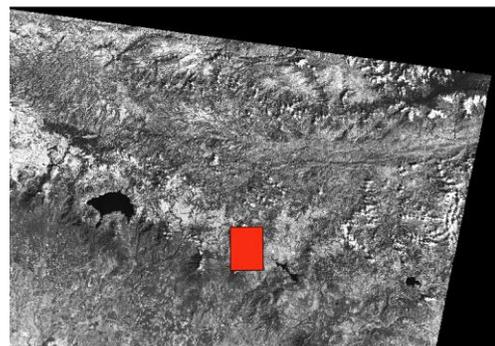
Se cargan las bandas de la imagen que se va a procesar y se procede a delimitar el área de estudio, con la creación de un polígono el cual abarca el área que ocupa la subcuenca del Río Pensativo, el cual servirá para la reducción de la imagen satelital, con el fin de trabajar directamente sobre el área de interés.

Las bandas a trabajar dependen de la fuente de información (satélite), ya que dependiendo del mismo son las bandas que se utilizarán, por ejemplo las bandas de la 2 a la 7 corresponden a los intervalos del espectro, los cuales ayudan a la separación de la cobertura del suelo, la banda 1 tiene aplicaciones en ozono, por lo mismo no se utiliza. Las bandas 2, 3 y 4 son des espectro visible (azul, verde, rojo) y las otras pertenecen al infrarrojo.

Figura 14. Carga de imagen satelital y delimitación de área de estudio



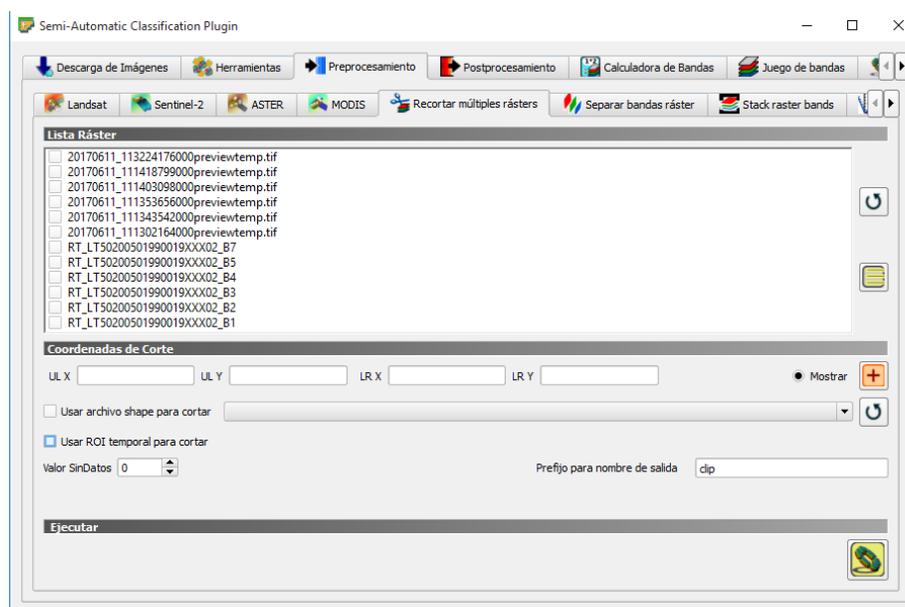
a) Carga de bandas de la imagen satelital



b) Delimitación del área de estudio

Posteriormente a la delimitación del área de estudio es necesario que se corten las bandas, a manera de trabajar sobre el área de interés, en este apartado es donde se utiliza la herramienta SCP. Es importante que se corten las imágenes con las bandas necesarias para realizar la clasificación, ya que no todas las bandas son útiles para la clasificación de la imagen.

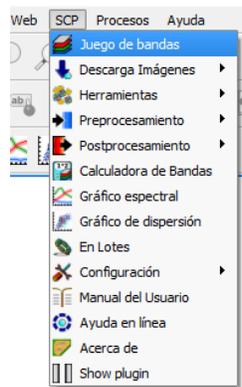
Figura 15. Recorte de múltiples rasters



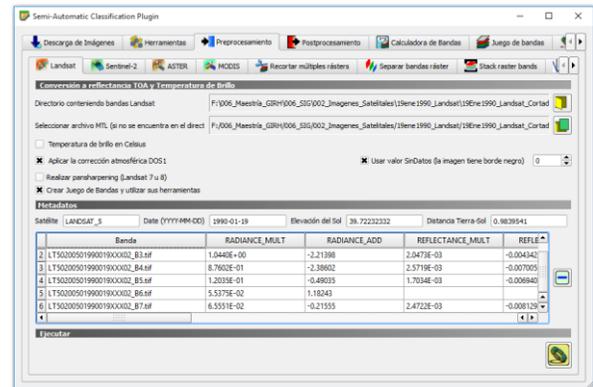
### 5.3.2.2. Corrección radiométrica

Se procede a la carga de las imágenes satelitales recortadas para insertar las firmas espectrales. Y se realizara una corrección DOS1, esta corrección es conocida como Sustracción de Objeto Oscuro, es una familia de correcciones atmosféricas basadas en la imagen. La corrección permite expresar los valores de los pixeles en unidades de la atmósfera o a la iluminación diferencial causada por la hora del día, el lugar de la Tierra o el relieve. Esta corrección trabaja bajo el supuesto que dentro de las imágenes existen algunos pixeles que están en penumbra total y que las radiancias recibidas en el satélite son debidas a la dispersión atmosférica (Congedo 2017). El la figura 16 se muestran los pasos para cargar las bandas ya recortadas y la aplicación de la corrección radiométrica.

Figura 16. Carga de imagen satelital cortada y corrección atmosférica



a) Carga de la imagen satelital cortada



b) Corrección DOS1

### 5.3.2.3. Creación de firmas espectrales

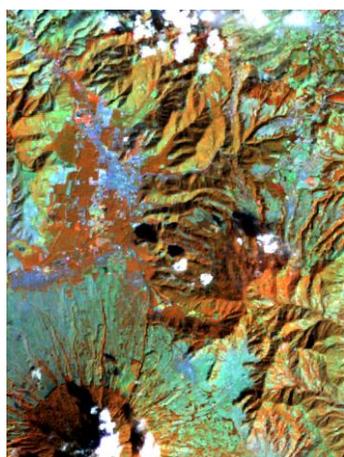
Posteriormente a las correcciones radiométricas, se realizó la creación de firmas espectrales, para la misma se definieron 6 macroclases, las mismas se tomaron del mapa de bosque y uso de la Tierra del año 2012 de la República de Guatemala, a continuación se describen las macroclases utilizadas. La coloración corresponde a la utilizada en el mapa de bosque y uso de la Tierra, así como la utilizada en las firmas espectrales.

Tabla 10. Definición de macro clases y categorías para las firmas espectrales

MC_Id	Macroclase	Descriptor
1	Agricultura Anual	Áreas con cultivos
2	Bosque	Tierras que se extienden por más de 0.5 hectáreas dotadas de árboles de una altura superior a 5 m y una cubierta de dosel superior al 10 por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ
3	Café	Áreas con café de sombre, uno de los principales productos de la economía de la región
4	Urbano	Espacios en los que, según su aptitud urbanística actual o futura, se divide el territorio de un asentamiento humano, el cual tiene características urbanas en cualquier grado de desarrollo.

5	Vegetación Arbustiva	Medios de vegetación arbustiva y/o herbácea, vegetación baja (guamil-matorral)
6	Nubes	Contaminación por nubosidades

Para la toma de firmas espectrales es necesaria la selección de la combinación de bandas, con el fin de realizar una interpretación visual. La combinación requerida está en función de los objetos o coberturas que se deseen identificar. Para efectos del estudio se utilizaron dos combinaciones la primera que es la combinación 5-4-3, la cual resalta características de color infrarrojo (vegetación) y la segunda combinación es la 4-5-3, la misma resalta características de Tierra/Agua, en la siguiente figura se muestran las dos combinaciones.



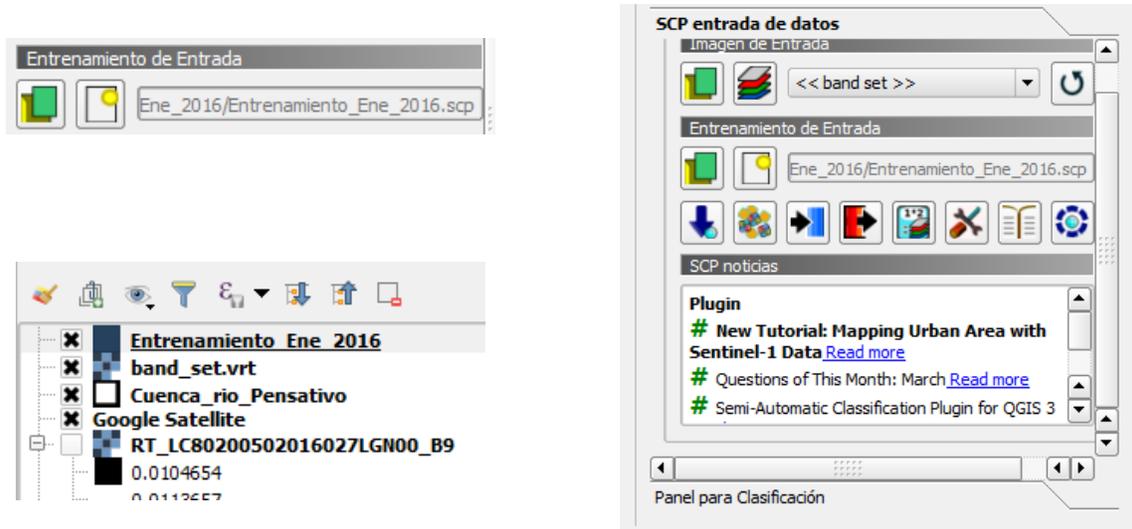
a) 4-5-3



b) 5-4-3

Figura 17. Combinación de bandas espectrales

Ya con la combinación se procedió a la creación de Regiones de Interés (ROIs o áreas de entrenamiento), este procedimiento se realizó para cada una de las coberturas o macroclases descritas anteriormente. Las ROIs son polígonos dibujados sobre áreas homogéneas de la imagen que se superponen a píxeles pertenecientes a las misma clase de cobertura de suelo (Congedo, 2017). Con este procedimiento se establecieron las firmas espectrales, las cuales fueron identificadas por medio del mapa de uso de suelo 2012 y la ayuda del programa Google Earth, para iniciar el proceso es necesaria la creación de una capa de entrenamiento, dentro del panel de SCP (Figura 18).



a) Creación capa de entrenamiento

b) SCP entrada de datos

Figura 18. Creación capa de entrenamiento

Con la creación de la capa de entrenamiento, se realizó la toma de firmas espectrales en el panel para clasificación, en este apartado se ingresan las macroclases descritas anteriormente así como las sub-classes, esto para realizar la clasificación supervisada. Iniciamos indicando las macroclases en el panel que se muestra a continuación.

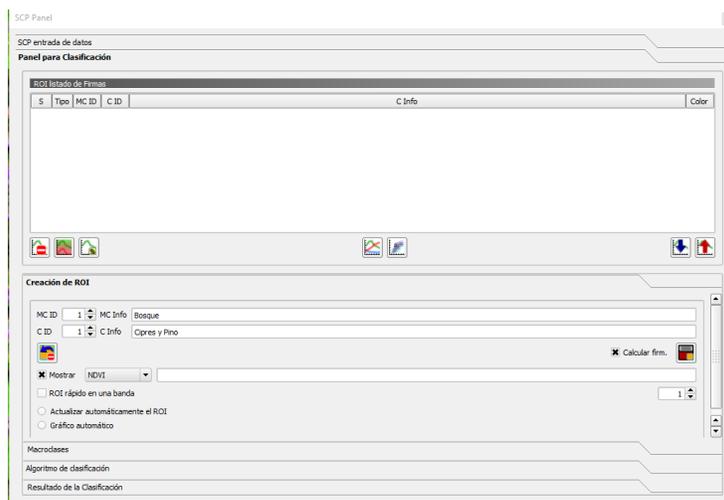


Figura 19. Panel de Clasificación

Para la toma de firmas espectrales se utilizó el algoritmo de Región Incremental, el cual permite seleccionar los pixeles similares a un pixel semilla, considerando la similitud espectral de los pixeles adyacentes. Este es el algoritmo que utiliza el complemento SCP para la creación de áreas de entrenamiento. En la figura el pixel central es usado como semilla (a) para la región incremental de una banda (b) con el parámetro de distancia espectral = 0.1; los pixeles similares son seleccionados para crear el área de entrenamiento (c, d) (Congedo, 2017).

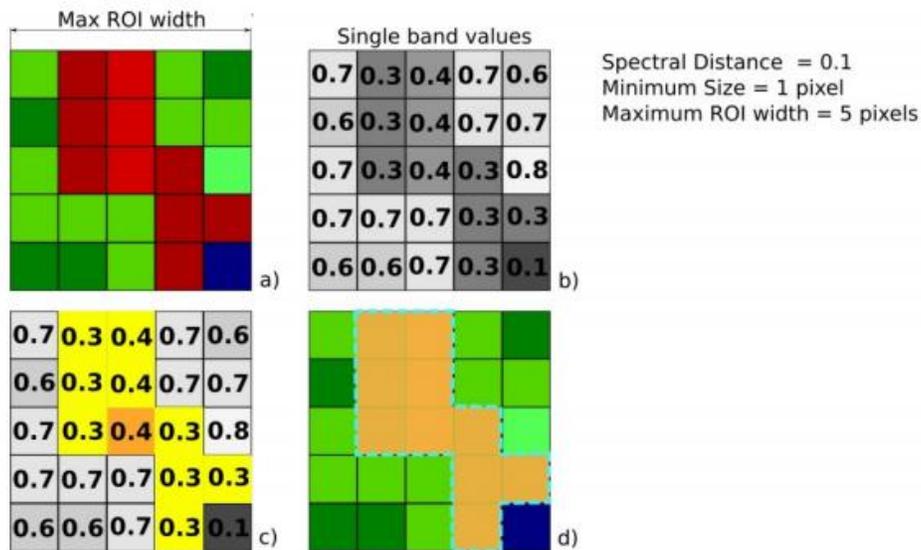
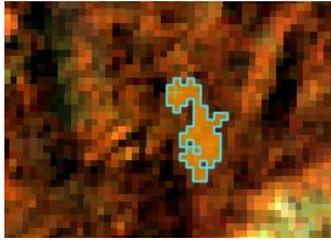
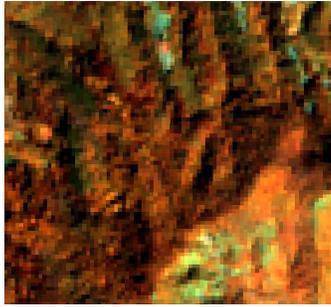


Figura 20. Ejemplo Algoritmo de Región Incremental (Congedo 2017)

La toma de firmas espectrales depende de la coloración y la variación de tonalidades que tiene la imagen, en la siguiente figura se aprecia una coloración naranja-verde (Figura 21 a) que representa Bosque, se coloca la sub clase y se procede a la toma de la firma, ese procedimiento se repite con cada macroclase. El número de muestras por cada clase se escogió de forma arbitraria en 10 muestras. Lo recomendable sería escoger el número de muestras proporcional al cubrimiento que tiene cada categoría o clase dentro del área de estudio. Dado que esto se desconoce a priori, se determinó este número de muestras pero teniendo el cuidado de capturar toda la variación espectral que tiene cada una de las clases (a partir del análisis visual) (Figura 21 b).



MC ID  MC Info   
 C ID  C Info   
 Calcular firm.

ROI listado de Firmas						
	S	Tipo	MC ID	C ID	C Info	Color
1	<input checked="" type="checkbox"/>	B	1	1	Cipres y Pino	

a) Toma de firma espectral

b) Calculo de firma espectral

Figura 21. Toma de firmas espectrales

Para verificar el comportamiento y la no coincidencia de las firmas tomadas el complemento SCP, muestra las firmas espectrales, donde se aprecia la diferencia entre las firmas tomadas. Este procedimiento es para analizar y verificar que programa no confunda firmas espectrales y clasifique las coberturas de suelo adecuadamente, ya que si las firmas espectrales son iguales se generará una clasificación errónea de las coberturas, en la siguiente figura se muestra la comparación de dos firmas espectrales donde se aprecia la diferencia entre una y otra.

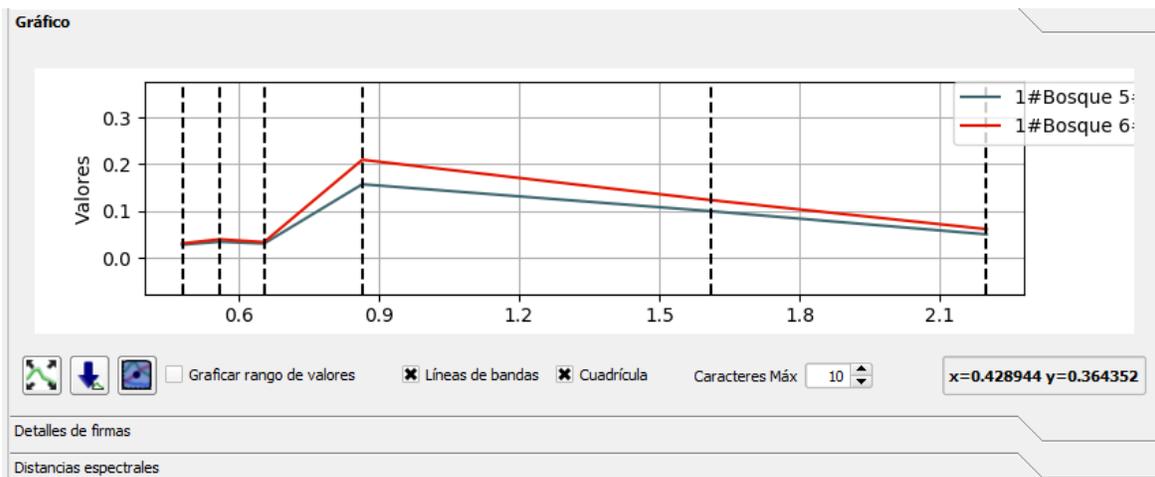


Figura 22. Verificación de firmas espectrales

#### 5.3.2.4. Clasificación de imágenes

Después de la verificación de firmas espectrales, se inicia el proceso de clasificación de la imagen de acuerdo al algoritmo de trabajo, para el desarrollo del proyecto se utilizó el algoritmo de Angulo de Mapeo Espectral (ver figura 23), esta clasificación se hace a nivel de macroclases. Este algoritmo está basado en la similitud espectral entre dos espectros, la similitud espectral se obtiene considerando cada espectro como un vector en un espacio n-dimensional. Un ángulo pequeño indica elevada similitud entre los espectros, mientras que ángulos elevados indican baja similitud (García-Allende *et al.* 2007).

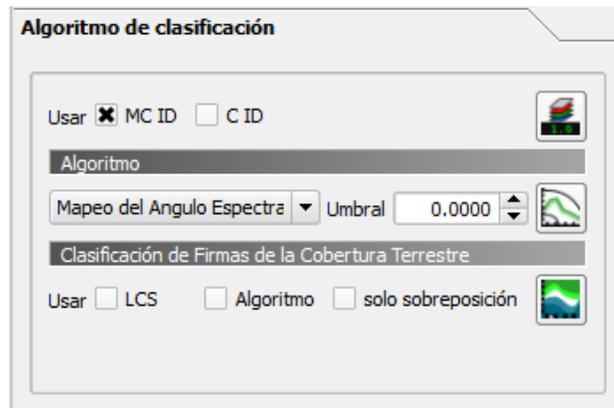


Figura 23. Selección de algoritmo de clasificación

Después de realizar el proceso de clasificación, se presenta la imagen clasificada en un raster, en el cual se identifica cada una de las macroclases determinadas, en esta clasificación los valores de los pixeles corresponden a cada macroclase y cada color es representativo de una clase de cobertura de suelo, a continuación se muestra la opción que genera la imagen clasificada de acuerdo a las firmas ingresadas.

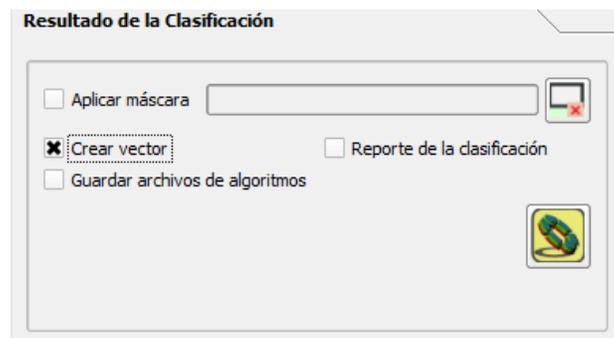
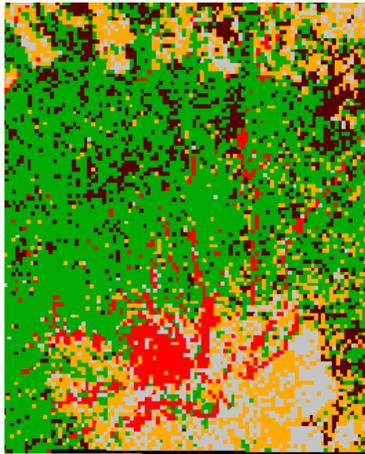


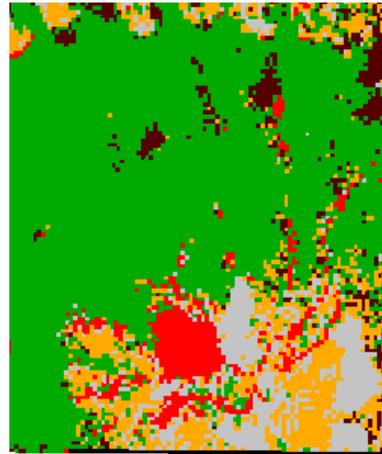
Figura 24. Generación de imagen clasificada

### 5.3.2.5. Filtrado de imágenes clasificadas

Con la clasificación ya generada (figura 25a), es necesaria la aplicación de un filtro a la imagen, el cual busca la eliminación de píxeles aislados (figura 25b).



a) Imagen clasificada sin filtro



b) Imagen clasificada filtrada

Figura 25. Comparación de imagen sin filtrar e imagen filtrada

Para la aplicación del filtro se utilizó la herramienta Majority filter, esta herramienta reemplaza píxeles en función del valor mayoritario de los valores vecinos. La herramienta tiene dos criterios para satisfacer antes del reemplazo, el primero corresponde al número de píxeles vecinos con el mismo valor debe ser lo suficientemente grande para ser el valor mayoritario y el segundo lugar los píxeles deben de ser contiguos al centro del filtro especificado. Este segundo criterio es relativo a la conectividad espacial de los píxeles, ya que minimiza la corrupción de patrones espaciales de cada píxel. En la imagen el Majority filter se aplica al raster de entrada usando un filtro de las cuatro celdas más cercanas, que son las cuatro células vecinas ortogonales, requiriendo que la mayoría sea la misma antes de que un píxel cambie su valor. Este cambia los píxeles rodeados por tres o más píxeles ortogonales con el mismo (ESRI 2016).

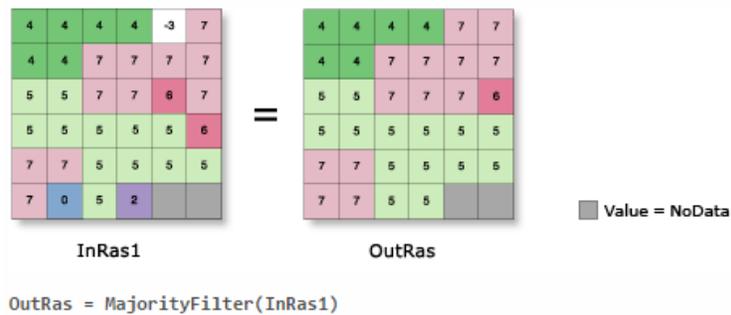
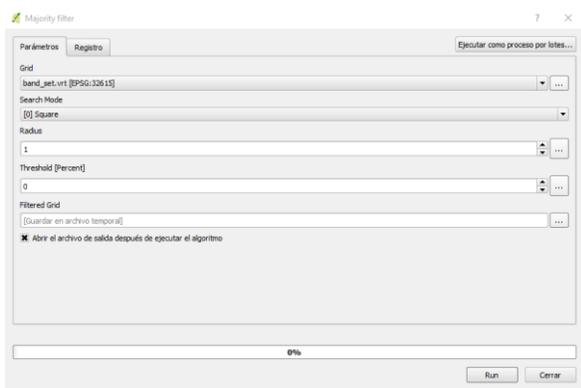
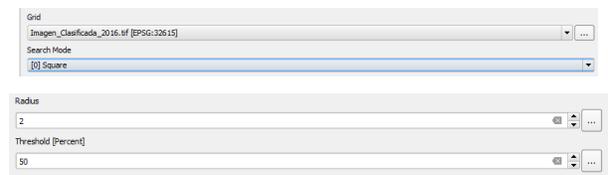


Figura 26. Aplicación del Majority filter (ESRI 2016)

Para la aplicación del filtro fue utilizado el majority filter, para el uso del mismo se utilizó la imagen que se va a filtrar, agregando parámetros como el radio que para nuestro caso va a ser igual a 2 y el porcentaje del 50% para cada una de los años generados.



a) Esquema general de la herramienta



b) Parámetros utilizados para el filtro

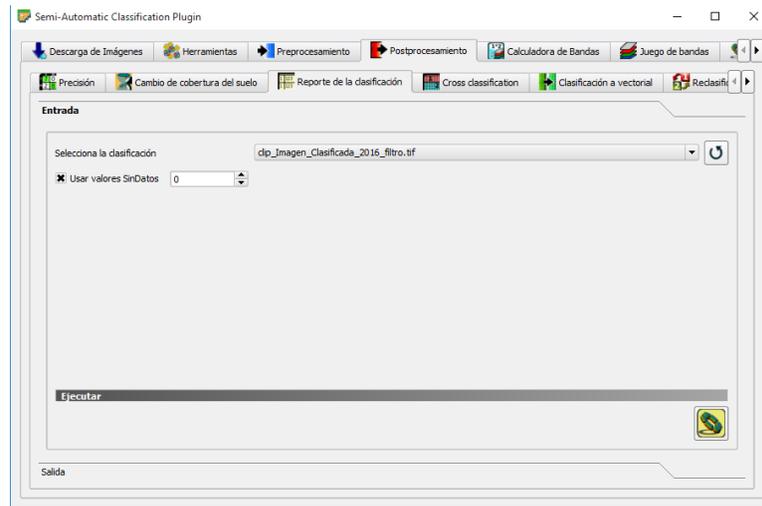
Figura 27. Majority Filter

Después de realizar todo el proceso de filtrado se cortaron las imágenes con la ayuda del shape de cuencas y subcuencas proporcionado por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, para tener datos únicamente de la subcuenca del Río Pensativo.

### 5.3.3. Reporte y verificación de resultados

#### 5.3.3.1. Reporte de la clasificación

Para finalizar el procedimiento es necesario que la información gráfica o imágenes clasificadas se puedan interpretar y manejar, de acuerdo al uso que se dará a la información, para el proyecto fue necesaria la identificación de los porcentajes y las áreas que representa cada cobertura de suelo, ya que con ello se identificaron los porcentajes de cambio que tiene cada una entre los periodos de 1990 – 2001 y 2001 – 2016, para el desarrollo este apartado se utilizó el reporte de la clasificación (figura 28 a), este permite el cálculo de estadísticas de las clases tales como el número de pixeles, porcentaje y área (figura 28 b).



a) Esquema general de la herramienta

Clase	PixelSum	Porcentaje %	Area [metre^2]
1.0	15181	16.500728245	13662900.0
2.0	38405	41.7436577466	34564500.0
3.0	22957	24.9527184192	20661300.0
4.0	9204	10.004130345	8283600.0
5.0	6255	6.79876524423	5629500.0

b) Reporte generado por clasificación

Figura 28. Reporte de la clasificación

## Tasas de cambio de cobertura de suelo

La tasa de cambio es un indicador de presión que permite conocer la magnitud y velocidad con que se está presentando este proceso, la evaluación de la misma sirve para conocer la dinámica, magnitud del cambio y sus efectos (Falcón 2014). La FAO (1996) propone la siguiente fórmula que expresa el cambio en porcentaje de la superficie del año inicial:

$$tc = \left[ \left( S_2 / S_1 \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100$$

Donde:

tc = tasa de cambio (%)

S1 = superficie en la fecha inicial

S2 = superficie en la fecha final

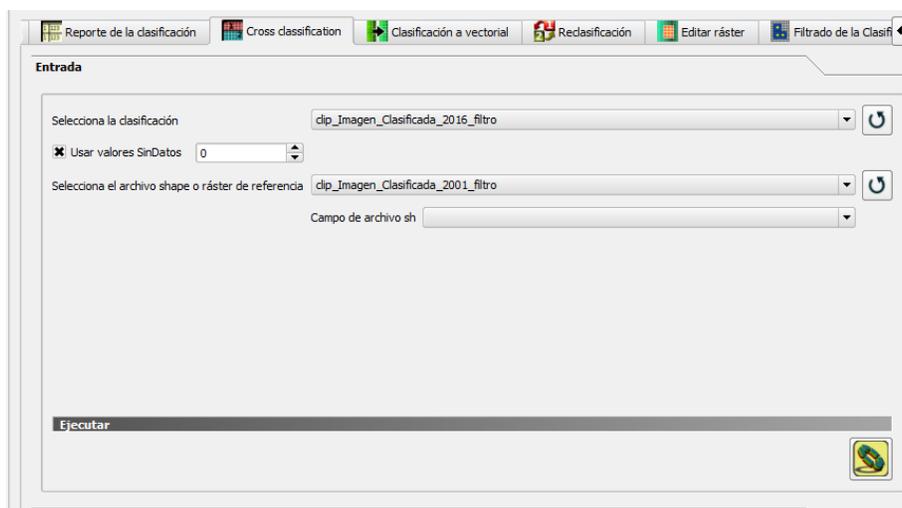
n = diferencia de años entre fecha inicial y final

### 5.3.3.2. Análisis de cambio de cobertura de suelo

El análisis se desarrolló mediante el cruce de matrices, de cada una de las clasificaciones generadas, esta matriz busca la validación del método utilizado, la misma se conoce como matriz de tabulación cruzada. Esta matriz realiza una comparación entre un intervalo definido de tiempo, con el cual se obtiene la cuantificación y los porcentajes de cada uno de los cambios de cobertura de suelo.

Para la generación de la matriz de tabulación cruzada, se utilizó el complemento SCP, el cual permitió hacer una comparación entre imágenes raster de las clasificaciones generadas, para la generación de la matriz de tabulación cruzada es necesario entrar en el posproceso del SCP, en esta etapa se realizó una comparación entre las dos imágenes previamente clasificadas y recortadas del área de estudio, para la creación de la matriz se debe seleccionar el archivo o raster de referencia, en este caso dependiendo del período de análisis puede ser la del año 1990 o la del año 2001, para seleccionar posteriormente la clasificación con la que se realizó la comparación 2001 para el año 1990 y la 2016 para el año 2001, el complemento genera un nuevo raster donde se identifican los

cambios así como la persistencia, la persistencia corresponde a las áreas donde no existe cambio, la cobertura de suelo se mantiene a través del tiempo (Figura 29).



a) Generación de matriz de tabulación cruzada

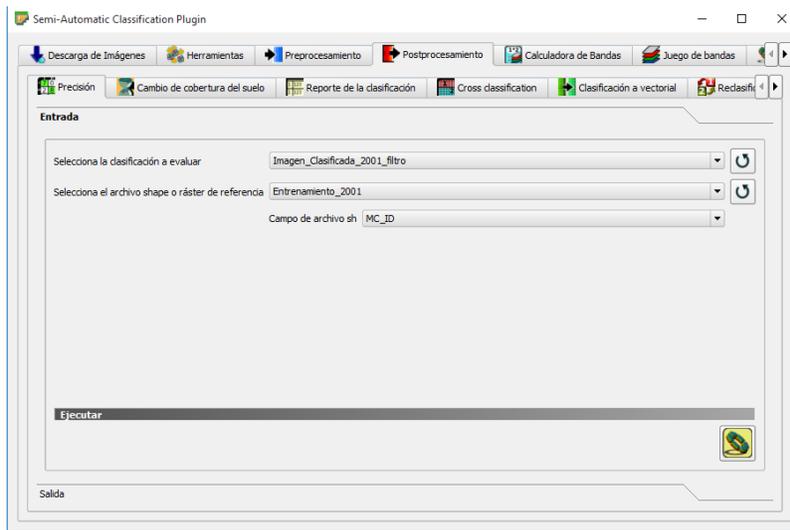
Salida				
CrossClassCode	Referencia	Clasificación	PixelSum	Area [metre^2]
1	1.0	1.0	6750	5482687.5
2	1.0	2.0	6341	5150477.25
3	1.0	3.0	5584	4535604.0
4	1.0	4.0	1154	937336.5
5	1.0	5.0	2747	2231250.75
6	2.0	1.0	3299	2679612.75
7	2.0	2.0	25613	20804159.25
8	2.0	3.0	10414	8458771.5
9	2.0	4.0	2157	1752023.25
10	2.0	5.0	1324	1075419.0
11	3.0	1.0	1614	1310971.5
12	3.0	2.0	5740	4662315.0
13	3.0	3.0	7624	6192594.0
14	3.0	4.0	652	529587.0
15	3.0	5.0	1426	1158268.5
16	4.0	1.0	846	687163.5
17	4.0	2.0	1715	1393008.75
18	4.0	3.0	287	233115.75
19	4.0	4.0	5518	4481995.5
20	4.0	5.0	116	94221.0
21	5.0	1.0	4301	3493487.25
22	5.0	2.0	3033	2463554.25
23	5.0	3.0	1450	1177762.5
24	5.0	4.0	685	556391.25
25	5.0	5.0	1194	969826.5

b) Resultado de clasificación

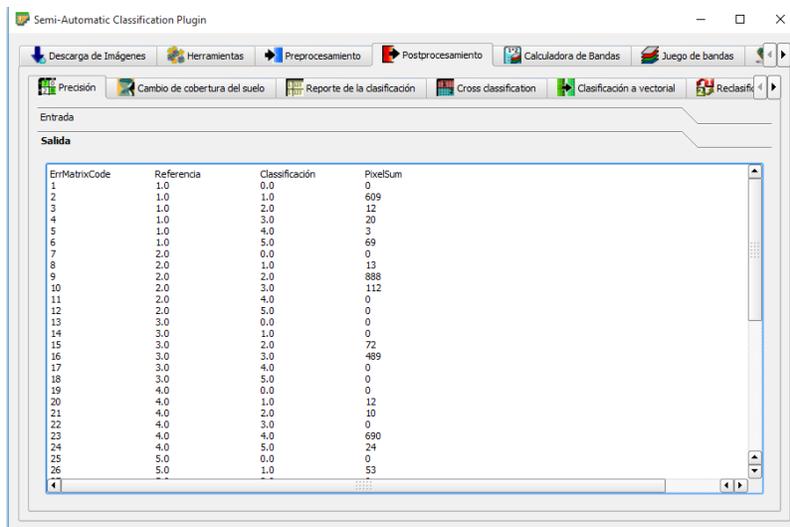
Figura 29. Cruce de matrices

### 5.3.3.3. Precisión de la clasificación

Para determinar la precisión de la clasificación se determinaron los valores Kappa para establecer los porcentajes de cada cobertura de suelo utilizada, así como la precisión total de la clasificación, para desarrollar este proceso se utiliza el panel (Figura 30a) y se establecieron los parámetros requeridos, la imagen clasificada y el archivo donde se encuentran las firmas espectrales, a partir de ello la herramienta genera un archivo de salida donde se encuentra la matriz de precisión y los valores totales y de los índices Kappa para las categorías (Figura 30b). Para la validación de resultados se utilizaron las mismas firmas con las que se hizo la clasificación de la imagen.



a) Generación de matriz de precisión



b) Resultado de análisis de precisión

Figura 30. Precisión de la clasificación

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Morfometría de la subcuenca

De acuerdo a la información que se obtuvo a través del modelo de elevación digital y la capa de cuencas proporcionada por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, se determinó que la elevación máxima de la subcuenca se encuentra a 3760 msnm, que corresponde a la altura del Volcán de Agua, que está en la parte sur de La Antigua Guatemala y la elevación mínima es de 1517 msnm en el municipio Ciudad Vieja, ambos puntos tienen incidencia en la subcuenca del Río Pensativo.

La subcuenca del Río Pensativo fluye de norte con dirección suroeste, con un área de 82.81 km<sup>2</sup> y un perímetro de 43.18 km, la longitud transversal de 16.5 km y un ancho medio de 5.02 km. El orden del cauce es 1 con una longitud de 11.30 km y una pendiente media de 5%.

La densidad de corriente es de 0.14 km/km<sup>2</sup>, el factor de forma es 0.63 y el índice de compacidad es de 1.33

$$D_s = \frac{N_s}{A} = \frac{11.30 \text{ km}}{82.81 \text{ km}^2} = 0.14$$

$$F = \frac{A}{L^2} = \frac{82.81 \text{ km}^2}{(11.3 \text{ km})^2} = 0.63$$

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{82.81 \text{ km}^2}} = 1.33$$

Para una densidad de corriente de 0.14 km/km<sup>2</sup> implica que la subcuenca posee un régimen pluvial de poca cuantía, se tiene que la resistencia del material litológico es alta lo que implica que no se producen erosiones relevantes, además de impedir el desarrollo a una mayor longitud de corriente y una baja velocidad de transporte. El índice de compacidad de 1.33 indica que la forma de la cuenca tiene una forma de oval redonda a oval oblonga y tiene como característica la concentración de una buena cantidad del volumen de escurrimiento.

## 6.2. Análisis multitemporal de cambio de cobertura de suelo entre los años 1990-2001 y 2001-2016

La clasificación desarrollada para el año 1990 hace referencia a las áreas que corresponden a cada una de las macroclases que se utilizaron para el estudio, la agricultura anual correspondiente a un área de 2730.06 hectáreas equivalente a un 32.97%, una de las mayores coberturas existentes a nivel de subcuenca, la mayor cobertura correspondía a bosque con un 48.88%, la cuenca del Río Pensativo se caracterizaba por la existencia de áreas extensas de bosque, y se cultiva gran variedad de hortalizas, en menor porcentaje de área se encuentra el café (8.15%), el área urbana (3.17%) y arbustos (6.83%), el área urbana en su mayoría estaba delimitada por la ciudad de la Antigua Guatemala, la cual correspondía a 7 calles y 7 avenidas (Ver anexo 1).

Tabla 11. Cobertura de suelo del año 1990, 2001, 2016

Clase	Macroclase	1990			2001			2016		
		%	Area (m <sup>2</sup> )	Area (ha)	%	Area (m <sup>2</sup> )	Area (ha)	%	Area (m <sup>2</sup> )	Area (ha)
1	Agricultura Anual	32.97	27300600.00	2730.06	22.25	18421017.75	1842.10	16.50	13662900.00	1366.29
2	Bosque	48.88	40471200.00	4047.12	42.07	34831716.75	3483.17	41.74	34564500.00	3456.45
3	Café	8.15	6748200.00	674.82	16.80	13906532.25	1390.65	24.95	20661300.00	2066.13
4	Urbano	3.17	2628000.00	262.80	8.37	6926868.00	692.69	10.00	8283600.00	828.36
5	Arbustos	6.83	5655600.00	565.56	10.53	8715442.50	871.54	6.80	5629500.00	562.95

Para el año 2001, la principal cobertura de suelo era bosque, que era equivalente al 42.07 %, seguido por la agricultura anual con un 22.25 % del área de la subcuenca, se mantenía una tendencia de las áreas de mayor cobertura, el área de café (16.80%) presentó un crecimiento el cual se podrá identificar en las matrices de tabulación cruzada, los menores porcentajes de área corresponden a cobertura urbana (8.37%) y área de arbustos con un 10.53% (Ver anexo 2).

En el 2016 se observó que el bosque representa la mayor área de cobertura de suelo, cuyo porcentaje de área corresponde al 41.74 %, seguido de las áreas de cultivo de café con 24.95%, la agricultura anual con un 16.50% y con un menor porcentaje el área urbana (10%) y el área de arbustos (6.80%) (Ver anexo 3).

### 6.3. Matrices de cambio de cobertura de suelo

Para la identificación de los cambios que se dieron en los períodos de los años 1990-2001 (Tabla 14) y 2001-2016 (Tabla 15), se realizó el análisis de las matrices de tabulación cruzada. La matriz en las filas presentan el año inicial de trabajo y las columnas corresponden a la categoría de fecha final, la diagonal de la matriz corresponde a la persistencia, el resto corresponde a los cambios que se presentaron entre diferentes coberturas de suelo. Además de la matriz de transición es necesaria la localización de los cambios, esto se desarrolló mediante la sobreposición de las imágenes clasificadas (Anexo 5,6).

Tabla 12. Matriz de tabulación cruzada 1990-2001

1990	2001					Total 1990	Pérdidas	Ganancia o pérdida Neta
	1) Agricultura Anual	2) Bosque	3) Café	4) Urbano	5) Arbustos			
1) Agricultura Anual	948.55	605.05	63.52	15.68	201.03	1833.82	885.27	878.37
2) Bosque	693.91	2358.45	286.48	31.35	106.81	3477.00	1118.55	563.70
3) Café	227.43	747.51	278.28	6.66	125.49	1385.37	1107.10	-709.09
4) Urbano	296.47	151.16	25.75	205.26	10.32	688.95	483.69	-423.91
5) Arbustos	545.83	178.53	22.26	6.09	113.47	866.18	752.71	-309.06
Total 2001	2712.18	4040.70	676.28	265.04	557.12	8251.32		
Ganancias	1763.64	1682.25	398.00	59.78	443.65			

Tabla 13. Matriz de tabulación cruzada 2001-2016

2001	2016					Total 2001	Pérdidas	Ganancia o pérdida Neta
	1) Agricultura Anual	2) Bosque	3) Café	4) Urbano	5) Arbustos			
1) Agricultura Anual	553.22	272.51	136.46	67.42	347.40	1377.01	823.78	456.73
2) Bosque	443.33	1766.72	338.63	128.99	211.27	2888.93	1122.20	588.07
3) Café	513.67	1142.43	741.34	32.08	145.23	2574.75	1833.41	-1189.38
4) Urbano	101.77	188.77	54.50	451.04	65.47	861.55	410.51	-172.60
5) Arbustos	221.74	106.57	114.45	9.42	96.74	548.92	452.18	317.18
Total 2016	1833.74	3477.00	1385.37	688.95	866.10	8251.16		
Ganancias	1280.51	1710.27	644.03	237.91	769.36			

#### 6.4. Validación de la información obtenida

Para las clasificaciones se requiere la verificación de la información obtenida, esto implica la precisión de la clasificación desarrollada, las clasificaciones independientemente del tipo que se haga no son 100% precisas, esto está íntimamente ligado con la confiabilidad de los resultados. Cuando se desarrolla una matriz de error las columnas presentan lo que se observa en los lugares de referencia y las filas presentan lo clasificado en base a los lugares de referencia. La matriz de error se desarrolló para la clasificación del año 2016, ya que es la fecha en que se pueden validar las firmas espectrales con visitas de campo o con la ayuda de google earth.

Para el año 2016 se tiene una precisión del 80.31%, cada una de las clases corresponden a las coberturas que se utilizaron en los mapas clasificados, de los resultados más significativos se tiene una precisión del productor de la clase 1 agricultura anual, con una precisión del productor equivalente al 94.32% y un error por omisión del 5.68%, la precisión del usuario para la cobertura de bosque corresponde al 99.37% lo que implica que se tiene un error por comisión del 0.67%. El coeficiente Kappa de 0.99 indica que la clasificación efectuada es un 99.16% mejor que la esperada al azar. En la clase 3 ocurre al contrario, una precisión del productor equivalente al 73.34%, precisión del usuario del 50% y un coeficiente Kappa de 0.41 equivalente al 41%, este es un valor bastante bajo, pero se toma como correcto debido al porcentaje de precisión que tiene la imagen clasificada en su totalidad.

Tabla 14. Matriz de error e índices Kappa del año 2016

Clase	Macroclase	1	2	3	4	5	Total
1	Agricultura Anual	632	1	0	2	1	636
2	Bosque	10	860	108	0	0	978
3	Café	6	297	300	0	0	603
4	Urbano	0	0	0	262	0	351
5	Arbustos	22	0	1	0	137	160
Total		670	1158	409	264	138	2728

Precisión total [%] =80.3152492669

### 6.5. Análisis de cambios de cobertura de suelo

Para el análisis se desarrolló una comparación de cada una de las macroclases con respecto a cada uno de los años de análisis, en la figura 31 se observa los cambios que ha sufrido cada uno de las coberturas identificadas, se observa que la agricultura anual muestra que las áreas dedicadas a esta actividad han ido disminuyendo conforme los períodos analizados, esta disminución se considera debido a la mayor rentabilidad en la siembra de café y el crecimiento urbano, ya que en este mismo período de tiempo se observa el crecimiento de ambos. El bosque presenta una disminución en áreas para los tres años analizados como se puede apreciar en la figura 31 y 32, el bosque representa la mayor cobertura en la subcuenca y esta variación ocurre debido a la expansión del área de siembra de café, ya que en Guatemala este cultivo representa una producción a gran escala, además de la extracción de madera, la cual presenta problemas de talado por empresas privadas, así como talado no declarado. Otro aspecto importante a considerar es la extensión de infraestructura, con la ampliación o apertura de caminos, asentamientos o urbanizaciones, otro aspecto que se considera es el económico, ya que el mercado maderero tiene un alto crecimiento, ya sea por demande de los centros urbanos, cambios en dietas de los consumidores, pobreza, etc.

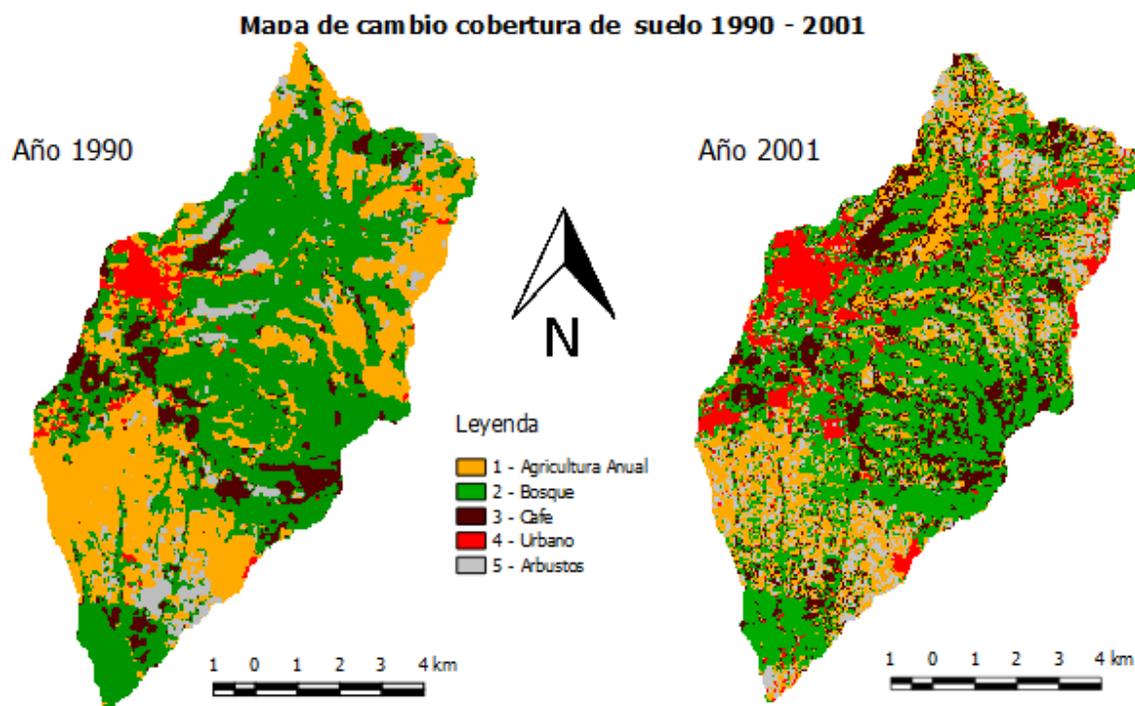


Figura 31. Comparación Imagen Clasificada Año 1990 - 2001



Según el mapa de cobertura forestal de Guatemala 2006 y dinámica de la cobertura forestal 2001 – 2006, para el año 2001 Guatemala contaba con un 38.1% del área con cobertura foresta, para el año 2006 se reportó un área de 35.5% del territorio, lo cual implica que hubo una pérdida del 2.6% equivalente a 605,103 ha, la tasa de deforestación para ese período era equivalente al 1.16%. Si se compara la dinámica forestal del 2001-2006 con la del año 1991-2001 (Figura 34) se observa que la pérdida anual de bosque aumentó, este aumento representa el 9% en la cantidad de bosque deforestado anualmente (Universidad del Valle de Guatemala et al, 2011).

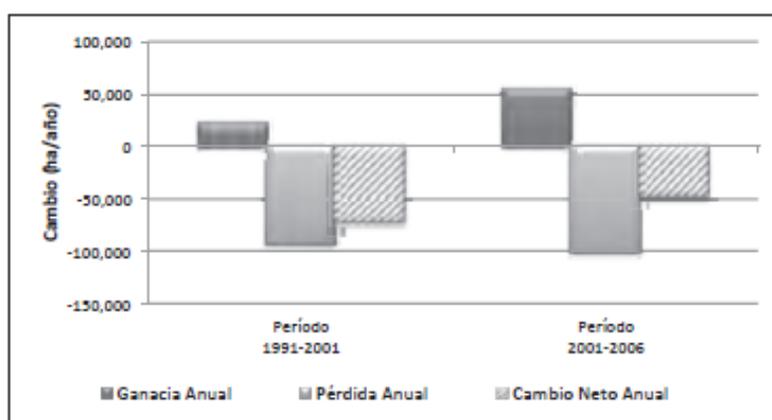


Figura 34. Tendencia de la dinámica forestal de Guatemala durante los períodos 91-01 y 01-06 (Universidad del Valle de Guatemala *et al.* 2011)

Con respecto a las áreas utilizadas para el cultivo de café, presenta una variación positiva, lo cual indica que hay un crecimiento significativo de áreas cafetaleras. La región montañosa de Guatemala es ideal para la siembra del café debido al régimen de lluvias y sol bastante definidos. El país cuenta con cinco regiones cafetaleras: Antigua, Atitlán, Cobán, Fraijanes y Huehuetenango, que reúnen las condiciones para la plantación de los mejores cafetales. El café de Antigua, ciudad que se encuentra dentro de la subcuenca del Río Pensativo, figura entre los cafés especiales respaldados por la Asociación de Cafés Especiales de América (Flores *et al.* 2002).

Guatemala es el mayor exportador de café en Centroamérica, posición que hace 10 años compartía con El Salvador. La tendencia a ampliar el área, la producción y las exportaciones se mantiene, con un producto muy cotizado en los mercados internacionales. El café en Guatemala

madura bajo la sombra de árboles especiales que crean una atmósfera adecuada para el buen desarrollo de los cafetos (Flores *et al.* 2002).

Según ANACAFE, una hectárea cultivada tiene un costo de \$ 1,128.00, con los gastos administrativos, transporte y crédito, el costo por quintal considerando un rendimiento promedio de 20 quintales por hectárea, es de 74 dólares. La diferencia entre el costo de producción y el precio pagado al productor da una pérdida de aproximadamente \$ 23.00 por quintal. Con un precio promedio inferior a los \$ 50.00 en el mercado internacional, por lo que las pérdidas por unidad producida se han duplicado (Flores *et al.*, 2002).

En cuanto al área urbana (Figura 33) se identifica un crecimiento, este crecimiento está conformado por los aumentos de población y el desarrollo de infraestructura. El crecimiento de la población urbana y rural a nivel de la República ha sido bajo, hasta los últimos años se ha ido incrementando. En Guatemala, el grado de urbanización al año 1950 fue de 24.6% y cincuenta y dos años después ascendió al 46.1%, por lo que se puede observar que el proceso de crecimiento urbano en Guatemala ha sido lento (Martínez, 2011).

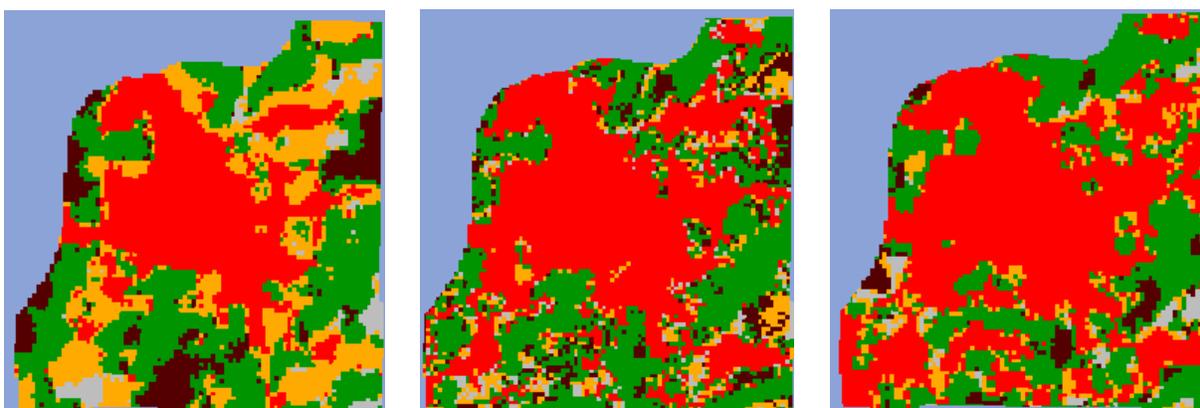
Según el instituto Nacional de Estadística la tasa de crecimiento poblacional total para del 2010 al 2015 es de 2.4% (Tabla 18). En este sentido, es oportuno indicar la importancia de los procesos de planificación de demanda actual y futura de servicios, esto implica el adecuado ordenamiento y crecimiento urbano. Los departamentos que tienen un mayor índice de urbanidad son Guatemala y Sacatepéquez, en este último es donde se encuentra ubicada la subcuenca del Río Pensativo.

Tabla 15. Cobertura de suelo del año 2016

Año	Proyecciones de población total	Tasa de crecimiento
2010	14,361,666	2.5
2011	14,713,763	2.5
2012	15,073,375	2.4
2013	15,438,384	2.4
2014	15,806,675	2.4
2015	16,176,133	2.3

Fuente (Instituto Nacional de Estadística de Guatemala, s.f.)

Guatemala, tiene un población relativamente joven, registra que el 66.50% de los habitantes cuentan con menos de 30 años de edad, lo cual implica que las áreas urbanas tiene una tendencia de crecimiento, por la necesidad vivienda existente. Para el caso analizado se observa en figura 29 el crecimiento de la ciudad de La Antigua Guatemala, como ha ido aumentando conforme al paso de los años, ha significado un aumento en los costos de vivienda, por la gran demanda que existe.



a) Año 1990

b) Año 2001

c) Año 2016

Figura 35. Crecimiento área urbana de la ciudad de La Antigua Guatemala

Al año 2002 Guatemala contaba con uno de los más bajos grados de urbanización equivalente al 46.1%. De acuerdo al porcentaje anterior, el crecimiento no se dio por igual en todas las regiones del país. Para el caso de este estudio es de interés el porcentaje de crecimiento de La Antigua Guatemala, una de las principales áreas de crecimiento urbano (Figura 35), reportando un crecimiento de 1.58% (Martínez, 2011). De acuerdo a estos datos se observa que la tendencia al crecimiento se ve reflejada en la actualidad de la zona influenciada por la subcuenca. De acuerdo a la tasa de crecimiento encontrada para el período entre el año 2001 al año 2016, se observa que presenta un 1.20% de crecimiento, lo cual se asemeja al 1.58% (Figura 36 y 37) presentado por el estudio de Martínez.

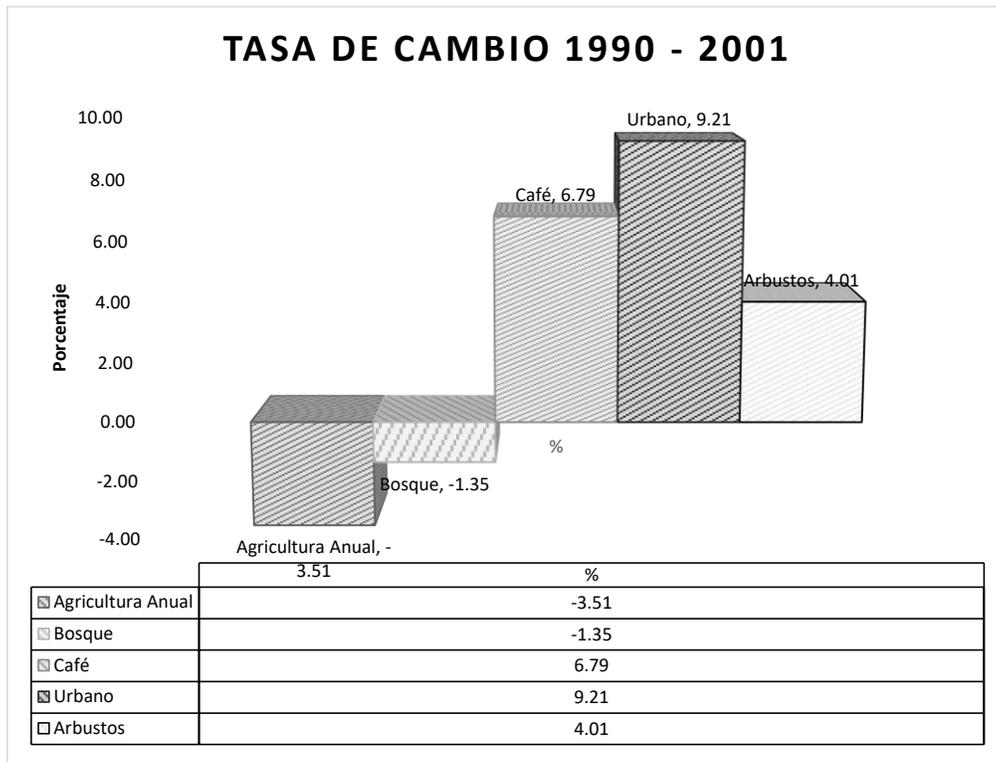


Figura 36. Tasa de cambio de cobertura de suelo 1990-2001

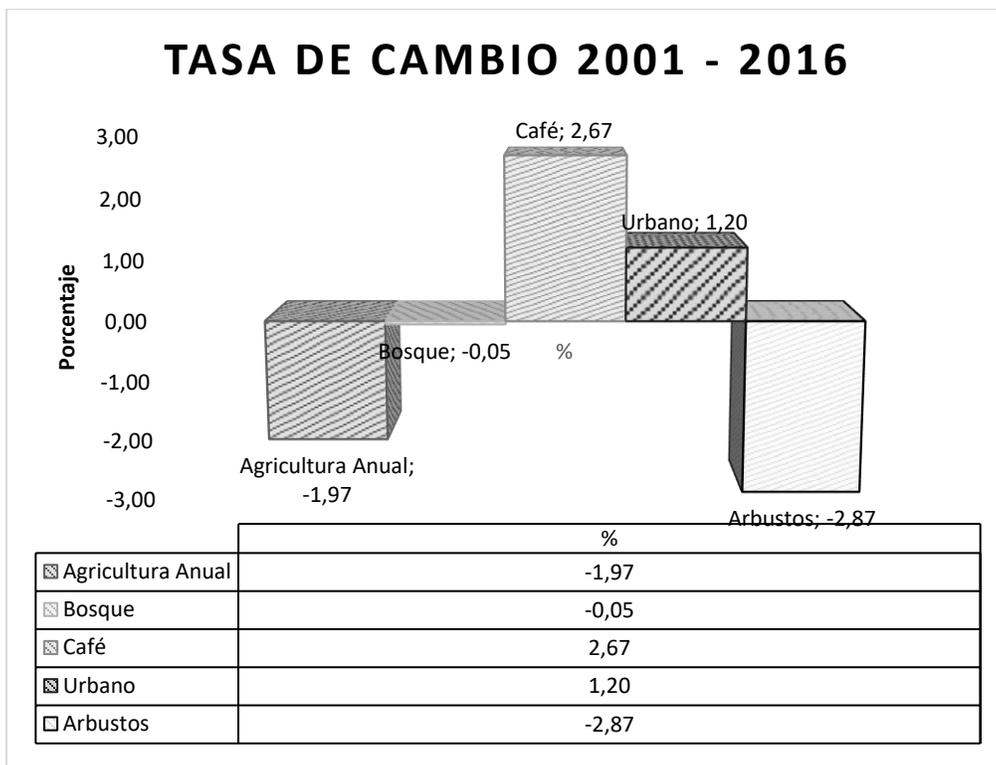


Figura 37. Tasa de cambio de cobertura de suelo 1990-2001

## 7. Conclusiones

- La cuenca del Río Pensativo debido a su morfometría presenta características muy especiales tales como la densidad de corriente, la compacidad y la forma, y debido a ellos la subcuenca tiene una gran tendencia a la generación de crecidas que causan inundaciones, no produce erosiones relevantes, tiene una baja velocidad de transporte y tiene como característica la concentración de una gran cantidad de volumen de escurrimiento.
- Según la clasificación supervisada de las tres imágenes de LANDSAT, las macroclases que poseen una tendencia a la disminución a lo largo del tiempo son agricultura anual, bosque y arbustos, mientras que aquellas clasificadas como café y urbano tienden a aumentar el área. Por tanto, los procesos relacionados con el ordenamiento territorial dentro de la cuenca del río Pensativo deben enfocarse en el manejo de las actividades productivas del café y la urbanización.
- La cobertura del suelo correspondiente al tipo arbustos es la macroclase que presenta menor cambio en comparación con las todas las categorías clasificadas, esto refleja que esta es la categoría menos impactada de la cuenca ya que mantiene una relativa persistencia, con tasas de crecimiento relativamente constantes.
- Los datos obtenidos señalan que la disminución del área boscosa dentro de la cuenca se debe principalmente al aumento de las actividades cafetaleras y al crecimiento urbano, estas principales fuerzas transformadoras del paisaje son las que sustentan la economía del lugar, lo cual hace que sea necesario, la implementación de planes producción innovadores que fomenten el desarrollo sostenible de la localidad.
- El establecimiento de infraestructura durante el período de la colonia en la ribera del río es la principal causa de cambio en la cobertura del suelo en la cuenca río Pensativo, ya que este modelo de urbanización incentiva el establecimiento de

grupos poblacionales que requieren generar acciones productivas enfocándose mayoritariamente en el cultivo del café.

- El análisis multitemporal de las imágenes satelitales refleja que la agricultura anual ha disminuido a través del tiempo según una tasa promedio de decrecimiento de 2.74% entre los periodos del 1990 al 2016, esta tendencia es producto de la modificación sufrida en las áreas para siembra de café e infraestructura urbana.

## 8. Literatura Citada

- Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R., López-Carr, D., Levy, M. A., Redo, D., ... & Muñiz, M. (2013). Deforestation and reforestation of Latin America and the Caribbean (2001–2010). *Biotropica*, 45(2), 262-271.
- Alcántara B., Germán H., 2014. Análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra. Gobierno Regional Cajamarca.
- Alvarado Q., Héctor O.; Araya R., Freddy, 2013. Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano. Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala.
- Andrade C., Juan C., 2013. Dinámica de la cobertura forestal de las microcuencas de los ríos tributarios de la hidroeléctrica Palo Viejo, ubicada en los municipios de San Juan Cotzal y San Miguel Uspantán del Departamento del Quiché, Guatemala. Maestría en Estudios Ambientales, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala.
- Arana, L. (1992). Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala (Doctoral dissertation, Tesis M. Sc. Turrialba, CR CATIE).
- Arezo, M. 2010. Sesores remotos satelitales en la medición del impacto ambiental en minería. Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias.
- Armenteras, D; Rodríguez Eraso, N. 2014. DINÁMICAS Y CAUSAS DE DEFORESTACIÓN EN BOSQUES DE LATINO AMÉRICA: UNA REVISIÓN DESDE 1990. *Colombia Forestal* 172:233-246.
- Bateman, A. 2007. Hidrología Básica y Aplicada. Ed. GDIETD Sedimentos. 70 p.
- Benítez Badillo, G. 2011. Crecimiento de la población y expansión urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz y sus efectos sobre la vegetación y agroecosistemas.
- Breña, A; & Jacobo, M. 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Disponible en: [cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro\\_documentos/estudios/cuenca\\_panel\\_as/DIAGNOSTICO/2.2 ASPECTOS\\_BIOFISICOS.pdf](http://cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panel_as/DIAGNOSTICO/2.2 ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf).
- Boca, T., & Rodríguez, G., 2012. Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos
- Congedo, Luca. 2017. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Disponible en: <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html>
- Chuvienco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp.
- del Toro Espín, N; García, FC; Sarria, FA; Castillo, FJG. 2015. Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (Región de Murcia). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 67:327-347.
- ESRI, 2016. Smoothing zone edges with Boundary Clean and Majority Filter. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/smoothing-zone-edges-with-boundary-clean-and-majority-filter.htm#GUID-CBD68932-69B7-469B-9DCB-8A743B72B908>. Fecha de consulta: 18/06/2017
- Estarrón, EJG. 2008. El proceso de expansión urbana y su impacto en el uso de suelo y vegetación del municipio de Juárez, Chihuahua. Maestra en administración integral del ambiente. Tijuana, B.C., México, El Colegio de la Frontera. 155 p.
- Falcón G., Oswaldo. 2014. Dinámica de cambio en la cobertura/uso del suelo, en una región del estado de Quintana Roo, México. Maestro en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.

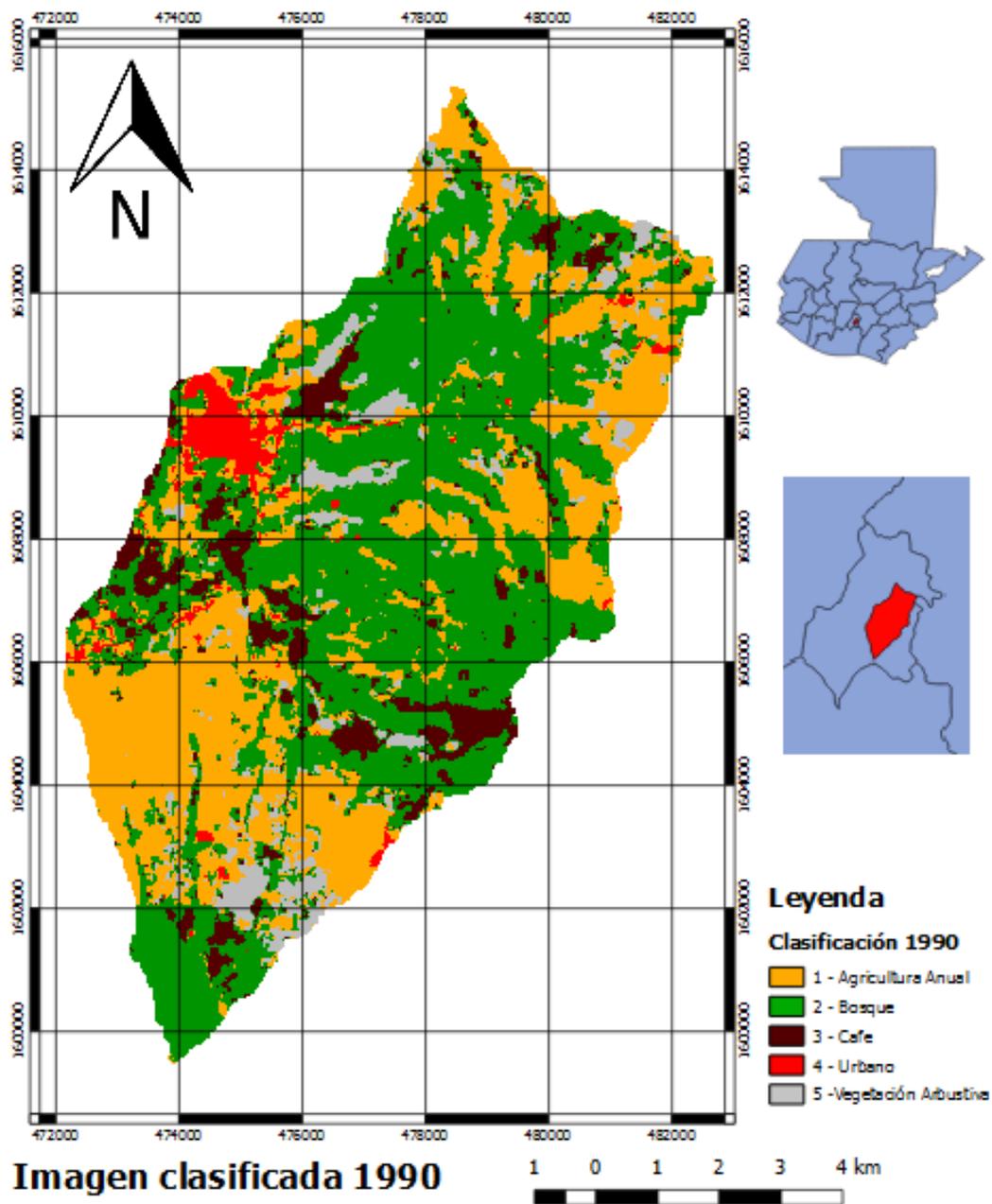
- FAO, 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Food and Agriculture Organization. FAO forestry paper, vol. 130 p. 152.
- Fernández A., González R., Llanes A., 2013. Teledetección Sistemas operacionales de observación de la Tierra. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. INTA, Torrejón de Ardoz. Madrid.
- Flores, M; Bratescu, A; Martínez, J.O; Oviedo, J.A.; Acosta, A; 2002. Centroamérica: El impacto de la caída de los precios del café. Sede Subregional de la CEPAL en México. México D.F.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., & Delgado, M. L. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS, 4. Gilabert, MA; González-Piqueras, J; García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista de teledetección 810:
- González C., Edio G., 2016. Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Gutierrez, M. Á. A., & Raúl, A. Hidrología urbana: Efectos de la Impermeabilización en las Cuencas Urbanas de la Ciudad de Posadas. Misiones, Argentina.
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra –GIMBOT-. 2014. Mapa de Bosques y Uso de la Tierra 2012. Mapa de cambios en uso de la tierra 2001 – 2010 para estimación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
- Hoffer, RM; Swain, PH. 1980. Computer processing of satellite data for assessing agricultural, forest, and rangeland resources. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University.
- INEGI; Ambiente, DgdEyM. s.f. Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. Consultado 14/11/2016. Disponible en [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos\\_tecnicos\\_imagenes\\_landsat.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf)
- INSIVUMEH. 1988. Informe Hidrológico Preliminar del río Pensativo. Ministerio de Comunicaciones, Transporte y Obras Públicas, Guatemala.
- Instituto Nacional de bosques, s.f. Clasificación de Tierras por capacidad de Uso. Aplicación de una metodología para tierras de la República de Guatemala.
- I.N.E. 2002. Características de la población y de los locales de habitación censados. Guatemala.
- Instituto Nacional de Estadística de Guatemala, s.f. Caracterización República de Guatemala.
- Invest In Guatemala. s.f. Turismo. Industria en Guatemala.
- Jiménez-Moreno, MJ; González-Guillen, MdJ; Escalona-Maurice, M; Valdez-Lazalde, JR; Aguirre-Salado, CA. 2011. Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente 173:389-406.
- Klingebiel, A; Montgomery, P. 1961. Land-capability classification. Agricultural Handbook. No. 210. Soil Conservation Service. US Department of Agriculture, Washington DC:
- Lattes, Aldredo E. 1995. Urbanización, Crecimiento Urbano y Migraciones en América Latina. Notas de población. Disponible en <http://200.9.3.98/handle/11362/38594>
- Lemus. A., Alvaro E. 2011. Estudio de capacidad de uso de la Tierra en el área de protección especial Sierra Santa Cruz, Livingston, Izabal. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. & Paulhus, J.L., 1977: Hidrología para ingenieros. 386 págs. Ed. McGraw-Hill, México
- López P., José N. (2008). Trabajo de graduación, dinámica del cambio de uso de la tierra y su impacto en el comportamiento del ciclo hidrológico de la parte sur de la subcuenca del Alto Guacalate y

- apoyo a la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo-UPGGR-del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación-MAGA-, Guatemala.
- Martínez J., Martín M., 2010. Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Red Nacional de Teledetección.
- Martínez L., Jose F, 2010. Gestión territorial en municipios con alta presión inmigratoria interna. San Miguel Petapa y San Juan Sacatepéquez en Guatemala; Jocotenango y Ciudad Vieja en Sacatepéquez; Chimaltenango y El Tejar en Chimaltenango; Salcajá y La Esperanza en Quetzaltenango; Atescatempa y Conguaco en Jutiapa. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Martínez, L, 2011. Transformaciones urbanas en Guatemala. CEPAL.
- Máximo, V.B. 2002. Hidrología. Instituto tecnológico de Costa Rica. Segunda Edición. Editorial Villón.
- Mena Espinosa, ÁJ. 2014. Procesamiento de Imágenes Satelitales Multiespectrales.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. 2011. Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura (en línea). Ecuador. Consultado 1 jul. 2017. Disponible en <http://www.sigtierras.gob.ec/cobertura-y-uso-de-la-tierra/#>
- Montenegro, R; Castellanos, E. 2008. Dinámica forestal en seis bosques comunitarios comparada con la dinámica forestal observada en los respectivos municipios. Revista No 17. Universidad del Valle de Guatemala
- Ochoa, W. A. s.f. Variabilidad climática y cambio de uso del suelo como factores del cambio climático en la subcuenca del río Panajachel, Sololá. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Ordoñez Hoyos, AE; Serna Castaño, JP. 2015. Análisis superficial y multitemporal de imágenes Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI TIRS en el proyecto carbonífero la luna entre los años 2001 y 2015.
- Ortiz C., Brenda H., 2008. Análisis del cambio de la cobertura de bosque en las reservas del Departamento de Izabal. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pérez E., García R. P., 2013. Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid.
- Pontius, RG; Shusas, E; McEachern, M. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, Ecosystems & Environment 1012:251-268.
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias (No. 3). Iica.
- Rocha, WP; Delgado, MG; Sendra, JB. 2009. Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales 13:293.
- Rodríguez Vásquez, AF. 2011. Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta. Universidad Nacional de Colombia.
- Rojas, JCQ. 2004. Riesgos geológicos y medidas de nitigación en la cuenca del Río Pensativo y zonas aledañas a la ciudad de La Antigua Guatemala. Ingeniero Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 110 p.
- Romero F. S., 2006. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. Universidad Complutense de Madrid.
- Ruiz Fernández, LÁ; Rey Pérez, Ad; Estornell Cremades, J; Ruiz Marín, R. 2007. La teledetección como herramienta de análisis del crecimiento urbano y su representación en 3D. ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno, núm. 4, Junio 2007:
- Ruiz, JS; Ramírez, RG. 2015. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. CIENCIA ergo-sum 122:167-174.

- Sala OE, Chapin, JJ Armesto, E Berlow, J Bloodmfield et al. (2000) Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770-1774.
- Salvá Serra, G. 2014. Análisis del Suelo Urbano en la Región del Litoral Pacífico de Nicaragua.
- Schweitzer, AMS; Farinelli, MLR. 2014. Análisis de cambios de uso del suelo en la Delegación Municipal de Ingeniero White (Buenos Aires, Argentina): aplicación de geotecnologías. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 231:133-146.
- Soto, E. M., & Gómez, C. M. (1994). Uso del suelo y vegetación en los climas cálido-húmedos de Veracruz. *Los Recursos Vegetales. Problemática Ambiental en el Estado de Veracruz*, Gobierno del Estado de Veracruz, México, 131-147.
- Suarez, GA. 2011. Cuencas hidrográficas de Guatemala Ed. GDLRD Guatemala. Guatemala, 52 p.
- Tacam Cúmez, Azucena, C. (2008). Trabajo de graduación, dinámica del cambio de uso de la tierra y su impacto en el comportamiento del ciclo hidrológico de la parte norte de la subcuenca alta del río Guacalate y actividades realizadas en la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Guatemala.
- Tovar, CM. 2012. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales* 238:39-46.
- Universidad del Valle de Guatemala; Instituto Nacional de Bosques; Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2006. Dinámica de la Cobertura Forestal de Guatemala durante los años 1991, 1996 y 2001 y Mapa de la Cobertura Forestal 2001.
- Universidad del Valle de Guatemala; Instituto Nacional de Bosques; Consejo Nacional de Áreas Protegidas; Universidad Rafael Landívar, 2011. Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala 2006 y Dinámica de la Cobertura Forestal 2001-2006. Guatemala.
- Using the USGS Landsat 8 Product. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. URL: <http://landsat.usgs.gov>. Page Contact Information: Ask Landsat.
- Villón, B. M. 2002. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica-CRRH. Cartago, Costa Rica, CA.g
- Vitousek, P., P. Ehrlich, A. Ehrlich and P. Matson (1986), "Human appropriation of the products of photosynthesis", *BioScience*, no. 36, pp. 368-374.
- Wambeke, J. 2003. La microcuenca hidrográfica como ámbito de planificación del uso y manejo de los recursos naturales, enfoque socio-territorial. FAO. Desarrollo Tierras y Aguas:

## 9. Anexos

### Anexo 1. Mapa de cobertura de suelo año 1990

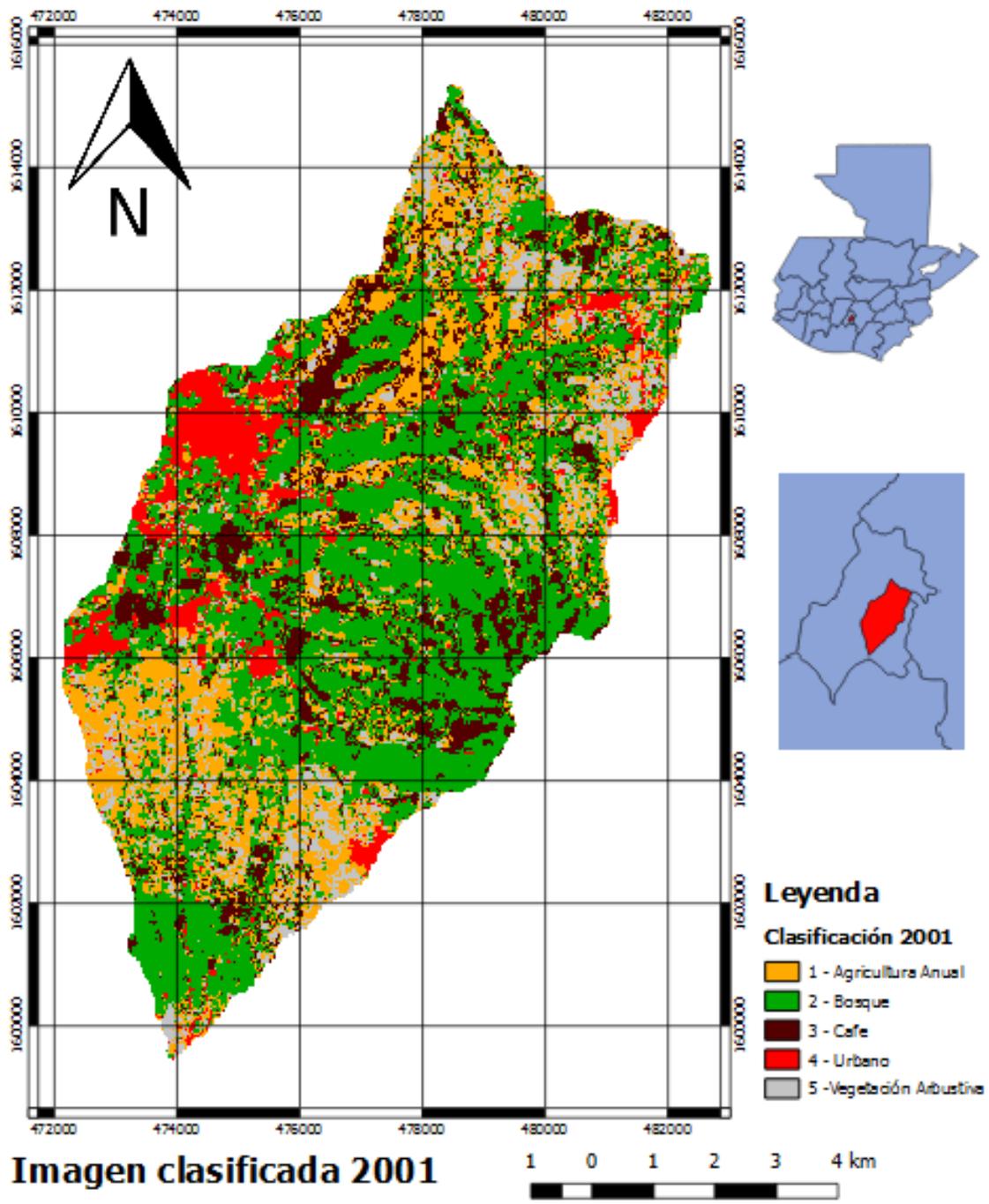


**Imagen clasificada 1990**

ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO, EN  
LA SUBCUENCA DEL RÍO PENSATIVO,  
SACATEPEQUEZ, GUATEMALA  
Ing. Otoniel Echeverría  
Maestría Virtual Manejo y Gestión de Cuencas  
Hidrográficas  
Escala 1:80000  
Septiembre 2017

**CATIE**  
Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Anexo 2. Mapa de cobertura de suelo año 2001

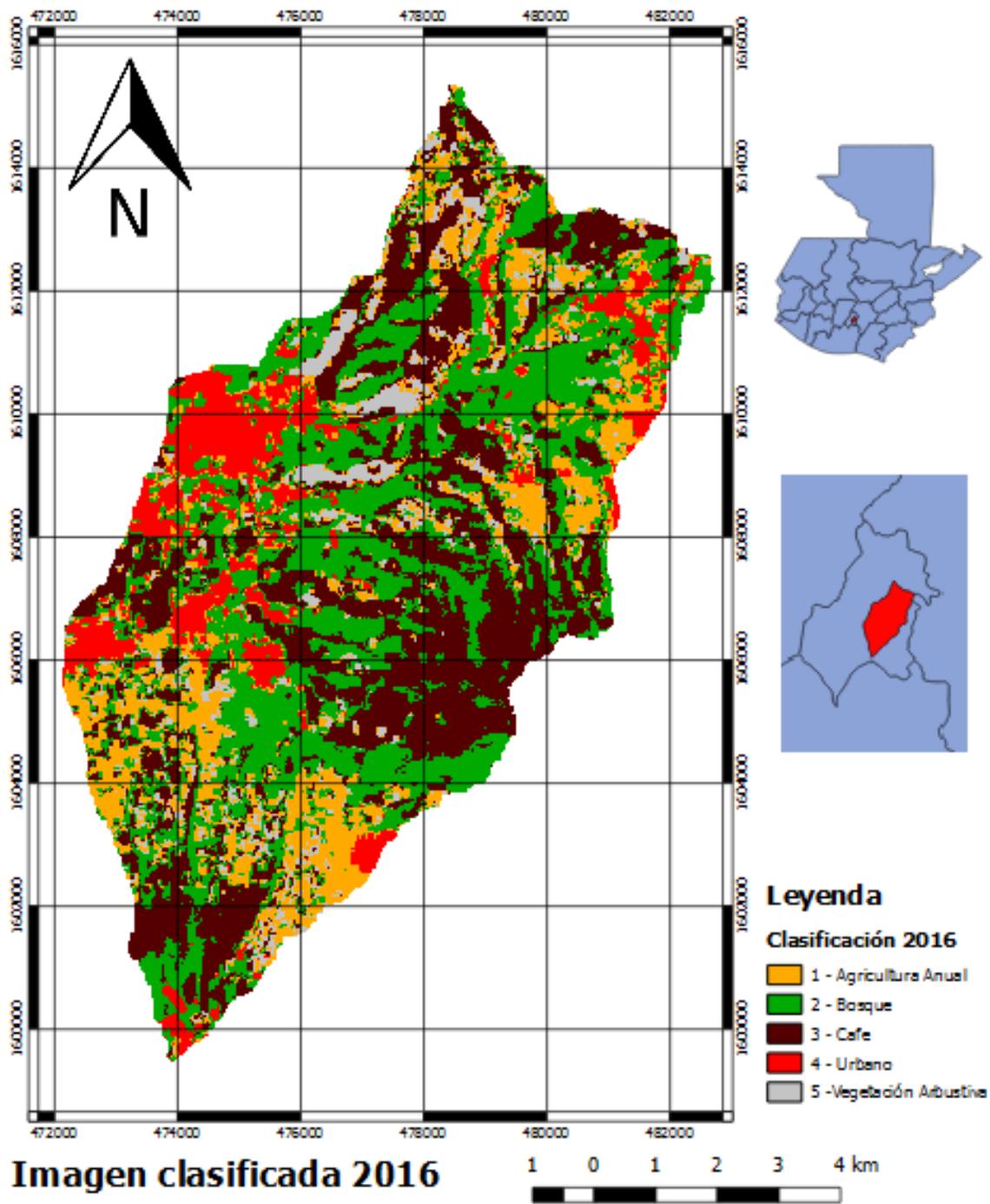


**Imagen clasificada 2001**

ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PENSATIVO, SACATEPEQUEZ, GUATEMALA  
 Ing. Otoniel Echeverría  
 Maestría Virtual Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas  
 Escala 1:80000  
 Septiembre 2017



Anexo 3. Mapa de cobertura de suelo año 2016

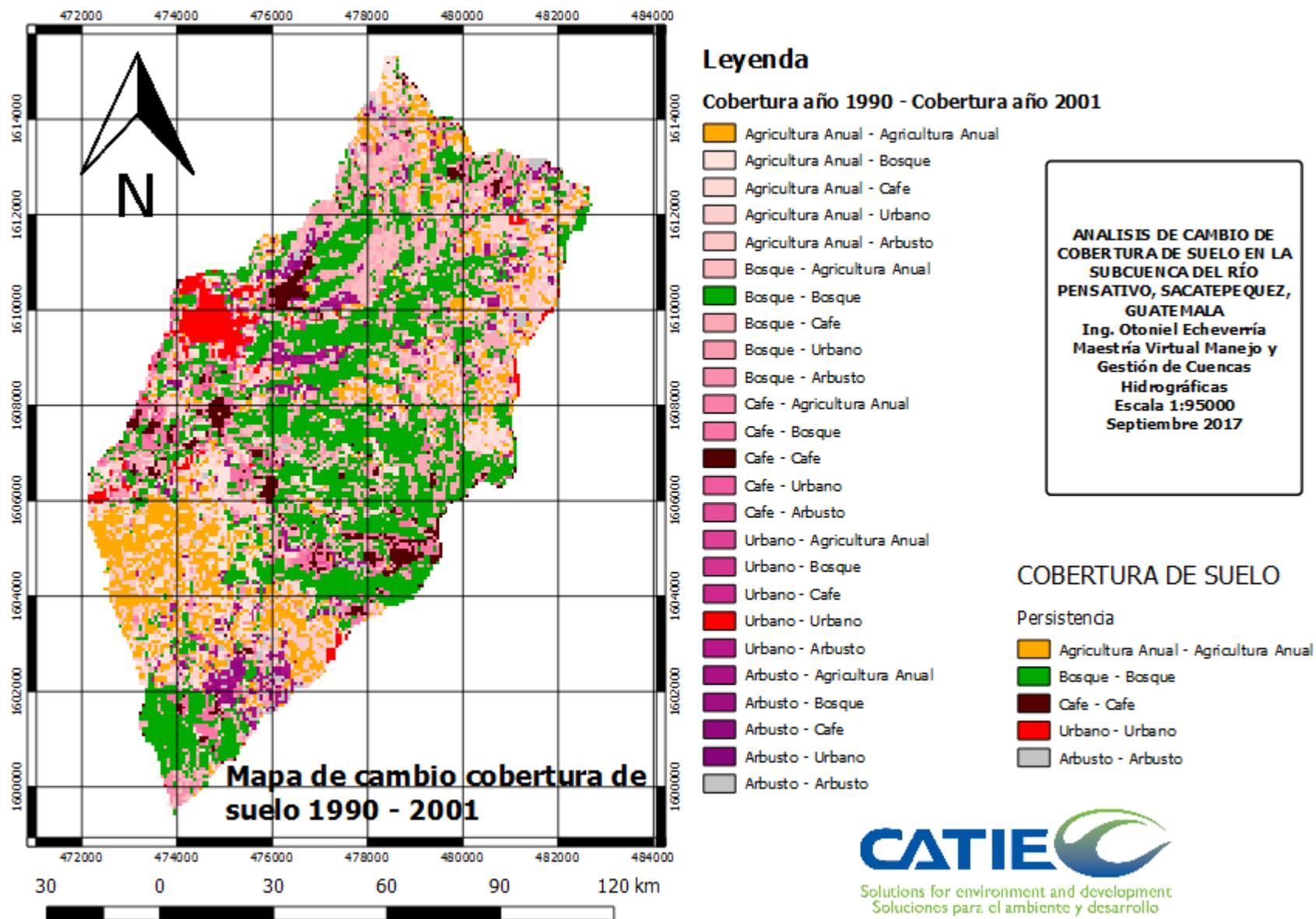


**Imagen clasificada 2016**

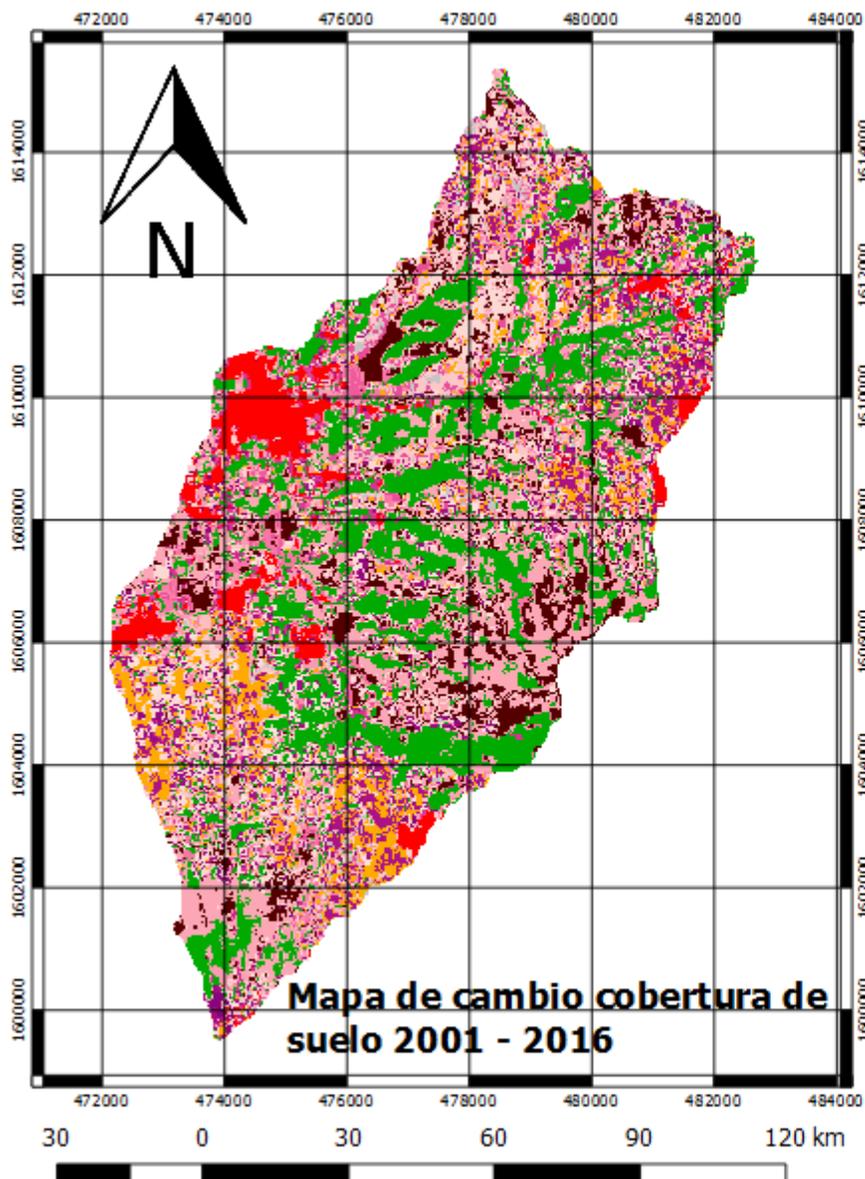
ANALISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PENSATIVO, SACATEPEQUEZ, GUATEMALA  
 Ing. Otoniel Echeverría  
 Maestría Virtual Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas  
 Escala 1:80000  
 Septiembre 2017



Anexo 6. Mapa cambio de cobertura de suelo 1990 – 2001



Anexo 7. Mapa cambio de cobertura de suelo 2001 – 2016



**Leyenda**

**Cobertura año 2001 - Cobertura año 2016**

- Agricultura Anual - Agricultura Anual
- Agricultura Anual - Bosque
- Agricultura Anual - Cafe
- Agricultura Anual - Urbano
- Agricultura Anual - Arbusto
- Bosque - Agricultura Anual
- Bosque - Bosque
- Bosque - Cafe
- Bosque - Urbano
- Bosque - Arbusto
- Cafe - Agricultura Anual
- Cafe - Bosque
- Cafe - Cafe
- Cafe - Urbano
- Cafe - Arbusto
- Urbano - Agricultura Anual
- Urbano - Bosque
- Urbano - Cafe
- Urbano - Urbano
- Urbano - Arbusto
- Arbusto - Agricultura Anual
- Arbusto - Bosque
- Arbusto - Cafe
- Arbusto - Urbano
- Arbusto - Arbusto

**ANALISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PENSATIVO, SACATEPEQUEZ, GUATEMALA**  
 Ing. Otoniel Echeverría  
 Maestría Virtual Manejo y Gestión de Cuencas  
 Hidrográficas  
 Escala 1:95000  
 Septiembre 2017

**COBERTURA DE SUELO**

**Persistencia**

- Agricultura Anual - Agricultura Anual
- Bosque - Bosque
- Cafe - Cafe
- Urbano - Urbano
- Arbusto - Arbusto

