



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA**

**MONITOREO DE CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DEL SANTUARIO
DE FLORA Y FAUNA DE IGUAQUE Y SU AREA DE INFLUENCIA, ENTRE 1986 Y
2014, EMPLEANDO SOFTWARE LIBRE DE CODIGO ABIERTO.**

**MARÍA FERNANDA RUIZ MORENO
CÓDIGO: 3101199**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
GEOMÁTICA**

BOGOTÁ D.C, ENERO 2015

MONITOREO DE CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DEL SANTUARIO DE FLORA Y FAUNA DE IGUAQUE Y SU AREA DE INFLUENCIA, ENTRE 1986 Y 2014, EMPLEANDO SOFTWARE LIBRE DE CODIGO ABIERTO.

CHANGE MONITORING IN THE VEGETATION COVER OF THE FLORA AND FAUNA SANCTUARY OF IGUAQUE AND ITS AREA OF INFLUENCE, FROM 1986 TO 2014 USING AN OPEN-SOURCE FREE SOFTWARE

**María Fernanda Ruiz Moreno
Ingeniera Catastral y Geodesta
maferumo@gmail.com**

RESUMEN

El Santuario de flora y fauna de Iguaque, se preselecciona por parte del INDERENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales), para ser área protegida en el año de 1977; sin embargo es desde 1994, cuando en Colombia se suscribe al convenio de Diversidad biológica, que se formula la Política Nacional de Biodiversidad y se adquiere el compromiso de conformar y consolidar un Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SINAP, en el marco del cual se encuentra actualmente incluido el santuario Nacional de Flora y fauna de Iguaque. El santuario actualmente constituye una de las zonas geográficas mas conservadas en relación a su ámbito geográfico inmediato, caracterizado especialmente por su importancia a nivel paisajístico y ecológico. Pese a lo anterior, de acuerdo a lo establecido por el plan de manejo básico elaborado para el periodo 2006-2010, existen una serie de amenazas para el santuario, discriminadas en la "Matriz de priorización de amenazas", que generan impactos en los Ecosistemas existentes en el área de estudio, esta condición hace necesaria la realización de análisis que permitan determinar los cambios en la cobertura vegetal del santuario.

Con el fin de realizar una aproximación a esta problemática, se pretende llevar a cabo un análisis de los cambios en la cobertura vegetal del santuario y su área de influencia, a través del uso de algoritmos de clasificación semi-automática en software libre de código abierto. Para este análisis se obtuvieron dos imágenes Landsat, correspondientes a los años de 1986 y 2012, y a través del plugin asociado al software libre QGIS, para la clasificación semi-automática de coberturas, se pretende obtener una aproximación a los cambios que se han dado a través del tiempo y que obedecen a los diferentes factores de presión enunciados.

ABSTRACT

The Flora and Fauna Sanctuary of Iguaque, was pre-selected as a protected area by the National Institute of Natural Resources (INDERENA) in the year 1977; however, it was not until 1994, when Colombia adhered to the Convention on Biological Diversity, that a National Biodiversity Policy was formulated and a commitment for the conformation and consolidation of a National System of

Protected Areas (SINAP) was undertaken, in whose framework, the Flora and Fauna Sanctuary of Iguaque was included, currently constituting one of the geographic zones which are better conserved with regard to its immediate geographical range, which is specially characterized by its landscape and ecological value. In spite of this, according to the Basic Management Plan devised for the 2006-2010 period, there are a series of threats to the Sanctuary, classified in the "Threat Prioritization Matrix", which generate impacts to the Ecosystems found in the study site. This condition urges for the development of analyses that allow the monitoring of the changes that occur in the vegetation cover of the Sanctuary. In order to elaborate an approach for the tackling of this problem, an analysis of the change in vegetation cover of the Sanctuary and its area of influence, is intended to be carried out through the implementation of semiautomatic classification algorithms using open-source free software. For the purpose of this analysis, two Landsat images corresponding to the years 1986 and 2012 were acquired, and by using the plugin associated to the free software QGIS for the semiautomatic classification of covers, changes that have occurred over time and that are due to the factors of pressure above mentioned, are expected to be monitored.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas extremas, la frecuencia de incendios forestales y la afectación del suelo por diferentes actividades del hombre, son entre otros los factores más influyentes en la desertización de las zonas circunvecinas al santuario de Flora y Fauna de Iguaque (SFFI), en este sentido es innegable la existencia de procesos erosivos que afectan al santuario y su área de influencia, que pese a ser la zona más conservada en su ámbito geográfico circunvecino, presenta en la actualidad zonas vulnerables a diferentes factores de presión que contribuyen a que se surtan cambios en la cobertura vegetal tanto del santuario, como del área circunvecina. De acuerdo a los planes de manejo existentes para el SFFI, se estima que las presiones ambientales existentes se relacionan con problemas estructurales como la distribución de la Tierra y las políticas económicas, que conllevan a que los habitantes hagan uso intensivo de los recursos existentes en la región, existe por otra parte una población flotante asociada al turismo ecológico que de una manera u otra influye en la oferta ecosistémica de la región. Estas condiciones, sumadas a las condiciones del clima y los incendios que afectan a la vegetación por las condiciones extremas del clima, definen una serie de factores de presión en los ecosistemas existentes en el área que han transformado la cobertura vegetal presente en la región y que requiere una serie de análisis que comprendan diferentes periodos y que permitan realizar de manera clara una aproximación al monitoreo de la cobertura vegetal.

En este sentido, existen diversas metodologías, empleadas para este tipo de análisis, sin embargo en ocasiones las mismas están condicionadas al software licenciado y a la adquisición de la información de la zona, por esta razón el uso de software libre constituye una alternativa de gran importancia para este tipo de estudios. Se espera que los resultados obtenidos permitan conocer los cambios en la cobertura vegetal del SFFI, como resultado de la afectación de los factores de presión enunciados.

1. CONTEXTO Y LOCALIZACIÓN GENERAL

En Colombia, el Sistema de Parques Naturales fue reglamentado en el año de 1977, gracias al decreto 622, en este sistema existen siguientes tipos de áreas protegidas (Cano & Diaz, 2002):

- Parque nacional Natural
- Reserva Natural
- Área natural única
- **Santuario de Flora y Fauna**

El Santuario de Flora y fauna, se configura para preservar especies o comunidades de animales silvestres para conservar recursos genéticos de la flora y fauna nacional. El santuario de flora y fauna de Iguaque, forma parte del Sistema Nacional de áreas protegidas, su área actual es de 67,5 Km², se encuentra en el Departamento de Boyacá, abarcando 20 veredas pertenecientes a los municipios de: Arcabuco, Chíquiza, Gachantivá y Villa de Leyva ubicados en el departamento de Boyacá. Beneficia a más de 35000 habitantes de la provincia de Ricaurte, quienes dependen de su oferta ambiental para su sustentabilidad económica y sostenibilidad ambiental.

El santuario está delimitado por una estructura montañosa, definida como el macizo de Iguaque, cuyo eje estructural se encuentra definido en dirección sur-occidente y norte-sur.

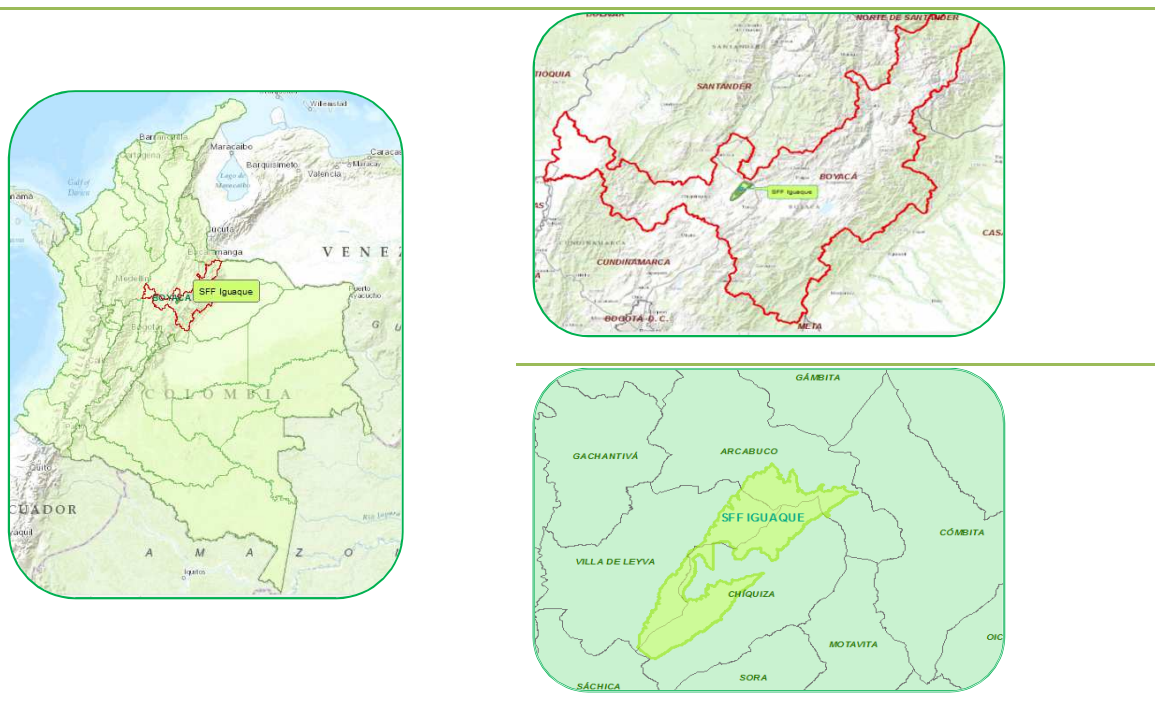


Figura 1 - Localización general

Se encuentra segmentado por un valle en forma de V, ubicado en la zona media del río Iguaque-Cane. En el sur del área predominan las condiciones climáticas secas del enclave seco de Villa de Leyva, en tanto que el norte se caracteriza por ser notablemente más húmedo, abarcando un gradiente de humedad entre 650 y 2.800 mm/año.

Con altitudes entre 2.400 y 3.800 m, el territorio del SFFI y su área de influencia constituyen una de las áreas de mayor presencia de roble en el país, cuya distribución regional se inicia a la altura de Villa de Leyva y se extiende hacia el NE hasta el Páramo de la Rusia (Santander).

El SFFI incluye ecosistemas de páramo y bosque andino, incluido una muestra representativa de bosque de roble. Se resalta en el páramo la presencia de siete lagunas de origen glaciar, dentro de las cuales se destaca la laguna de Iguaque, elemento natural asociado a la mitología Muisca por considerarse la cuna de la humanidad. Es importante mencionar que el santuario es reconocido por su importancia vital como proveedor de servicios eco sistémicos, en particular de los hídricos, el territorio del SFF de Iguaque abastece de agua para el consumo de la población urbana y rural distribuida en su periferia.

A continuación se definen los principales componentes de la dimensión Biofísica del SFFI:

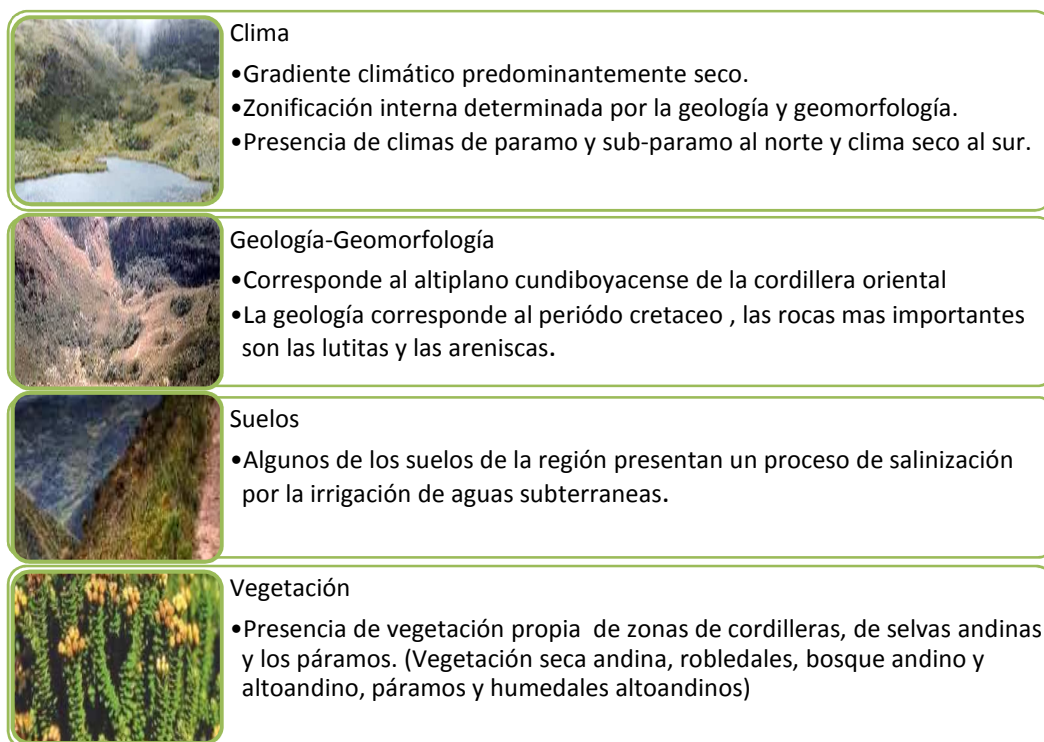
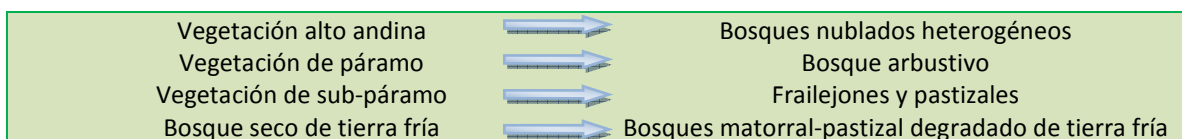


Figura 2- Componentes de la dimensión Biofísica del SFFI

Es importante mencionar que la vegetación de la región forma parte de las zonas secas de las cordilleras, sin embargo se presentan variaciones en la cobertura vegetal asociada a los cambios altitudinales, en este sentido se distinguen cuatro grandes tipos de formaciones vegetales que son: Vegetación alto andina, vegetación de páramo y vegetación de sub-paramo y bosque seco de tierra fría (PNN, 2006), de manera específica a continuación se describen los tipos de vegetación existentes en el SFFI:



Es importante tener en cuenta la descripción de la vegetación con el objeto de realizar un preámbulo a la clasificación de la cobertura vegetal, cuyo proceso se describirá en el aparte de metodología del presente análisis.

2. MATERIALES Y METODOS

A continuación se describen los insumos empleados y métodos desarrollados para el Monitoreo de cambios en la cobertura vegetal del Santuario de flora y fauna de Iguaque.

2.1. MATERIALES USADOS

Se relacionan los insumos empleados como base para el proceso de Monitoreo de la cobertura vegetal.

2.1.1. IMAGENES EMPLEADAS

Las imágenes empleadas corresponden a la Plataforma Landsat, específicamente a los satélites Landsat 5 y 8, discriminadas en la Tabla 1:

Satélite	Año de la información	ID de la imagen
Landsat 5 TM	1986	LT50070561986013XXX11
Landsat 8C	2014	LC80070562014010LGN00

Tabla 1 - Relación de Imágenes LandSat

Para la realización del análisis, se utilizaron imágenes Landsat 5 y Landsat 8, descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.Spor sus siglas en ingles. A continuación se presentan las características de las imágenes empleadas.

Características Imagen 1986 (LT50070561986013XXX11)	Características Imagen 1986 (LT50070561986013XXX11)
Landsat 5, Sensor TM (Barrido multiespectral)	Landsat 5, Sensor TM (Barrido multiespectral)
Fecha de toma: 1986-01-13	Fecha de toma: 1986-01-13
PATH = 007 , ROW = 056	PATH = 007 , ROW = 056
Latitud central de la imagen = 5,7833	Latitud central de la imagen = 5,7833
Longitud central de la imagen = -72,6329	Longitud central de la imagen = -72,6329
Datum de Referencia: "WGS84"	Datum de Referencia: "WGS84"
Elipsoide de Referencia: "WGS84"	Elipsoide de Referencia: "WGS84"
Proyección "UTM", Zona: 18	Proyección "UTM", Zona: 18
Azimut: 128.49596154	Azimut: 128.49596154
Elevación: 45.08429098	Elevación: 45.08429098
Formato de salida: GEOTIFF	Formato de salida: GEOTIFF

Tabla 2 - Características de Imágenes LandSat

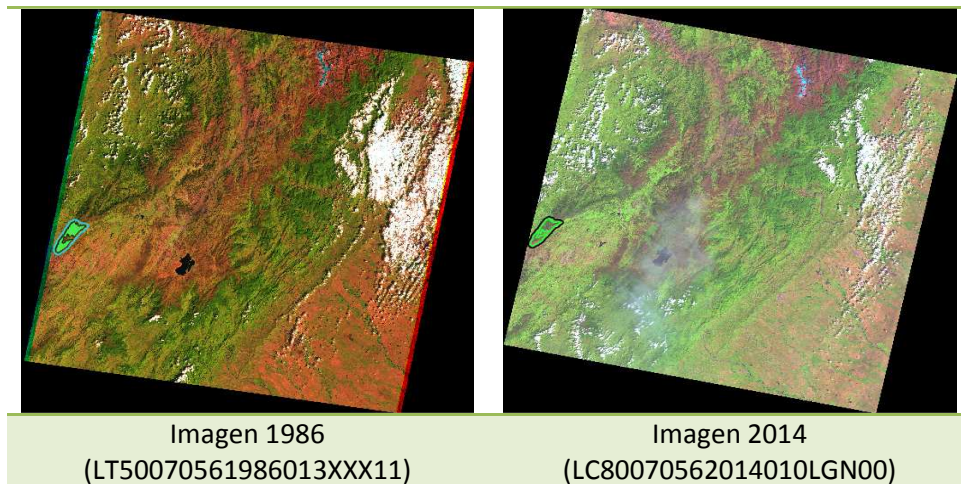


Figura 3- Imágenes Landsat descargadas

2.1.2. SOFTWARE EMPLEADO

Para el desarrollo del presente trabajo se empleó el software libre y de código abierto Quantum GIS[®]. Específicamente fue empleado el Plugin para clasificación Semi-automática, que permite la clasificación supervisada de imágenes provenientes de diferentes plataformas de teledetección que proporcionan herramientas para agilizar el proceso de clasificación y monitoreo de cambios. La plataforma QGIS, por ser de código abierto, está concebida para incluir aportes de diversos usuarios en los complementos del software y de esta manera posibilita realizar las mejoras o desarrollos pertinentes que permitan evidenciar los avances en las funcionalidades de la aplicación. Bajo este esquema el complemento para la clasificación, desarrollado en el marco del concepto Open source, se descarga de manera gratuita y se encuentra en el índice de complementos del software. Lo anterior constituye una gran ventaja frente a otras herramientas que funcionan bajo licenciamiento y que por ende generan costos adicionales para la realización de este tipo de análisis.

Es importante destacar la funcionalidad de estas herramientas, entorno a la manipulación de imágenes Landsat, en este sentido el pre-procesamiento orientado de manera específica para esta plataforma incluye la corrección atmosférica que permite realizar la normalización de la radiación solar mediante la conversión de radiación espectral.

Por otra parte, en cuanto al post-procesamiento se destaca la herramienta que permite el monitoreo en el cambio de áreas, lo que permite que además del análisis visual se cuente con las estadísticas que soporten el monitoreo de cambios.

2.2. METODOLOGÍA EMPLEADA

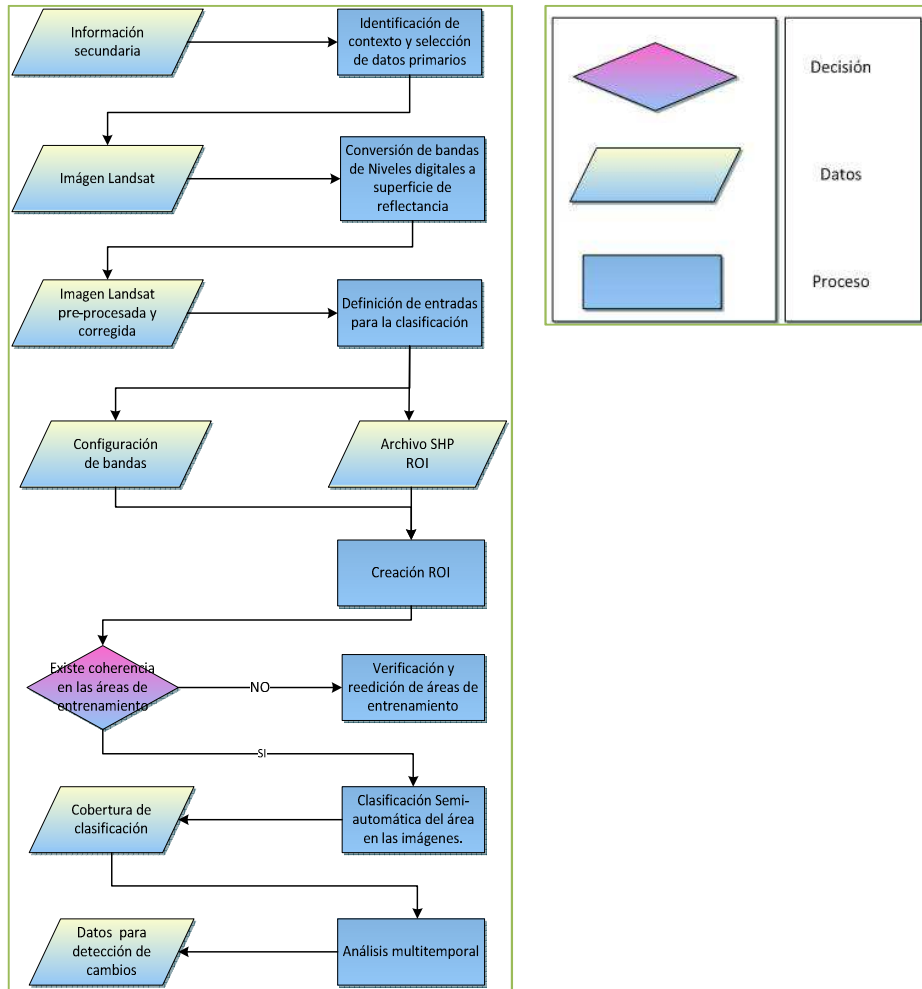


Figura 4- Metodología empleada para el análisis

2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE CONTEXTO Y SELECCIÓN DE DATOS PRIMARIOS

A partir de la información recopilada se realizó una aproximación al contexto regional del Santuario de Flora y fauna de Iguaque y adicionalmente se identificaron de manera preliminar los diferentes biomas presentes en el área de estudio y descritos en el Plan de manejo ambiental elaborado para el periodo 2006-2010, así como las diferentes problemáticas a las que se encuentra expuesto el SFFI, en razón a los diferentes factores de presión descritos en el mismo documento.

De la misma manera se obtuvo información concerniente al Software y los complementos empleados para el monitoreo de cambios en la cobertura, consistentes en el manual de configuración del plug-in de clasificación semi-automática de QGIS.

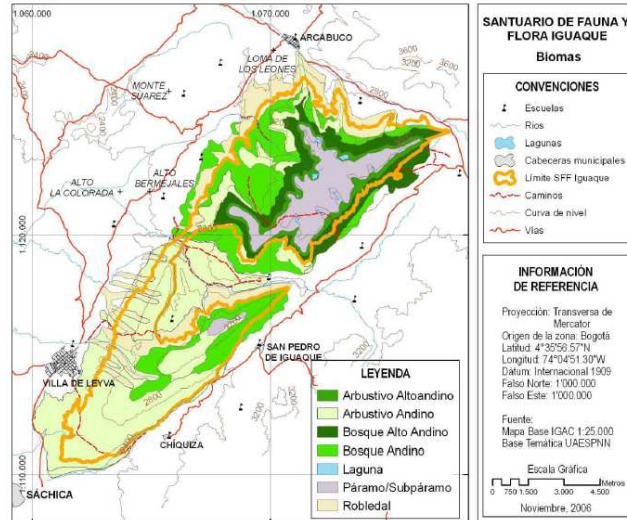


Figura 5- Biomas existentes en el santuario de Flora y fauna de Iguaque

Los insumos para el procesamiento, constituyen la base del presente análisis, los mismos fueron descargados del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

2.2.2 CONVERSIÓN DE BANDAS DE NIVELES DIGITALES A SUPERFICIE DE REFLECTANCIA

Dado que los productos Landsat, suministrados por el USGS, consisten en una serie cuantificada, calibrada y escala de niveles digitales, se hace necesario, escalar o convertir la información a niveles de reflectancia, desde este punto se realizar la conversión de bandas, corrección atmosférica y las composiciones en falso color.

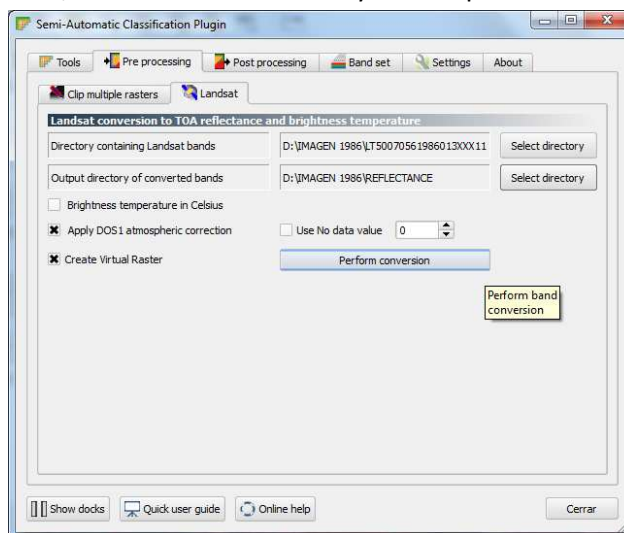


Figura 6 - Pre-procesamiento de imágenes

Por otra parte el pre-procesamiento incluye el proceso de corrección atmosférica, basado en el método DOS1, que se utiliza en diferentes aplicaciones. Utiliza el principio de que la bruma atmosférica incrementa los ND en áreas de las imágenes de agualimpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar reflectancia nula. El valor representativo de esa diferencia se sustrae, en cada banda, en todos los píxeles de la escena.(Brizuela, Aguirre, & Velasco, 2007) Esta corrección fue realizada para cada una de las 3 imágenes que constituyen el principal insumo del presente análisis.

2.2.3 DEFINICIÓN DE ENTRADAS PARA LA CLASIFICACIÓN.

Una de las bases para la clasificación semi-automática es la composición en falso color, para el caso del software empleado consiste en la configuración de las bandas de manera que permita identificar las coberturas de interés para el presente análisis.

Para la realización de composiciones a color se requiere configurar las propiedades de la superficie generada, y establecer las bandas requeridas, de acuerdo a la temática del análisis a realizar. Para el caso, específico en el que se requiere diferenciar la cobertura vegetal, la composición empleada fue la RGB 543 para la imagen de 1986 y su equivalente para la imagen de 2014, cuya fuente es el satélite Landsat 8, RGB 654.

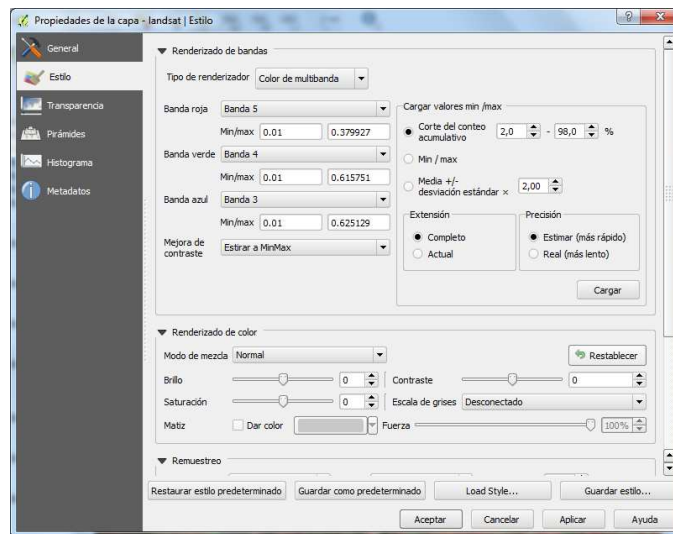


Figura 7 - Configuración de bandas

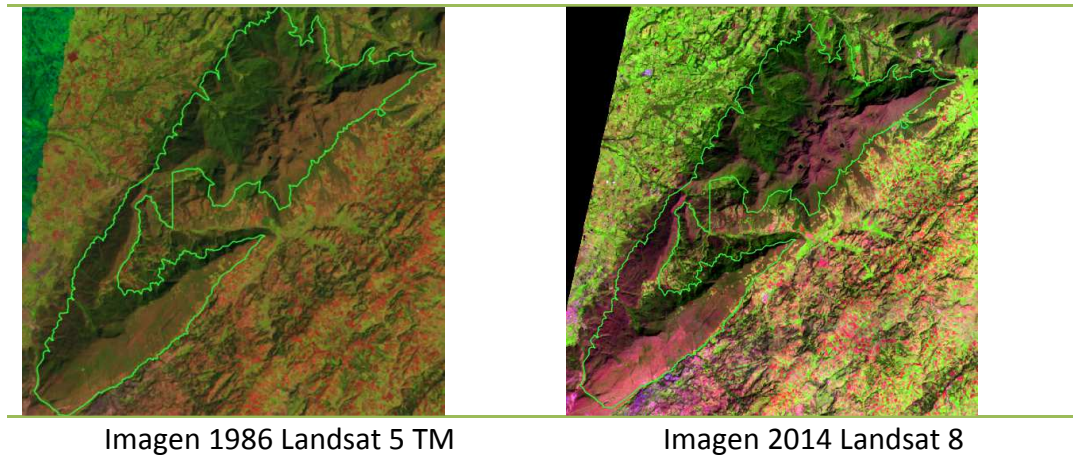


Figura 8 - Resultado de Configuración de bandas

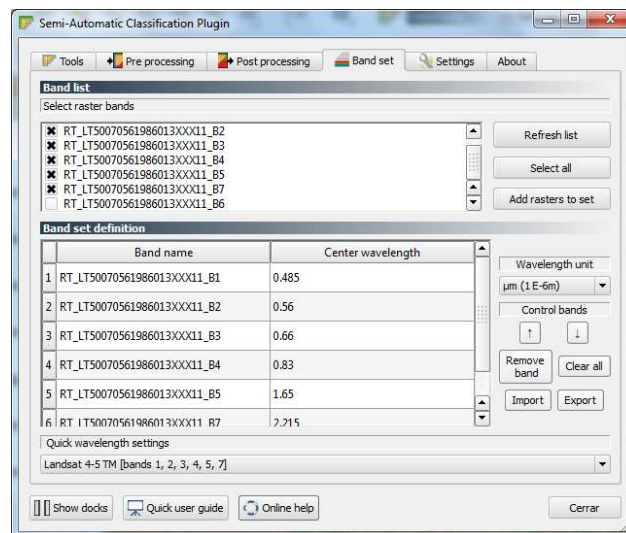


Figura 9 – Configuración de longitudes de onda

De la misma manera se requiere configurar el centro de rango de la longitud de onda de cada una de las bandas que componen la imagen, como se muestra en la Figura 9, en este punto se deben tener en cuenta la serie de Landsat fuente de la imagen.

Por otra parte fue necesario configurar el almacenamiento de áreas de entrenamiento (ROI), a través del menú de clasificación semiautomática de QGIS, es importante que por cada una de las imágenes a clasificar se genere un archivo. Shp para los ROI.

2.2.4 CREACIÓN ROI

La creación de ROI (Áreas de entrenamiento), permite generar semillas, de cada una de las clases, es decir que haciendo clic en un pixel de la imagen se generan áreas de interés cuyo comportamiento espectral es similar.

Para la creación de ROI es posible configurar Macro clases, en las que se pueden agrupar varias clases, aplicable, por ejemplo en el caso en el que una cobertura tenga varias firmas espectrales.

Para el caso particular del presente análisis, a cada macro clase, se asoció una sola clase, pese a que se realizaron varios muestreos. Es importante mencionar que de la captura cuidadosa de las áreas de entrenamiento, depende en gran parte que la clasificación supervisada a ejecutar se acerque a las coberturas existentes en el terreno, por esta razón se requiere, contar con información previa que nos permita realizar una aproximación a la cobertura, dicha información puede componerse de cartografía de la zona, así como el conocimiento de las firmas espectrales de las coberturas a clasificar.

En este sentido se requiere realizar una aproximación a las firmas espectrales de las coberturas de interés, por esta razón, debido a que el presente análisis corresponde al monitoreo de la cobertura vegetal, se debe tener en cuenta que la misma presenta variaciones que dependen de ciertos factores (Hernandez & Montaner, 2010), algunos de estos son:

- Tipos de pigmentos.
- Estructura de hojas
- Contenido de humedad

Es importante además del comportamiento espectral, contar con información geográfica o documentación de la zona para realizar la captura de áreas de entrenamiento con base en las mismas, ya que de la correcta captura de las mismas depende la fiabilidad de la clasificación, para esto también se requiere contar con las herramientas adecuadas para esta captura; En este sentido el software permite la selección de áreas de entrenamiento, mediante la delimitación vectorial de las diferentes coberturas y su almacenamiento en un archivo formato shape, lo que facilita la revisión de las áreas, de la misma manera, a medida que se realiza el muestreo, simultáneamente se almacena en un archivo formato .xml, la firma espectral asociada. En la siguiente figura se visualiza el almacenamiento de archivos y la ventana para el muestreo.

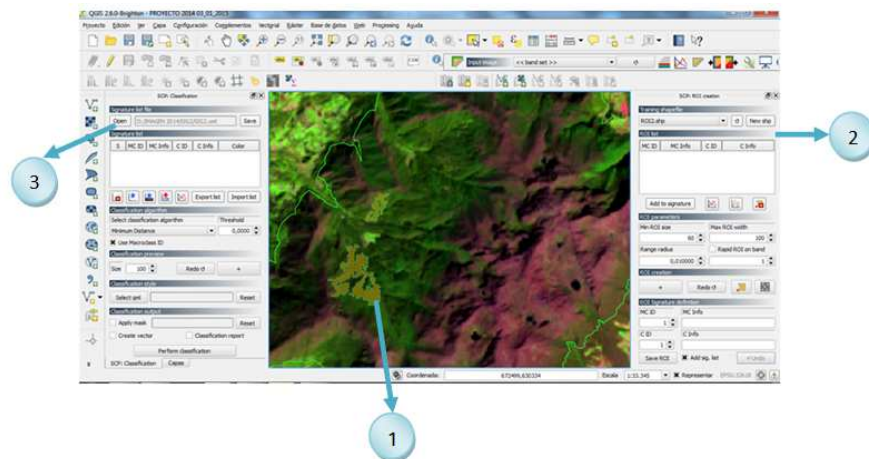


Figura 10 – Configuración de la ventana para la creación de archivos ROI-

Muestreo de Bosque Denso alto de tierra firme

En la figura se observa el funcionamiento general de la herramienta para selección de áreas de entrenamiento, en el área 1, se observa el muestreo que para este caso corresponde al área de Bosque denso alto de tierra firme. El área 2, corresponde a la configuración del almacenamiento de las áreas de entrenamiento (ROI) y de las macroclases asociadas a la clasificación supervisada.

2.2.5 VERIFICACIÓN Y REEDICIÓN DE ÁREAS DE ENTRENAMIENTO.

Es importante que durante la recolección de áreas de entrenamiento se atento a las notificaciones del software, ya que si existe cruce entre los valores de reflectancia entre clases, surgido a partir de la toma de muestra errónea, el software notifica este cruce.

Sin embargo, la verificación de áreas de entrenamiento se realiza finalizada la clasificación, a través de la matriz de error en la que se evidencia la precisión de la clasificación de la cobertura vegetal. En este sentido lo que se evidencia en la matriz es la correspondencia entre las áreas de entrenamiento (ROI) muestreadas y la clasificación final.

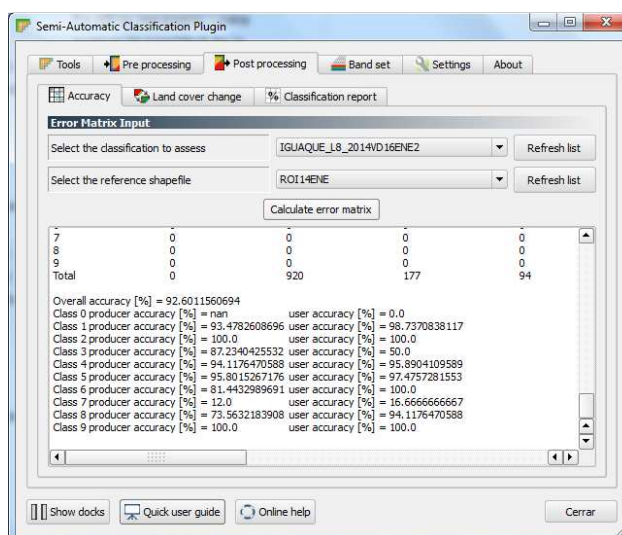


Figura 11 - Matriz de error de la clasificación

Esta verificación permite validar la necesidad de revisar las ROI muestreadas o si el número de muestras es insuficiente para lograr mayor precisión en la clasificación, evidenciando en resumen la precisión de las muestras tomadas, respecto a la clasificación final.

2.2.6 CLASIFICACIÓN SEMI-AUTOMÁTICA DEL ÁREA EN LAS IMÁGENES.

La metodología empleada para la realización del monitoreo de cambios en la cobertura vegetal del Santuario de flora y fauna de Iguaque, está asociada a la utilización de la versión 3.1.3 "Rome" del plugin para clasificación semi automática implementado sobre la plataforma de software libre y de código abierto QGIS. El modulo cuenta con una herramienta específica para las imágenes Landsat, lo que representa una ventaja comparativa frente a otras herramientas.

Aparte del software empleado para la clasificación es necesario definir las coberturas que formaran parte de la misma, dichas coberturas se basaron en la Leyenda nacional de coberturas de la tierra, acogida por el IDEAM y que consistió en la adaptación realizada para escala 1:100.000 de la Metodología "CorineLandCover" para Colombia. Esta metodología permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a escala 1:100.000. (IDEAM, 2010)

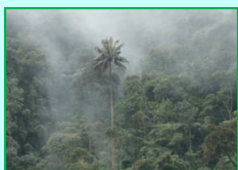



Formación vegetal	Descripción	Clasificación CorineLandcover
	Vegetación alto andina Bosque seco de tierra fría	Bosques nublados heterogéneos Bosque denso alto de tierra firme
	Vegetación de páramo	Bosque arbustivo
		Matorral-pastizal degradado de tierra fría Arbustal abierto Arbustal denso Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos
	Vegetación de sub-páramo	Frailejones y pastizales Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado

Tabla 3 - Correspondencia clasificación

Con base en la metodología descrita y en la caracterización del área de estudio entorno a la vegetación presente en el santuario se estableció la correspondencia definida en la **Tabla 3** para la clasificación. Adicionalmente a las coberturas de vegetación asociadas a bosques y áreas seminaturales en el santuario se evidencia la

existencia de cultivos y espacios naturales, en este sentido y de acuerdo al plan de manejo ambiental del Santuario de flora y fauna de Iguaque, se presentan cultivos de papa al interior del santuario, que se rotan con pastos, existentes también para actividades de pastoreo que se venían realizando al interior del parque, incluso antes de que fuera declarado como área protegida. Por esta razón aparte de las formaciones vegetales a clasificar se incluyeron las coberturas correspondientes a áreas agrícolas heterogéneas:

- Mosaico de cultivos
- Mosaico de pastos y cultivos
- Mosaico de pastos con espacios naturales

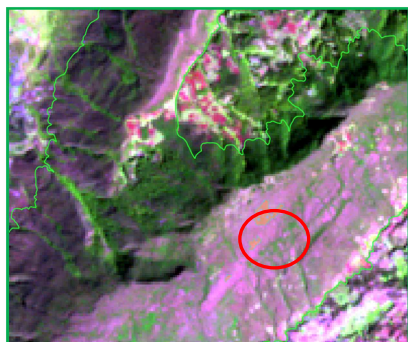
Por último, con base en la metodología para la clasificación descrita, así como de las áreas de entrenamiento capturadas (Procedimiento descrito en el numeral 2.2.4), se realizó la clasificación, empleando el algoritmo Spectral angle mapper (SAM), este método permite obtener valores asociados a la similitud espectral, a partir de los valores de referencia de las áreas de entrenamiento, empleando la medición entre el ángulo existente entre los espectros que conforman la muestra, tratando los mismos como vectores. bajo este esquema es importante para la funcionalidad del método la toma de un número significativo de muestras de todas las coberturas, ya que de esta manera se construye una firma espectral más específica y el cálculo de los ángulos es más preciso.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

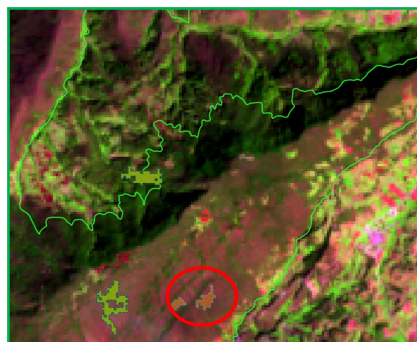
3.1. AREAS DE ENTRENAMIENTO OBTENIDAS

Los muestreos de las áreas de entrenamiento que forman parte del presente análisis se realizaron empleando para la interpretación la composición RGB 543 para la imagen Landsat 5 de 1986 y la equivalente RGB 654 para la imagen Landsat 8 de 2014.

La escogencia de la combinación RGB 543 para el muestreo de las áreas de entrenamiento, obedeció a que es la que más brinda información sobre la cobertura vegetal y permite discriminar las coberturas de interés en el presente análisis. Permite por ejemplo, discriminar las coberturas de bosques de otras como la asociada a herbazales o cultivos. A continuación se observan ejemplos de algunas de las áreas de entrenamiento capturadas:

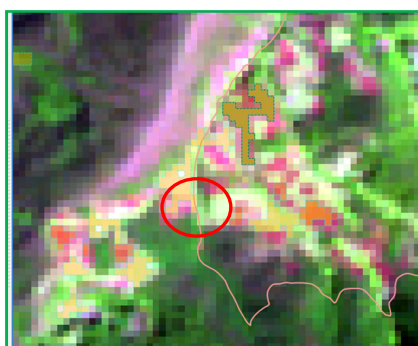


**Figura 12 - Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado
Imagen 1986**

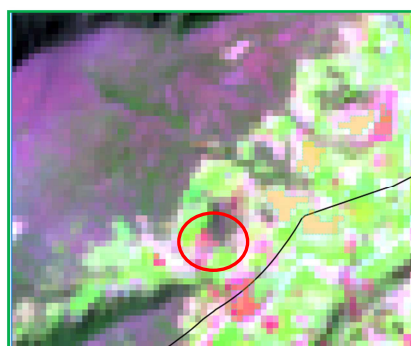


**Figura 13 - Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado
Imagen 2014**

La cobertura asociada al herbazal denso de tierra firme no arbolado, se define de acuerdo a la Leyenda Nacional de coberturas de la Tierra (IDEAM, 2010), como aquella que se constituye por “una comunidad vegetal dominada por elementos herbáceos”, dado que en el Santuario se presentan alturas de hasta 3800 s.n.m.m, que permite la caracterización de clima de paramo, evidenciando de esta manera herbazales de montaña y asociaciones de matorrales de tierra fría cuyo comportamiento en la combinación RGB 543, se relaciona con un color marrón o café bastante claro y una textura heterogénea fina media.



**Figura 14 - Mosaico de pastos y cultivos
Imagen 1986**



**Figura 15 - Mosaico de pastos y cultivos
Imagen 2014**

La cobertura asociada a mosaico de pastos y cultivos, se compone de parcelas de tamaño pequeño y pastos, es decir que el patrón de loteo es muy pequeño para representarse gráficamente de manera individual (IDEAM, 2010). El comportamiento en la composición mencionada, se relaciona con tonos de amarillo a verde claro, en el presente análisis se presentaron dificultades entorno a que la respuesta espectral de esta cobertura es en algún grado similar a la cobertura de mosaico de pastos y espacios naturales, la diferencia principal radica en el patrón geométrico, dado que el mosaico de pastos y cultivos presenta un patrón geométrico definido, contrario al mosaico de pastos y espacios naturales.

Es importante mencionar que entre más áreas de entrenamiento muestreadas, se presentará mayor precisión en la clasificación, la misma se evidenciará solamente en las matrices de error obtenidas, este procedimiento de verificación se explica a continuación.

3.2. VERIFICACION DE LA CLASIFICACION A PARTIR DE LAS AREAS DE ENTRENAMIENTO.

Una vez realizado el muestreo de las áreas de entrenamiento y la clasificación por el método SAM (Spectral Angle Mapping), se realizó la verificación de la clasificación a través del análisis de la precisión de la clasificación, en la que se estiman los porcentajes de precisión del usuario y de la herramienta. Las precisiones obtenidas para las dos clasificaciones obtenidas fue la siguiente:

MATRIZ DE ERROR CLASIFICACIÓN IMAGEN 1986\ LT50070561986013XXX11
Overall accuracy = 93,0724823605

Class 1	Bosque denso alto de tierra firme	producer accuracy [%] = 92,8242264648	user accuracy [%] = 96.8406593407
Class 2	Arbustal abierto	producer accuracy [%] = 100	user accuracy [%] = 95.3068592058
Class 3	Arbustal denso	producer accuracy [%] = 65,6	user accuracy [%] = 42.2680412371
Class 4	Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos	producer accuracy [%] = 98,1029810298	user accuracy [%] = 99.7245179063
Class 5	Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	producer accuracy [%] = 100	user accuracy [%] = 99.0384615385
Class 6	Mosaico de pastos y espacios naturales	producer accuracy [%] = 70,7482993197	user accuracy [%] = 95.4128440367
Class 7	Mosaico de pastos y cultivos	producer accuracy [%] = 92,0289855072	user accuracy [%] = 81.4102564103
Class 8	Cultivos	producer accuracy [%] = 95,652173913	user accuracy [%] = 100.0
Class 9	Sombras	producer accuracy [%] = 100	user accuracy [%] = 100.0

Tabla 4 - Matriz de error clasificación imagen 1986

En la tabla 2 se observa la precisión obtenida para la clasificación de la imagen 1986 LT50070561986013XXX11, el promedio de la clasificación del usuario es de 90%; En tanto que el promedio obtenido por la herramienta fue de 90,55%.

Se observa que la cobertura en la que se presentó menor precisión obtenida para la clasificación fue la de arbustal denso, se asocian los valores de la precisión a que la respuesta espectral de esta cobertura se asimila tanto en el patrón geométrico, como en el color a la cobertura de bosque denso alto de tierra firme, en esta medida la clasificación para esta cobertura se debe tomar con alguna reserva. Por otra parte la cobertura de pastos y espacios naturales también presentó una precisión baja (inferior a 80%), por lo que se hace necesario analizar si para un producto cartográfico se incluirían estas 2 clases. Por lo demás las coberturas superan el 90% de la precisión.

MATRIZ DE ERROR CLASIFICACIÓN IMAGEN 2014\ LC80070562014010LGN00

Overall accuracy = 88,287261328

Class 1	Bosque denso alto de tierra firme	producer accuracy [%] =	86,93035254	user accuracy [%] =	91,081081
Class 2	Arbustal abierto	producer accuracy [%] =	95,42682927	user accuracy [%] =	89,173789
Class 3	Arbustal denso	producer accuracy [%] =	60,73619632	user accuracy [%] =	52,659574
Class 4	Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos	producer accuracy [%] =	93,94957983	user accuracy [%] =	96,048110
Class 5	Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	producer accuracy [%] =	96,51741294	user accuracy [%] =	96,198347
Class 6	Mosaico de pastos y espacios naturales	producer accuracy [%] =	87,42138365	user accuracy [%] =	95,205479
Class 7	Mosaico de pastos y cultivos	producer accuracy [%] =	93,80530973	user accuracy [%] =	85,483871
Class 8	Cultivos	producer accuracy [%] =	78,08219178	user accuracy [%] =	96,610169
Class 9	Sombras	producer accuracy [%] =	100	user accuracy [%] =	100

Tabla 5 - Matriz de error clasificación imagen 2014

En la tabla 3 se observa la precisión obtenida para la clasificación de la imagen 2014 LC80070562014010LGN00, el promedio de la clasificación del usuario es de 88,09%; En tanto que el promedio obtenido por la herramienta fue de 89,16%.

Para la clasificación de la imagen del año 2014 se presenta una precisión promedio bastante alta, sin embargo, nuevamente se presentan valores muy bajos en la precisión de la clasificación de la cobertura asociada a arbustales densos.

En este sentido y teniendo en cuenta que la precisión requerida para generación de cartografía temática, teniendo como insumo imágenes de satélite debe ser superior al 80% (Chuvienco, 1995); la cobertura de arbustal abierto debe analizarse con mayor precaución en relación a las demás coberturas, dado que tanto en la imagen de 1986 como en la de 2014, presentó niveles de precisión bajos.

3.3. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA Y ESTADÍSTICAS DE LA CLASIFICACIÓN

A partir de los muestreos realizados y después de haber verificado que se obtuviera un nivel de precisión alto para ambas clasificaciones (1986 y 2014), se procedió a realizar el análisis de las coberturas resultantes:

Se obtuvieron 9 clases:

Clase 1: Bosque denso alto de tierra firme, **Clase 2:** Arbustal abierto, **Clase 3:** Arbustal denso, **Clase 4:** Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos, **Clase 5:** Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado, **Clase 6:** Mosaico de pastos y espacios naturales, **Clase 7:** Mosaico de pastos y cultivos, **Clase 8:** Cultivos y **Clase 9:** Sombras.

3.3.1. RESULTADOS CLASIFICACIÓN IMAGEN LANDSAT 5 1986

Para la imagen Landsat de 1986 se obtuvo un área total clasificada de: 137,20 Km²; discriminada de la siguiente manera:

	Class	PixelSum	Percentage (%)	Area [Km ²]
Class 1	Bosque denso alto de tierra firme	17415	11,418%	15,6666799
Class 2	Arbustal abierto	36611	24,004%	32,9355624
Class 3	Arbustal denso	27904	18,295%	25,1026723
Class 4	Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos	12422	8,145%	11,1749353
Class 5	Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	29179	19,131%	26,2496729
Class 6	Mosaico de pastos y espacios naturales	5469	3,586%	4,91995823
Class 7	Mosaico de pastos y cultivos	18987	12,449%	17,0808643
Class 8	Cultivos	3329	2,183%	2,9947963
Class 9	Sombras	1204	0,789%	1,08312849
	TOTAL	152520		137,20827

Tabla 6 - Discriminación de áreas imagen 1986

Para analizar las áreas obtenidas, se debe tener en cuenta que pese a que el área total del santuario de flora y fauna de Iguaque es de 67,5 Km², se definió un área de influencia mayor a la que encierra el límite establecido por Parques nacionales Naturales de aproximadamente de 1 Km excediendo la delimitación del santuario, en razón a que los factores de presión existentes en esta área protegida se encuentran principalmente sobre los límites del mismo. Por lo tanto el área total del polígono de clasificación, incluyendo el área de influencia es de 137,25 Km², como se observa existe una diferencia mínima entre el área de la clasificación y la del polígono del área de influencia, que puede deberse a errores mínimos en la asignación de los píxeles en las áreas límite del análisis. Se observa que el mayor porcentaje del santuario y su área de influencia, para el año de 1986 corresponde a asociaciones de arbustales abiertos y herbazales no arbolados, el área total de estas 2 coberturas es de aproximadamente 44% del total del polígono definido para el análisis.

A partir de la clasificación realizada también se observa que para 1986 los cultivos ocupan aproximadamente 3 Km² que principalmente se localizan más allá del límite del santuario, en la zona oriental del mismo; Pese a que corresponde a un área relativamente pequeña es importante mencionar que de acuerdo a los Planes de manejo ambiental del Santuario elaborados por Parques nacionales Naturales de Colombia, aproximadamente el 97% de las fincas que componían el predio del santuario cuando se hizo la declaratoria, eran de carácter privado, lo que ocasiona que diversos sistemas productivos existentes al interior del parque antes de la declaración de área protegida hayan persistido en el tiempo. Adicionalmente se debe mencionar que los mosaicos de pastos y espacios naturales asociados a la rotación de cultivos y áreas de pastoreo, ocupan un área de 17 Km², es decir que totalizando el mosaico de pastos y cultivos y las áreas de cultivos propiamente dichas se tiene un área total de 20 Km².



Figura 16 - Resultados de la clasificación a partir de la imagen Landsat 5 de 1986

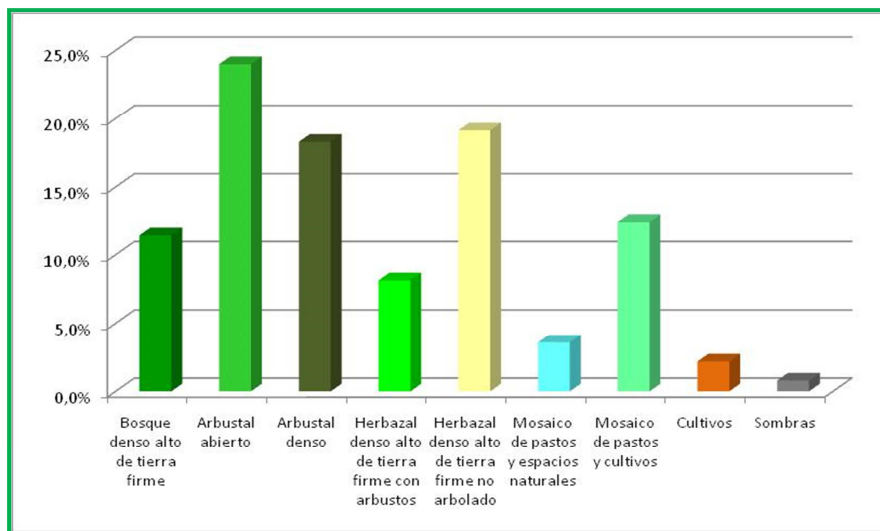


Figura 17 - Porcentajes de ocupación de coberturas vegetales para 1986

3.3.2. RESULTADOS CLASIFICACIÓN IMAGEN LANDSAT 8 2014

Como producto de la clasificación de la imagen del año 2014, se obtuvieron los siguientes resultados:

	Class	PixelSum	Percentage (%)	Area [Km^2]
Class 1	Bosque denso alto de tierra firme	17415	11,418%	15,66668
Class 2	Arbustal abierto	36611	24,004%	32,93556
Class 3	Arbustal denso	27904	18,295%	25,10267
Class 4	Herbazal denso alto de tierra firme con arbustos	12422	8,145%	11,17494
Class 5	Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	29179	19,131%	26,24967
Class 6	Mosaico de pastos y espacios naturales	5469	3,586%	4,91996
Class 7	Mosaico de pastos y cultivos	18987	12,449%	17,08086
Class 8	Cultivos	3329	2,183%	2,99480
Class 9	Sombras	1204	0,789%	1,08313
	TOTAL	152520		137,20827

Tabla 7 - Discriminación de áreas imagen 2014

Se observa que para el año 2014 el mayor porcentaje del santuario y su área de influencia, sigue estando asociado a la cobertura de arbustal abierto. De la misma manera la cobertura de herbazales no arbolados, ocupa un 19,1% del área total definida. Siendo estas dos coberturas las que ocupan gran parte del área de análisis. Por otra parte se destaca la cobertura de arbustal denso existente principalmente en el cinturón de páramo y sub-páramo, esta descripción coincide con lo planteado en la descripción de la vegetación del páramo planteada para el año 2010 en el Plan de manejo ambiental más reciente.

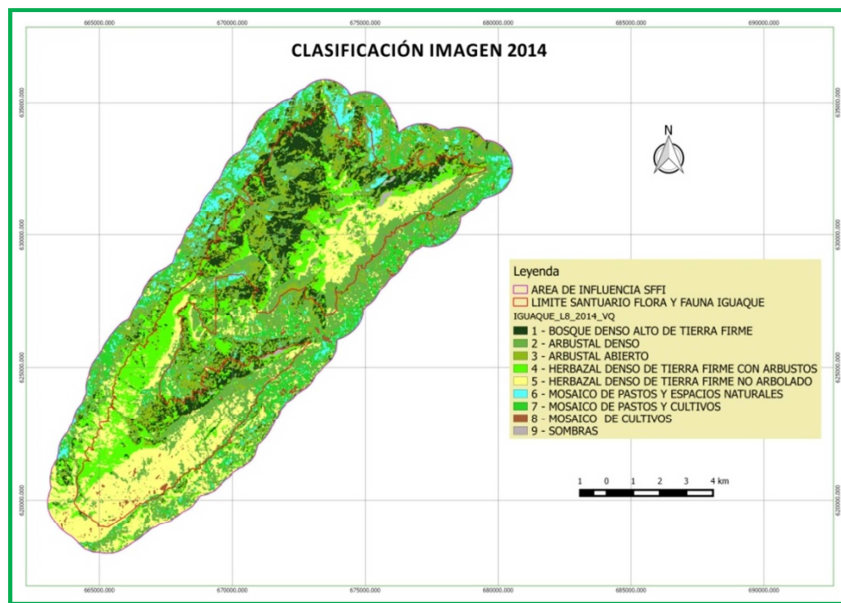


Figura 18 - Resultados de la clasificación a partir de la imagen Landsat 8 de 2014

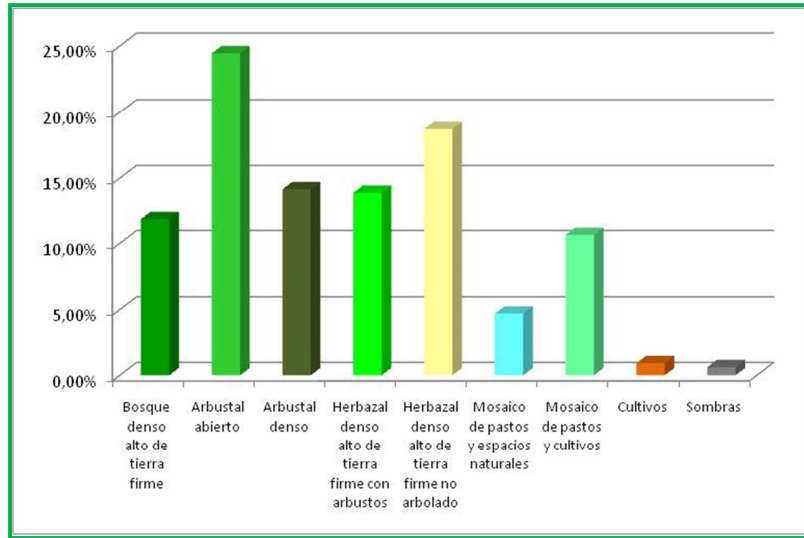


Figura 19 - Porcentajes de ocupación de coberturas vegetales para 2014

3.4. ESTADÍSTICAS Y MONITOREO DE CAMBIOS

Con el objeto de realizar el monitoreo de cambios en la cobertura vegetal entre 1986 y 2014, se realizó la comparación cuantitativa de las clasificaciones obtenidas. Es necesario señalar que si se realiza una comparación con base en las áreas obtenidas, es posible determinar la cobertura que presenta mayor variación, ya que a nivel visual se dificulta obtener información concluyente en este sentido.

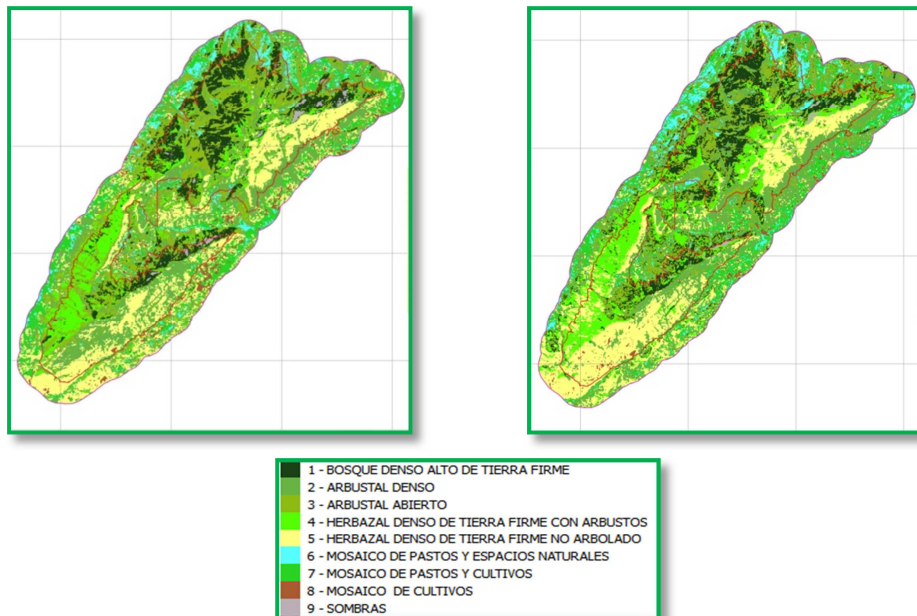


Figura 20 - Comparación clasificaciones obtenidas 1986 (izq.), 2014 (der.)

Gráficamente es posible observar variaciones significativas en la cobertura "arbustal denso", evidenciando una reducción en el área de la misma en el periodo del presente análisis. Se presenta de la misma manera una reducción aunque no tan significativa en el área destinada a cultivos y a la cobertura asociada a mosaico de pastos y cultivos. La reducción de estas áreas, relacionadas con las actividades económicas desarrolladas en las áreas límite del santuario, se puede asociar a lo que en el plan de manejo ambiental del santuario se describe como la intensificación en las actividades administrativas y de protección del SFFI.

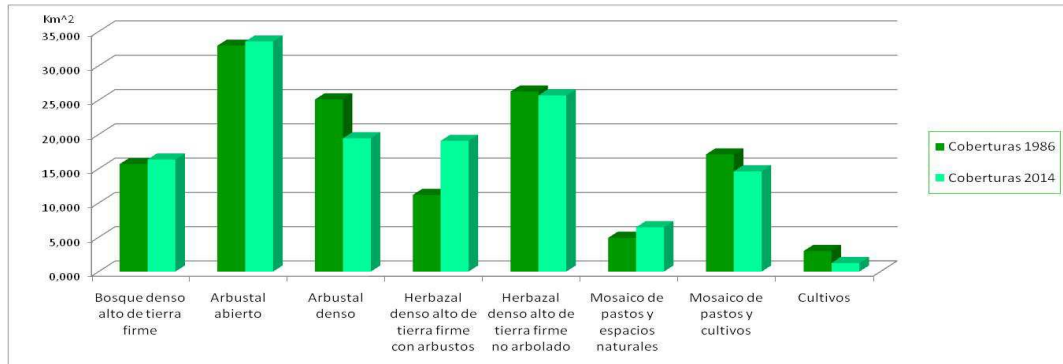


Figura 21 - Comparación áreas obtenidas por cobertura 1986-2014

Por otra parte se presenta un aumento entre 1986 y 2014 de la cobertura correspondiente a "Herbazal denso de tierra firme con arbustos", siendo este el aumento más significativo que pudo registrarse en el periodo del análisis. Se evidenció que este aumento es localizado fuera del límite suroccidental del santuario.

Por último es necesario señalar que la herramienta empleada cuenta con un modulo para el análisis de cambios entre 2 clasificaciones, este modulo se centra en el análisis a nivel de pixeles y tiene como resultado una matriz en la que se indica el número de pixeles que ha cambiado de una clase a otra en el periodo definido por el usuario.

3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE SOFTWARE LIBRE PARA EL MONITOREO DE CAMBIOS

Para concluir el presente análisis es importante describir las ventajas del uso de software libre para el monitoreo de cambios de coberturas.

3.5.1. VENTAJAS

- ✚ Es innegable el impacto positivo que a nivel económico tiene para las organizaciones el uso de software libre y de código abierto, ya que teniendo un

desarrollo a nivel de la manipulación y análisis de imágenes muy similar a un software licenciado es una herramienta totalmente gratuita.

- ✚ El software soporta un importante número de formatos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG) lo que facilita la realización de diversos análisis y la interoperabilidad con otras aplicaciones.
- ✚ La corrección atmosférica de las imágenes constituye un procedimiento muy sencillo e incluido por defecto en el pre-procesamiento de imágenes.
- ✚ El proceso de muestreo de áreas de entrenamiento permite utilizar formato shape, lo que garantiza interoperabilidad en el proceso.
- ✚ La interfaz permite que el usuario entienda paso a paso cada uno de los componentes del análisis, desde el pre-procesamiento hasta el análisis de la información obtenida.
- ✚ Dado que el software es de código abierto, se realizan mejoras y cambios de versiones tanto en el nivel macro del programa, como a nivel de los complementos o plugins que se descargan, de acuerdo a las necesidades de cada usuario.
- ✚ Es posible lograr interacción directa con los desarrolladores de los complementos para la resolución de dudas y el reporte de fallas en la herramienta.

3.5.2. DESVENTAJAS

- ✚ El plugin empleado para la clasificación de imágenes y el análisis multitemporal, es de desarrollo muy reciente, por lo que está sujeto a constantes cambios de versión.
- ✚ Frente a otras herramientas como PCI, el plugin se queda atrás en la obtención de datos estadísticos relacionados con el análisis, específicamente hablando de la matriz de confusión.
- ✚ La herramienta empleada para la detección de cambios en la cobertura constituye una buena alternativa, sin embargo la interpretación de los datos para el usuario se hace compleja, dado que solo evidencia cambios en las coberturas a nivel de número de píxeles.
- ✚ El soporte brindado por software libre y de código abierto depende mucho de la investigación que haga el usuario por su cuenta, lo que frente al software licenciado constituye una desventaja, teniendo en cuenta que con la licencia, el distribuidor del software garantiza el soporte requerido.

4. CONCLUSIONES

- ✚ El plugin para la clasificación semi-automática de imágenes, brinda las herramientas necesarias para realizar una clasificación supervisada, a través de una interfaz amigable y que le permite al usuario entender todo el proceso del análisis.
- ✚ Es importante que dentro de las mejoras a realizar en el plugin se incluyan aquellas asociadas con la obtención de datos estadísticos, dado que frente a otras herramientas como PCI, el plugin se queda atrás en la obtención de datos como la matriz de confusión.
- ✚ Es importante reconocer el avance que se presenta en la actualidad frente al uso de herramientas asociadas a software libre y de código abierto para análisis que involucre el uso de imágenes de satélite para clasificación de coberturas y su monitoreo a través del tiempo
- ✚ El desarrollo de complementos y plugins generados por usuarios y encaminados a realizar monitoreos en cambios de coberturas, hace que con el tiempo se vayan depurando errores en las herramientas, muestra de ello son las múltiples versiones existentes de los complementos desarrollados para el software Quantum Gis.

CONCLUIDO EL PROCESO DE UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA FUE POSIBLE ESTABLECER QUE:

- ✚ Se obtuvo, a través de la matriz de error, una precisión promedio para ambas clasificaciones del 89%. Sin embargo la cobertura asociada a arbustales abiertos en ambas clasificaciones, presentó un nivel de precisión inferior al promedio.
- ✚ Es importante tener en cuenta que de la cantidad de áreas de entrenamiento muestreadas, dependerá mayor precisión en la clasificación, la cual se evidencia solamente en las matrices de error obtenidas, este procedimiento de verificación se explica a continuación
- ✚ El área del santuario, esencialmente mantiene en el tiempo la distribución de áreas existentes para el año 2014, sin embargo se evidenciaron cambios importantes en el área de influencia, sobre todo en aquellas coberturas relacionadas con la actividad económica de las habitantes de la región, a través de una disminución en áreas destinadas a cultivos y mosaicos de pastos y cultivos.
- ✚ No existe disminución asociada a la cobertura vegetal, sino más bien una redistribución relacionada con las coberturas que para el presente análisis se denominaron arbustales densos y abiertos
- ✚ Se evidencia una disminución sustancial en la cobertura de arbustal denso, sin embargo es importante anotar que esta fue la cobertura en la que se obtuvo menor precisión en la matriz de error, por lo que esta información se debe manejar con cierta precaución.

5. BIBLIOGRAFIA

Brizuela, A., Aguirre, C., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* , 207-214.

Cano, A., & Diaz, F. (2002). Parques, áreas, santuarios y reservas. *Revista La Tadeo* , 177-182.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección*. Madrid.

Hernandez, J., & Montaner, D. (2010). *Patrones de respuesta espectral*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para*. Bogotá D.C: IDEAM.

Ministerio de Medio Ambiente. (Diciembre de 2014). *Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Obtenido de <http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/>

PNN. (2006). *Plan de manejo ambiental santuario de flora y fauna Iguaque*. Bogotá: Parques Nacionales naturales de Colombia.