

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Postgrados**

**Identificación de ecosistemas en la Provincia de Napo - Ecuador  
mediante análisis digital de imágenes satelitales**

**Diego Fernando Pérez Vasco**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de  
Magíster en Sistemas de Información Geográficas

Quito, octubre 2012

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Postgrados**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Identificación de ecosistemas en la Provincia de Napo - Ecuador  
mediante análisis digital de imágenes satelitales**

**Diego Fernando Pérez Vasco**

Richard Resl, PhD(c).,  
Director de Tesis  
Director del Programa de Maestría en  
Sistemas de Información Geográfica

\_\_\_\_\_

Pablo Cabrera, MSc.,  
Miembro del Comité de Tesis

\_\_\_\_\_

Stella de la Torre, PhD.,  
Decana de Colegio de  
Ciencias Biológicas y Ambientales

\_\_\_\_\_

Víctor Viteri Breedy, PhD.,  
Decano del Colegio de Postgrados

\_\_\_\_\_

Quito, octubre de 2012

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art.144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

-----

Nombre: Diego Fernando Pérez Vasco

C. I.: 1717151821

Fecha: Octubre 2012

## RESUMEN

La parte central de esta investigación se desarrolla a partir de la necesidad de identificar los tipos de ecosistemas existentes en la provincia de Napo (zona piloto), ubicada en la parte nor-oriental del Ecuador, mediante el análisis digital de imágenes satelitales en tres tipos de sensores, Landsat, Aster y Rapideye.

La discriminación de ecosistemas se basa en la leyenda de representación cartográfica para el Ecuador continental, documento realizado por el Ministerio del Ambiente, en conjunto con el Consorcio para el Desarrollo de la Ecoregión Andina CONDESAN.

El análisis digital de imágenes se realiza mediante la metodología de clasificación supervisada en el software ENVI 4.7; la identificación de los ecosistemas se complementa con información de Macroclima, Bioclima y Ombrotipo, que conjuntamente con Geomorfología y Suelos, constituyen piezas fundamentales para la mejor identificación y delimitación. Los procesos y métodos desarrollados permiten la evaluación de la exactitud en la identificación de los ecosistemas.

Esta investigación va a contribuir en parte al desarrollo del Proyecto Mapa de Vegetación implementado en el Ministerio del Ambiente, cuyo propósito es el de extender la metodología del presente estudio a las demás provincias del país y así sentar las bases para la estructuración de un sistema de monitoreo ambiental, que permita identificar trayectorias de cambio de las coberturas de la tierra y analizar el impacto de las políticas nacionales de ordenamiento del territorio sobre el capital natural del Ecuador.

## **ABSTRACT**

The main part of this investigation was developed from the need to identify the types of ecosystems in the province of Napo (pilot area), located in the north-eastern Ecuador, using digital analysis of satellite images into three sensor types Landsat, Aster and RapidEye.

Discrimination based on ecosystem mapping legend for continental Ecuador, document prepared by the Ministry of Environment, in conjunction with the Consortium for the Development of the Andean Ecoregion CONDESAN.

The digital image analysis is performed by the methodology of the classification supervised in ENVI 4.7 software, the identification of ecosystems is complemented by information Macroclimate Bioclima and Ombrotype, which together with Geomorphology and Soils are fundamental parts for better identification and delimitation. The processes and methods developed allow the evaluation of the accuracy of the identification of the ecosystems.

This investigation will contribute in part to the development of the Vegetation Map Project implemented by the Ministry of Environment, whose purpose is to extend the methodology of this study to other provinces and promote the basis for structuring a monitoring system environmental pathways to identify changing land cover and analyze the impact of national policies on land use planning on natural capital of Ecuador.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLA DE CONTENIDOS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PRESENTACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.2.1. Objetivo General.....	8
1.2.2. Objetivos Específicos.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	9
2.2. TELEDETECCIÓN.....	9
2.2.1. Imagen Satelital.....	10
2.2.2. Principios Básicos para la Percepción Remota.....	11
2.2.2.1. El espectro electromagnético.....	11
2.2.2.2. Firma espectral.....	12
2.2.2.2.1. Firma espectral de la vegetación.....	12
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES A UTILIZAR.....	15
2.3.1. Metadatos de Imágenes.....	15
2.3.1.1. Nivel de procesamiento de imágenes.....	15
2.3.2. Sensor Rapideye.....	16
2.3.3. Sensor Aster.....	18
2.3.4. Sensor Landsat.....	20
2.4. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE ENVI 4.7.....	21
2.4.1. Clasificación supervisada en ENVI 4.7.....	23
2.4.1.1. Métodos de clasificación supervisada.....	24
2.4.1.1.1. Clasificación por el método de Recolección de Spectra endmember.....	25
2.4.1.1.2. Clasificación por el método de codificación binaria.....	25
2.4.1.1.3. Clasificación por el método del paralelepípedo.....	25
2.4.1.1.4. Clasificación por el método mínima distancia.....	26
2.4.1.1.5. Clasificación por el método de Mahalanobis.....	26
2.4.1.1.6. Clasificación por el método de máxima verosimilitud.....	27
2.4.1.1.7. Clasificación por el método espectral Mapper Angulo.....	27

2.4.1.1.8. Clasificación por el método de Divergencia de información espectral (SID).....	28
2.4.1.1.9. Clasificación por el método de codificación binaria .....	28
2.4.1.2. Métodos de Post Procesamiento de Clasificación que ofrece ENVI 4.7 .....	29
2.4.1.2.1. Extracción de Estadísticas de clase.....	29
2.4.1.2.2. Generación de una matriz de confusión.....	30
2.4.1.2.3. Agrupamiento y tamizado .....	30
2.4.1.2.4. Combinación de clases.....	30
2.4.1.3. ENVI ZOOM.....	31
2.5. EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN.....	33
2.5.1. Matriz de Confusión .....	33
2.5.2. Coeficiente kappa (k) .....	34
3. METODOLOGÍA Y DATOS.....	35
3.1. GENERALIDADES.....	38
3.1.1. Descripción del área de estudio .....	38
3.1.2. Descripción del software, hardware y datos a utilizar .....	40
3.2. ADQUISICIÓN DE PUNTOS DE CALIBRACIÓN DE IMÁGENES.....	43
3.3. ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES .....	45
3.3.1. Análisis de imágenes satelitales sensores Landsat, Aster y Rapideye .....	45
3.3.2. Corrección de imágenes a ser clasificadas .....	48
3.3.2.1. Corrección Radiométrica.....	49
3.3.2.2. Corrección Atmosférica.....	51
3.3.2.2.1. Método DOS Dark Object Subtraction .....	51
3.3.2.3. Corrección Geométrica .....	54
3.3.2.3.1. Ortorectificación de Imágenes .....	55
3.4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SOTWARE ENVI 4.7 PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	58
3.4.1. Selección de áreas de entrenamiento .....	59
3.4.2. Cálculo y análisis de parámetros estadísticos .....	62
3.4.3. Método de clasificación supervisada.....	66
3.4.3.1. Método del Paralelepípedo .....	66
3.4.3.2. Método de Mínima Distancia.....	67
3.4.3.3. Método Distancia de Mahalanobis .....	68
3.4.3.4. Método de Máxima Verosimilitud .....	69
3.4.3.5. Método Mapper Angulo Espectral (SAM) .....	70
3.4.3.6. Método de Divergencia de información espectral (SID).....	71
3.4.3.7. Método de Codificación Binaria.....	72

3.4.4. Generalización de la clasificación .....	74
3.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA CON EL SOTWARE ENVI 4.7 A LAS IMÁGENES QUE SE ENCUENTRAN EN LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO).....	81
3.6. EXACTITUD DE CLASIFICACIÓN EN ENVI 4.7 .....	82
3.6.1. Matriz de confusión .....	82
3.6.2. Índice Kappa .....	82
3.7. UNIÓN Y EDICIÓN DE LAS CLASIFICACIONES DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO).....	88
3.8. INTEGRACIÓN DE INSUMOS DE BIOCLIMA Y GEOFORMA .....	91
3.8.1. Modelo Bioclimático .....	91
3.8.1.1. Ombrotipos .....	92
3.8.1.2. Termotipos.....	94
3.8.2. Modelo de Geofomas.....	97
4. RESULTADOS .....	102
4.1. RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ENVI 4.7.....	102
4.2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA EN ENVI A LAS IMÁGENES QUE SE ENCUENTRAN DENTRO DE LA ZONA PILOTO .....	106
4.3. RESULTADOS DE LA EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE MATRIZ DE CONFUSIÓN DE ENVI...	109
4.4. UNIÓN Y EDICIÓN DE LAS CLASIFICACIONES .....	119
4.5. INTEGRACIÓN DE LOS INSUMOS DEL LOS MODELOS DE BIOCLIMA Y GEOFORMAS .....	120
4.6. COMPROBACIÓN DE ECOSITEMAS EN CAMPO CON PUNTOS GPS.....	121
4.7. VERSIÓN FINAL DE LOS ECOSISTEMAS IDENTIFICADOS EN LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO).....	123
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	123
6. CONCLUSIONES .....	127
7. RECOMENDACIONES.....	130
BIBLIOGRAFÍA .....	132
ANEXO A.....	135
ANEXO B.....	136
ANEXO C.....	137
ANEXO D.....	138
ANEXO E .....	139
ANEXO F .....	140
ANEXO G.....	141



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Ficha Técnica de Imagen Rapideye .....	17
Tabla 2.2. Ficha técnica de imagen Aster .....	19
Tabla 2.3. Ficha técnica de imagen Landsat Fuente: Image Group y Spot Image.....	20
Tabla 2.4. Proceso de clasificación supervisada en ENVI 4.7.....	24
Tabla 2.5. Herramientas de ENVI ZOOM 4.7 .....	32
Tabla 2.6. Grado de Acuerdo de Landis y Koch.....	35
Tabla 3.1. Coordenadas de los puntos extremos del Área de Estudio .....	39
Tabla 3.2. División administrativa de la Provincia de Napo .....	40
Tabla 3.3. Descripción de Software utilizados en la investigación.....	41
Tabla 3.4. Descripción del hardware utilizado.....	42
Tabla 3.5. Descripción de los datos utilizados .....	43
Tabla 3.6. Ombrotipos presentes en el Ecuador Continental .....	94
Tabla 3.7. Termotipos presentes en el Ecuador continental.....	96
Tabla 3.8. Leyenda de unidades geomorfológicas .....	99
Tabla 4.1. Matriz de confusión ENVI número de píxeles .....	111
Tabla 4.2. Matriz de confusión ENVI en porcentaje .....	112
Tabla 4.3. Matriz de comisión y omisión en porcentaje.....	113
Tabla 4.4. Matriz de precisión del productor y precisión del usuario en porcentaje.....	113
Tabla 4.5. Resultados de matriz de confusión y coeficiente kappa de las imágenes del área de estudio.....	118
Tabla 4.6. Ecosistemas de toma de puntos de verificación.....	122

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Propiedades ópticas de una hoja en función de la longitud de onda, (Adaptado de Bonn y Rochon, 1992). .....	13
Figura 2.2. Firmas espectrales reales (Adaptado de Bonn y Rochon, 1992).....	14
Figura 2.3. Imagen Rapideye (fecha de toma: 03-Dec-2010 11:22:31), Fuente: Ministerio del Ambiente.....	17
Figura 2.4. Imagen Aster (2008-05-18).Fuente: Ministerio del Ambiente.....	19
Figura 2.5. Imagen Landsat 2007. Fuente: Ministerio del Ambiente.....	21
Figura 3.1. Esquema de los componentes de mapa de ecosistemas para la provincia de Napo.....	36

Figura 3.2. Metodología análisis digital de imágenes .....	37
Figura 3.3. Área de Estudio .....	38
Figura 3.4. Imágenes Rapideye combinación de bandas 5-4-3 con realces, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 5m. Fuente: Ministerio del Ambiente .....	46
Figura 3.5. Imágenes Aster, combinación de bandas 3-4-2 con realces, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 15m. Fuente: Ministerio del Ambiente .....	46
Figura 3.6. Imágenes Lansat normalizadas, combinación de bandas 4-5-3, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 30m. Fuente: Ministerio del Ambiente .....	47
Figura 3.7. Imágenes Landsat, Aster y Rapideye que abarcan la zona piloto, para la interpretación de imágenes satelitales. Fuente Ministerio del Ambiente .....	48
Figura 3.8. Corrección Radiométrica con el software ERDAS 9.3 .....	50
Figura 3.9. Corrección por el método de Sustracción de Píxeles Oscuros .....	52
Figura 3.10. Regresión de Bandas.....	53
Figura 3.11. Método Dark Subtract en el software ENVI 9.2 .....	53
Figura 3.12. Resultado de la aplicación del método de sustracción de píxeles oscuros .....	54
Figura 3.13. Ortorectificación en software ERDAS 9.3.....	57
Figura 3.14. Realces imagen satelital Rapideye (resolución espectral 5m.).....	59
Figura 3.15. Opciones de ventanas para delimitar la muestra.....	60
Figura 3.16. Digitalización de ROIs o muestras espectrales. ....	61
Figura 3.17. Gráficos de puntos máximos, mínimos, media y desviación estándar.....	63
Figura 3.18. Histograma de superposición de clases .....	63
Figura 3.19. Reporte de Separabilidad. ....	65
Figura 3.20. Clasificación método Paralelepípedo .....	67
Figura 3.21. Método de Mínima Distancia.....	68
Figura 3.22. Método distancia de Mahalanobis .....	69
Figura 3.23. Método de Máxima verosimilitud .....	70
Figura 3.24. Método Mapper ángulo Espectral (SAM).....	71
Figura 3.25. Método de Divergencia información espectral (SID).....	72
Figura 3.26. Método de Codificación Binaria.....	73
Figura 3.27. Análisis de Correspondencia Temática .....	74
Figura 3.28. Comparación de resultados con la aplicación del filtros Majority .....	75
Figura 3.29. Comparación de resultados entre los filtros Sieve, Clump y Majority .....	76
Figura 3.30. Resultado Final de la Clasificación Supervisada .....	77
Figura 3.31. Visualización del vector en el software ENVI .....	78
Figura 3.32. Tabla de datos de la imagen clasificada.....	79
Figura 3.33. Imagen clasificada en formato shapefile, visualizada en ArcGis .....	80
Figura 3.34. Diagrama del proceso de análisis digital de imágenes .....	81
Figura 3.35. Proceso con la herramienta eliminate .....	90

Figura 3.36. Flujo de trabajo para la construcción de la capa de Índice Ombrotémico.....	93
Figura 3.37. Proceso para obtener el Índice de Termicidad .....	95
Figura 3.38. Metodología Modelo de Geoformas .....	100
Figura 3.39. Inclusión de los modelos de bioclimas y geoformas en la clasificación supervisada .....	101
Figura 4.1. Visualización en ENVI tres tipos de zoom.....	103
Figura 4.2. Visualización en ENVI misma imagen tres ventanas diferentes y tres combinaciones de bandas diferentes.....	104
Figura 4.3. Imagen clasificada en ENVI 4.7 .....	106
Figura 4.4. Imagen Rapideye y clasificación de ecosistemas.....	108
Figura 4.5. Imagen Aster y clasificación de ecosistemas .....	108
Figura 4.6. Imagen Landsat y clasificación de ecosistemas.....	109
Figura 4.7. Matriz de Confusión en ENVI 4.7 .....	110
Figura 4.8. Unión y edición de clasificaciones de imágenes.....	120
Figura 4.9. Puntos de Verificación planificados para investigación en campo.....	122
Figura 5.1. Gráfico de los ecosistemas identificados en porcentajes .....	126

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. PRESENTACIÓN**

El proyecto final de tesis “Identificación de ecosistemas en la Provincia de Napo – Ecuador, mediante análisis digital de imágenes satelitales” fue planteado a partir de la necesidad que presenta el Proyecto Mapa de Vegetación del Ecuador Continental, de desarrollar una metodología de trabajo para la identificación de ecosistemas en el Ecuador continental.

El Gobierno del Ecuador en su impulso por fortalecer las actividades relacionadas a una mejor planificación, acceso y uso de los recursos naturales, ha promovido una serie de políticas, programas y proyectos que el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) ha venido desarrollando. Entre los principales proyectos de inversión pública que el MAE ejecuta, se encuentra el desarrollo del Mapa de Vegetación y Uso de la Tierra del Ecuador Continental desde inicios del año 2010, cuyo objetivo está orientado a disponer de información espacial actualizada de los ecosistemas, su remanencia, su nivel de representatividad en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, además de proveer una identificación de áreas prioritarias para conservación y restauración. Adicionalmente, este proyecto contribuye a sentar las bases para la estructuración de un sistema de monitoreo ambiental a futuro que permita identificar trayectorias de cambio de las coberturas de la tierra y analizar el impacto de las políticas nacionales de ordenamiento del territorio sobre el capital natural. Se espera que la construcción del Mapa de Vegetación

del Ecuador apoye a su vez procesos de documentación y reporte respecto del estado de la biodiversidad del Ecuador en el marco de los tratados y convenios internacionales de los cuales el país es miembro activo.

En este contexto, para que el proyecto Mapa de Vegetación se desarrolle con normalidad y llegue a cumplir los objetivos y metas planteadas, es necesario investigar y seleccionar los datos y procesos que lleven a la obtención de productos de calidad, por esto, como miembro del equipo técnico en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y encargado de la identificación, discriminación y delimitación mediante la interpretación y clasificación de las imágenes satelitales de la Provincia de Napo (Zona Piloto), se ha visto la necesidad de desarrollar la metodología en la identificación de ecosistemas en la zona piloto (Provincia de Napo), mediante la investigación de herramientas de análisis digital y de los insumos que ha generado el proyecto hasta la presente fecha.

El proceso que se va a seguir para la identificación de los ecosistemas en la Provincia de Napo (Zona Piloto) es el siguiente: (1) descripción del área de estudio y adquisición de puntos GPS de calibración de imágenes en campo (ver anexo B), (2) análisis y corrección radiométrica y geométrica de las imágenes satelitales disponibles para la zona piloto (sensores Landsat, Aster y Rapideye), (3) Evaluación del software ENVI 4.7 y las herramientas para el tratamiento de imágenes satelitales, (4) Interpretación y clasificación de las imágenes que se encuentran en la zona piloto, a partir de la leyenda de representación cartográfica

de los ecosistemas del Ecuador continental (MAE-2009) (ver anexo A), (5) Exactitud de clasificación, mediante la matriz de confusión y el coeficiente kappa, (6) Unificación y edición de las clasificaciones resultantes a partir de las imágenes satelitales (7) Integración de los insumos ya generados por el proyecto en etapas anteriores, modelo Bioclimático y modelo de Geoformas, (8) Verificación de ecosistemas identificados mediante recolección puntos de verificación GPS de campo planificadas en gabinete (ver anexo B). (9) Versión final del mapa de ecosistemas (ver anexo G).

El proyecto Mapa de Vegetación del Ministerio del Ambiente, cuenta hasta el momento con la leyenda oficial de clasificación de ecosistemas para el Ecuador continental y cuenta también con información bioclimática y de geoformas desarrolladas con apoyo de varias instituciones públicas y privadas; en los párrafos subsiguientes se va a dar una breve introducción de las características de cada uno de los insumos utilizados para una mejor identificación, discriminación y delimitación de los ecosistemas.

La utilidad de un mapa como herramienta para gestión y monitoreo de la biodiversidad a escala de paisaje o región depende en gran medida de cuan adecuadamente se representa la variación de la diversidad biológica a escalas ecosistémicas (MAE, CONDESAN-2010). Un ecosistema, entendido como un grupo de organismos que interactúan entre sí, y con su entorno físico, engloba características fisonómicas y taxonómicas de la vegetación las cuales dictan en gran medida la composición faunística. Adicionalmente, este concepto incluye

aspectos relacionados con la interacción entre los organismos y los factores abióticos como ciclos de materia y nutrientes, y dinámicas sucesionales. En consecuencia, la leyenda de ecosistemas es un elemento clave para caracterizar la biodiversidad y un requisito necesario para mapear sus patrones geográficos de variación (MAE, CONDESAN-2010). Las leyendas utilizadas anteriormente para clasificar y mapear vegetación en el Ecuador funcionan a escalas espaciales gruesas y generalmente tienen una estructura modular (p.e., no jerárquica). Desarrollar un sistema de clasificación estandarizada y jerárquica de ecosistemas impone retos, pero ofrece varias ventajas. En primer lugar, una clasificación estandarizada y jerárquica provee una base consistente para caracterizar los componentes biológicos a través de unidades físicas y administrativas del paisaje. En consecuencia, mejora nuestra habilidad de evaluar el estado de conservación de los ecosistemas, implementar acciones de conservación, y comparar la efectividad de políticas de conservación a escalas de país y regionales. De igual manera, el empleo de unidades consistentes y definibles en el paisaje permite consolidar un sistema de monitoreo más eficiente y medible para evaluar el estado de conservación de la biodiversidad a través del tiempo. Desde una perspectiva científica, contar con una clasificación estandarizada y jerárquica de ecosistemas, tiene el potencial de mejorar nuestro entendimiento acerca de los factores que influyen en la distribución de los ecosistemas, y sus características ecológicas (p.e, biodiversidad) (MAE, CONDESAN-2010). Estos conocimientos ecológicos, ligados a un patrón espacial, son la base para manejar la biodiversidad, predecir los posibles efectos de los cambios globales en la biodiversidad y el funcionamiento ecosistémico, y por lo tanto, en los servicios ambientales que estos prestan a las poblaciones humanas. Consecuentemente,

esta información es básica para el desarrollo de políticas de conservación de la biodiversidad, y el manejo paisajes naturales y productivos a mediano y largo plazo (MAE – CONDESAN, 2010).

Para adoptar un sistema de clasificación que sea aplicable al Ecuador continental se analizaron varios sistemas de clasificación de la vegetación y los conceptos de los ecosistemas. Los criterios principales sobre los cuales se desarrolló el sistema de clasificación son: que sea aplicable al Ecuador continental tomando en cuenta requerimientos y disponibilidad de información, que permita implementar un sistema anidado de factores diagnóstico (o clasificadores) en una estructura jerárquica y que los diferentes niveles y sus factores puedan ser representados espacialmente (MAE – CONDESAN, 2010).

La Bioclimatología se entiende como el estudio de la o las relaciones existentes entre los factores climáticos y la distribución de los seres vivos en la Tierra. Esta disciplina comenzó a estructurarse en base a relacionar los valores numéricos del clima (temperatura y precipitación) con los areales de las plantas y de sus formaciones vegetales, para añadir más adelante información de las biogeocenosis (Rivas-Martínez, 2004).

El conocimiento cada vez más detallado de la distribución de la vegetación sobre la Tierra, así como las modificaciones en el aspecto y composición de la vegetación potencial natural y de sus etapas de sustitución, causadas por factores climáticos, edáficos, geográficos y antrópicos, está permitiendo que cada día



puedan reconocerse con mayor precisión y objetividad las fronteras bioclimáticas y vegetacionales (Rivas-Martínez 2004).

En tal virtud la manera más confiable de identificar de forma cuantitativa la influencia del clima respecto de la vegetación y su distribución, se realiza mediante el cálculo de índices bioclimáticos, los mismos que intentan indicar de forma explícita las distintas relaciones entre las variables climáticas claves a ser consideradas, tales como: la Precipitación y la Temperatura.

De la información recopilada y/o gestionada en el proyecto Mapa de Vegetación sobre esta temática, mediante mecanismos de coordinación previamente establecidos de instituciones públicas se lograron obtener:

- Dos modelos de distribución de precipitación para su análisis, el uno correspondiente al que se encuentra de manera gratuita y se accede a través de la página de internet del worldclim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)). Un segundo modelo de distribución de la precipitación realizado por técnicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Por otra parte del INAMHI se obtuvo además el modelo de precipitación, la información alfanumérica de las estaciones, en las cuales se indican los valores medios anuales correspondientes a cada estación, además de especificar las coordenadas geográficas para su ubicación (MAE, 2010).

La orografía y la geomorfología permiten conocer las características del suelo, subsuelo y relieve; siendo factores determinantes en la distribución de los ecosistemas (MAE, 2010). La tierra sólida constituye la plataforma estable que sirve de sustrato para el mantenimiento de la capa biótica y es modelada por sus relieves. Estas características del paisaje, que incluyen montañas, cordilleras, serranías, llanuras, entre otras; aportan otra dimensión al medio físico y proporcionan hábitats variados para las plantas. A escalas continentales, regionales y de paisaje las formaciones geológicas también influyen en los factores ambientales como la precipitación, temperatura, humedad, protección de disturbios (p.e., viento) o generación de disturbios (p.e., deslaves) que afectan fuertemente en el tipo de organismos que pueden establecerse en una zona dada (MAE, 2010).

En ciertas regiones la forma del terreno tiene especial relevancia en la distribución espacial de los ecosistemas por su influencia en el tipo de agua de inundación y la frecuencia de estas (p.e., zonas pantanosas, bosques inundables). En zonas montañosas el relieve del terreno impide que los ríos tengan áreas de inundación extensas por lo cual los regímenes de inundación tienen una incidencia menor en la distribución de ecosistemas de montaña. Por el contrario, en las tierras bajas como la Amazonía, dominadas por relieves suaves, la capacidad de inundación de los ríos es más amplia y por lo tanto su efecto en la distribución de ecosistemas adquiere una relevancia mayor (Báez C., 2010).

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Identificar ecosistemas en la Provincia de Napo (Zona Piloto), a partir del análisis digital de imágenes satelitales e insumos generados previamente en el proyecto Mapa de Vegetación.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Generar puntos de calibración de imágenes GPS en campo de posibles ecosistemas identificados en gabinete (clasificación supervisada).
- Obtener imágenes satelitales corregidas radiométricamente y geométricamente dentro de la zona Piloto.
- Analizar potencialidades y falencias del software ENVI 4.7 y de sus herramientas para el análisis digital de imágenes.
- Obtener la clasificación supervisada mediante el software ENVI 4.7 de las imágenes satelitales que se encuentran dentro de la zona de estudio.
- Evaluar la exactitud de clasificación de cada una de las imágenes clasificaciones, mediante la matriz de confusión y el coeficiente Kappa.
- Validar información realizada en gabinete con puntos GPS de verificación recolectados mediante inspección terrestre.
- Obtener el mapa digital de los ecosistemas identificados en este estudio.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Los SIG son una clase específica de los Sistemas de Información, donde básicamente el proceso es el mismo de adquisición de datos, procesamiento, análisis, almacenamiento y distribución o resultados; con lo cual se tiene un mejor criterio para la toma de decisiones y gestión. El propósito de la Información Geográfica está en conocer la ubicación sobre un elemento en la superficie de la Tierra, es decir, la información georeferenciada, como se indica en una de sus características Ej.: Multidimensionalidad: mediante dos coordenadas puede definirse cualquier posición(x, y o latitud, longitud). Realizando una reflexión de las dos ideas anteriores, podemos decir que los SIG realizan un proceso de captura de datos, gestión, análisis y visualización de todas las formas de información geográficamente referenciada, dando soluciones o respuestas a las diferentes interrogantes que se plantea, según los requerimientos de los grupos o personas que van a utilizar la información (Longey, P.; Goodchild M.; Maguirre D.; Rhind D., 2001).

### **2.2. TELEDETECCIÓN**

La teledetección o lo que es lo mismo la percepción remota es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores

instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (Chuvieco E., 1996).

Para este estudio en particular se va a definir la Teledetección espacial que es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre o marina y la atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos u objetos (seres vivos, planetas u objetos inanimados) emiten radiación electromagnética. La cantidad y tipo de radiación que emiten depende básicamente de su temperatura. El mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el Sol, y la radiación que refleja la Tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en Teledetección. Otro tipo de emisión puede provenir del mismo sensor, el cual incorpora en su sistema un rayo emisor de radiación (Chuvieco, E., 1996).

### **2.2.1. Imagen Satelital**

Las imágenes son matrices de celdas llamadas píxeles, formadas por un determinado número de filas y columnas. Cada una de esas celdas representa un área geográfica indivisible, determinando así el detalle espacial mínimo que se puede distinguir dentro de la imagen. El tamaño de la superficie que puede ser representada (es decir, el tamaño del píxel), varía dependiendo del satélite y de los sensores que tomen la imagen. Cada píxel contiene un valor numérico, que

representa en promedio la cantidad de energía solar que esa superficie refleja. Como la energía que se refleja depende de lo que haya sobre ella, los sensores ubicados en los satélites captan distintos niveles y calidades de energía, que luego pasan a ser distintos colores en una imagen ya formada (Chuvienco, E., 2011).

Una característica sumamente importante de los sensores de imágenes satelitales es que obtienen información dentro de rangos específicos de longitud de onda dentro del espectro fotomagnético. Esta información es registrada en distintos canales o bandas espectrales. Para visualizar las imágenes satelitales, podemos combinar y visualizar las distintas bandas digitales mediante los tres colores primarios (azul, verde y rojo) que capta el ojo humano. De este modo, es posible visualizar energía de longitudes de onda invisibles al ojo humano, como la luz infrarroja, que puede ser de gran utilidad para estudiar distintos objetos o fenómenos (Canada Center for Remote Sensing, 2002).

## **2.2.2. Principios Básicos para la Percepción Remota**

### **2.2.2.1. El espectro electromagnético**

Los satélites de percepción remota tienen sensores que detectan la luz visible, al igual que las fotos, pero también pueden detectar radiación que los seres humanos no son capaces de ver (por ej. luz infrarroja y las ondas de radar). Todas las imágenes remotas se basan en la medida de la radiación o energía

electromagnética que emite un objeto o material. El espectro electromagnético es un espectro continuo de todos los tipos de radiación electromagnética, ordenados generalmente de acuerdo a su longitud de onda como vemos aquí debajo:

Como podemos ver, la luz visible ocupa una pequeña parte del espectro. Esto otorga una importancia especial a las imágenes remotas que pueden captar otros tipos de energía, ya que amplían así la capacidad de los ojos humanos. De ahí la importancia de entender las propiedades espectrales de los diferentes materiales y objetos de la superficie de la Tierra para poder interpretar y sacar más provecho a las imágenes satelitales (Predium, 2002).

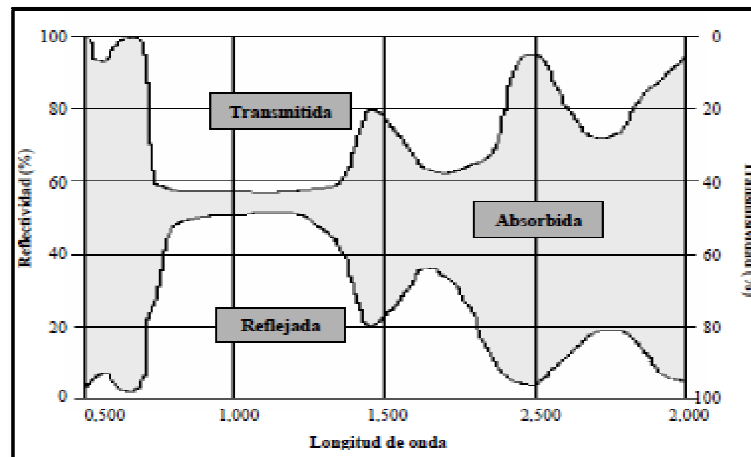
#### **2.2.2.2. Firma espectral**

Todos los materiales u objetos emiten energía en rangos específicos de longitud de onda, que son normalmente conocidos como su espectro o *firma espectral*. Esto nos permite identificar distintos materiales presentes en la superficie terrestre aún a grandes distancias.

##### **2.2.2.2.1. Firma espectral de la vegetación**

La vegetación es un medio complejo que varía con el tiempo y por lo cual las propiedades espectrales cambian según la época del año y las fases de crecimiento. Se han realizado numerosos estudios sobre el comportamiento espectral de la vegetación según distintas escalas que, por orden de complejidad, son hoja, planta y cobertura vegetal.

**A nivel de la hoja:** La Figura 2.1 presenta el comportamiento de los tres mecanismos involucrados entre la radiación y una hoja. En la parte del visible son los pigmentos foliares como la clorofila, los responsables de la alta absorción de la radiación solar, la poca reflectividad en esta parte del espectro y la poca transmitividad, principalmente en el rojo. En la región del infrarrojo cercano (0,7 a 1,5  $\mu\text{m}$ ) se observa una alta reflectividad y transmitividad, producto de la estructura interna de las hojas; especialmente el mesófilo en empalizada. En cuanto al infrarrojo medio (1,5  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ ), la respuesta espectral es gobernada por el contenido de agua, con una absorción máxima a 1,45 y 1,95  $\mu\text{m}$ , lo que genera picos de reflectividad entre 1,65 y 2,20  $\mu\text{m}$ . Estas propiedades varían según la especie, el estado de crecimiento y la geometría de la hoja, también debido a factores externos como estrés, deficiencia en agua, exceso de minerales, época de sequía o infecciones parasitarias.



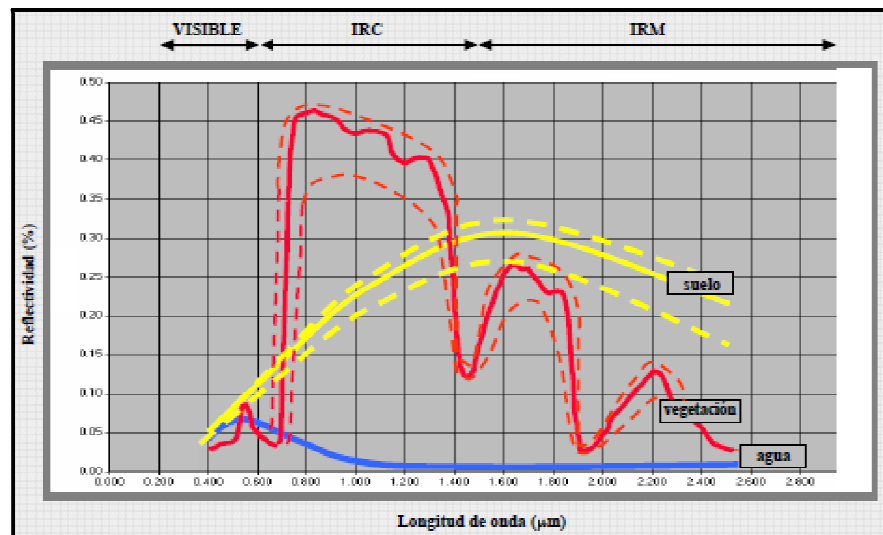
**Figura 2.1.** Propiedades ópticas de una hoja en función de la longitud de onda, (Adaptado de Bonn y Rochon, 1992).

**A nivel de la planta o de una cobertura vegetal:** En estos casos la firma espectral es mucho más compleja porque implica otros elementos tales como



tronco, tallos, así como el sustrato. La situación se complica aún más cuando se consideran variaciones en tamaño, orientación y forma de las hojas, porcentaje de recubrimiento del suelo y reflectividad del mismo, además del estado de madurez, fenología, enfermedad o estrés de las plantas. La energía detectada por el sensor remoto es la suma de cada uno de estos componentes, lo cual modifica considerablemente la firma espectral, dificultando la interpretación.

En la realidad, las situaciones complejas y variables en las cuales se encuentra la vegetación son tales que provocan que las firmas espectrales se presenten más en forma de ramo, tal como lo ilustra la figura 2.2., esta situación trae como consecuencia la disminución de la nitidez entre las firmas espectrales de las distintas coberturas y la complicación en la interpretación. Es preciso destacar que esta aclaración es aplicable a todas las coberturas.



**Figura 2.2.** Firmas espectrales reales (Adaptado de Bonn y Rochon, 1992)

## 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES A UTILIZAR

### 2.3.1. Metadatos de Imágenes

Los metadatos son datos sobre los datos, es decir, información sobre la información misma. En esencia, los metadatos geográficos intentan responder a las preguntas quién, qué, cuándo, cómo, dónde y porqué, sobre cada una de las características relativas a los datos que se documentan. Los metadatos geográficos permiten a un productor de información espacial describir totalmente los datos geográficos de manera que los usuarios puedan entender las presunciones y limitaciones y puedan evaluar la aplicabilidad de los datos para el uso específico de su interés. En los metadatos se indica el nivel de procesamiento de las imágenes.

#### 2.3.1.1. Nivel de procesamiento de imágenes

Esta opción está en función del nivel de corrección geométrica de la imagen que se desea:

- ***Nivel 1A***

Corrección radiométrica de las distorsiones debidas a las desviaciones de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de toma de imágenes. Destinado a los usuarios de deseosos de efectuar por si mismo los procesamientos geométricos de la imagen.

- **Nivel 1B**

Corrección radiométrica idéntica al nivel 1A, corrección geométrica de los efectos sistemáticos (efecto panorámico, curvatura y rotación de la tierra). Las distorsiones internas de la imagen son corregidas, lo que permite las mediciones de distancia, de ángulos y de superficie. Producto privilegiado para la fotointerpretación y los estudios temáticos.

- **Nivel 2A**

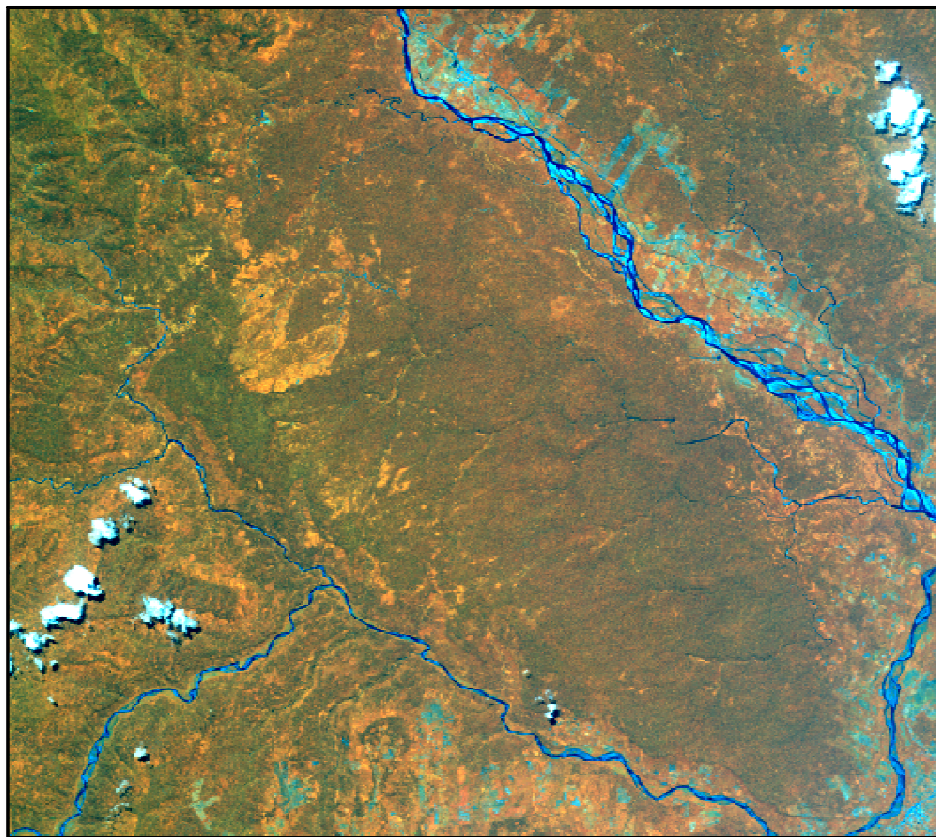
Corrección radiométrica idéntica a la del nivel 1 A, corrección geométrica efectuado dentro de la proyección cartográfica estándar (UTM WG5 84 por defecto) sin toma de punto de apoyo. Permite combinar, teniendo en cuenta la eventual diferencia en localización, la imagen con informaciones geográficas de diferentes tipos (vectores, mapas raster y otras imágenes satelitales)

### **2.3.2. Sensor Rapideye**

Esta constelación alemana de cinco (5) satélites idénticos ofrece una capacidad de revisita inigualable para la rápida captura de imágenes de programación o para estudios de monitoreo (multitemporales). En la tabla a continuación se presentan las principales características del producto estándar, que ya viene ortorectificado y listo para ser incorporado en un sistema de información Geográfica (SIG) (Cartografía, 2010).

Bandas espectrales	Azul	0,440 - 0,510 $\mu\text{m}$
	Verde	0,520 - 0,590 $\mu\text{m}$
	Rojo	0,630 - 0,685 $\mu\text{m}$
	Borde rojo	0,690 - 0,730 $\mu\text{m}$
	Infrarrojo cercano	0,760 - 0,850 $\mu\text{m}$
Distancia de muestreo sobre el terreno (nadir)	6,5 m	
tamaño del pixel (ortorectificado)	5 m	
Ancho de observación	77 km	
Tiempo de revisita	Diario	
Hora de cruce por el ecuador	11:00 a.m (aproximadamente)	
Capacidad de adquisición de imágenes	4 millones de $\text{Km}^2$ a diario	

**Tabla 2.1.** Ficha Técnica de Imagen Rapideye.



**Figura 2.3.** Imagen Rapideye (fecha de toma: 03-Dec-2010 11:22:31), Fuente: Ministerio del Ambiente.

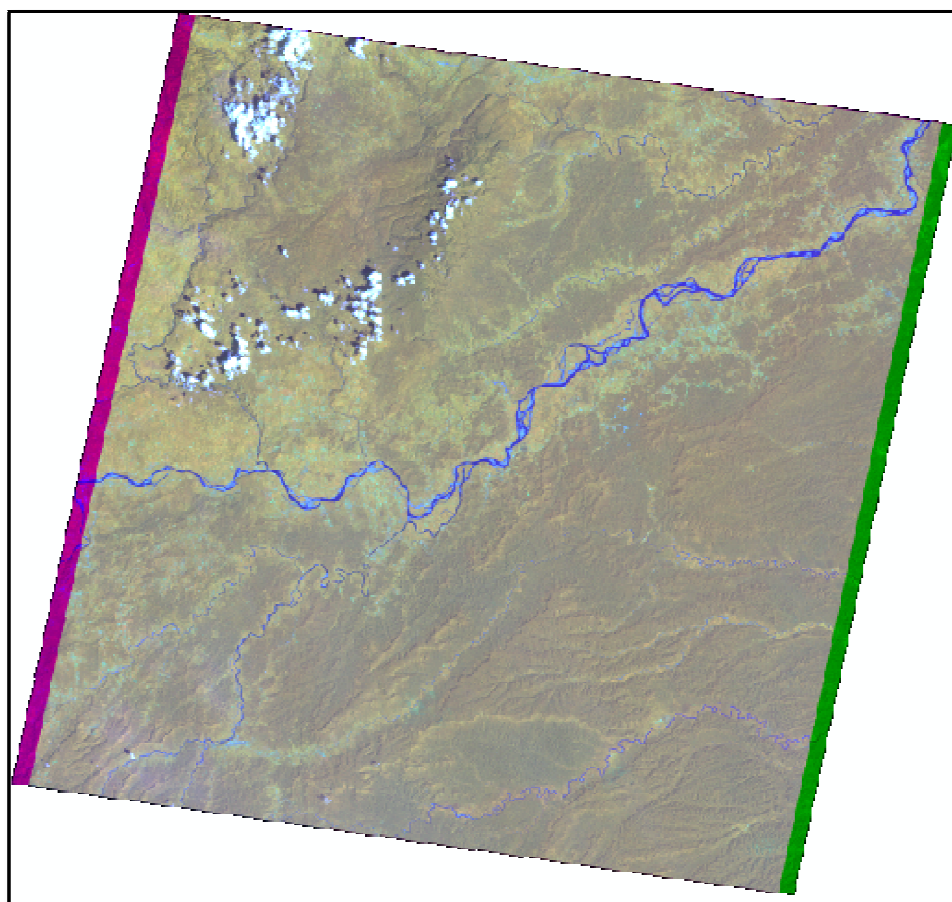
### 2.3.3. Sensor Aster

ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. En 1999 el instrumento se lanzó a bordo del satélite TERRA de la NASA. El objetivo principal de la misión ASTER es mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la tierra y en la atmósfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmósfera.

ASTER presenta una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 Km. ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (ERSDAC, 2001). ASTER también presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos (Remote Sensing Geoimage SAC, 2011).

ASTER	VNIR	1	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	15 m	8 bits
		2	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$		
		3N	0.78 - 0.86 $\mu\text{m}$		
		3B	0.78 - 0.86 $\mu\text{m}$		
	SWIR	4	1.600 - 1.700 $\mu\text{m}$	30 m	8 bits
		5	2.145 - 2.185 $\mu\text{m}$		
		6	2.185 - 2.225 $\mu\text{m}$		
		7	2.235 - 2.285 $\mu\text{m}$		
		8	2.295 - 2.365 $\mu\text{m}$		
		9	2.360 - 2.430 $\mu\text{m}$		
	TIR	10	8.125 - 8.475 $\mu\text{m}$	90 m	12 bits
		11	8.475 - 8.825 $\mu\text{m}$		
		12	8.925 - 9.275 $\mu\text{m}$		
		13	10.25 - 10.95 $\mu\text{m}$		
14		10.95 - 11.65 $\mu\text{m}$			

**Tabla 2.2.** Ficha técnica de imagen Aster



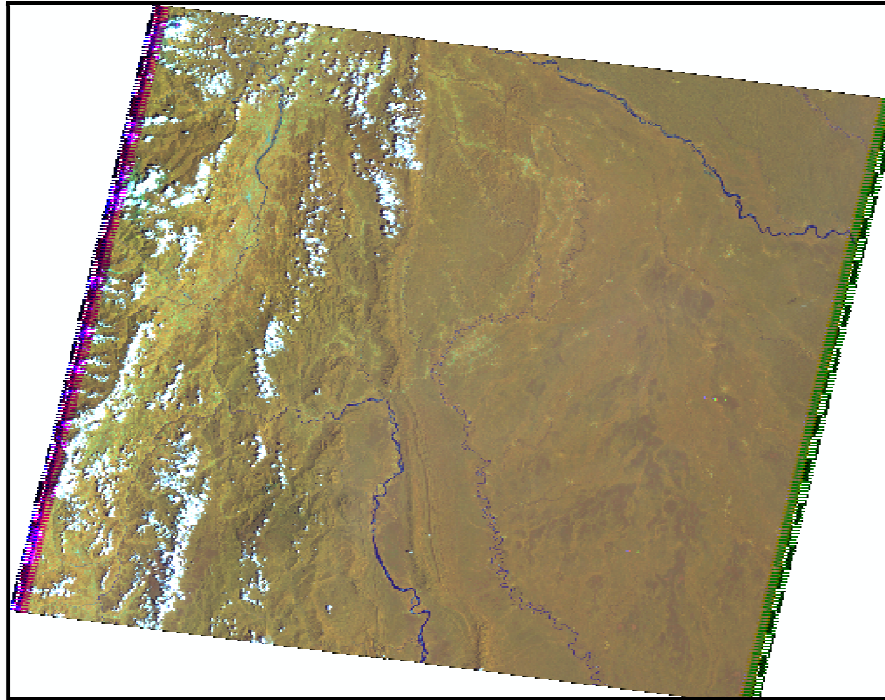
**Figura 2.4.** Imagen Aster (2008-05-18). Fuente: Ministerio del Ambiente.

### 2.3.4. Sensor Landsat

Los Landsat son una serie de satélites construidos y puestos en órbita por EEUU para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Orbitan alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2° respecto del Ecuador y un período de 99 minutos. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador lo hacen de Norte a Sur entre las 10:00 y las 10:15 de la mañana hora local. Los LandSat están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multispectral (Image Group y Spot Image, 2009).

Sensor	Subsistema	Banda No.	Rango Espectral $\mu\text{m}$ (micrometro)	Resolución Especial	Resolución Radiométrica
TM	VNIR	1	0.45-0.52 $\mu\text{m}$	30 m	8 bits
		2	0.53-0.60 $\mu\text{m}$		
		3	0.63-0.69 $\mu\text{m}$		
		4	0.76-0.90 $\mu\text{m}$		
	SWIR	5	1.55-1.75 $\mu\text{m}$	30 m	8 bits
		7	2.08-2.35 $\mu\text{m}$		
	TIR	6	10.4-12.5 $\mu\text{m}$	120 m	8 bits

**Tabla 2.3.** Ficha técnica de imagen Landsat Fuente: Image Group y Spot Image .



**Figura 2.5.** Imagen Landsat 2007. Fuente: Ministerio del Ambiente.

## **2.4. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE ENVI 4.7**

ENVI es un moderno sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar un análisis multispectral de datos obtenidos por teledetección mediante el uso de fotografía aérea y de imágenes satelitales. Proporciona un entorno potente, novedoso y de fácil uso para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas con su procesamiento de imágenes, basado en ficheros y bandas, además permite trabajar con ficheros de imágenes enteros, bandas individuales, o ambas.

Cuando se abre un fichero de entrada, cada banda espectral está disponible para todas las funciones del sistema. Con múltiples ficheros de entrada abiertos, este



puede fácilmente seleccionar bandas de diferentes ficheros para procesarlas juntas. ENVI también incluye herramientas para extraer espectros, usar librerías espectrales o para analizar conjuntos de imágenes de alta resolución espectral como AVIRIS, GERIS y GEOSCAN. ENVI está completamente escrito en IDL (Interactive Data Language), Lenguaje de Datos Interactivo IDL es un potente lenguaje de programación estructurado, basado en matrices, que proporciona un procesamiento de imágenes integrado, con grandes capacidades de visualización y herramientas GUI (interfaz gráfica de usuario) fáciles de usar. Se requiere IDL para ejecutar ENVI y ENVI recibe gran parte de su flexibilidad de la potencia de IDL (INNOVA CAD VISION -2001).

Las áreas de entrenamiento o muestras espectrales en ENVI llamadas ROI son áreas de interés que el usuario define para procesos de extracción de estadísticas de la imagen o para operaciones como clasificación y crear máscaras que pueden ser usadas para recortar zonas dentro de una imagen.

Para esta investigación en la discriminación de ecosistemas se realiza una selección tomando como referencia su reflectancia espectral, pueden ser creados uno o varios ROIs para cada categoría de ecosistemas, sea tipo de formación vegetal o cualquier otro tipo de cobertura que se presente en la imagen, tomando en consideración el aspecto topográfico y la propia distribución espacial con el fin de agrupar aquellos grupos que tienen semejanzas entre ellos desde el punto de vista espectral, aunque es conocido que hay varios factores que influyen en la reflectancia final detectada tales como la topografía, la asociación con otras coberturas, el ángulo solar, etc.

### 2.4.1. Clasificación supervisada en ENVI 4.7.

Se parte de un conjunto de clases conocido a priori. Estas clases deben caracterizarse en función del conjunto de variables mediante la medición de las mismas en individuos cuya pertenencia a una de las clases no presente dudas (áreas de entrenamiento) (Universidad de Murcia, 2003).

Para ejecutar una clasificación supervisada el investigador o usuario debe poseer conocimiento previo de la zona de interés o por medio de trabajo de campo que le permita delimitar zonas representativas de los usos o coberturas que quiere abstraer, comúnmente llamado "sitios de entrenamiento".

A partir de esos sitios de entrenamiento (ROIs) en la imagen se está obteniendo los niveles digitales que le corresponde a cada clase.

Para ejecutar una clasificación supervisada, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Selección de áreas de entrenamiento.
- Calculo de parámetros estadísticos
- Análisis de las muestras
- Clasificación

Selección de entrenamiento	Se identifica y delimita el o las áreas (polígonos, líneas, etc.) que se consideran representativas de las distintas clases o tipos de respuesta de interés.
Cálculo de parámetros	Se calculan los parámetros que

estadísticos	caracterizan la distribución de los datos espectrales de las “áreas muestras” escogidas: la media y el desvío.
Análisis de las muestras	Se analizan los datos de las muestras evaluándose la precisión de “clasificador” generado mediante una clasificación de las “áreas muestras” con los valores en ella calculados. Se obtiene una matriz que proporciona una medida de priori de los aciertos y errores que resultaran del proceso.
Clasificación	Se clasifica o categoriza el área de interés utilizando la combinación de muestras que resultó más favorable según los objetivos buscados.

**Tabla 2.4.** Proceso de clasificación supervisada en ENVI 4.7

#### **2.4.1.1. Métodos de clasificación supervisada**

Los siguientes métodos se describen en la Guía del usuario de ENVI. Estos fueron desarrollados específicamente para su uso en los datos hiperespectrales, pero proporcionan un método alternativo para la clasificación de los datos multiespectrales, a menudo con mejores resultados que fácilmente se puede comparar a las propiedades espectrales de los materiales.

#### **2.4.1.1.1. Clasificación por el método de Recolección de Spectra endmember**

La Colección endmember: diálogo paralelo es una forma estandarizada de recolección de espectros para clasificación supervisada a partir de archivos ASCII, regiones de interés, bibliotecas espectrales, y los archivos de estadísticas.

#### **2.4.1.1.2. Clasificación por el método de codificación binaria**

La técnica de codificación binaria de clasificación codifica los datos y endmember espectros en ceros y unos, en función de si una banda está por debajo o por encima de la gama media. Una función OR exclusiva compara cada espectro de referencia codificados con los espectros de datos codificados, y ENVI produce una imagen de clasificación. Todos los píxeles se clasifican en el endmember con el mayor número de bandas que contienen menos que el usuario especifica un umbral mínimo de coincidencia, en el que caso de que algunos píxeles pueden ser clasificados si no cumplen los criterios.

#### **2.4.1.1.3. Clasificación por el método del paralelepípedo**

Paralelepípedo clasificación utiliza una regla de decisión simple de clasificar los datos multispectrales. Las fronteras de decisión forman una clasificación paralelepípedo n-dimensional en el espacio de datos de imagen. Las dimensiones

del paralelepípedo de la clasificación se definen en base a un umbral de la desviación estándar de la media de cada clase seleccionada. Si un valor de píxel está por encima del umbral bajo y por debajo del umbral elevado para todas las bandas en la clasificación, se le asigna a esa clase. Si el valor del píxel cae en múltiples clases, ENVI asigna el píxel a la última clase emparejado. Las áreas que no pertenezca a ninguna de las clasificaciones paralelepípedo son designados como no clasificados.

#### **2.4.1.1.4. Clasificación por el método mínima distancia**

La clasificación se utiliza la distancia mínima vectores de medias de cada retorno de la inversión y calcula la distancia euclidiana de cada píxel desconocido para el vector de medias para cada clase. Todos los píxeles se clasifican a la clase más cercano retorno de la inversión a menos que el usuario especifica la desviación estándar o los umbrales de distancia, en el que caso de que algunos píxeles pueden ser clasificados si no cumplen con los criterios seleccionados.

#### **2.4.1.1.5. Clasificación por el método de Mahalanobis**

La clasificación de Mahalanobis a distancia es un clasificador de dirección sensible a distancia que utiliza las estadísticas para cada clase. Es similar a la clasificación de máxima verosimilitud, pero asume toda clase de covarianzas son iguales y por lo tanto es uno más rápido.

#### **2.4.1.1.6. Clasificación por el método de máxima verosimilitud**

Clasificación de máxima probabilidad asume que las estadísticas de cada clase en cada banda tienen una distribución normal y calcula la probabilidad de que un píxel dado, pertenece a una clase específica. A menos que un umbral de probabilidad está seleccionado, todos los píxeles se clasifican. Cada píxel se le asigna a la clase que tiene la probabilidad más alta (es decir, el riesgo máximo).

#### **2.4.1.1.7. Clasificación por el método espectral Mapper Angulo**

El ángulo espectral Mapper (SAM) es una clasificación espectral basada en la física que utiliza un ángulo de n-dimensional para que coincida con píxeles de espectros de referencia. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos espectros, calculando el ángulo entre los espectros, tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. SAM compara el ángulo entre el vector del espectro endmember y cada píxel en el espacio vectorial n-dimensional. Pequeños ángulos representan más coincidencias con el espectro de referencia. Los píxeles más lejos que el umbral máximo ángulo especificado en radianes no están clasificados.

#### **2.4.1.1.8. Clasificación por el método de Divergencia de información espectral (SID).**

Es un método de clasificación espectral que utiliza una medida de divergencia para que coincida con píxeles de espectros de referencia. Cuanto menor sea la divergencia, es más probable que los píxeles son similares. Los píxeles con una medida mayor que el umbral máximo especificado divergencia no se clasifican. Espectros endmember utilizado por SID puede venir de ficheros ASCII o bibliotecas espectrales, o puede extraer directamente de una imagen (ROI como espectros promedio).

#### **2.4.1.1.9. Clasificación por el método de codificación binaria**

Codifica los datos y los espectros endmember en ceros y unos, en función de si una banda está por debajo o por encima de la media del espectro, respectivamente. Una función OR exclusiva compara cada espectro de referencia codificada con los espectros de datos codificados y produce una imagen de clasificación. Todos los píxeles se clasifican para la endmember con el mayor número de bandas que responden, a menos que se especifique un umbral mínimo de coincidencia, en cuyo caso algunos píxeles pueden ser no clasificados si no cumplen con los criterios.

### **2.4.1.2. Métodos de Post Procesamiento de Clasificación que ofrece ENVI 4.7**

Después de clasificar una imagen se requiere un post-procesamiento para evaluar la precisión de clasificación y generalizar las clases para la exportación de imágenes de mapas y SIG vectorial. Clasificación de Puestos se puede utilizar para clasificar imágenes regla; para calcular las estadísticas de clase y las matrices de confusión; aplicar la mayoría o minoría de análisis a las imágenes de clasificación; se agrupan, criba, y combinan las clases, para las clases de superposición en una imagen; imágenes para calcular la zona de amortiguamiento; para calcular las imágenes de segmentación y clases de salida a las capas vectoriales. ENVI proporciona una serie de herramientas para satisfacer estos requisitos.

#### **2.4.1.2.1. Extracción de Estadísticas de clase**

Esta función le permite extraer datos de la imagen que se utiliza para producir la clasificación. Estadísticas separadas consistente de las estadísticas básicas, histogramas, y el espectro promedio se calculan para cada clase seleccionada.



#### **2.4.1.2.2. Generación de una matriz de confusión**

ENVI, la función de los oficiales administrativos matriz de confusión permite la comparación de dos imágenes clasificadas (la clasificación y la verdadera imagen), o una imagen clasificada y regiones de interés. La imagen de la verdad puede ser otra imagen clasificada, o una imagen creada a partir de mediciones reales de tierra la verdad.

#### **2.4.1.2.3. Agrupamiento y tamizado**

Macizo y el tamiz se utilizan para generalizar las imágenes de clasificación. Tamizar normalmente se ejecuta primero para eliminar los píxeles aislados sobre la base de un tamaño (número de píxeles) umbral, entonces se ejecuta grupo para agregar la coherencia espacial a las clases existentes mediante la combinación de áreas adyacentes clasificados similares.

#### **2.4.1.2.4. Combinación de clases**

La funcionalidad se combinan las clases proporciona un método alternativo para la generalización de clasificación. Clases similares se pueden combinar para formar una o más clases generalizada. La superposición de las clases de superposición le permite colocar los elementos clave de una imagen clasificada como una capa de color en una escala de grises o la imagen RGB.

Además de los métodos anteriores para trabajar con datos clasificados, ENVI proporciona también una herramienta de clasificación de superposición interactiva. Esta herramienta le permite cambiar de forma interactiva las clases y bajar las sobreimpresiones en una imagen en pantalla, para editar las clases, obtener estadísticas de la clase, se fusionan las clases, y editar los colores de clase.

### 2.4.1.3. ENVI ZOOM

ENVI Zoom intenta mostrar de forma automática una imagen de color verdadero o escala de grises sobre la base del tipo de archivo, abrir un archivo en ENVI Zoom, un nuevo elemento se agrega a la parte superior del árbol Data Manager. Puede abrir múltiples archivos en un ENVI Zoom período de sesiones, y se puede elegir cuál de esos archivos para mostrar y cómo mostrarlas usando el Administrador de Datos.

<b>Herramientas de ENVI ZOOM</b>	<b>Descripción</b>
Ocultar Capas	Por defecto, todas las capas en el Administrador de la capa se muestran en la ventana de la imagen. Usted puede ocultar temporalmente la presentación de una capa de modo que usted puede trabajar con otras capas en la ventana de la imagen.
Exploración de la interfaz de ENVI Zoom	La interfaz de ENVI Zoom incluye una barra de menús, barras de herramientas, barras de categoría, y una barra de estado. Gran parte de la ENVI Zoom interfaz es personalizable y ofrece opciones para hacer uso de varios monitores.
Trabajar con la ventana Overview	La ventana de vista general proporciona una vista de toda la extensión de las capas de carga en la ventana de la imagen. Cada vez que mostrar una nueva capa, la ventana se cambia el tamaño general que abarca los grados de todas las capas en la ventana de la imagen.

Realización RX de detección de anomalías	RX Anomalía de procesamiento de detección utiliza el algoritmo de Reed-Xiaoli detector para detectar las diferencias espectrales y de color entre una región y para poner a prueba sus píxeles vecinos o el conjunto de datos. Este algoritmo extractos de los objetivos que se espectralmente distinta de la imagen de fondo. Los resultados de los análisis RXD son inequívocas y han demostrado ser muy eficaces para detectar sutiles características espectrales.
Fijación del Portal de las Imágenes	Puede adjuntar (o pines) el Portal de la imagen para que los movimientos del portal con los datos (vicepresidente el movimiento y la panorámica con él la imagen como lo hizo en el último ejercicio). De esta manera, cuando te desplazas en la imagen, el Portal se mantiene fijo en su posición original relativa a los datos.
Trabajar con Blend, Flicker, y Pase	ENVI Zoom proporciona herramientas que ayudan a comparar dos capas diferentes. Usted puede utilizar estas herramientas para la comparación de todas imágenes o los puede utilizar en el interior de un Portal. Estas herramientas se activan sólo cuando haya dos o más capas abierto en el administrador de capas, y cuando se muestre al menos una capa en la ventana de la imagen. Para obtener una óptima viendo al uso de estas herramientas, se recomienda que no utilice el control deslizante mejora la transparencia.
Mezcla	La mezcla le permite gradualmente la transición de una imagen a otra, aumentando la transparencia de una imagen.
Al pasar	Al pasar le permite espacialmente transición de una imagen a otra mediante una línea vertical que divide que se mueve entre dos las imágenes.
Chipping y Ahorro	En este paso, utilizará chips de pantalla para tomar una captura de pantalla del contenido de la ventana de la imagen, y ahorrar la imagen. Cualquier mejora, hacer zoom, rotar, o portales que se muestran en la ventana de imagen se quemó en el salida de la imagen. ENVI Zoom crea un 8-bits, la imagen de tres bandas con una resolución de pantalla.
Trabajar con capas	Puede cargar múltiples capas en ENVI Zoom en una vez y gestionar esas capas utilizando el administrador de capas.
Reordenar las capas	Usted puede controlar el orden de capas en la imagen general y ventanas por arrastrar y soltar en el árbol de capas del Administrador de capas o utilizando el menú opciones (que va a utilizar en un ejercicio posterior).

**Tabla 2.5.** Herramientas de ENVI ZOOM 4.7

## **2.5. EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN**

La exactitud puede medirse con el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y sus ubicaciones correctas según datos de tierra recolectados por el usuario y considerados como datos de referencia para las áreas de entrenamiento. Este procedimiento constituye en realidad sólo una evaluación de la calidad de selección de las áreas de entrenamiento.

### **2.5.1. Matriz de Confusión**

Para completar satisfactoriamente esta investigación se ha estimado la exactitud de la clasificación mediante la matriz de confusión, pues, ninguna clasificación puede considerarse completa hasta que su grado de exactitud sea evaluado.

La matriz de confusión, también llamada matriz de error o de contingencia es una matriz cuadrada de  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de clases. En una matriz de confusión las columnas corresponden a los datos de referencia, mientras que las filas corresponden a las asignaciones del clasificador. Esta matriz muestra la relación entre dos series de medidas correspondientes al área en estudio, la primera serie corresponde a datos de referencia adquiridos, para esta investigación se han incorporado observaciones de campo con toma de puntos GPS, insumos detallados anteriormente y otros estudios similares. La segunda corresponde a la categorización de los píxeles realizada para las clases de interés.

### 2.5.2. Coeficiente kappa (k)

Este es un índice estadístico mide la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un clasificador automático y la chance de lograr una clasificación correcta con un clasificador aleatorio.

La definición conceptual del coeficiente kappa es la siguiente:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde  $P_o$  es la proporción de concordancia observada (en tanto por 1) y  $P_e$  es la proporción de concordancia esperada por puro azar. En caso de acuerdo perfecto la proporción de concordancia será 1, por lo que  $1 - P_e$  representa el margen de acuerdo posible no atribuible al azar. De ese margen nosotros observamos probablemente sólo una parte  $P_o - P_e$ , salvo que haya acuerdo perfecto  $P_o = 1$ .

Así pues en caso de concordancia perfecta el valor de kappa es 1; si la concordancia observada es igual a la esperada kappa vale 0; y en el caso de que el acuerdo observado sea inferior al esperado el índice kappa es menor que cero.

Para calcular  $P_e$ , la concordancia esperada, se suma las multiplicaciones de cada una de las filas y columnas totales de su correspondiente (p.e. fila 1 total multiplicado con la columna 1 total), y este producto dividido para el número total de pixeles correctamente clasificados al cuadrado; esto será entonces el producto de las dos probabilidades (sucesos independientes), esto es:

$$P_e = \frac{f_1 \cdot c_1 + f_2 \cdot c_2}{n^2}$$

Landis y Koch propusieron unos márgenes para valorar el grado de acuerdo en función del índice kappa:

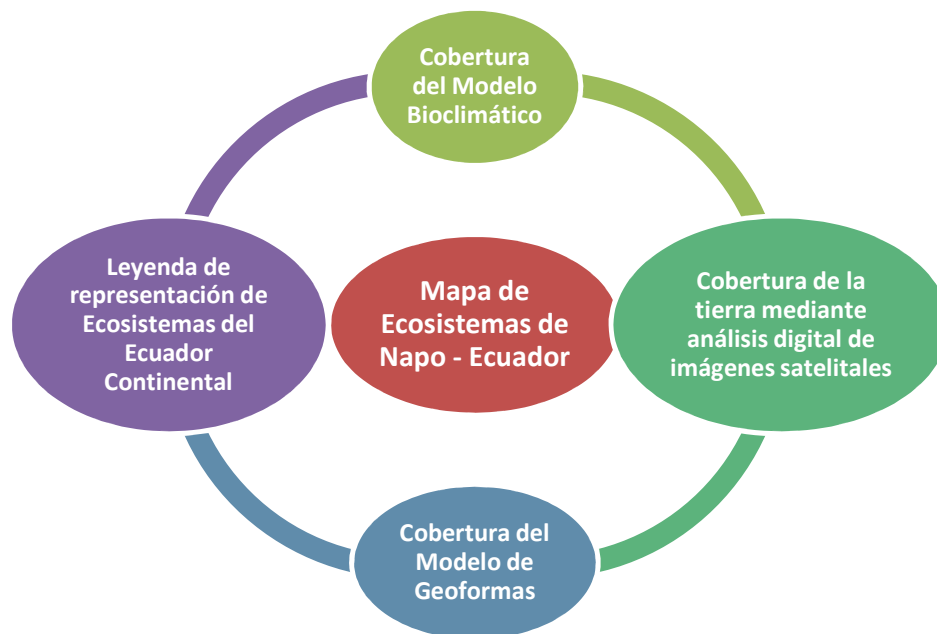
Kappa	Grado de acuerdo
<0	Sin acuerdo
0-0.2	insignificante
0.2-0.4	bajo
0.4-0.6	moderado
0.6-0.8	bueno
0.8-1	Muy bueno

**Tabla 2.6.** Grado de Acuerdo de Landis y Koch.

### 3. METODOLOGÍA Y DATOS

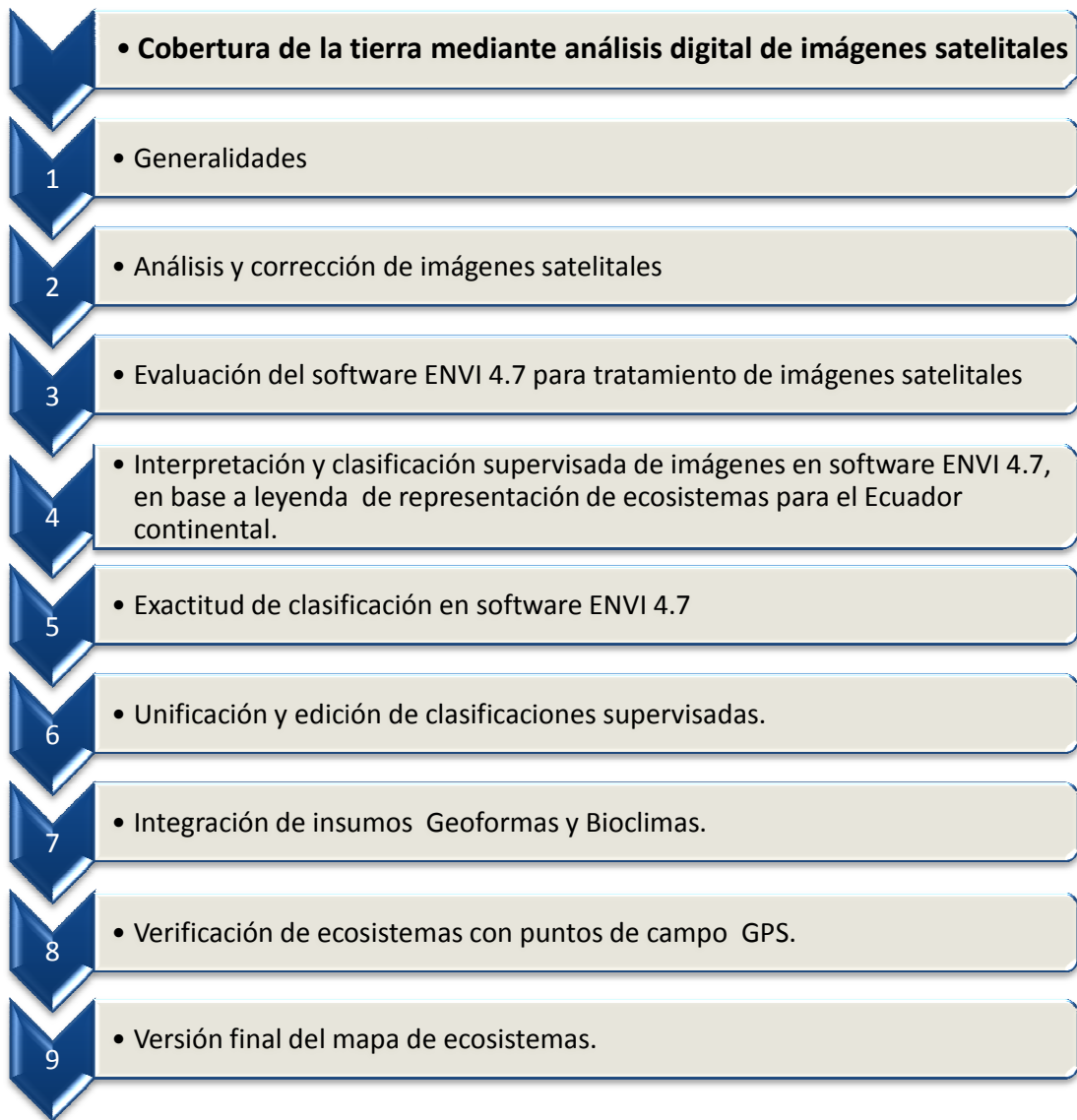
En el desarrollo de este capítulo vamos a ver los diferentes datos y procesos para llegar a conformar el mapa de ecosistemas para la provincia de Napo (Zona Piloto), esta metodología presenta cuatro componentes principales, la leyenda de representación de ecosistemas para el Ecuador continental (MAE-CONDESAN, 2010), la cobertura de la superficie de la tierra mediante procesamiento de imágenes satelitales, la cobertura del modelo de Bioclima (MAE, 2010) y la cobertura del modelo de Geoformas (MAE, 2010); la combinación de estos cuatro componentes permiten que la identificación de los ecosistemas tengan una

precisión acorde a los objetivos trazados. La leyenda de representación de ecosistemas del Ecuador continental, junto con la capa de la superficie de la tierra mediante procesamiento de imágenes satelitales, son los insumos de mayor peso para esta metodología, pues la conformación de éstos permite tener ya una primera versión de los tipos de ecosistemas generados con los procesos de clasificación supervisada en las imágenes en base a la leyenda. Los modelos bioclimático y de geoformas van a dar una mejor precisión en la delimitación y definición de los ecosistemas, también ayudarán a identificar ecosistemas que por definiciones de leyenda se encuentren en zonas que no es posible detectar con las imágenes satelitales.



**Figura 3.1.** Esquema de los componentes de mapa de ecosistemas para la provincia de Napo.

En la figura 3.2 se detalla la metodología que se utilizará en el desarrollo del análisis digital de las imágenes satelitales (sensores Landsat, Aster y Rapideye).



**Figura 3.2.** Metodología análisis digital de imágenes



### 3.1. GENERALIDADES

#### 3.1.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio para el desarrollo de la presente tesis de maestría comprende la Provincia de Napo situada al nor-orienté del Ecuador y se determinó como zona piloto por la disponibilidad de imágenes que hasta la fecha se tiene, la extensión del área de estudio es de 12.543 km<sup>2</sup> (ver figura 3.1).

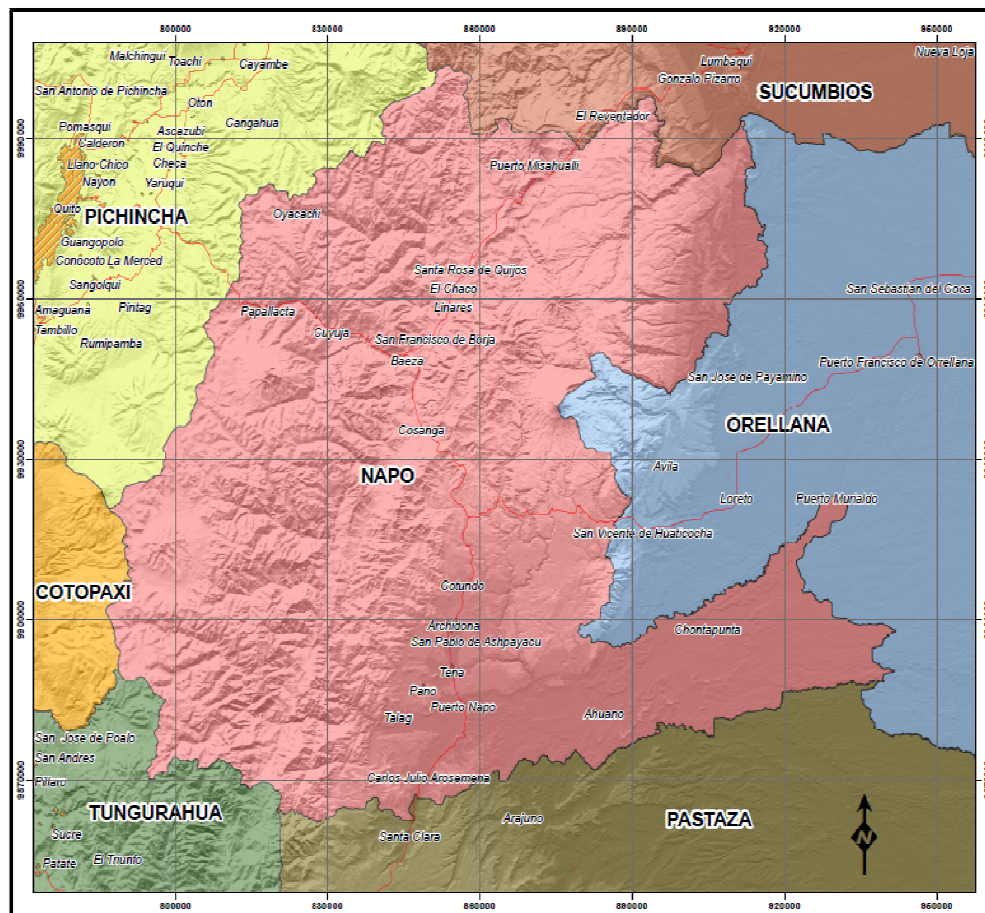


Figura 3.3. Área de Estudio

Las coordenadas de los puntos extremos donde se extiende el área de estudio se describen en la tabla 3.1 y se encuentran en proyección UTM con DATUM WGS84 Zona 18 norte.

Ubicación	ESTE	NORTE
Extremo Norte	853711	10002983
Extremo Este	942046	9898085
Extremo Sur	846810	9862199
Extremo Oeste	786425	9920859

**Tabla 3.1.** Coordenadas de los puntos extremos del Área de Estudio

La provincia de Napo es una de las provincias del Ecuador, se halla en la región amazónica ecuatoriana, incluyendo parte de las laderas de los Andes, hasta las llanuras amazónicas. Toma su nombre del río Napo. Su capital es la ciudad de Tena. Limita al norte con Sucumbíos, al sur con Pastaza, al oeste con Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua y al este con la Provincia de Orellana.

La provincia está compuesta por cinco cantones, cinco parroquias urbanas y diecinueve parroquias rurales.

Cantón	Población	Área(km <sup>2</sup> )	Capital
Archidona	18.551	3.029	Archidona
Carlos Julio Arosemena Tola	2.943	501	Carlos julio Arosemena
El Chaco	6.133	3.473	El Chaco
Quijos	5.505	1.577	Baeza
Tena	46.007	3.904	Tena

**Tabla 3.2.** División administrativa de la Provincia de Napo.

Según el censo 2010 de población y vivienda se ha confirmado que existen 104.047 habitantes, esta cifra se ha incrementado en un 26,57% en comparación al censo del año 2001(82.206). La población vive en su mayoría en sectores rurales, y solo cerca del 20% de la población habita en sectores urbanos. La población de la provincia ha aumentado debido en buena parte al desarrollo de la explotación de hidrocarburos (INEC, 2010).

### 3.1.2. Descripción del software, hardware y datos a utilizar.

Los software SIG y hardware que se utiliza en la investigación se detallan en las siguientes tablas:

Software	Descripción	Versión
ERDAS IMAGINE	ERDAS Imagine es el software geoespacial de creación estándar de la industria, centrado en procesamiento de imagen, teledetección y GIS	9.3

	raster (ERDAS SOFTWARE IMAGE, 2011).	
ENVI	ENVI, Entorno para Visualización de Imágenes (Environment for Visualizing Images), es un moderno sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral de los datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites (TELEDETE, 2011).	4.7
ARCGIS	Es un software GIS para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, estos corresponden a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales; regiones y cualquier tipo de ubicaciones en terrenos determinados (ESRI, 2011).	9.3
PATHFINDER	Software de procesamiento de datos GPS. Soporta todos los aspectos de recolección de datos GIS y mantenimiento de información para sistemas Trimble Pathfinder y GeoExplorer. Este software añade valor a su base de datos GIS, al habilitar la pre-planeación de sesiones de acopio, logrando que el trabajo en campo sea más productivo (PHATFINDER, 2011).	4.0

**Tabla 3.3.** Descripción de Software utilizados en la investigación

Hardware	Descripción
Estación de Trabajo	<p>Procesador: Intel® Core™ i7 CPU 870 @ 2.93 GHz.</p> <p>Memoria instalada (RAM): 4GB.</p> <p>Tipo de Sistema: Sistema Operativo de 64 bits.</p> <p>Monitor HP de 19 pulgadas.</p>
GPS Trimble NOMAD	<p>Trimble Nomad® facilita la captura, almacenamiento y transmisión de datos gracias a la gran variedad de funciones integradas que tiene. Elije las funciones que se adaptan a sus necesidades. Podrá calcular su ubicación con el receptor de Pantalla táctil visible a la luz solar.</p> <p>GPS integrado para las aplicaciones de navegación, hacer un seguimiento rápido de los bienes de equipo/recursos con el escáner láser de código de barras integrado, mantenerse conectado en el campo con el sistema GSM WWAN Noma X, capturar imágenes en color geo etiquetadas o aumentar sus prestaciones mediante un accesorio de tarjeta compacta Flash.</p>

	<p>Cumple con la norma MIL- STD-810F lo que mejora la fiabilidad de la solución</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta caídas y vibraciones.</li> <li>• A prueba de polvo.</li> <li>• Sellado que permite soportar inmersiones en agua de hasta 1 metro de profundidad durante 30 minutos.</li> <li>• Ligero (aprox. 589,6 gramos incluyendo la batería)Batería recargable en caliente de li-ion de 15 horas</li> </ul> <p>Software Windows Mobile 6.1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plataforma de desarrollo estándar</li> <li>• Facilita la gestión de información</li> <li>• La mejor plataforma para fines comerciales</li> </ul> <p>Procesador de 806 MHz, 128 MB de SDRAM, y de 512 MB a 2 GB de memoria Flash no volátil</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uno de los procesadores más rápidos del mercado de dispositivos Windows Mobile.</li> <li>• Al carecer de piezas móviles ofrece un sólido rendimiento en condiciones de temperatura y vibración extremas</li> </ul> <p>Funciones de conexión inalámbrica integradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• GPS, Si-Fi con extensiones Cisco, Bluetooth</li> <li>• Fácil conexión a otros dispositivos, redes e Internet</li> <li>• Optimiza las aplicaciones basadas en localización, mejorando la productividad y reduciendo costes</li> <li>• No se necesitan accesorios ni codificación (TRIMBLE, 2011):</li> </ul>
--	--

**Tabla 3.4.** Descripción del hardware utilizado.

Para el desarrollo de esta investigación los datos a utilizar se presentan en la siguiente tabla:

Tipo de Dato	Descripción	Fecha de generación
Puntos de Calibración de imágenes satelitales.	Recolección de puntos de las distintas coberturas observadas en las imágenes.	2010
Imagen Satelital	Sensor Rapideye, resolución espacial 5 metros	2010
Imagen Satelital	Sensor Aster, resolución espacial 15 metros.	2008
Imagen Satelital	Sensor Landsat, Resolución espacial 30 metros.	2008
Cobertura del Modelo de Bioclimas y Modelo de Termotipos.	Escala 1:100.000	2010-2011
Documento Word 2010	Leyenda de representación de ecosistemas del Ecuador continental.	2010-2011

**Tabla 3.5.** Descripción de los datos utilizados

### 3.2. ADQUISICIÓN DE PUNTOS DE CALIBRACIÓN DE IMÁGENES.

Para la toma de puntos de calibración se elaboró en el proyecto un protocolo de levantamiento de puntos de campo, definiendo procedimientos adecuados para la recolección y sistematización de datos que permitan a los intérpretes adquirir experiencia para vincular las clases temáticas generadas en el laboratorio con las clases de uso y cobertura del suelo en campo.

La clasificación de ecosistemas requiere que el intérprete tenga un alto grado de familiaridad con el paisaje de interés. Los datos recopilados en esta etapa de la

investigación no buscan evaluar la calidad de los mapas temáticos producidos, si no asegurarse de la consistencia temática de los ecosistemas interpretados. Por lo tanto, este proceso puede conceptualizarse como la recopilación de datos de campo para calibrar la clasificación e interpretación de imágenes satelitales.

Los elementos conceptuales que se definen en general en el protocolo son, cubrir todas las clases definidas en la propuesta de leyenda temática, seleccionar una unidad de muestreo, cuantificar de la exactitud de un mapa de uso y cobertura, el número de muestras debe ser definido siguiendo criterios de representatividad estadística (Congalton & Green 2008), la distribución espacial de las muestras para el protocolo de calibración responde a un diseño ad hoc donde se busca maximizar la cobertura temática y minimizar costos, los puntos de campo pueden servir como áreas de entrenamiento para una clasificación supervisada.

A un nivel general, el protocolo incluye un diseño experimental donde se especifica el número y distribución espacial de las muestras, actividades de planificación y preparación, actividades de recolección de datos en campo, y la sistematización de los datos colectados. El acceso a los puntos de muestreo se realizó utilizando capacidades de navegación del receptor GPS. Fue imprescindible establecer permisos de acceso adecuados al sitio de muestreo<sup>1</sup>. Cuando fue imposible llegar físicamente al punto o a un lugar cercano por problemas de acceso (p.ej. si no se puede acordar permiso de acceso por parte

---

1 El apoyo de personas locales familiarizadas con el sitio y la estructura de tenencia de la tierra es necesario durante la sesión de campo.

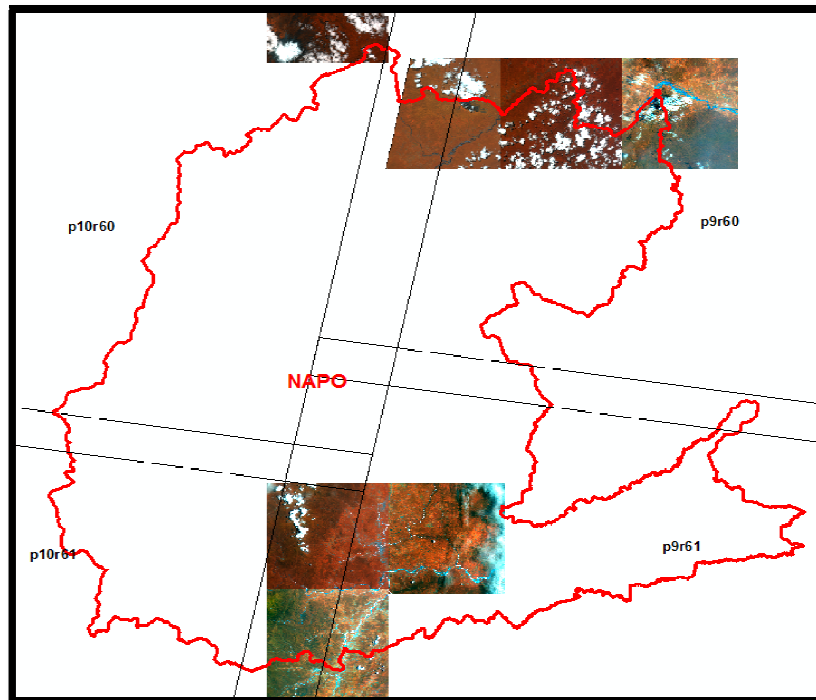
de propietarios) se identificó un punto alternativo siempre y cuando corresponda a la cobertura del punto original. La toma de fotos digitales de las áreas que rodean al sitio en donde se adquirió el punto fue de gran ayuda al trabajar con la clasificación de las imágenes satelitales (ver anexo B).

### **3.3. ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES.**

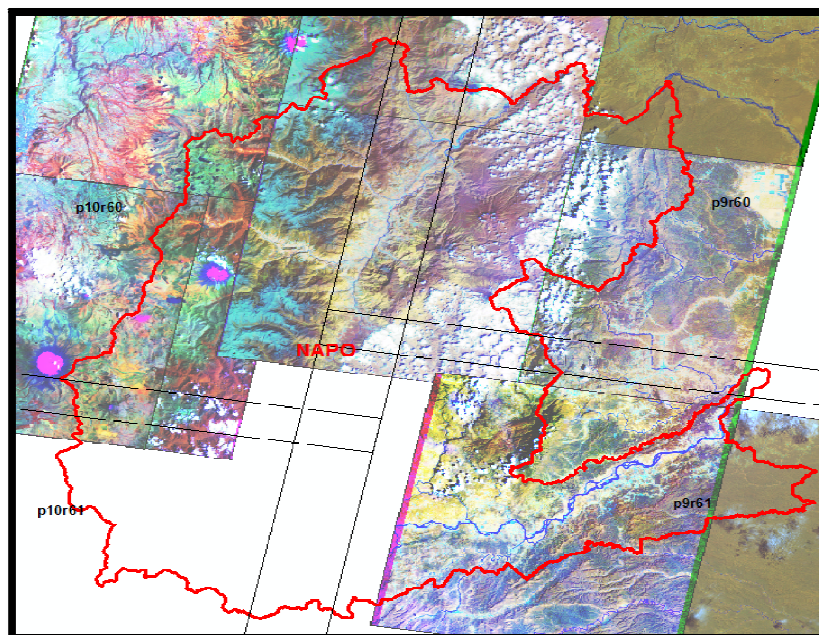
#### **3.3.1. Análisis de imágenes satelitales sensores Landsat, Aster y Rapideye.**

Para la mejor ubicación de las imágenes para este estudio se ha tomado como referencia la denominación de la grilla mundial utilizada por las imágenes Landsat en el que se identifica cada imagen de forma unívoca por un Path (franja vertical) y un Row (fila horizontal). A continuación se presentan tres figuras que indican las imágenes disponibles dentro de la zona piloto, (ver figuras 3.4-3.5-3.6)

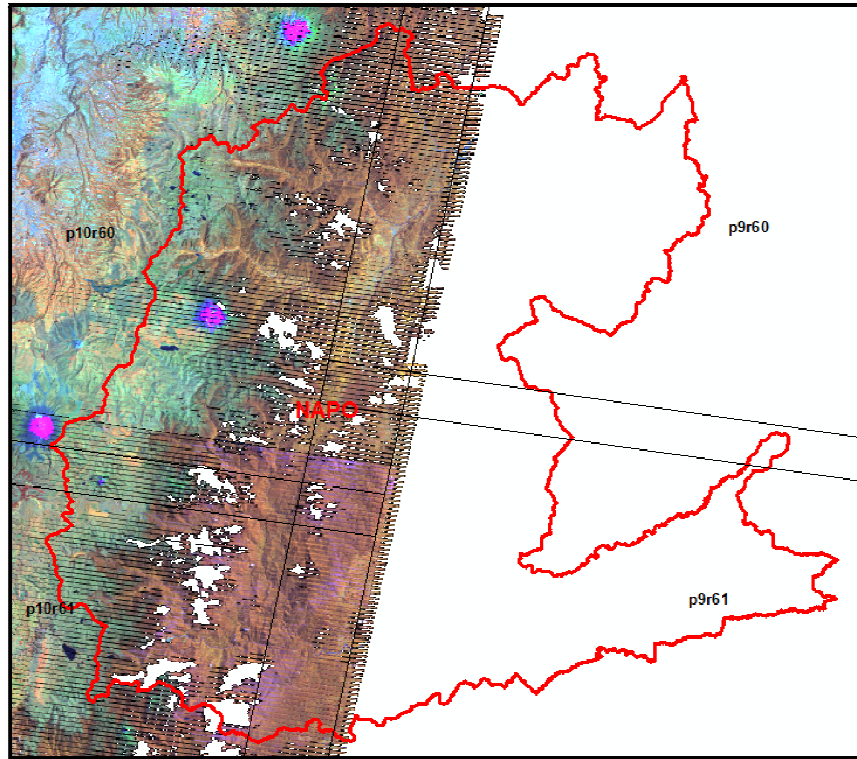




**Figura 3.4.** Imágenes Rapideye combinación de bandas 5-4-3 con realces, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 5m. Fuente: Ministerio del Ambiente

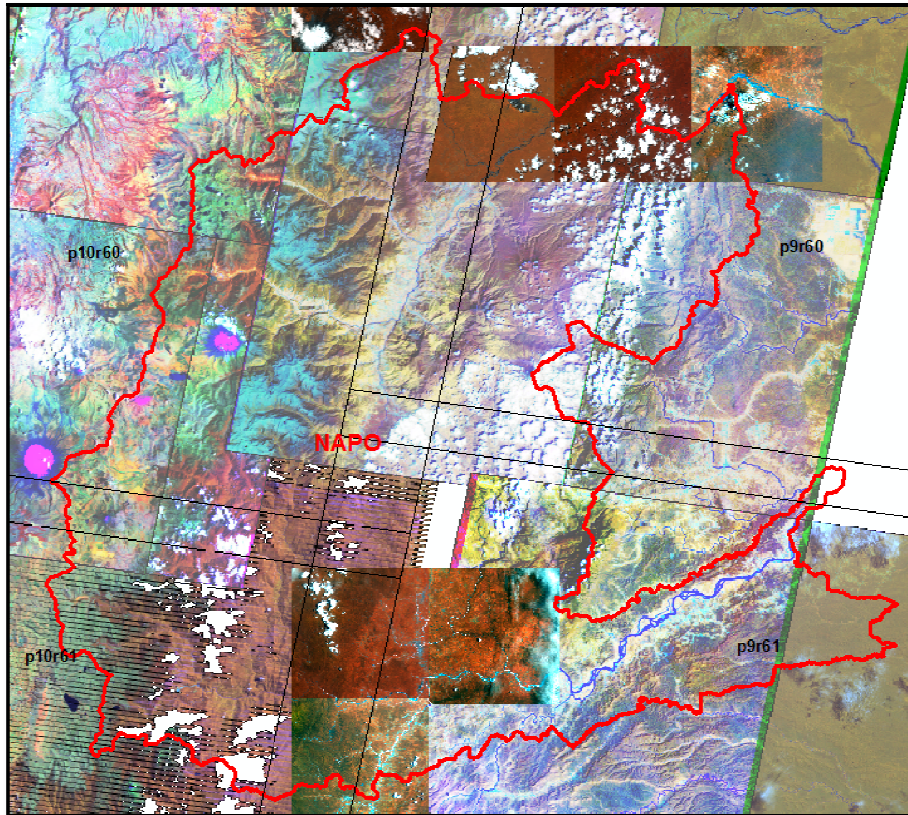


**Figura 3.5.** Imágenes Aster, combinación de bandas 3-4-2 con realces, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 15m. Fuente: Ministerio del Ambiente



**Figura 3.6.** Imágenes Lansat normalizadas, combinación de bandas 4-5-3, disponibles dentro de la zona piloto, resolución 30m. Fuente: Ministerio del Ambiente

Sería lo ideal contar con imágenes con un solo tipo de resolución, lamentablemente el proyecto cuenta con imágenes de tres tipos de resolución para la identificación de los ecosistemas en la zona piloto, esto debido al costo de captura de las imágenes rapideye que son las de más alta resolución y que serían las más recomendadas para este tipo de estudios.



**Figura 3.7.** Imágenes Landsat, Aster y Rapideye que abarcan la zona piloto, para la interpretación de imágenes satelitales. Fuente Ministerio del Ambiente.

### 3.3.2. Corrección de imágenes a ser clasificadas.

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información aparezca perturbada por una serie de errores. Para aplicar los procesos de clasificación en una imagen, primero se tiene que eliminar cualquier anomalía detectada, ya sea en su localización o en los ND<sup>2</sup> de los pixeles que

<sup>2</sup> Abreviatura de nivel digital. Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce asimismo como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre

componen la imagen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, tanto en la posición de los píxeles como en la radiancia.

Existen varias clases de correcciones según el tipo de afectación:

- *Corrección Radiométrica*: donde se detectan fallos en los sensores que generan píxeles incorrectos.
- *Corrección Atmosférica*: interferencias de la atmosfera, alteran de forma sistemática los valores de los píxeles.
- *Corrección Geométrica*: alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación, generan distorsiones en la imagen global.

### **3.3.2.1. Corrección Radiométrica**

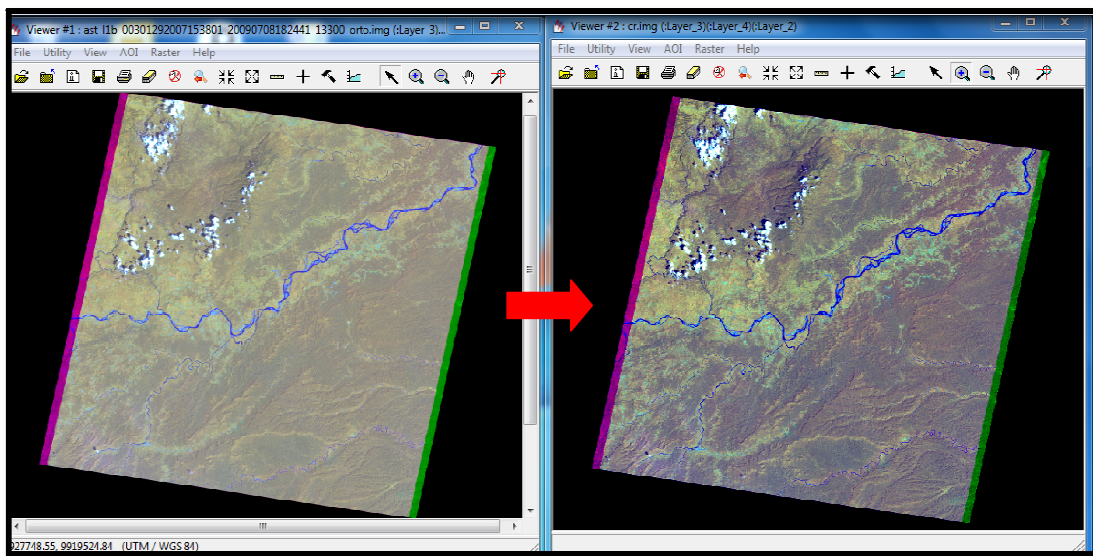
La respuesta radiométrica que llega al sensor del satélite desde la superficie se modifica a consecuencia de su paso por la atmosfera. Uno de los efectos más importantes de la atmosfera en las radiaciones visibles e infrarrojas próximas es debido a la dispersión producida por las moléculas de los gases (dispersión de Rayleigh). Ésta es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda, por lo que afecta mucho más a las longitudes cortas (azul) que a las longitudes más largas (infrarrojo medio). Otros efectos de dispersión atmosférica pueden ser debidos a las presencia de partículas de aproximadamente el mismo

---

el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno. Universidad de Jaén, Departamento de Cartografía, Glosario de Teledetección (2006).

tamaño que las longitudes de onda (aerosoles), pero son más esporádicos y suelen presentarse únicamente en días de atmósferas poco nítidas.

El proceso que realizó en este estudio para corregir radiométricamente las imágenes, fue realizado en la plataforma ERDAS 9.3, con la herramienta Radiometric Enhancement y con el método Haze Reduction cuyo resultado se presenta a continuación.



**Figura 3.8.** Corrección Radiométrica con el software ERDAS 9.3

Se observa en la imagen de la derecha una clara mejoría después de haber aplicado el método de Haze Reduction. Cabe indicar que este método se empleó únicamente en las imágenes Aster y Landsat, pues, las imágenes Rapideye están corregidas radiométricamente.

Posteriormente se aplicó a las imágenes un filtro de paso bajo con la finalidad de atenuar los componentes de alta frecuencia de la imagen y permitir el paso de aquellos de baja frecuencia.

### **3.3.2.2. Corrección Atmosférica.**

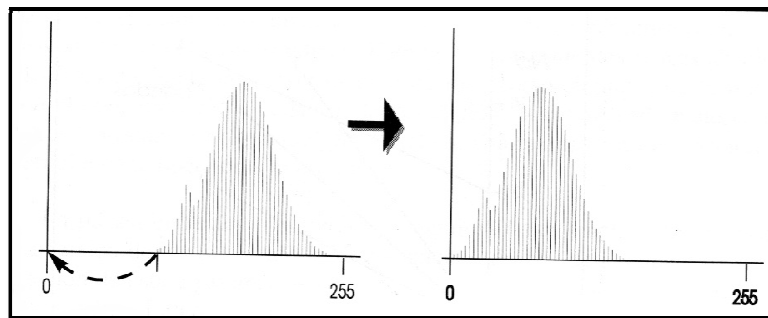
La corrección atmosférica resulta indispensable cuando se pretende aplicar modelos que tengan en cuenta parámetros físicos que son factibles de modelar, como la iluminación proveniente de la fuente de luz. Para esto se dispone de diferentes métodos y programas desarrollados para este fin. Muchas veces se requiere de información auxiliar como humedad para el día de toma, radiación neta, etc, es por eso que muchos de estos modelos asumen considerablemente estas variables, a la par se han desarrollado modelos empíricos por las asunciones que toman, pero que brindan un resultado aceptable según el tipo de trabajo que se realice. Para este estudio se utilizará el método de DOS Dark Object Subtraction que ofrece el software ENVI 4.7.

#### **3.3.2.2.1. Método DOS Dark Object Subtraction.**

El procedimiento utilizado es conocido como DOS – Dark Object Subtraction o SPO - método de Sustracción de Píxeles Oscuros, es también muy conocido como el Método de Chávez.

La corrección del histograma por los valores mínimos conocido como método de Chávez, consiste en desplazar hacia 0 el histograma de cada banda, se supone que el mínimo ND de una imagen debe corresponder a las zonas de agua y que este debe ser 0 en condiciones de ausencia de efecto atmosférico, el procedimiento consiste en restar el valor mínimo del ND de la imagen a todos los ND:

$$ND_{i,j}(k) = ND_{i,j}(k) - ND_{\min}(k)$$

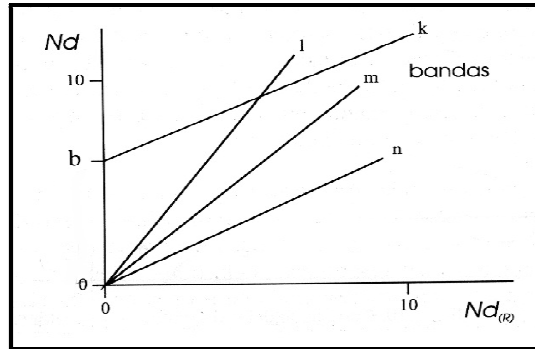


**Figura 3.9.** Corrección por el método de Sustracción de Píxeles Oscuros.

Sólo se aplica a las bandas afectadas por este efecto de dispersión atmosférica ( $\lambda$  más cortas como el azul, verde, etc.). A veces se aplica una reducción de 2/3 del ND por suponer que las aguas reflejan cierta radiación por su contenido orgánico.

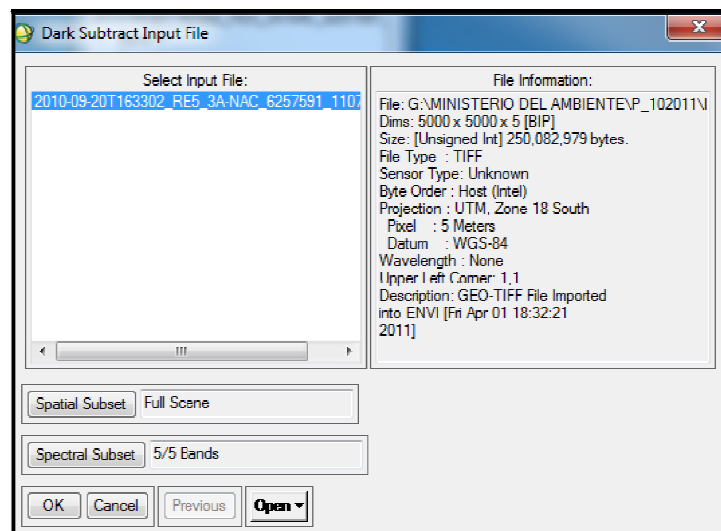
La regresión entre bandas consiste en calcular la recta de regresión entre cada banda y una de referencia en la que la dispersión tenga menos repercusión (de mayor  $\lambda$ , como el rojo), para ello se obtienen muestras en cada banda de ND correspondientes a zonas de baja radiancia. En ausencia de efecto atmosférico

las rectas deberían pasar por el origen de coordenadas. Si presentan ordenada en el origen este es el valor que debería restarse a los ND de las bandas afectada



**Figura 3.10.** Regresión de Bandas

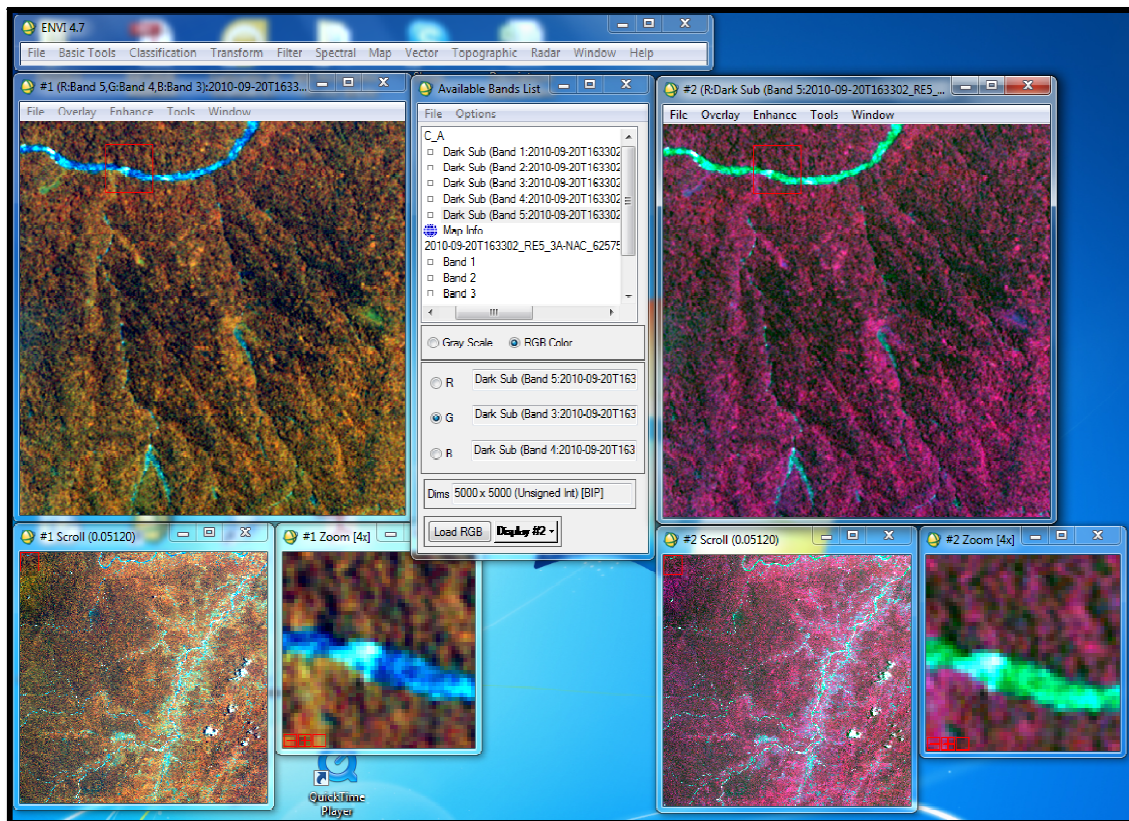
Para esta investigación se utilizará la herramienta Dark Subtract del software ENVI 4.7. Esta herramienta permitió corregir atmosféricamente las imágenes que se encuentran dentro de la zona piloto.



**Figura 3.11.** Método Dark Subtract en el software ENVI 9.2



A continuación se presenta el resultado de una imagen Rapideye a la cual se le aplicó la corrección atmosférica con el método de Substracción de Pixeles Oscuros.



**Figura 3.12.** Resultado de la aplicación del método de sustracción de pixeles oscuros.

### 3.3.2.3. Corrección Geométrica

Las imágenes crudas recogidas por los satélites o aeronaves son representaciones de la superficie irregular de La Tierra. Incluso imágenes de áreas que parecen ser planas se ven distorsionadas por la curvatura de La Tierra

y por el sensor utilizado. Para que el proyecto pueda utilizar las imágenes, éstas tienen que corregirse geoméricamente, es necesario entonces realizar una corrección geométrica mediante la cual se realiza el ajuste de las propiedades geométricas de la imagen para definir la escala, rotación, y corrección de otras distorsiones espaciales, de tal manera que este acorde con el sistema a utilizarse (WGS84 Zona 18 Norte).

#### **3.3.2.3.1. Ortorectificación de Imágenes**

La ortorectificación es el proceso de ajuste de una imagen satelital, por el cual se eliminan sus distorsiones causadas por las variaciones topográficas de la superficie terrestre y por la inclinación del sensor, obteniendo una nueva imagen digital en donde los píxeles tienen una proyección cartográfica determinada representan a los objetos del terreno en su verdadera posición ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z$ ), de esta forma ya es posible realizar mediciones directas de posiciones, áreas y distancias.

Las imágenes ASTER Y LANDSAT utilizadas en el Mapa de Vegetación fueron adquiridas anteriormente por el Proyecto Línea Base de Deforestación del Programa Socio Bosque (MAE, 2010). Las imágenes RAPIDEYE adquiridas para el Proyecto Mapa de Vegetación ya están ortorectificadas, pero en algunas imágenes el sistema de referencia está en la Zona 17 Sur, por lo que procedió a re proyectarlas a la Zona 18 Norte ya que esta es la zona en la que se trabajará en el presente estudio.

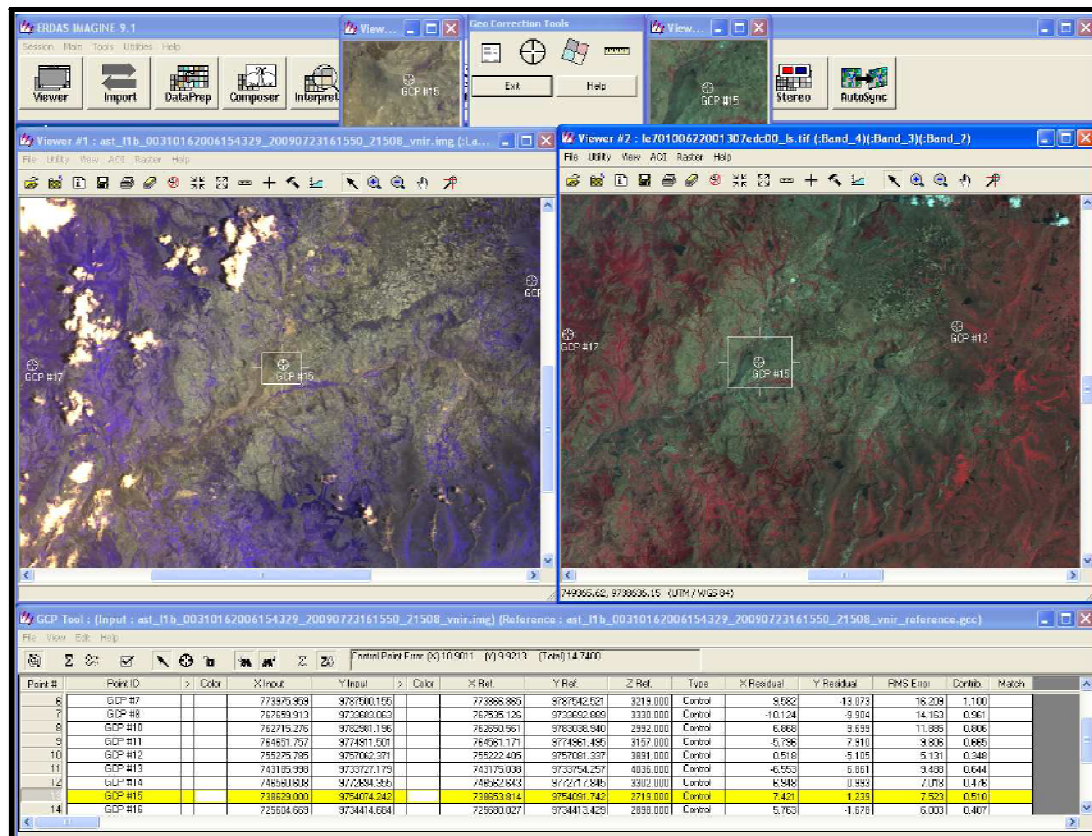
Las imágenes ASTER tienen un nivel de procesamiento 1A, por lo que estas imágenes están georeferenciadas, pero no están corregidas completamente ni ortorectificadas, por esto para el proceso de ortorectificación se utilizó las imágenes LANDSAT ortorectificadas de mejor calidad y para obtener la altura del terreno, el modelo digital de elevación (DEM) derivado del SRTM con una resolución de 90 x 90 metros. Esta metodología se aplicó de forma independiente a las bandas VNIR y SWIR, la banda 3b del VNIR no fue usada en este proceso.

La Ortorectificación se realizó mediante puntos de control, se inició con las bandas del VNIR, ya que tienen una mejor resolución espacial (15 metros) y por tanto se puede identificar mejor los detalles y objetos en esta fracción del espectro. Se utilizó la transformación proyectiva porque se puede utilizar en situaciones donde no se dispone de calendario astronómico, no existe un modelo de sensores aplicables o cuando la imagen de satélite ya tiene un grado de corrección geométrica.

El error medio cuadrático "RMS" es definido en términos de metros a la escala terrestre y en milímetros a la escala del mapa original. El resultado es una relación lineal entre RMS y la escala del mapa; a medida que la escala del mapa decrece, el RMS se incrementa linealmente. El RMS es el resultado acumulativo de todos los errores incluyendo aquellos producidos por el levantamiento de puntos de control, recopilación de mapas, y la extracción de dimensiones terrestres usando el mapa en estudio (Sistema de Información Regional, 2010).

Para el caso de las imágenes ASTER, si el error supera los 10 m, se movió los puntos con mayor contribución de error hasta lograr el RMS deseado, o se eliminaron los puntos con mayor error y se añadieron otros nuevos. Cuando el error sea aceptable se grabaron los puntos.

En la siguiente gráfica se observa la ortorectificación de una imagen Aster en base a una imagen Landsat para la generación de puntos de control.



**Figura 3.13.** Ortorectificación en software ERDAS 9.3

En el proceso de ortorectificación de las imágenes Aster se encontraron algunos inconvenientes que se solucionaron de la siguiente manera; en las imágenes

Aster con muy poca variación en la pendiente, surgió el error al momento de aplicar el SRTM, el error cuadrático superaba el RMS elegido, arrojando valores superiores a 250 metros de error, por lo que se trabajó sin el SRTM y con una constante de 500 metros de altitud. En las imágenes que por tener pocos elementos que visualmente sirvan de referencia, como vías y ríos, se aplicó el método de remuestreo de Convolución Cúbica, el mismo que permitió ajustar de mejor forma estas imágenes. Todas las imágenes fueron rectificadas utilizando modelos matemáticos cuyos residuales (en X y Y) fueron menores al error medio cuadrático de 10 m.

### **3.4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ENVI 4.7 PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.**

El método supervisado en ENVI 4.7 parte de áreas de entrenamiento, el término indica que tales áreas sirven para “entrenar” al programa de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas se caracterizan cada una de las clases, para asignar más tarde el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de la similitud de sus ND con los extraídos como referencia (Chuvieco, 2011).

Las regiones de interés (ROIs) son muestras de las imágenes, seleccionados gráficamente, existe también otro método como la umbralización que en este caso no se va a utilizar. Las regiones pueden ser de forma irregular y se utilizan para extraer las estadísticas para la clasificación.

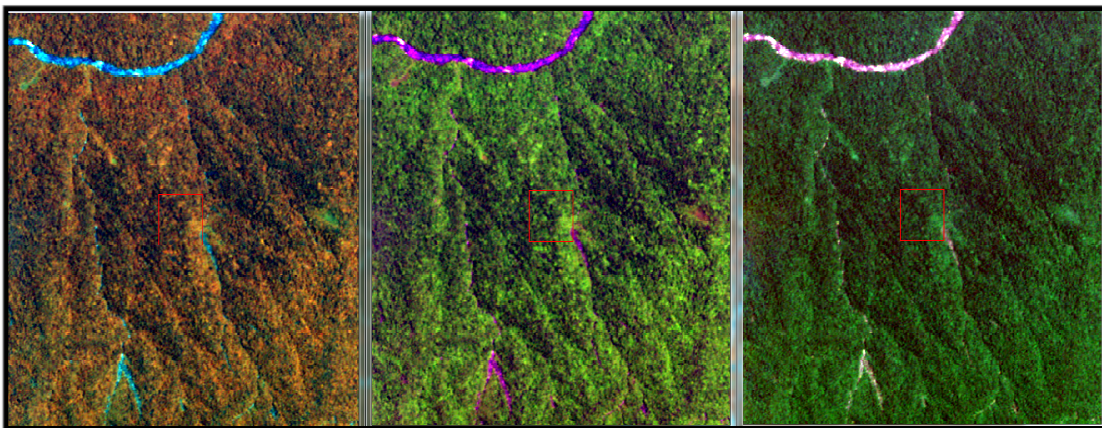
Los siguientes tipos de ROI están disponibles en ENVI:

- Polígono
- Polilínea
- Punto
- Rectángulo y cuadrado
- Elipse y el círculo
- Multi Part (donut)

Una sola región puede contener cualquier combinación de los seis tipos de ROI.

### 3.4.1. Selección de áreas de entrenamiento.

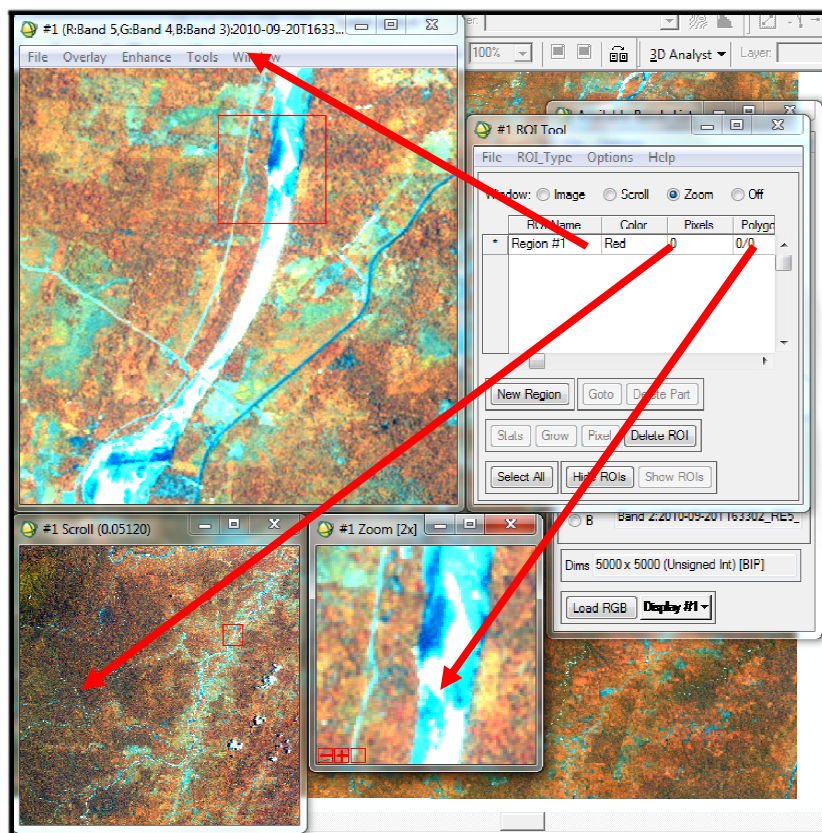
Se despliega la imagen a clasificar aplicando los realces adecuados que permiten realizar un reconocimiento total de la imagen e identificar los diferentes espacios geográficos. ENVI permite tener la misma imagen en diferentes composiciones de bandas y realces en diferentes ventanas y existe la posibilidad de tomar las muestras espectrales o ROIs en cualquiera de estas lo cual es una gran ventaja para el interprete (ver figura 3.28.).



**Figura 3.14.** Realces imagen satelital Rapideye (resolución espectral 5m.)

Para la delimitación más precisa de los ROIs, se recurre a los puntos de calibración, fotografía aérea y la cartografía convencional, teniendo en mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse.

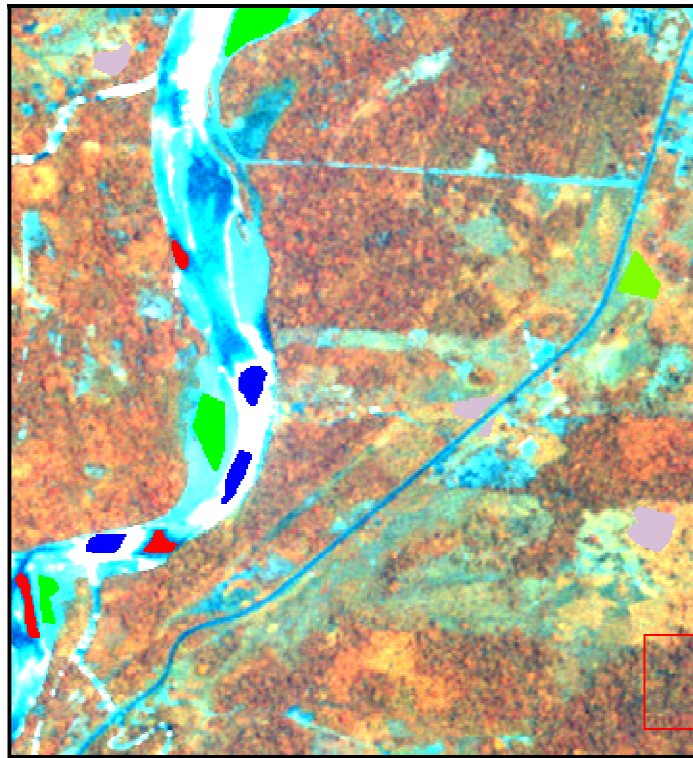
ENVI, permite delimitar las muestras en cualquiera de las tres ventanas desplegables de la imagen, esto puede ser seleccionado en la ventana de ROI Tool (ver figura 3.29.).



**Figura 3.15.** Opciones de ventanas para delimitar la muestra.

Se seleccionan las áreas representativas, escogiendo regiones de interés que sean homogéneas. También existe la posibilidad de separar del ROI mediante su exportación a un visualizador ND y observar la distribución de los puntos dentro de cada ROI, esto es justamente para detectar solapamiento entre las clases.

En el estudio resultó más conveniente elegir varias áreas de pequeño tamaño que una sola de mayores dimensiones, ya que con las áreas de mayor tamaño se tendía a infravalorarse la variabilidad de esa categoría.



**Figura 3.16.** Digitalización de ROIs o muestras espectrales.

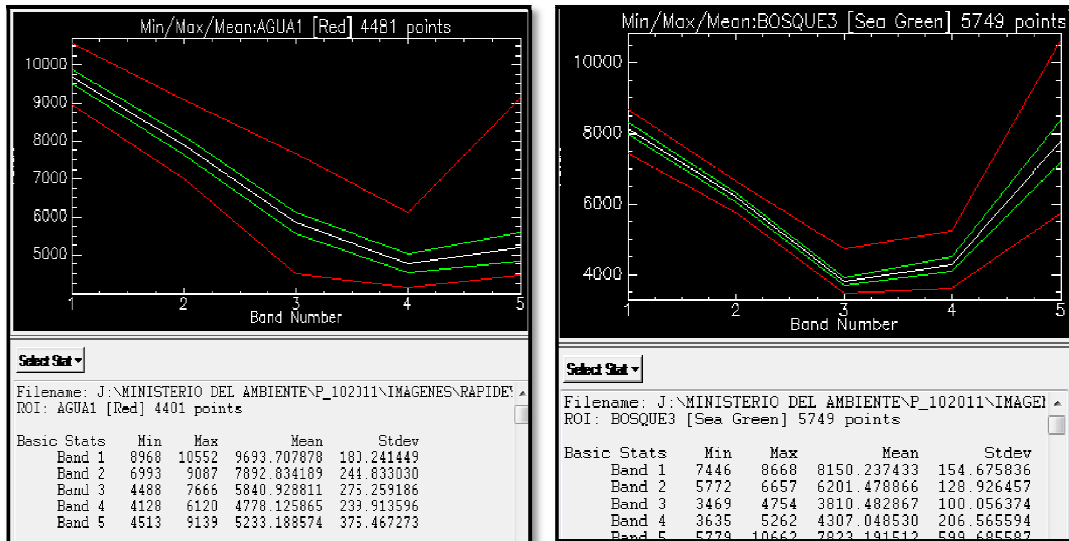
Después de la creación de las regiones de interés, éstas se pueden borrar, renombrarlas o fusionarlas.



### 3.4.2. Cálculo y análisis de parámetros estadísticos

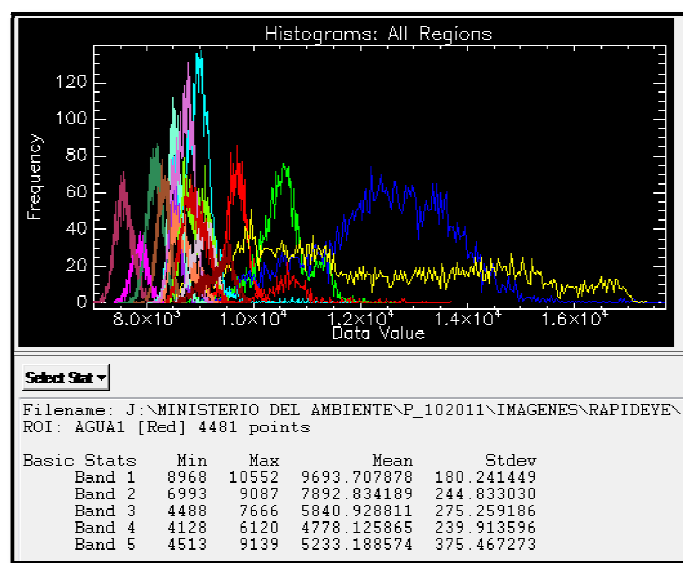
Se calcula los parámetros que caracterizan la distribución de los datos espectrales de las “áreas muestras” a partir de los valores de radiancia de todos los píxeles incluidos en las áreas de entrenamiento. Lógicamente este cálculo se aplicó a todas las bandas que intervendrán en la clasificación.

Es de suma importancia verificar la separabilidad entre las clases con el fin de que las reflectancias de los usos de la cobertura de la tierra no tiendan a confusión, pues las respuestas espectrales pueden mostrar una compleja interrelación entre la cobertura y la influencia de la vegetación circundante que varía, además con respecto a la ubicación espacial de cada uno de ellos. De allí que el reconocimiento de la respuesta espectral “in situ” sea útil para diagnosticar y evaluar las respuestas espectrales que se dan. En el siguiente ejemplo se presentan los casos de separabilidad de la clase 1 que corresponde a agua y la clase 3 que corresponde a bosque (ver figura 17). En estas figuras también se puede observar datos como los puntos máximos, puntos mínimos, media y la desviación estándar, que nos sirven para calcular o comparar con otras clases de la imagen.



**Figura 3.17.** Gráficos de puntos máximos, mínimos, media y desviación estándar

Después de realizar los ajustes pertinentes a los ROIs de las clases de la imagen a clasificar, en el histograma resultante se observa que no existe superposición de clases, cada clase se encuentra en un rango del espectro sin que estas se solapen permitiendo una clasificación de mayor certeza.



**Figura 3.18.** Histograma de superposición de clases

En definitiva, se comprobó que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus valores de radiancia definen convenientemente a esas clases. De aquí que es crucial la correcta selección, ya que de otro modo se estaría forzando al algoritmo a clasificar áreas heterogéneas.

Finalmente, se procede a realizar un análisis de separabilidad con el afán de discriminar mejor las clases a ser definidas. Esta opción evalúa la separabilidad espectral entre pares de ROIs seleccionados, dando como resultado un reporte en donde se despliega el promedio de separabilidad tanto con el método de la Divergencia Transformada como el de Jeffries-Matusita<sup>3</sup>.

El resultado de realizar este proceso es un archivo en el que muestra la separabilidad de cada par de clases con valores que van de 0 a 2. Para este estudio los valores mayores a 1.9 significan que hay una buena separabilidad entre las clases, cuando los valores son menores a 1 es necesario realizar una unión (merge ROIs) entre las clases para obtener una sola, y cuando los valores están entre 1 y 1.9 es necesario revisar estas muestras ya sea para reubicar la muestra, definir mejor la muestra o simplemente para eliminarla (ver figura 3.17.).

---

<sup>3</sup> Métodos que calculan la distancia normalizada entre dos categorías

```

File
Input File: 2010-09-20T163302_RE5_3A-NAC_6257591_110712.tif
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

AGUA1 [Red] 4481 points:
AGUA2 [Green] 3885 points: (1.90749872 1.99993034)
AGUA3 [Blue] 5195 points: (1.98922602 2.00000000)
NUBES [Yellow] 4083 points: (2.00000000 2.00000000)
SOMBRA5 [Cyan] 5592 points: (1.99990198 1.99999089)
BOSQUE1 [Magenta] 2791 points: (2.00000000 2.00000000)
BOSQUE2 [Maroon] 4714 points: (2.00000000 2.00000000)
BOSQUE3 [Sea Green] 5749 points: (2.00000000 2.00000000)
BOSQUE4 [Purple] 3276 points: (2.00000000 2.00000000)
BOSQUE INTERVENIDO [Coral] 3951 points: (2.00000000 2.00000000)
MORETALES [Aquamarine] 5676 points: (1.99999967 2.00000000)
BOSQUE5 [Orchid] 10022 points: (2.00000000 2.00000000)
BOSQUE6 [Sienna] 5277 points: (2.00000000 2.00000000)
INTERVENCION1 [Chartreuse] 7349 points: (1.99999951 2.00000000)
INTERVENCION2 [Thistle] 3852 points: (1.99999999 2.00000000)
intervencion2 [Red1] 582 points: (1.98812121 1.99983062)
intervencion3 [Red2] 5444 points: (1.99999573 1.99999972)
intervencion4 [Red3] 2428 points: (1.99984867 1.99995862)

AGUA2 [Green] 3885 points:
AGUA1 [Red] 4481 points: (1.90749872 1.99993034)
AGUA3 [Blue] 5195 points: (1.89278256 2.00000000)
NUBES [Yellow] 4083 points: (1.99892598 1.99993372)
SOMBRA5 [Cyan] 5592 points: (1.99678293 2.00000000)
BOSQUE1 [Magenta] 2791 points: (1.99999923 2.00000000)
BOSQUE2 [Maroon] 4714 points: (1.99999997 2.00000000)
BOSQUE3 [Sea Green] 5749 points: (1.99999345 2.00000000)
BOSQUE4 [Purple] 3276 points: (1.99999766 2.00000000)
BOSQUE INTERVENIDO [Coral] 3951 points: (1.99999999 2.00000000)
MORETALES [Aquamarine] 5676 points: (1.99958427 2.00000000)
BOSQUE5 [Orchid] 10022 points: (1.99999809 2.00000000)
BOSQUE6 [Sienna] 5277 points: (1.99999816 2.00000000)

```

**Figura 3.19.** Reporte de Separabilidad.

Es recomendable realizar la evaluación por categoría, es decir, el momento de seleccionar los ROIs, seleccionar solo aquellos que pertenecen a la misma clase temática; con esto, las muestras que tengan una separabilidad muy baja serán contenidas en un mismo ROI propendiendo a tener el mínimo número de ROIs por cada clase temática, con la finalidad de que la clasificación y todos los post procesos no presente un tiempo de ejecución extenso.

Luego de la evaluación por categorías se realiza una global, con el fin de identificar los conflictos entre diferentes clases y tomar las decisiones adecuadas, ya sea la reubicación de muestras o eliminación de las mismas, favoreciendo a una clasificación más adecuada.

Una de las ventajas del software ENVI es que la clasificación supervisada trabaja directamente con ROIs (regiones de interés) que en nuestro caso son las muestras que tomamos de cada clase, esto facilita la ubicación de las muestras tomadas en la imagen y la comparación con otras muestras anteriormente delimitadas para realizar los ajustes necesarios. Estos ajustes corresponden a acciones de eliminar completamente o parcialmente una clase, unir con otras clases o recalcular la clase a partir de la redefinición de las regiones de interés.

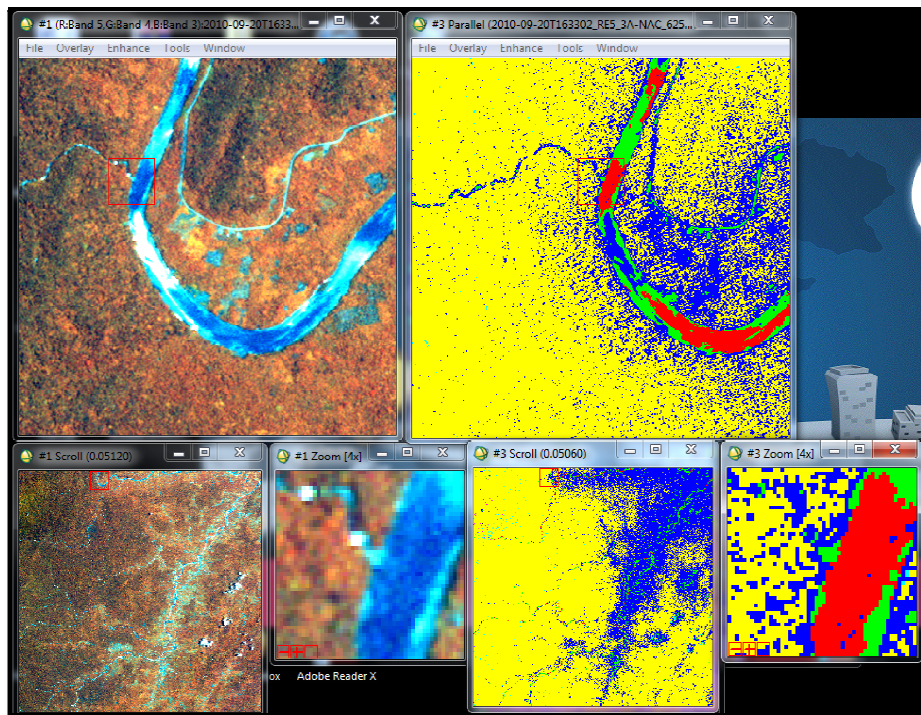
### **3.4.3. Método de clasificación supervisada.**

Las técnicas de clasificación supervisada en ENVI 4.7 incluyen paralelepípedo, mínima distancia, distancia de Mahalanobis, máxima verosimilitud, Mapper Ángulo Espectral (SAM), divergencia información espectral (SID), y la codificación binaria.

La etapa final corresponde a la agrupación de los píxeles clasificados de toda la imagen alrededor de las clases temáticas definidas en el proceso de muestreo, mediante unos algoritmos específicos de agrupación. Como parte del proceso de investigación se evaluó cada uno de los métodos de clasificación en una imagen específica para comparación.

**3.4.3.1. Método del Paralelepípedo:** Este método utiliza una regla de decisión sencilla para clasificar los datos multiespectrales. Los límites de decisión forman un paralelepípedo de clasificación n-dimensional en el espacio de datos de imagen. Las dimensiones de la clasificación de

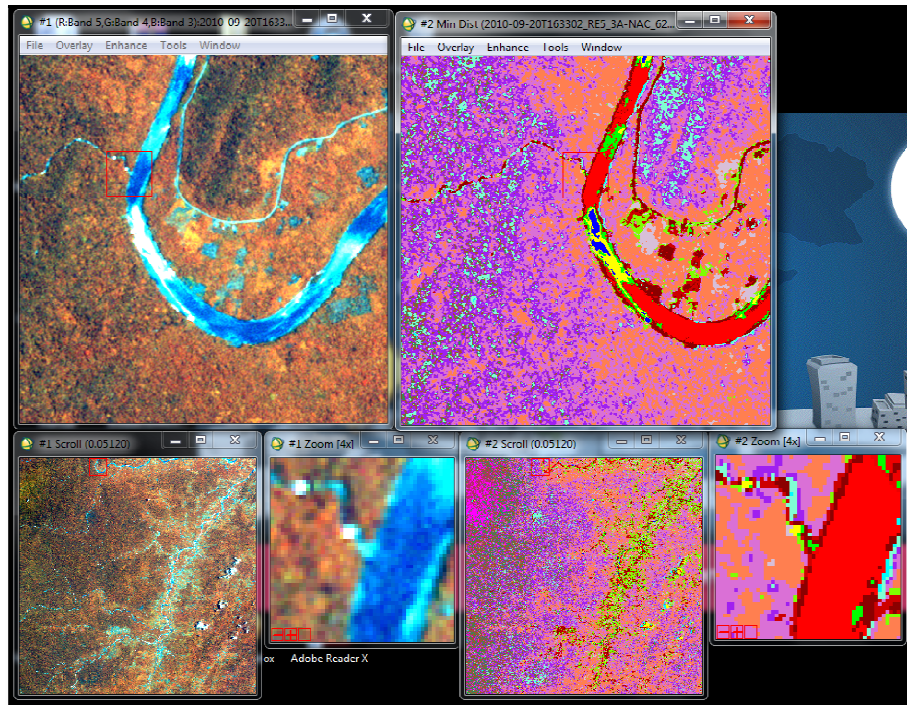
paralelepípedo se definen en base a un umbral de desviación estándar de la media de cada clase seleccionada. Si un valor de píxel está por encima del umbral inferior y por debajo del umbral alto para todas las bandas  $n$  siendo clasificados, se le asigna a esa clase. Si el valor del píxel cae en múltiples clases, se asigna al píxel a la última clase coincidente. Las zonas que no entran en ninguna de las clases paralelepípedos son designados como no clasificados (Figura 3.20).



**Figura 3.20.** Clasificación método Paralelepípedo

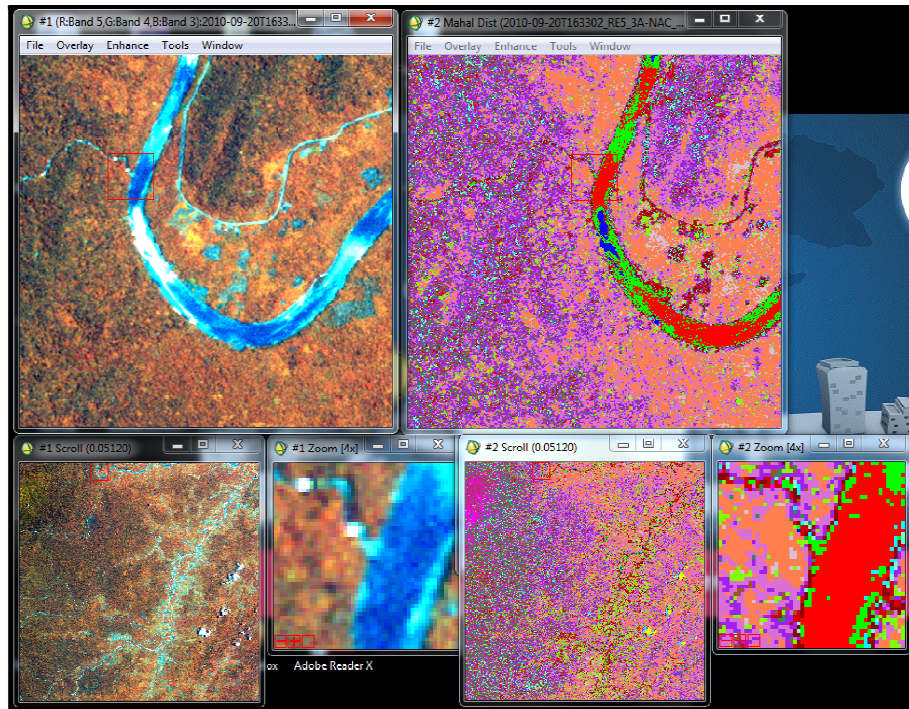
**3.4.3.2. Método de Mínima Distancia:** Utiliza los vectores medios de cada firma espectral y calcula la distancia euclidiana de cada píxel desconocido del vector medio para cada clase. Todos los píxeles se clasifican en la clase más cercana a menos que una desviación estándar o el umbral de distancia

lo especifiquen, en cuyo caso algunos píxeles pueden ser no clasificados si no cumplen con los criterios seleccionados (ver figura 3.21.).



**Figura 3.21.** Método de Mínima Distancia.

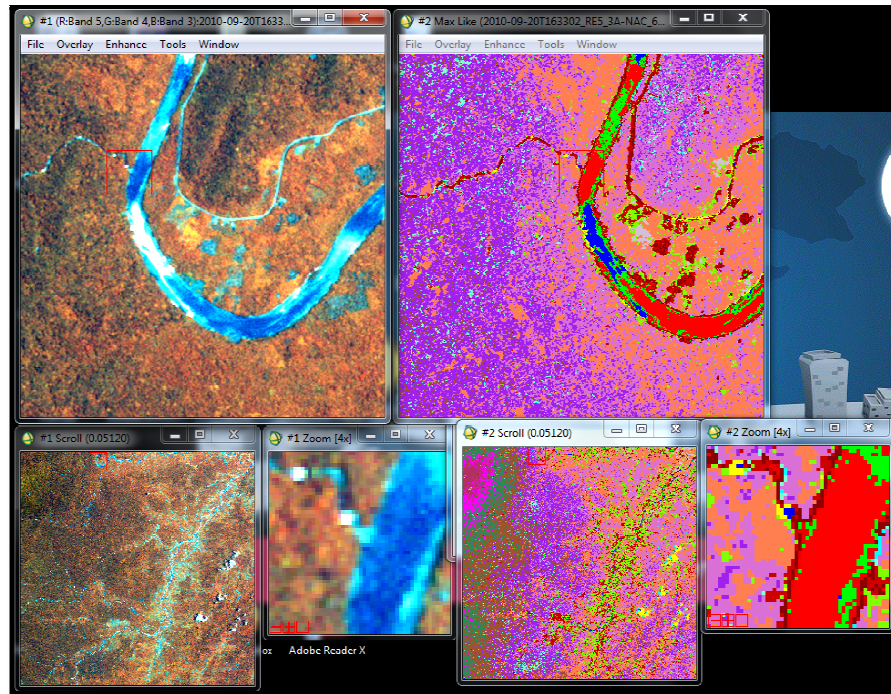
**3.4.3.3. Método Distancia de Mahalanobis:** Es similar a la clasificación de máxima probabilidad, pero asume que todas las clases de covarianzas son iguales y por lo tanto es un método más rápido. Todos los píxeles se clasifican en la clase más cercana, a menos que especifique un umbral de distancia, en cuyo caso algunos píxeles pueden ser no clasificados si no cumplen con el umbral (ver figura 3.22.).



**Figura 3.22.** Método distancia de Mahalanobis.

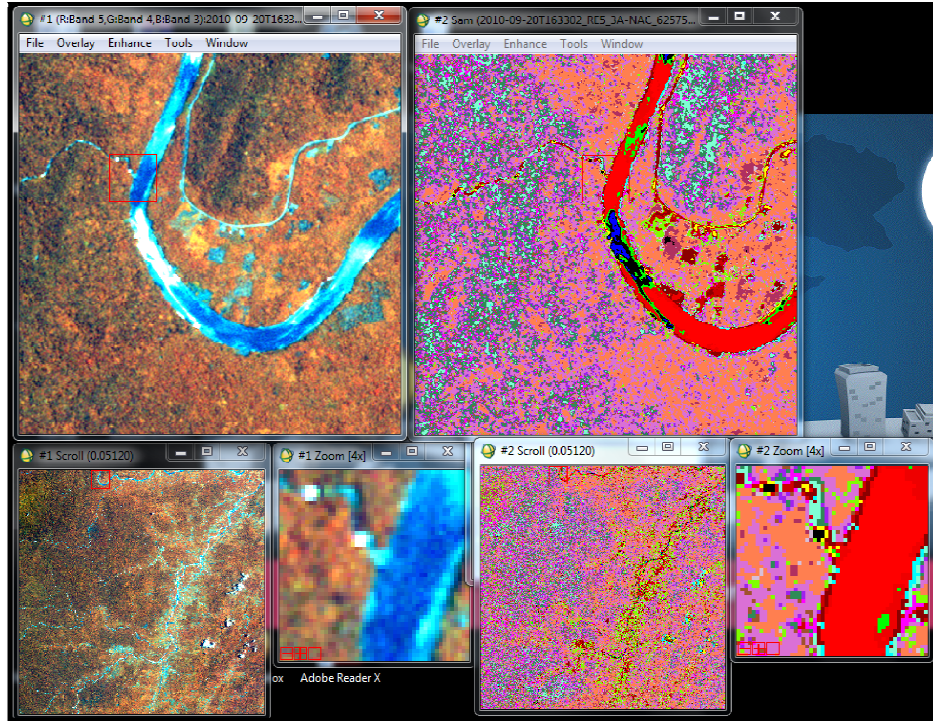
**3.4.3.4. Método de Máxima Verosimilitud:** supone que las estadísticas de cada clase en cada banda tienen una distribución normal y calcula la probabilidad de que un píxel pertenece a una clase específica. A menos que seleccione un umbral de probabilidad, todos los píxeles se clasifican. Cada píxel se le asigna a la clase que tiene la probabilidad más alta (es decir, la probabilidad máxima). Si la probabilidad más alta es menor que un umbral especificado, el píxel permanece sin clasificar (ver figura 3.23.).





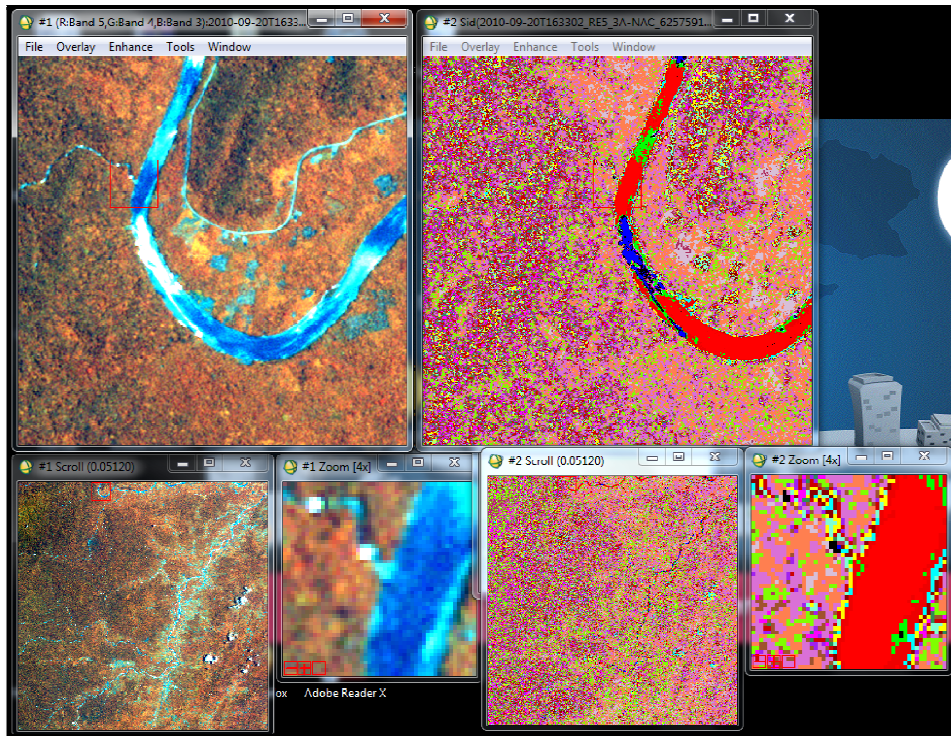
**Figura 3.23.** Método de Máxima verosimilitud.

**3.4.3.5. Método Mapper Angulo Espectral (SAM):** es una clasificación espectral de base física que utiliza un ángulo  $nD$  para que coincida con los píxeles espectros de referencia. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos espectros mediante el cálculo del ángulo entre los espectros y tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. Esta técnica, cuando se utilizan en los datos de reflectancia calibrados, es relativamente insensible a los efectos de iluminación y albedo. SAM compara el ángulo entre el vector de espectro endmember y cada vector de píxel en el espacio  $nD$ . Ángulos más pequeños que se aproximen a representar el espectro de referencia. Píxeles más lejos que el umbral máximo ángulo especificado en radianes no clasificados (ver figura 3.24.).



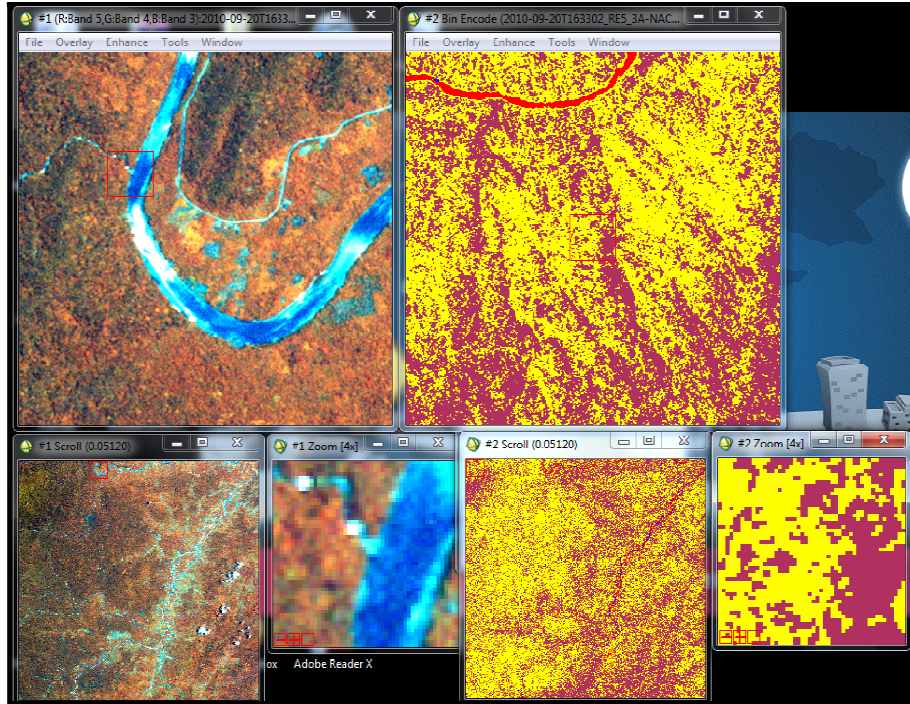
**Figura 3.24.** Método Mapper ángulo Espectral (SAM).

**3.4.3.6. Método de Divergencia de información espectral (SID):** es un método de clasificación espectral que utiliza una medida de divergencia para que coincida con píxeles de espectros de referencia. Cuanto menor sea la divergencia, es más probable que los píxeles son similares. Los píxeles con una medida mayor que el umbral máximo especificado divergencia no se clasifican (ver figura 3.25.).



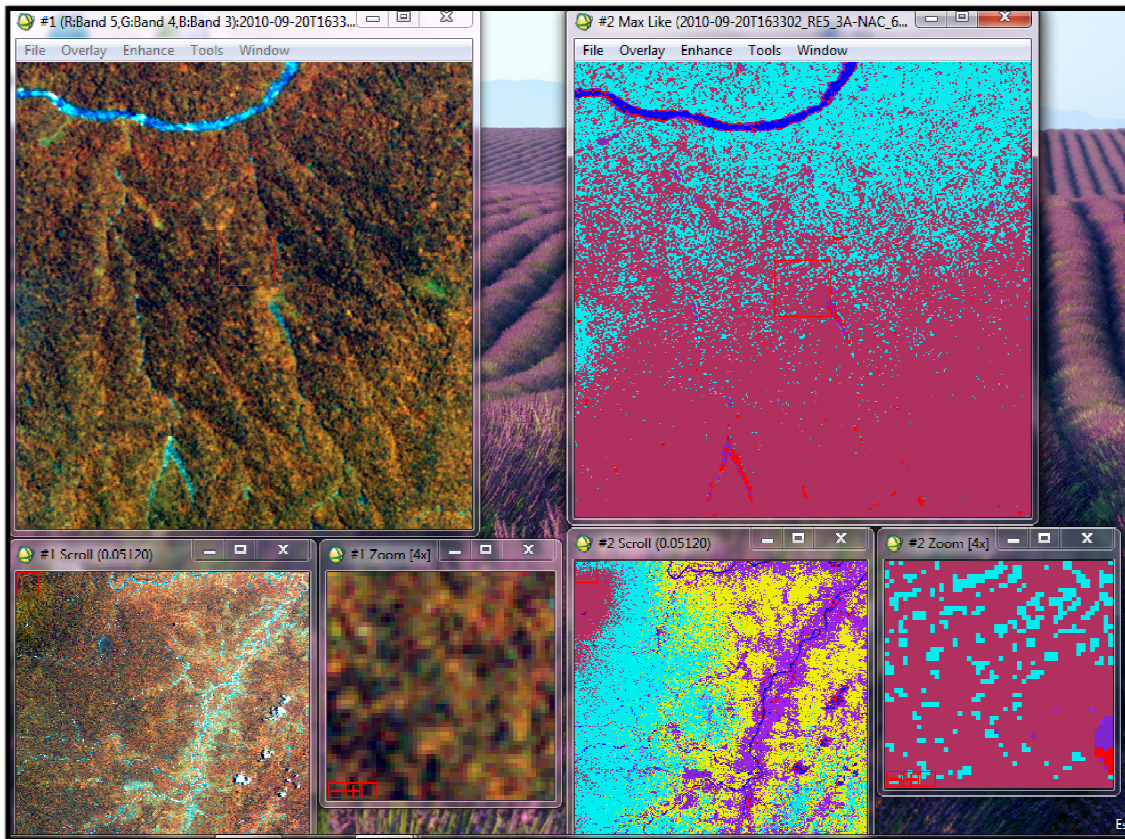
**Figura 3.25.** Método de Divergencia información espectral (SID).

**3.4.3.7. Método de Codificación Binaria:** codifica los datos y los espectros de los componentes en ceros y unos, en función de si una banda está por debajo o por encima de la media del espectro, respectivamente. Una función OR exclusiva compara cada espectro de referencia codificada con los espectros de datos codificados y produce una imagen de clasificación. Todos los píxeles se clasifican para el componente con el mayor número de bandas que responden, a menos que se especifique un umbral mínimo de coincidencia, en cuyo caso algunos píxeles pueden ser no clasificados si no cumplen con los criterios (ver figura 3.26).



**Figura 3.26.** Método de Codificación Binaria

Finalmente se realiza un *análisis de correspondencia temática* de todas las clasificaciones ejecutadas con los métodos de agrupación espectral que posee ENVI, de aquí se concluye que el método de máxima verosimilitud presenta los mejores resultados en agrupación de píxeles para el propósito de discriminación de ecosistemas de este estudio (ver figura 3.27).



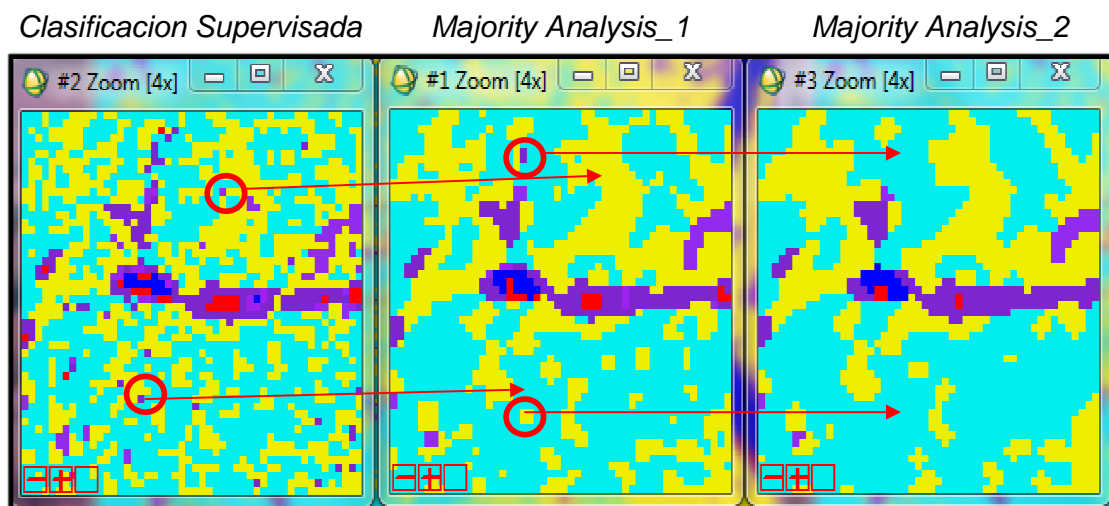
**Figura 3.27.** Análisis de Correspondencia Temática

#### 3.4.4. Generalización de la clasificación

Al utilizar una imagen de alta resolución puede generar muchos píxeles aislados, que en algunas ocasiones el filtro no borra. Si el número de píxeles aislados es considerable, convendrá retornar a la fase de entrenamiento (muestreo), con objeto de deducir nuevas categorías o perfeccionar la definición de las ya existentes.

ENVI cuenta con diferentes filtros que ayudan a eliminar el ruido (píxeles aislados) (ver figura 3.28), entre los filtros utilizados en este estudio tenemos:

- **Majority Analysis**, este filtro se utiliza para cambiar píxeles falsos dentro de una gran clase individual. Se introduce un tamaño de núcleo y el píxel central en el núcleo que será reemplazado con el valor de la clase de la mayoría de los píxeles que posee el núcleo. Si se selecciona el análisis de Minority, el píxel central del núcleo será reemplazado por el valor de la clase de la minoría de píxeles de kernel. Como se puede observar en la figura 3.28 al aplicar el filtro Majority los píxeles aislados o píxeles falsos son reemplazados o absorbidos por la clase mayoritaria que se encuentra junto a él (concepto de vecindad).



**Figura 3.28.** Comparación de resultados con la aplicación del filtros Majority

- **Sieve** este filtro ayudó a resolver el problema de los píxeles aislados que resultan de las imágenes clasificadas. La metodología que utiliza este

proceso es mirar los vecinos de 4 o 8 píxeles para determinar si un píxel es agrupado con píxeles de la misma clase. Si el número de píxeles en una clase que es agrupada es menor que el valor ingresado (4 o 8 píxeles), esos píxeles serán removidos de la clase y tomarán valores de *No clasificados*.

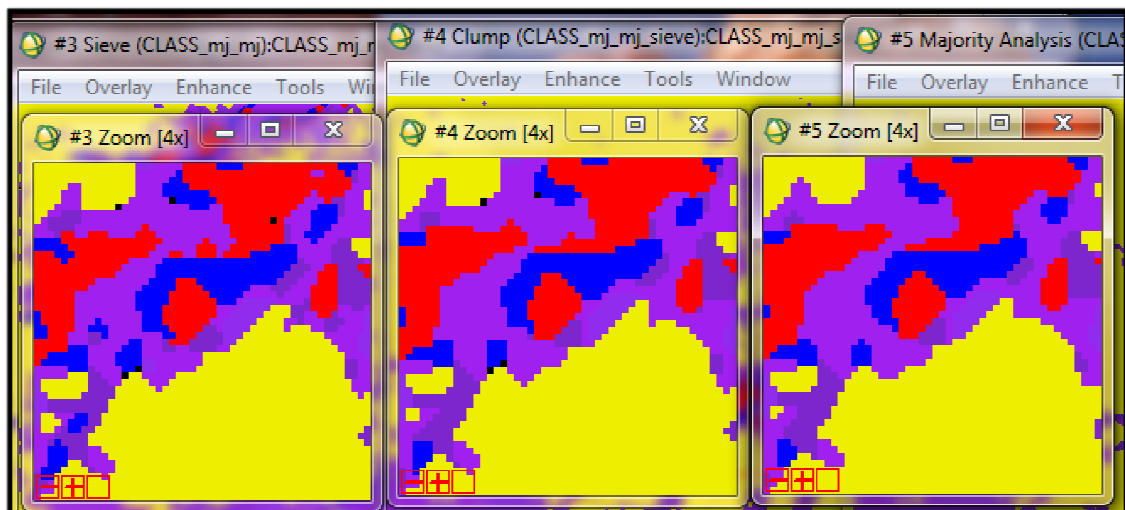
- **Clump** este filtro se utilizó para agregar la coherencia espacial de las clases existentes, combinando píxeles similares adyacentes a las áreas clasificadas.

Finalmente, debido a que no todos los píxeles con valores “*No clasificados*” son corregidos, es importante pasar un filtro de *Majority Analysis* para agrupar dichos píxeles a la clase vecina (ver figura 3.29).

*Sieve Classes*

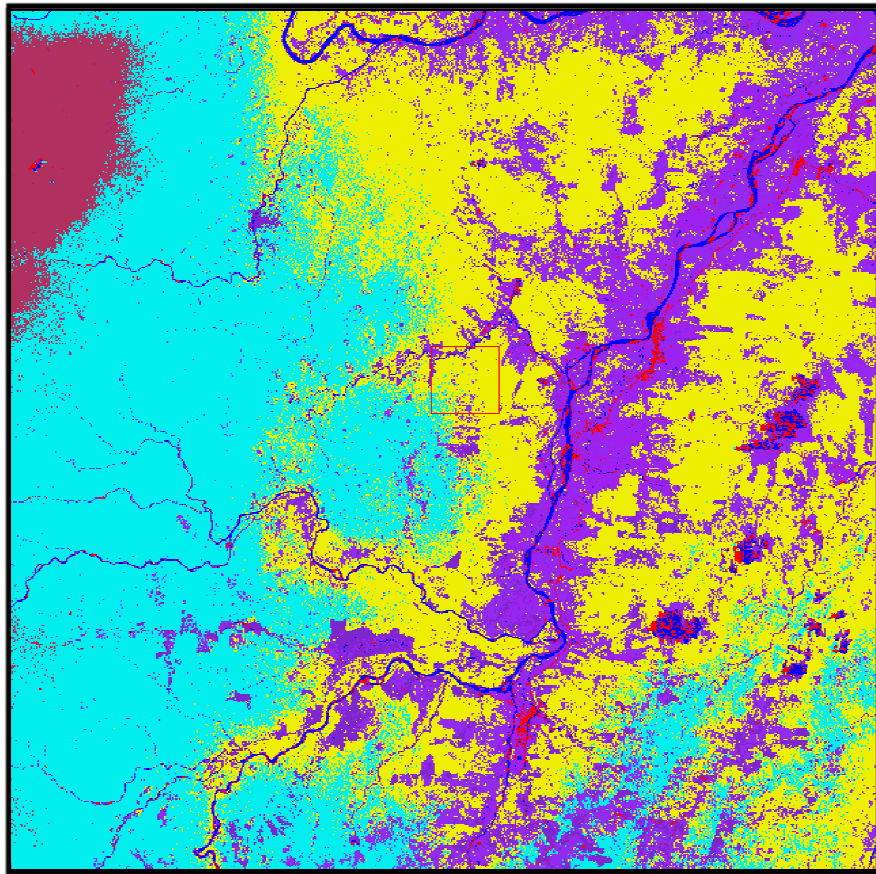
*Clump*

*Majority Analysis*



**Figura 3.29.** Comparación de resultados entre los filtros Sieve, Clump y Majority

El resultado final es una imagen clasificada sin pixeles aislados o pixeles sin clasificar (evitar el efecto pimienta), cabe indicar que hay que tener bastante precaución al momento de pasar los filtros, pues se puede perder clases o información relevante para el estudio, que alterarían los resultados de la clasificación original, para esto hay que revisar con la imagen cada vez que se aplique un proceso de filtrado para evitar la alteración de resultados (ver figura 3.30.).



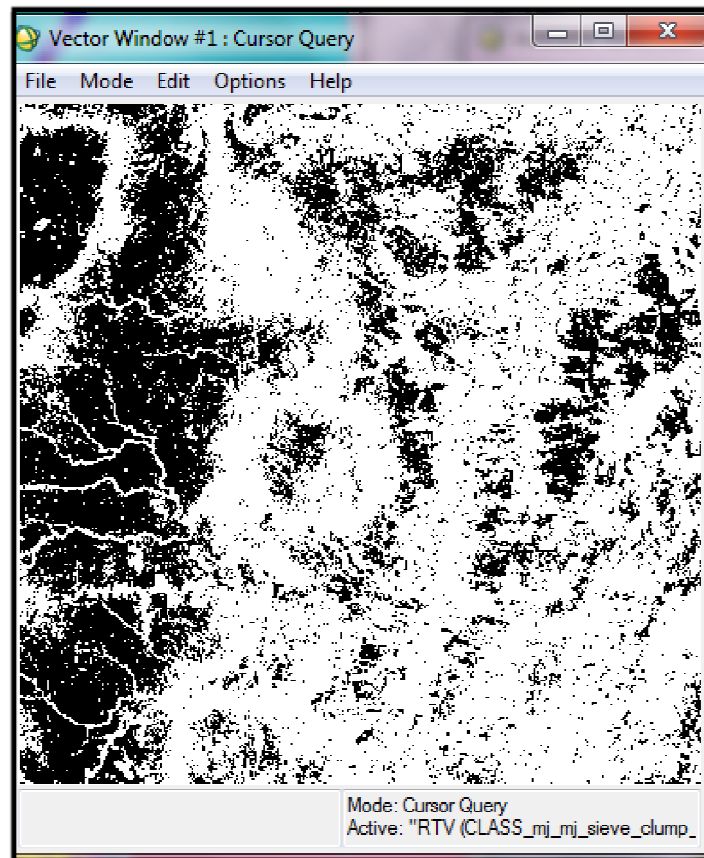
**Figura 3.30.** Resultado Final de la Clasificación Supervisada

Al finalizar el proceso de evaluación de las regiones de interés, aún existieron varios ROIs correspondientes a una misma categoría, para esto se utilizó la



función “*Combine*”. Esta función elimina clases individuales pertenecientes a una misma clase temática y las agrupa en una sola categoría, sin realizar cambios a la clasificación final; a diferencia del merge ROIs, el cual trabaja con estadísticas, lo que produce cambios en el resultado final.

Se requirió convertir la clasificación de ENVI a formato vector para realizar las ediciones de los polígonos, esto a realizarse en el software ArcGis con la herramienta “*Classification to Vector*” de ENVI (ver figura 3.31).

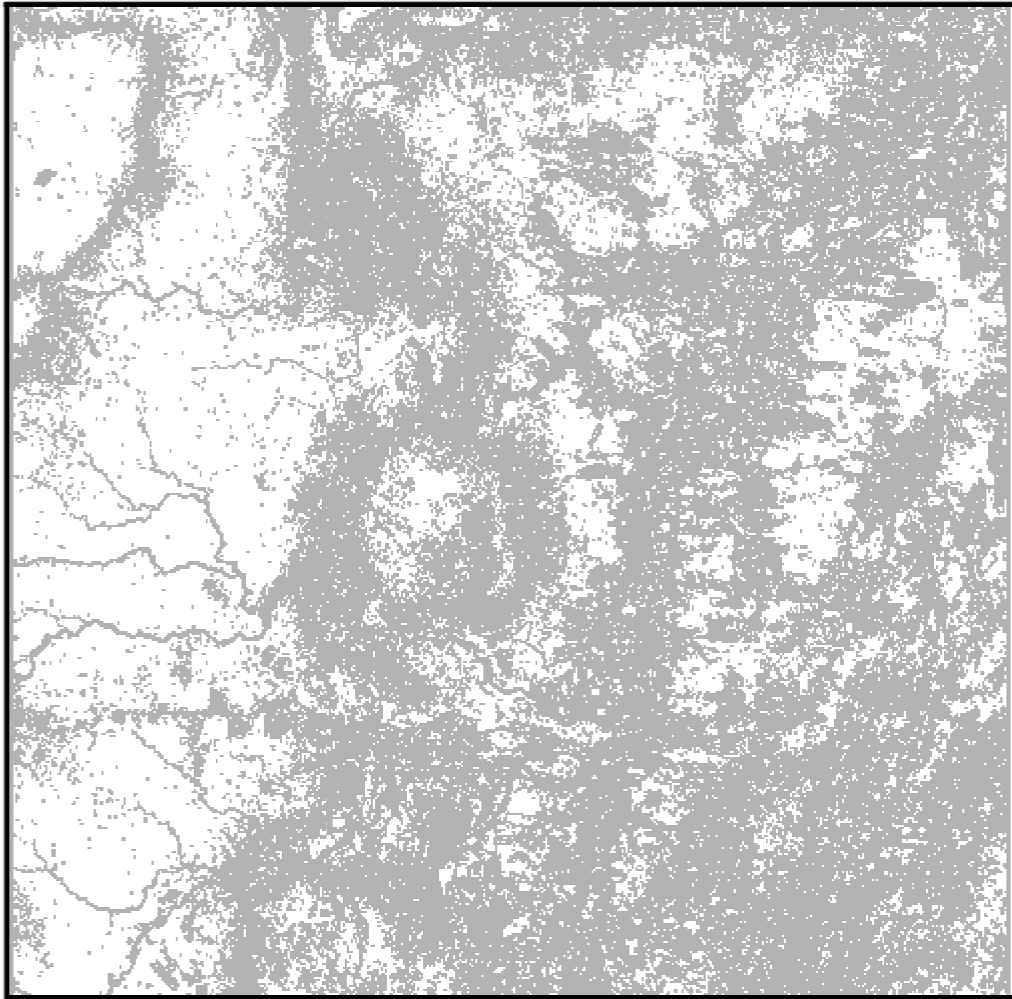


**Figura 3.31.** Visualización del vector en el software ENVI

Una ventaja que se encontró en ENVI en el proceso de post clasificación, fue al momento de convertir de raster a vector, pues la tabla de atributos creada en la etapa de recolección de los ROIs, mantiene sus atributos, con lo cual se pudo visualizar directamente en el software ArcGis (ver figuras 3.32, 3.33.).

FID	Shape	Class_Name	Class_Id	Parts	Length	Area
0	Polygon	Unclassified	0	3	200840	50290
1	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1550	18375
2	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	340	3150
3	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1000	11900
4	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	520	6100
5	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	2	1370	28000
6	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1250	21175
7	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	240	1475
8	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	40	100
9	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	170	975
10	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1170	27825
11	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	50	100
12	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	2	1940	48600
13	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	580	6750
14	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	130	550
15	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	20	25
16	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	20	25
17	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	190	925
18	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	150	700
19	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	3610	10945
20	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	220	1125
21	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	40	75
22	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1760	15150
23	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	550	5725
24	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	90	350
25	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	350	3050
26	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1610	14525
27	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	1240	10050
28	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	510	4975
29	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	2	1470	22075
30	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	2140	51150
31	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	130	600
32	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	120	500
33	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	2960	66850
34	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	130	575
35	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	110	575
36	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	100	450
37	Polygon	AGUA1 [Blue] 15212 points	1	1	120	500

Figura 3.32. Tabla de datos de la imagen clasificada

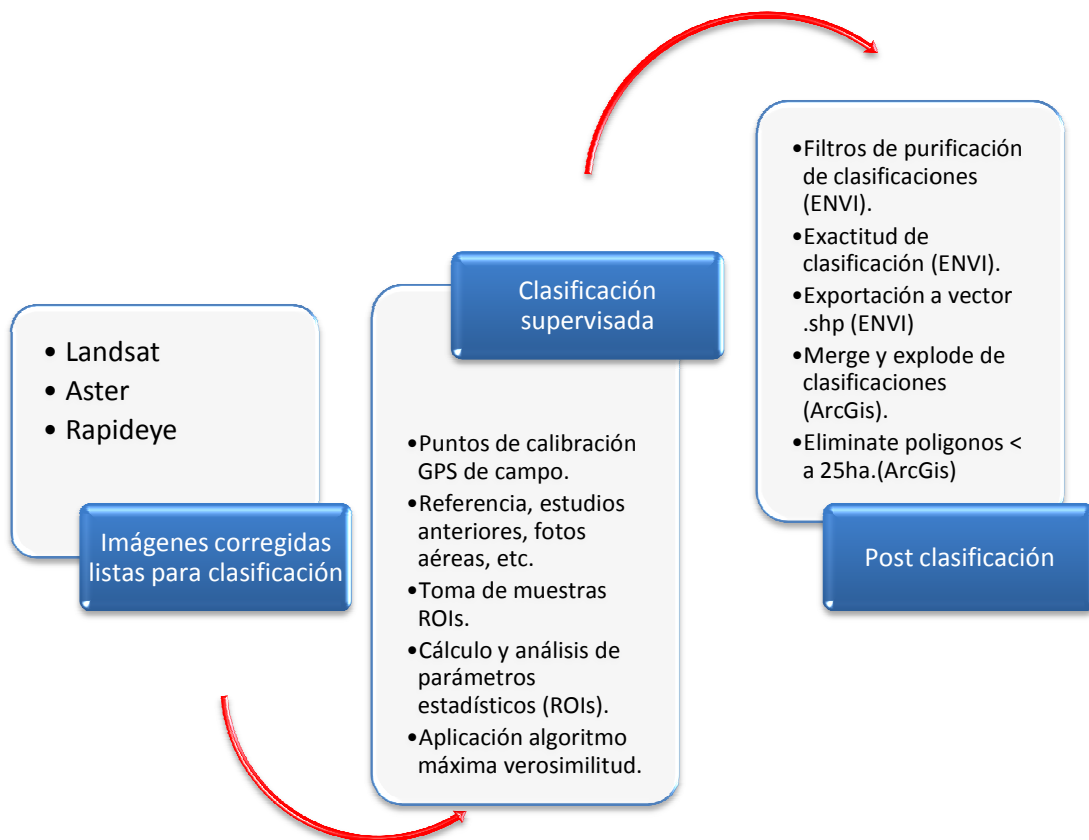


**Figura 3.33.** Imagen clasificada en formato shapefile, visualizada en ArcGis

En la figura anterior se presenta el resultado final de la clasificación de una imagen visualizada en ArcGis, esta clasificación todavía se encuentra sin editar su polígonos, pues existen varios procedimientos para llegar a tener una clasificación final, estos procedimientos se van a ampliar en los siguientes procesos de la investigación.

### 3.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA CON EL SOTWARE ENVI 4.7 A LAS IMÁGENES QUE SE ENCUENTRAN EN LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO).

En la clasificación supervisada de las imágenes dentro del límite de la zona piloto se procedió a clasificar una por una a las imágenes con el software ENVI 4.7. El procedimiento fue el mismo para todas las imágenes después que estas poseen las respectivas correcciones radiométricas y geométricas. A continuación para explicar de mejor manera el proceso que se realizó a cada una de las imágenes de la zona piloto, se presenta un diagrama referente al proceso de clasificación supervisada en el software ENVI 4.7.



**Figura 3.34.** Diagrama del proceso de análisis digital de imágenes

## 3.6. EXACTITUD DE CLASIFICACIÓN EN ENVI 4.7

### 3.6.1. Matriz de confusión

Utilizar una matriz de confusión para mostrar la exactitud de un resultado de clasificación mediante la comparación de un resultado de clasificación con información verdadera de la cobertura vegetal es necesario para un estudio de estas características. En ENVI, la función matriz de confusión permite la comparación de dos imágenes clasificadas (la clasificación y la imagen original), o una imagen clasificada y regiones de interés. La imagen verdadera puede ser otra imagen clasificada, o una imagen creada a partir de mediciones reales de la cobertura de la tierra.

### 3.6.2. Índice Kappa

El coeficiente kappa ( $\kappa$ ) es otra medida de la precisión de la clasificación. Se calcula multiplicando el número total de píxeles de todas las clases de verificación en tierra (N) por la suma de las diagonales matriz de confusión (XKK), restando la suma de los píxeles de tierra verdad en una clase veces la suma de los píxeles clasificados en la categoría que clase de agregado para todas las clases ( $\sum_i C_i$ ), y dividiendo por el número total de píxeles al cuadrado menos la suma de los píxeles terreno la verdad de que los tiempos de clase, la suma de los píxeles clasificados en la clase que sumado sobre todas las clases.

En el software ENVI el informe muestra la precisión global, el coeficiente kappa, matriz de confusión, errores de comisión (porcentaje de píxeles extra en clase), los errores de omisión (porcentaje de píxeles que quedan fuera de la clase), la precisión del productor, y la exactitud de usuario para cada clase. Exactitud del productor es la probabilidad de que un píxel en la imagen de clasificación se pone en  $x$  clase dada la verdad de clase  $x$ . Precisión de usuario es la probabilidad de que la verdad de clase  $x$  se encuentra un píxel dado  $x$  se pone en clase  $x$  en la imagen de clasificación. La salida de matriz de confusión muestra cómo cada una de estas evaluaciones de precisión se calcula. Para más detalles, se presenta un ejemplo matriz de confusión en ENVI.

En el ejemplo siguiente se explican los elementos calculados para la matriz de confusión, incluyendo la precisión general, el coeficiente kappa, confusión (contingencia) de la matriz, los errores de comisión, los errores de omisión, la exactitud del productor, y la precisión del usuario. ENVI puede calcular una matriz de confusión utilizando ya sea una imagen de realidad del terreno o utilizando ROIs desde la imagen original y ambas producen un resultado similar al ejemplo:

Confusion Matrix: {M6} (640x400x1)

Overall Accuracy = (131003/256000) 51.1730%

Kappa Coefficient = 0.2648

**Ground Truth (Pixels)**

<b>Class</b>	<b>Unclassified</b>	<b>Grass</b>	<b>Forest</b>	<b>Swamp</b>	<b>Total</b>
Unclassified	43689	26949	40	18001	88679
Grass	32835	64516	1741	3329	102421
Forest	8202	7277	4096	654	20229
Swamp	15227	10742	0	18702	44671
<b>Total</b>	<b>99953</b>	<b>109484</b>	<b>5877</b>	<b>40686</b>	<b>256000</b>

**Ground Truth (Percent)**

<b>Class</b>	<b>Unclassified</b>	<b>Grass</b>	<b>Forest</b>	<b>Swamp</b>	<b>Total</b>
Unclassified	43.71	24.61	0.68	44.24	34.64
Grass	32.85	58.93	29.62	8.18	40.01
Forest	8.21	6.65	69.70	1.61	7.90
Swamp	15.23	9.81	0.00	45.97	17.45
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

<b>Class</b>	<b>Commission (Percent)</b>	<b>Omission (Percent)</b>	<b>Commission (Pixels)</b>	<b>Omission (Pixels)</b>
Unclassified	50.73	56.29	44990/88679	56264/99953
Grass	37.01	41.07	37905/102421	44968/109484
Forest	79.75	30.30	16133/20229	1781/5877
Swamp	58.13	54.03	25969/44671	21984/40686

<b>Class</b>	<b>Prod. Acc. (Percent)</b>	<b>User Acc. (Percent)</b>	<b>Prod. Acc. (Pixels)</b>	<b>User Acc. (Pixels)</b>
Unclassified	43.71	49.27	43689/99953	43689/88679
Grass	58.93	62.99	64516/109484	64516/102421
Forest	69.70	20.25	4096/5877	4096/20229
Swamp	45.97	41.87	18702/40686	18702/44671

Análisis del ejemplo:

- ***Confusión Matrix (píxeles)***

La matriz de confusión se calcula mediante la comparación de la ubicación y la categoría de cada píxel de la imagen original con la ubicación y la categoría correspondiente en la imagen clasificada y regiones de interés (ROIs). Cada columna de la matriz de confusión representa una clase en la imagen original y los valores en la columna corresponden al etiquetado en la clasificación de los píxeles de verificación. Por ejemplo, se observa la columna de la imagen verdadera para la clase de bosque (píxeles), el total muestra 5.877 píxeles en esta clase. La clasificación fue capaz de clasificar 4.096 de estos píxeles correctamente, pero no se clasificaron 40 píxeles y 1.741 fueron clasificados como superficie herbácea.

- ***Confusión Matrix (Porcentaje)***

La tabla muestra la distribución de las clases en porcentaje para cada clase de la imagen original. Los valores se calculan dividiendo los recuentos de píxeles en cada columna de la imagen original por el número total de píxeles en una clase de la clasificación. Por ejemplo, en la clase de bosque los píxeles clasificados correctamente por ciento es  $4,096 / 5,877 = 0,697$  o 69,7%.



- **Comisión**

Errores de comisión representan píxeles que pertenecen a otra clase que se etiquetan como pertenecientes a la clase de interés. Los errores de comisión se muestran en las filas de la matriz de confusión. En el ejemplo de matriz de confusión, la clase herbácea tiene un total de 102.421 píxeles, donde 64.516 píxeles se clasifican correctamente y 37.905 píxeles se clasifican incorrectamente como hierba (37.905 es la suma de todas las otras clases de la fila herbácea de la matriz de confusión). La relación del número de píxeles clasificados incorrectamente por el número total de píxeles de la clase verdad suelo forma un error de comisión. Para la clase de herbácea en el error de comisión es de  $37.905 / 102.421$  lo que equivale a un 37%.

- **Omisión**

Los errores de omisión representan los píxeles que pertenecen a la clase baja, pero la verdad la técnica de clasificación no ha logrado su clasificación en la clase adecuada. Los errores de omisión se muestran en las columnas de la matriz de confusión. En el ejemplo de matriz de confusión, la clase de herbácea tiene un total de 109.484 píxeles realidad del suelo donde 64.516 píxeles se clasifican correctamente y 44.968 píxeles de la clase herbácea son clasificados incorrectamente (44.968 es la suma de todas las otras clases en la columna de la hierba de la matriz de confusión). La relación del número de píxeles clasificados incorrectamente por el número total de píxeles de la clase imagen original forma

un error de omisión. Para la clase herbácea el error de omisión es 44968/109484 que equivale a un 41,1%.

- ***Precisión del Productor***

La exactitud del productor es una medida que indica la probabilidad de que el clasificador ha marcado un píxel de la imagen en la Clase A, dado que el imagen original Clase A. En el ejemplo de matriz de confusión, la clase herbácea tiene un total de 109.484 píxeles realidad de la cobertura donde se encuentran 64.516 píxeles correctamente clasificados. La precisión del productor es la relación  $64516/109484$  o 58,9%.

- ***Precisión del usuario***

Manual de precisión es una medida que indica la probabilidad de que un píxel es de clase A ya que el clasificador ha marcado el píxel en la Clase A. En el ejemplo de matriz de confusión, el clasificador ha etiquetado 102.421 píxeles como la clase herbácea y un total de 64.516 píxeles se clasifican correctamente. La exactitud de usuario es la relación  $64516/102421$  o 63,0%.

### **3.7. UNIÓN Y EDICIÓN DE LAS CLASIFICACIONES DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)**

Una vez obtenidas las clasificaciones finales de cada imagen, se confirma que toda la información esté georeferenciada de acuerdo a la zona de trabajo (UTM-WGS84 18 Norte); el siguiente paso es reducir el número de polígonos de cada clasificación, para lo cual se selecciona todos los polígonos que pertenezcan a una misma clase o ecosistema, y se aplica directamente las funciones “merge” y “explode” (en ese orden) del Editor de ArcGis 9.3, la primera combina las características de entrada de múltiples fuentes de entrada (del mismo tipo de datos) en una única nueva clase de entidad de salida, y la segunda separa una entidad multiparte seleccionada en sus funciones de los componentes individuales, esto es útil para alterar los atributos de uno de los elementos en una entidad multiparte.

Cuando se reduce al mínimo el número de polígonos de cada clasificación, se aplica la herramienta “repair geometry” (repara la geometría de los polígonos), y se calcula el área para todos los polígonos; con esta información se puede aplicar la herramienta “eliminate” en el software ArcGis que combina los polígonos seleccionados con los polígonos vecinos si tienen la mayor frontera compartida o el área más grande.

Por lo escrito, este proceso consiste en eliminar los segmentos que contengan una superficie menor a la unidad mínima mapeable (UMM), la UMM responde al

objeto más pequeño que se puede representar en un mapa en función del nivel de detalle, objetos que no son representativos para este nivel de detalle son eliminados por ser menores a la UMM.

En un mapa, el tamaño mínimo que debe ocupar una unidad mapeable ha de ser de al menos 25 mm<sup>2</sup>; un cuadrado de 5 mm de lado (Vink; 1975, citado por Rossiter, 1994).

Para determinar la UMC se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{UMC} = (\text{MUM} * [\text{E} / 1000]^2)$$

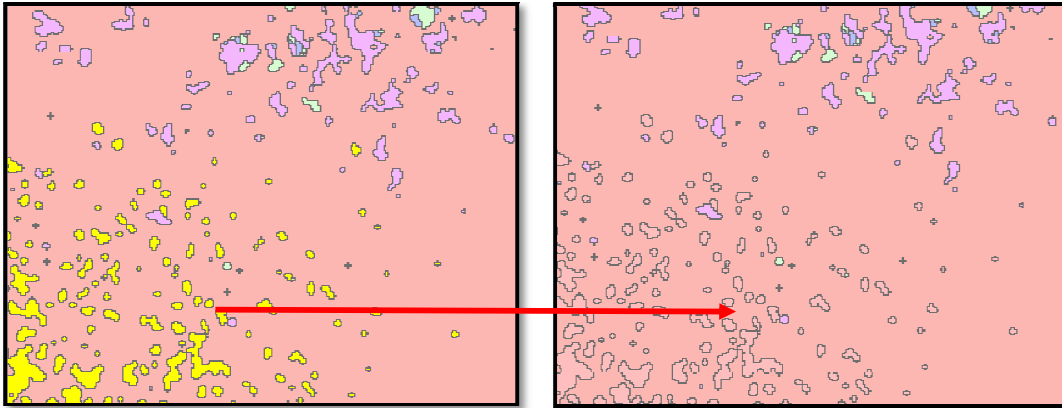
Donde: E = escala

MUM = mínima unidad mapeable = 5 mm \* 5 mm

Dando como resultado lo siguiente:

$$\text{UMC} = (25 \text{ mm}^2 * [100000 / 1000]^2 \text{ m}^2/\text{mm}^2) \text{ UMC} = 250000 \text{ m}^2 = 25 \text{ ha}$$

La unidad mínima mapeable para el presente estudio se ha establecido en 25 hectáreas. Este proceso se repitió, hasta conseguir un archivo vectorial donde todos sus segmentos sean mayores o iguales a la UMM.



**Figura 3.35.** Proceso con la herramienta eliminate.

Una vez que se reduce el número de polígonos de todas las clasificaciones, se utiliza la funciónn “Update” de Arc Toolbox (ArcGis), se procede a unir cada una de las clasificaciones, tomando siempre en cuenta, cuál de las dos clasificaciones se adapta mejor en la región de traslapo al momento de la unión, pues la herramienta “Update” lo que hace es sobreponer la clasificación una sobre otra, donde queda a criterio del intérprete cuál debe ir por arriba y cual por debajo, la clasificación que se encuentre arriba mantendrá sus atributos y predominará sobre la que este debajo.

A continuación se revisa que exista coherencia y continuidad entre las clasificaciones, para lo cual se visualiza todas las clasificaciones e imágenes de la zona de estudio, cuando existe la necesidad de editar algún polígono se lo edita observando la imagen como base para corregir mínimas distorsiones, y si por algún motivo se presentaba diferencias visuales muy grandes, se corrige dando un mayor peso a la información de referencia, es decir, puntos de campo, coberturas de ecosistemas de estudios anteriores, etc., que permitan confirmar la

delimitación correcta de los ecosistemas (solo se corrige en las zonas de “conflicto de continuidad”).

Con las interpretaciones de cada imagen validadas en su contexto general (coherentes con las de su alrededor), se debe siempre reparar la geometría antes y después de reducir al mínimo la cantidad de polígonos. En la etapa de edición (ArcGis) se tiene que confirmar que el campo “*ecosistema*” este correctamente lleno en relación a los ecosistemas que corresponderían a esa región geográfica, y que no existan errores ortográficos y/o tipológico, además que todos los polígonos tengan un atributo en este campo, llenando inclusive nubes y sombras, las áreas sin cobertura vegetal, los cultivos y zonas antrópicas y cuerpos de agua.

### **3.8. INTEGRACIÓN DE INSUMOS DE BIOCLIMA Y GEOFORMA.**

#### **3.8.1. Modelo Bioclimático.**

La temperatura, la precipitación total anual, y la variación mensual o estacional de la precipitación, son factores que definen en un grado elevado la distribución de los ecosistemas. En el caso del Ecuador, es una tarea compleja caracterizar el clima para modelar la distribución de ecosistemas. Esto se debe a la variación geográfica impuesta por los Andes y a la complejidad de los factores que determinan el clima a escalas de paisaje y locales. En este caso, la caracterización del clima se facilita grandemente al utilizar índices bioclimáticos,

como los propuestos por Rivas- Martínez (2010) para América del Sur, porque estos proveen escalas continuas con las cuales es posible inferir la significancia biológica, principalmente en la actividad fotosintética de las plantas.

A continuación se presenta el proceso metodológico que se utilizó para la representación cartográfica de bioclimas y ombrotipos pues se deriva de forma directa de la partición de los índices continuos índice ombrotérmico (Io) e índice ombrotérmico de la época seca (Iod2).

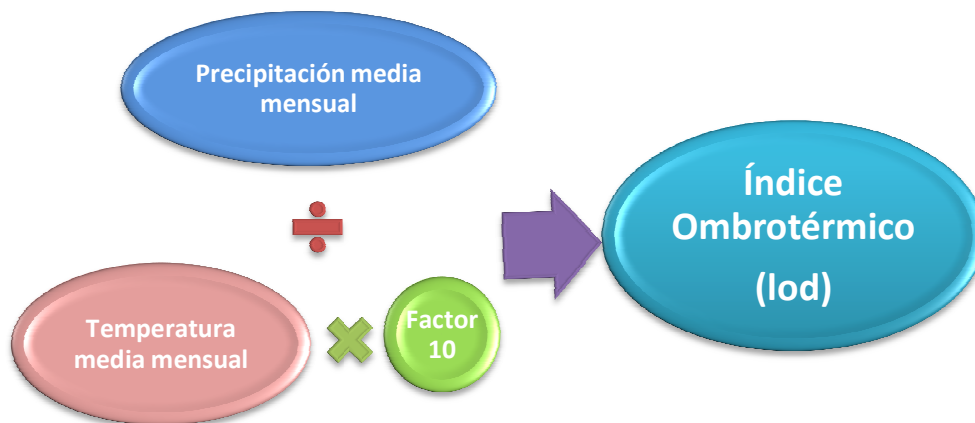
Los índices más ampliamente utilizados y con mayor relevancia para modelar ecosistemas son los siguientes:

#### **3.8.1.1. Ombrotipos.**

Con el fin de construir la capa del índice ombrotérmico como medio para desarrollar el mapa de ombrotipos del Ecuador continental se utilizó como insumo principal dos capas precipitación y temperatura media.

- **Índice ombrotérmico (Io):** mide la disponibilidad relativa y efectiva del monto anual de la precipitación en relación a las temperaturas medias anuales. El índice se calcula como:  $Io = Pp / Tp$ , donde Pp= Precipitación positiva anual correspondiente a los meses con temperatura media mensual superior a 0°C, Tp= Temperatura positiva anual correspondiente a la suma de los meses de temperatura media mensual superior a 0°C en décimas de grados centígrados.

- **Índice ombrotérmico de la época seca (Iod2):** evalúa el ritmo anual de las precipitaciones al estimar la intensidad de la época seca mediante el cálculo del índice ombrotérmico de los dos o tres meses consecutivos con menor precipitación anual. Expresión:  $Iod2 = P2/T2$ , donde P=precipitación media de los dos meses con menor precipitación anual, T2=temperatura media de los dos meses con menor precipitación anual x 10.



**Figura 3.36.** Flujo de trabajo para la construcción de la capa de Índice Ombrotérmico

Una vez obtenida la capa del índice ombrotérmico (Io), se reclasificó esta según la equivalencia de los intervalos de acuerdo a la propuesta de representación cartográfica, valores que se detallan a continuación (MAE-2010):



<b>OMBROTIPO</b>	<b>Io</b>
DESERTICO	0 - 1
SEMIARIDO	1.0 - 1.5
SEMIARIDO SUPERIOR	1.5 - 2.0
SECO INFERIOR	2.0 - 2.8
SECO SUPERIOR	2.8 - 3.6
SUBHUMEDO INFERIOR	3.6 - 3.8
SUBHUMEDO SUPERIOR	4.8 - 7.0
HUMEDO INFERIOR	7.0 - 10.5
HUMEDO SUPERIOR	10.5 - 14.0
HIPERHUMEDO INFERIOR	14.0 - 21.0
HIPERHUMEDO SUPERIOR	21.0 - 28.0
ULTRAHUMEDO	>28.0

**Tabla 3.6.** Ombrotipos presentes en el Ecuador Continental.

Para nuestro estudio se obtuvo únicamente los ombrotipos correspondiente a la Zona Piloto (Provincia de Napo) (ver anexo D).

### **3.8.1.2. Termotipos.**

Para la construcción de la capa del índice de termicidad (It), se lo realizó a partir de la información de capas continuas de información de temperatura, entendiéndose para este caso la capa de temperaturas máximas, mínimas y medias a nivel anual, expresadas según el esquema que se detalla a continuación:



**Figura 3.37.** Proceso para obtener el Índice de Termicidad

En este caso se utilizó la información de worldclim<sup>4</sup>, por contar con las características que mejor se pueden asociar al relieve y por lo tanto permitiría discriminar de forma más eficiente la distribución de ecosistemas. Al ser un ejercicio preliminar se podría replicar con la información del INAMHI<sup>5</sup> correspondiente a estas variables, ya que a la fecha que se ejecuta el proyecto la cantidad de estaciones que contienen estas variables es limitada y su distribución espacial es poco representativa. Una vez obtenida la capa del índice de termicidad, se procedió a reclasificar la capa de acuerdo a los valores que se presentan a continuación:

<sup>4</sup> El worldclim es un conjunto de capas de información temática en formato raster con una resolución de 1 km, especialmente diseñado para su tratamiento a través de sistemas de información geográfica u otros programas de modelamiento. La base de datos utilizada para la construcción de este modelamiento está documentado en relación al artículo de Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas.

<sup>5</sup> El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador. (INAMHI)

TERMOTIPO	It	Tp
INFRATROPICAL INFERIOR INFRATROPICAL SUPERIOR	810 - 890 730 - 810	>3350 3100 - 3350
TERMOTROPICAL INFERIOR TERMOTROPICAL SUPERIOR	610 - 730 490 - 610	2900 - 3100 2700 - 2900
MESOTROPICAL INFERIOR MESOTROPICAL SUPERIOR	395 - 490 320 - 395	2400 - 2700 2100 - 2400
SUPRATROPICAL INFERIOR SUPRATROPICAL SUPERIOR	240 - 320 160 - 240	1575 - 2100 1050 - 1575
INFRATROPICAL INFERIOR INFRATROPICAL SUPERIOR	810 - 890 730 - 810	>3350 3100 - 3350
TERMOTROPICAL INFERIOR TERMOTROPICAL SUPERIOR	610 - 730 490 - 610	2900 - 3100 2700 - 2900
MESOTROPICAL INFERIOR MESOTROPICAL SUPERIOR	395 - 490 320 - 395	2400 - 2700 2100 - 2400
SUPRATROPICAL INFERIOR SUPRATROPICAL SUPERIOR	240 - 320 160 - 240	1575 - 2100 1050 - 1575
OROTROPICAL INFERIOR OROTROPICAL SUPERIOR	105 - 160 50 - 105	750 - 1050 450 - 750
CRIOROTROPICAL INFERIOR CRIOROTROPICAL SUPERIOR	- -	150 - 450 1 - 150
ATERMICO TROPICAL	-	0

**Tabla 3.7.** Termotipos presentes en el Ecuador continental

Para nuestro estudio se obtuvo únicamente los termotipos correspondiente a la Zona Piloto (Provincia de Napo) (ver anexo E).

### **3.8.2. Modelo de Geoformas.**

La orografía y la geomorfología son factores determinantes en la distribución de los ecosistemas. La tierra sólida constituye la plataforma estable que sirve de sustrato para el mantenimiento de la capa biótica y es modelada por sus relieves. Estas características del paisaje, que incluyen montañas, colinas y llanuras, aportan otra dimensión al medio físico y proporcionan hábitats variados para las formaciones vegetales. A escalas continentales, regionales y de paisajes las formaciones geológicas influyen en factores ambientales como la precipitación, temperatura, humedad, protección, generación de disturbios que afectan fuertemente en el tipo de organismos que pueden establecerse en una zona dada. En ciertas regiones la forma del terreno tiene especial relevancia en la distribución espacial de los ecosistemas por su influencia en el tipo de agua de inundación y la frecuencia de estas. Por ejemplo, en zonas montañosas el relieve del terreno impide que los ríos tengan áreas de inundación extensas por lo que los regímenes de inundación tiene una incidencia menor en la distribución de ecosistemas de montaña. Por el contrario, en las tierras bajas como la Amazonia, dominadas por los relieves suaves, la capacidad de inundación de los ríos es más amplia por lo tanto su efecto en la distribución de ecosistemas adquiere una relevancia mayor. Con base en estas consideraciones, para mapear ecosistemas en el Ecuador continental es necesario utilizar geomorfología a escalas espaciales regionales y de paisaje. Algunas de estas características de relieve del terreno han demostrado ser de gran utilizada en iniciativas de mapeo de ecosistemas en países andinos y en procesos de representación de ecosistemas a nivel nacional y continental en otras regiones geográficas. En el caso del Ecuador, se plantean

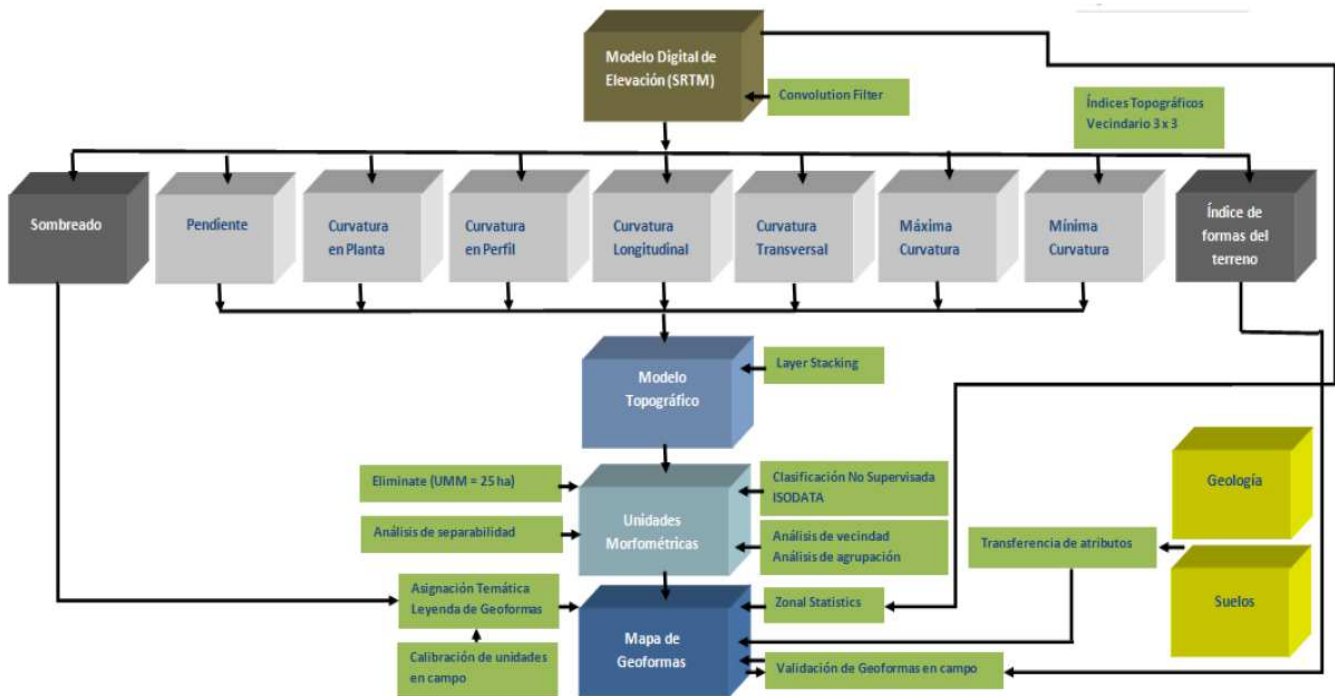
factores diagnósticos a tres niveles para representar le geoforma: 1) relieve general, 2) macrorelieve y 3) mesorelieve. Es importante notar que en relieves de montaña la distribución de los ecosistemas y valles está estrechamente asociada a la variación bioclimática, biogeográfica y de pisos altitudinales. Al contrario, en tierras bajas, donde no existe una gran variación bioclimática, la distribución de los ecosistemas está estrechamente relacionada con el meso y microrelieve.

Para la representación cartográfica de Geoformas se parte de un modelo digital de elevación, en este caso el SRTM, del cual se generan los índices topográficos que sirven de insumo para el proceso de clasificación automática que consiste en una clasificación no supervisada (ISODATA) para generar clusters, los clusters representan unidades morfométricas, es decir que representan una geoforma o un conjunto de estas, para luego realizar una atribución temática de acuerdo a la leyenda expuesta, una vez finalizado el mapa se realiza una transferencia de atributos de las capas de la cobertura de geología y suelos lo que ayuda a discriminar de mejor forma las unidades, junto a esto también se realiza un análisis estadístico zonal para extraer variables estadísticas del modelo digital de elevación, esto con el objetivo igualmente de ayudar a clasificar de mejor manera las unidades geomorfológicas en función de su desnivel relativo y su elevación, finalmente se valida el mapa con datos de campo y utilizando un índice topográfico llamado formas del terreno el cual nos da una clasificación ya establecida.

RELIEVE GENERAL	MACRORELIEVE	MESORELIEVE
DE MONTAÑA	Montaña	Edificios Volcánicos
		Relieves Montañosos
	Serranía	Colinas
		Cuestas
		Chevrones
		Mesas
		Vertientes
	Valle	Planicies
		Terrazas
	TIERRAS BAJAS	Cordillera
Colinas		
Cuestas		
Mesetas		
Vertientes		
Piedemonte		Chevrones
		Colinas
		Cuestas
		Mesetas
		Vertientes
		Terrazas
		Planicies
		Abanico aluvial
Penillanura		Colinas
		Chevrones
		Vertientes
Llanura		Abanico aluvial
		Planicies
		Terrazas

**Tabla 3.8.** Leyenda de unidades geomorfológicas

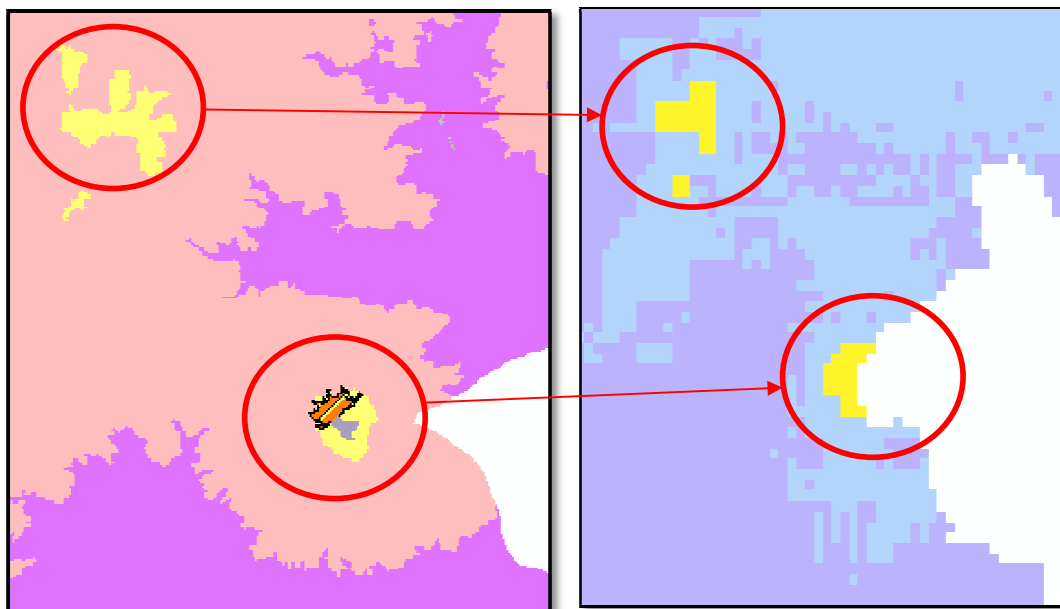
A continuación se presenta un esquema de la Metodología que se utilizó en la obtención del Modelo de Geoformas.



**Figura 3.38.** Metodología Modelo de Geoformas.

Para el modelo de geoformas las unidades se han generado a partir de un proceso metodológico, se cuenta con unidades discretas, sin embargo se ha tomado información de la capa de geología y suelos para la transferencia de atributos, la información en ciertas zonas como terrazas aluviales y planicies se transfiere el atributo sin problema en las demás unidades se baso en interpretación y datos de campo, sin embargo la información ya está siendo actualizada por el proyecto “generación de Geoinformación a nivel nacional a escala 1:25000” ejecutado por CLIRSEN por lo que es recomendable tomar dicha información en su momento y mejorar el mapa de unidades geomorfológicas para la representación de Ecosistemas.

El procedimiento que se siguió para la verificación de los ecosistemas fue comparar los rangos descritos por los modelos y relacionarlos con los límites de los ecosistemas identificados en el análisis digital de las imágenes. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo se relacionaba una por una las clases de los modelos hasta ajustar el límite del ecosistema. Cabe indicar que si bien el modelo ayudó mucho a identificar los límites siempre se priorizaba a la clasificación de las imágenes, mediante la imagen original.



**Figura 3.39.** Inclusión de los modelos de bioclimas y geoformas en la clasificación supervisada.

Estos insumos sirven para realizar un análisis de los límites de los ecosistemas, contribuyendo o dando un soporte a la clasificación supervisada de imágenes. El resultado de la aplicación de estos insumos se observará en la versión final del mapa de ecosistemas de la Zona Piloto (ver anexo B).



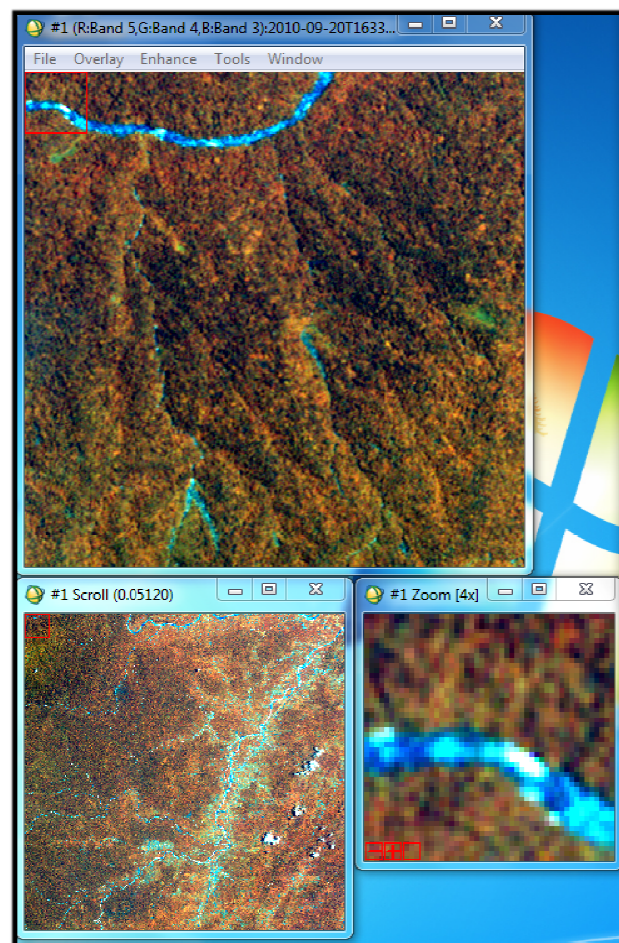
## **4. RESULTADOS**

En este capítulo se va a dar a conocer los resultados obtenidos en los siguientes puntos, la evaluación de los Software ENVI 4.7 y sus ventajas en el proceso de clasificación supervisada, la aplicación de método de clasificación supervisada a las imágenes que se encuentran dentro del límite de la Zona Piloto (Provincia de Napo), la exactitud de la clasificación aplicando con la herramienta matriz de confusión y los parámetros que ésta contiene en ENVI, unión y edición de las clasificaciones de las imágenes resultantes, integración de los insumos bioclima y geformas para la mejor delimitación de los ecosistemas, comprobación de los ecosistemas con relación a los puntos (GPS) adquiridos en el campo, finalmente la versión final de los ecosistemas identificados plasmados en un mapa temático escala 1:100000.

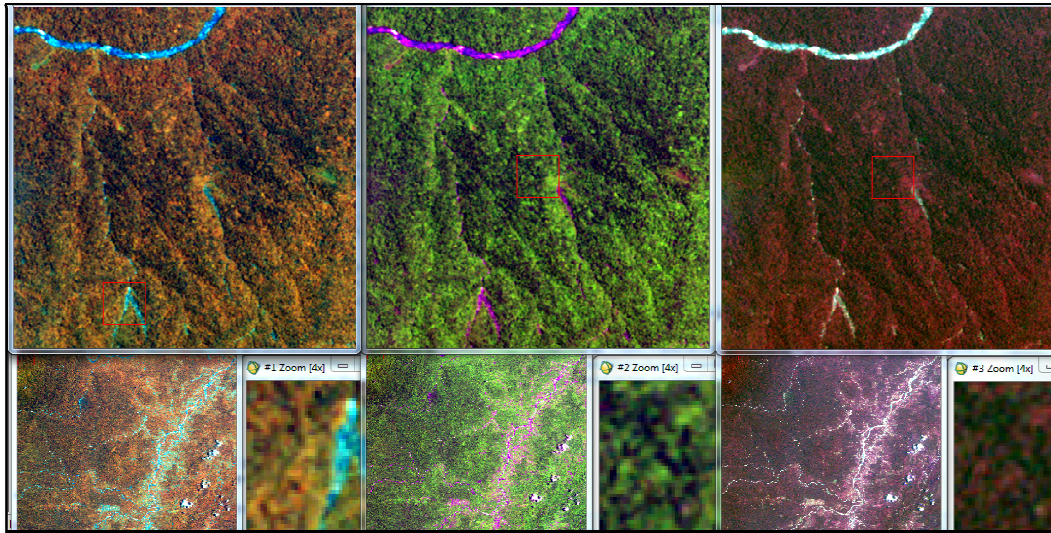
### **4.1. RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ENVI 4.7**

Después de realizar el proceso de clasificación a las imágenes Landsat, Aster y Rapideye de prueba en ENVI con el método de clasificación supervisada, se encontró algunas características que permiten constatar que este software es una potente herramienta de trabajo en cuanto al tratamiento de imágenes satelitales se refiere. En los siguientes párrafos se va a describir las ventajas encontradas en ENVI, identificadas en esta investigación.

La visualización de una imagen en ENVI es versátil pues consta de tres pantallas interconectadas entre sí (geolink), con tres tipos de zoom diferentes, logrando de esta manera una mejor ubicación de los tipos de cobertura, así como también una mejor facilidad en digitalización de muestras espectrales o ROIs. ENVI puede abrir el número de ventanas que soporte las dimensiones de una pantalla con diferentes combinaciones de bandas cada una con los tres zooms diferentes, esto de igual manera ayuda a identificación más precisa de las diferentes clases que se pueden presentar en una imagen satelital (ver figura 4.1. y 4.2).



**Figura 4.1.** Visualización en ENVI tres tipos de zoom



**Figura 4.2.** Visualización en ENVI misma imagen tres ventanas diferentes y tres combinaciones de bandas diferentes

ENVI es amigable en la toma de muestras, pues se lo puede hacer en cualquiera de las tres ventanas desplegadas, simplemente escogiendo una de los tres tipos de ventana que se despliega en la herramienta “ROI tool”. En la misma ventana se puede escoger la forma de digitalizar la muestra espectral al gusto y necesidades del intérprete (polígono, polilínea, punto, etc.). Los ROIs pueden borrarse de uno en uno o todo el conjunto de muestras, después de la creación de las regiones de interés, éstas se pueden se borradas, renombradas o fusionadas.

Para el cálculo y el análisis de los parámetros estadísticos en muestras espectrales, se realiza un análisis rápido y concreto sobre separabilidad de las clases con el fin de que las reflectancias de los usos de la cobertura de la tierra no tiendan a confusión, esto se presenta en un archivo que muestra la separabilidad de cada par de clases con valores que van de 0 a 2, también se puede analizar

visualmente con las opciones de gráficos e histogramas que presenta este software.

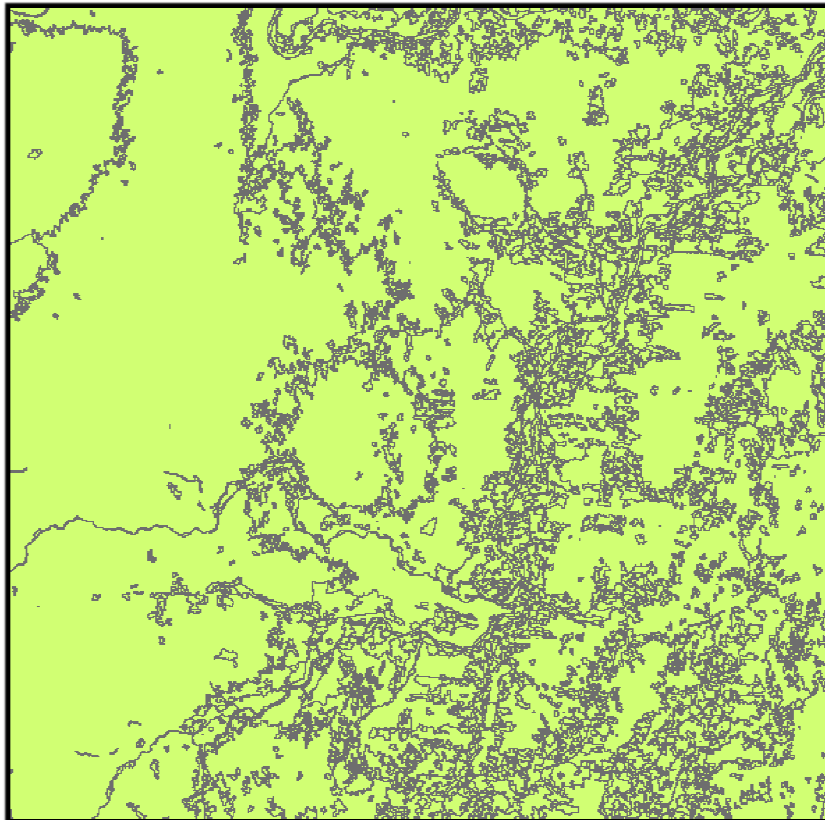
ENVI en la clasificación supervisada trabaja directamente con ROIs (regiones de interés) que en nuestro caso son las muestras que tomamos de cada clase, esto facilita la ubicación de las muestras tomadas en la imagen y la comparación con otras muestras anteriormente delimitadas para realizar los ajustes necesarios

ENVI maneja con gran eficacia la tabla de atributos, ya que el nombre de las clases no se pierden cuando la clasificación final es convertida en vector para ser abierta en ArcGis y continuar con los procesos de edición, pues al abrir el shape en el módulo ArcMap constan todas las clases seleccionadas en las muestras o ROIs (ver la figura 3.33.).

Como resultado final, al analizar la clasificación en ENVI se observa que los polígonos presentan una delimitación muy acorde con la imagen, esto depende fuertemente a como el interprete realizó la toma de muestras en las clases, y al algoritmo que se utilizó para la clasificación, como se constató en el capítulo de metodología, el algoritmo de máxima verosimilitud presentó los mejores resultados (ver figura 4.3).

La aplicación de filtros en la generalización de las clasificaciones fue esencial, pues se obtuvo un resultado con áreas mejor definidas y sin píxeles aislados o sin clasificar, se debe tomar en cuenta que no exista pérdida de información o que

no se distorsione la realidad después de aplicar un filtro, para esto se debe revisar cada vez que se aplique un filtro la información resultante.



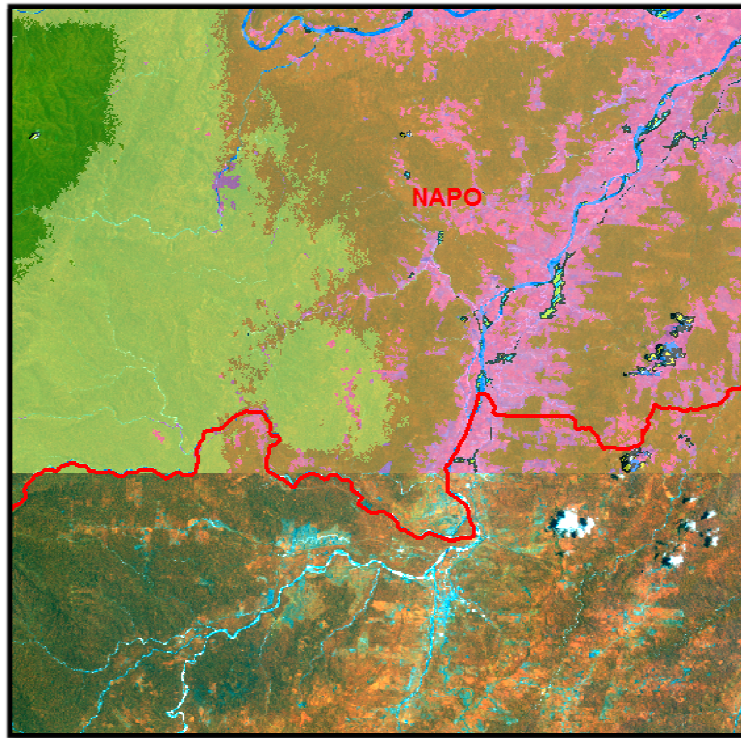
**Figura 4.3.** Imagen clasificada en ENVI 4.7

#### **4.2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA EN ENVI A LAS IMÁGENES QUE SE ENCUENTRAN DENTRO DE LA ZONA PILOTO.**

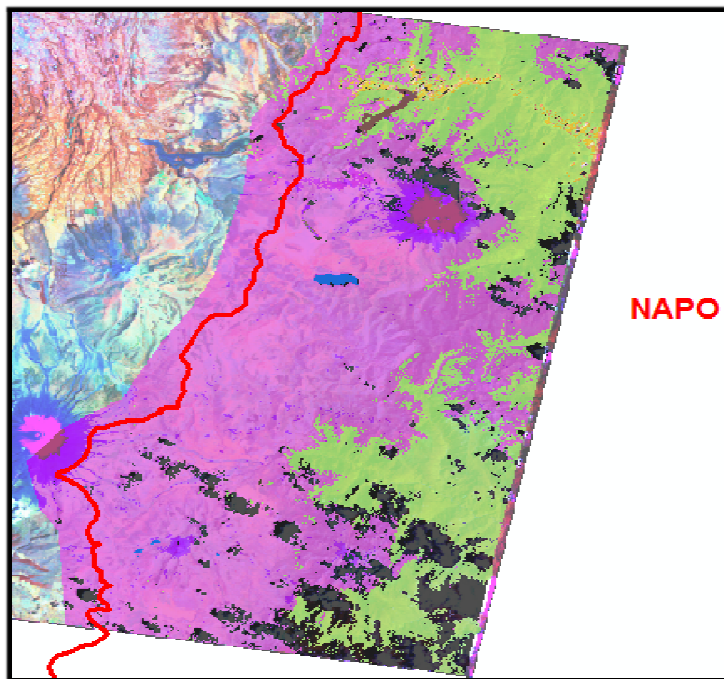
Para este proceso el procedimiento fue el mismo para todas las imágenes, después de que las imágenes se están corregidas geométricamente y radiométricamente, entraron a la etapa de clasificación, aquí se tomaron las muestras espectrales o ROIs con la ayuda de los puntos de calibración,

fotografías áreas dependiendo del sector, estudios anteriores de ecosistemas o estudios de formaciones vegetales, etc.; se calculó y analizó los parámetros estadísticos de todas y cada una de las imágenes , se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud después de ser comprobado en estudio como el más idóneo para la clasificación supervisada, finalmente en la etapa de post clasificación se aplicaron los filtros necesarios detallados en el capítulo de metodologías; se determinó la exactitud de clasificación a cada imagen mediante la herramienta de matriz de confusión de ENVI, con la metodología de comparación de los ROIs con la imagen satelital original, se exportó los resultados a formato vector para que todos los polígonos resultantes de la clasificación puedan ser editados en ArcGis con los parámetros propuestos en este estudio, las ediciones se las realizó con las herramientas merge, explode y eliminate del módulo ArcMap.

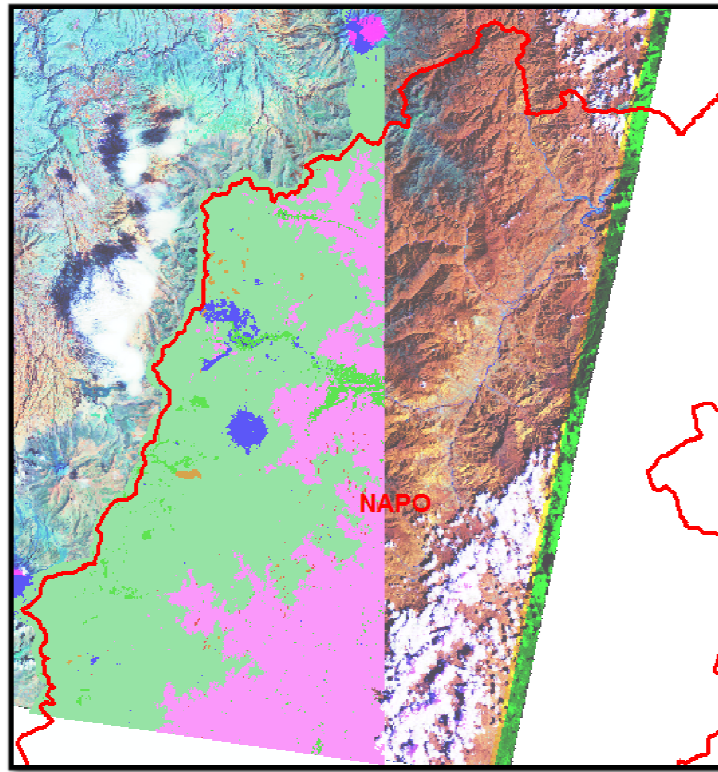
Por motivos de espacio no se va a presentar todas las imágenes clasificadas, se ha seleccionado una imagen de cada sensor para la presentación de resultados.



**Figura 4.4.** Imagen Rapideye y clasificación de ecosistemas



**Figura 4.5.** Imagen Aster y clasificación de ecosistemas



**Figura 4.6.** Imagen Landsat y clasificación de ecosistemas.

#### **4.3. RESULTADOS DE LA EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE MATRIZ DE CONFUSIÓN DE ENVI.**

En ENVI, la función *matriz de confusión* permite la comparación de dos imágenes clasificadas (la clasificación y la imagen original), o una imagen clasificada y regiones de interés. La imagen verdadera puede ser otra imagen clasificada, o una imagen creada a partir de mediciones reales de la cobertura de la tierra.



El informe que presenta el software muestra la precisión global, el coeficiente kappa, matriz de confusión, errores de comisión (porcentaje de píxeles extra en clase), los errores de omisión (porcentaje de píxeles que quedan fuera de la clase), la precisión del productor, y la exactitud de usuario para cada clase.

A continuación se presenta el proceso de la obtención de exactitud de clasificación de una imagen rapideye y así explicar la forma de cómo se calculó la exactitud para todas las imágenes del estudio.

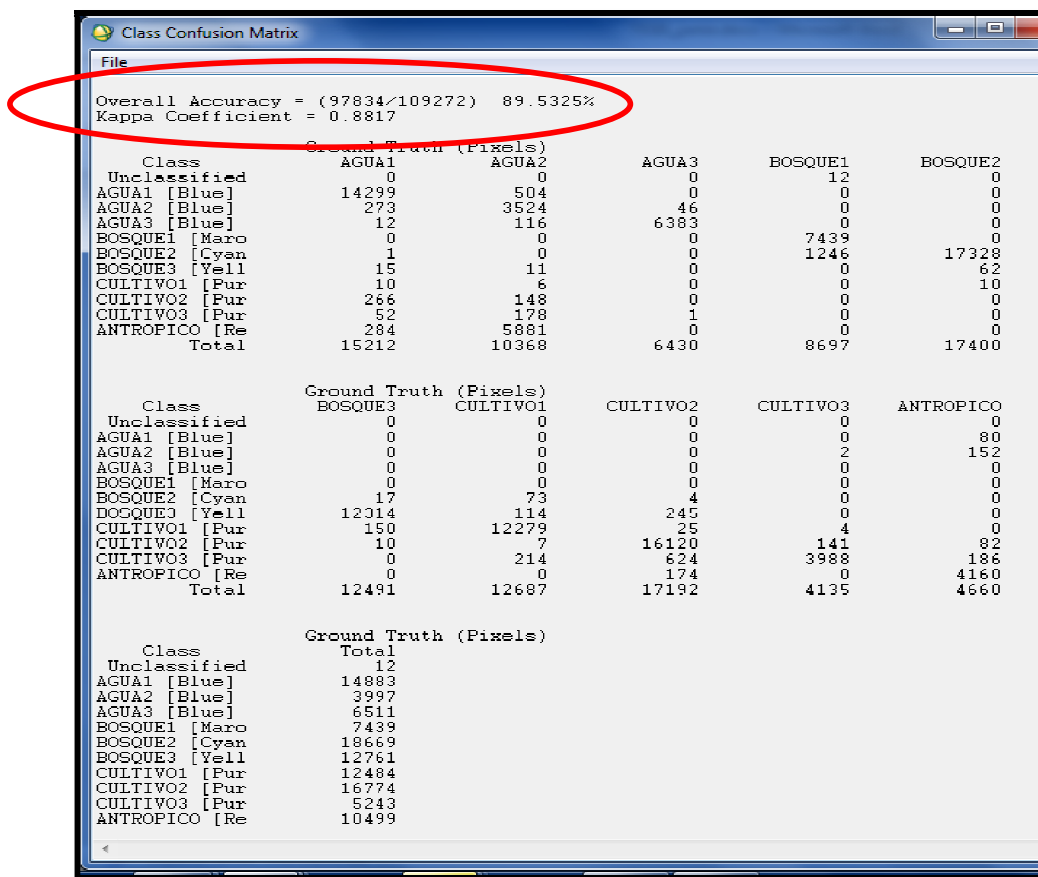


Figura 4.7. Matriz de Confusión en ENVI 4.7

Clases	Agua1	Agua2	Agua3	Bosque1	Bosque2	Bosque3	Cultivo1	Cultivo2	Cultivo3	Antrópico	Total
No clasificado	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	12
Agua1	14299	504	0	0	0	0	0	0	0	80	14883
Agua2	273	3524	46	0	0	0	0	0	2	152	3997
Agua3	12	116	6383	0	0	0	0	0	0	0	6511
Bosque1	0	0	0	7439	0	0	0	0	0	0	7439
Bosque2	1	0	0	1246	17328	17	73	4	0	0	18669
Bosque3	15	11	0	0	62	12314	114	245	0	0	12761
Cultivo1	10	6	0	0	10	150	12279	25	4	0	12484
Cultivo2	266	148	0	0	0	10	7	16120	141	82	16774
Cultivo3	52	178	1	0	0	0	214	624	3988	146	5243
Antrópico	284	5881	0	0	0	0	0	174	0	4160	10499
<b>Total</b>	15212	10368	6430	8697	17400	12491	12687	17192	4135	4660	109272

**Tabla 4.1.** Matriz de confusión ENVI número de píxeles.

Clases	Agua1	Agua2	Agua3	Bosque1	Bosque2	Bosque3	Cultivo1	Cultivo2	Cultivo3	Antrópico	Total
<b>No clasificado</b>	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>Agua1</b>	94,00	4,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	13,62
<b>Agua2</b>	1,79	33,99	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	3,26	3,66
<b>Agua3</b>	0,08	1,12	99,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,96
<b>Bosque1</b>	0,00	0,00	0,00	85,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,81
<b>Bosque2</b>	0,01	0,00	0,00	14,33	99,59	0,14	0,58	0,02	0,00	0,00	17,08
<b>Bosque3</b>	0,10	0,11	0,00	0,00	0,36	98,58	0,90	1,43	0,00	0,00	11,68
<b>Cultivo1</b>	0,07	0,06	0,00	0,00	0,06	1,20	96,78	0,15	0,10	0,00	11,42
<b>Cultivo2</b>	1,75	1,43	0,00	0,00	0,00	0,08	0,06	93,76	3,41	1,76	15,35
<b>Cultivo3</b>	0,34	1,72	0,02	0,00	0,00	0,00	1,69	3,63	96,44	3,13	4,80
<b>Antrópico</b>	1,87	56,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00	89,27	9,61
<b>Total</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Tabla 4.2.** Matriz de confusión ENVI en porcentaje.

Clases	Comisión (%)	Omisión (%)
Agua1	3,92	6,00
Agua2	11,83	66,01
Agua3	1,97	0,73
Bosque1	0,00	14,33
Bosque2	7,18	0,41
Bosque3	1,64	1,42
Cultivo1	1,64	3,22
Cultivo2	3,90	6,24
Cultivo3	23,17	3,56
Antrópico	60,38	9,87

**Tabla 4.3.** Matriz de comisión y omisión en porcentaje.

Clases	Precisión del Productor (%)	Precisión del Usuario (%)
Agua1	94,00	96,08
Agua2	33,99	88,17
Agua3	99,27	98,03
Bosque1	85,54	100,00
Bosque2	99,59	92,82
Bosque3	98,58	96,50
Cultivo1	96,78	98,36
Cultivo2	93,76	96,10
Cultivo3	96,44	76,06
Antrópico	89,27	39,62

**Tabla 4.4.** Matriz de precisión del productor y precisión del usuario en porcentaje.

Análisis de la matriz de confusión en ENVI:

- **Confusión Matrix (píxeles)**

Cada columna de la matriz de confusión representa una clase de en la imagen original y los valores en la columna corresponden al etiquetado en la clasificación de los píxeles de verificación. En la matriz que se presenta, se observa la columna de la imagen verdadera para la clase de BOSQUE2 (píxeles). El total muestra 17400 píxeles en esta clase. La clasificación fue capaz de clasificar 17328 de estos píxeles correctamente, pero no se clasificaron 0 píxeles y 62 fueron clasificados como superficie de CULTIVO1 y 10 de CULTIVO2.

- **Confusión Matrix (Porcentaje)**

La tabla muestra la distribución de las clases en porcentaje para cada clase de la imagen original. Los valores se calculan dividiendo los recuentos de píxeles en cada columna de la imagen original por el número total de píxeles en una clase de la clasificación. En la matriz la clase de BOSQUE los píxeles clasificados correctamente por ciento es  $17328 / 17400 = 0,9950$  o 99.59%.

- **Comisión**

Errores de comisión representan píxeles que pertenecen a otra clase que se etiquetan como pertenecientes a la clase de interés. Los errores de comisión se

muestran en las filas de la matriz de confusión. En la matriz la clase CULTIVO1 tiene un total de 12484 píxeles, donde 12779 píxeles se clasifican correctamente y 205 píxeles se clasifican incorrectamente como hierba (205 es la suma de todas las otras clases de la fila herbácea de la matriz de confusión). La relación del número de píxeles clasificados incorrectamente por el número total de píxeles de la clase verdad suelo forma un error de comisión. Para la clase de herbácea en el error de comisión es de  $205 / 12484$  lo que equivale a un 1.64%.

- ***Omisión***

Los errores de omisión representan los píxeles que pertenecen a la clase baja, pero la verdad la técnica de clasificación no ha logrado su clasificación en la clase adecuada. Los errores de omisión se muestran en las columnas de la matriz de confusión. En la matriz la clase de CULTIVO3 tiene un total de 4135 píxeles realidad del suelo donde 3988 píxeles se clasifican correctamente y 143 píxeles de los ROIs son clasificados incorrectamente (143 es la suma de todas las otras clases en la columna de la hierba de la matriz de confusión). La relación del número de píxeles clasificados incorrectamente por el número total de píxeles de la clase imagen original forma un error de omisión. Para la clase CULTIVO3 el error de omisión es  $143/4135$  que equivale a un 3.56%.

- ***Precisión del Productor***

La exactitud del productor es una medida que indica la probabilidad de que el

clasificador ha marcado un píxel de la imagen en la Clase A, dado que el imagen original Clase A. En la matriz la clase AGUA1 tiene un total de 15212 píxeles realidad de la cobertura donde se encuentran 14899 píxeles correctamente clasificados. La precisión del productor es la relación  $14899/15212$  o 97.94%.

- ***Precisión del usuario***

Manual de precisión es una medida que indica la probabilidad de que un píxel es de clase A ya que el clasificador ha marcado el píxel en la Clase A. En la matriz el clasificador ha etiquetado 6511 píxeles como la clase AGUA3 y un total de 6383 píxeles se clasifican correctamente. La exactitud de usuario es la relación  $6383/6511$  o 98.03%.

Para resumir en la matriz se observa dos versiones equivalente, una cuyas entradas se expresan en píxeles y otra en que se expresan como porcentajes. Los elementos de la diagonal indican los píxeles que fueron correctamente clasificados. Todos los elementos fuera de la diagonal indican errores de omisión o de comisión. Los errores de omisión corresponden a los elementos no diagonales de las columnas. Los errores de comisión corresponden a los elementos no diagonales de las filas.

A partir de la matriz de confusión podemos calcular la exactitud global de nuestra clasificación:

- **Exactitud global (overall accuracy)**, esta se calcula dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados por el número total de píxeles de referencia y expresándolo como porcentaje.

En este caso,

$$(97834 / 109272) * 100 = \mathbf{89.5325\%}$$

Para nuestro ejercicio el coeficiente kappa es **0,8817** que cae en la categoría de **muy bueno** según la tabla que propuso Landis y Koch para valorar el grado de acuerdo.

A continuación se presenta los resultados de las matrices de confusión y el índice Kappa para el resto de imágenes que se encuentran dentro de la zona piloto.

Nombre del sensor	Código imagen	Exactitud global (%)	Coficiente Kappa
ASTER	ast_l1b_00301292007153744_2009070 8182441_13305_ls_orto.img	85.96	0.84
ASTER	ast_l1b_00301292007153753_2009070 8182511_14130_orto.tif	83.65	0.82
ASTER	ast_l1b_00301292007153801_2009070 8182441_13300_swir_orto.img	86.24	0.84
ASTER	ast_l1b_00302052007154358_2009081 3143212_25371_orto.img	85.14	0.83
ASTER	ast_l1b_00302052007154407_2009072	90.02	0.89



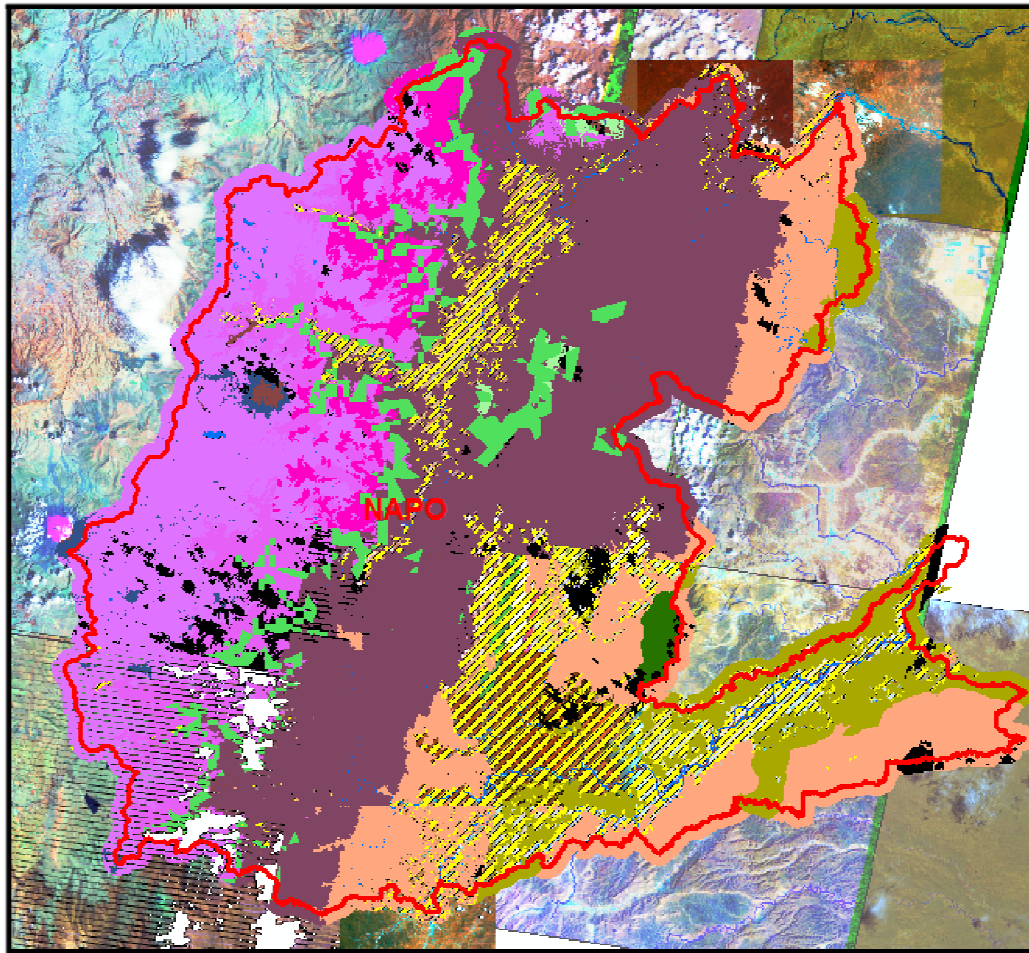
	3162130_27988_orto.img		
ASTER	ast_l1b_00310162006154302_2009070 8182451_13575_orto.img	82.50	0.80
ASTER	ast_l1b_00311232005153644_2009070 8182431_12939_orto.img	84.23	0.81
ASTER	ast_l1b_00311232005153653_2009081 3143212_25356_orto.tif	87.59	0.82
LANDSAT	le70090602007029edc00	78.23	0.79
LANDSAT	le70100602007036edc00	75.21	0.71
RAPIDEYE	2010-03-25T163651_RE2_3A- NAC_5157731_102237.tif	92.15	0.86
RAPIDEYE	2010-09-10T162309_RE5_3A- NAC_4932252_100122.tif	90.23	0.87
RAPIDEYE	2010-10-29T163319_RE1_3A- NAC_4932172_100122.tif	86.23	0.86
RAPIDEYE	2010-01-01T163307_RE5_3A- NAC_4930003_100058.tif	94.21	0.93
RAPIDEYE	2010-11-04T163839_RE2_3A- NAC_4930883_100058.tif	93.23	0.93
RAPIDEYE	2010-01-01T163257_RE5_3A- NAC_4932175_100122.tif	87.56	0.85
RAPIDEYE	2010-01-02T163529_RE1_3A- NAC_4932452_100122.tif	89.48	0.86

**Tabla 4.5.** Resultados de matriz de confusión y coeficiente kappa de las imágenes del área de estudio.

Como se puede observar en la tabla 4.6 todas las imágenes clasificadas caen dentro del rango de ***muy bueno*** en el *grado de acuerdo* de Landis y Koch (ver tabla 2.6), por lo que se determinó que la correspondencia entre las imágenes clasificadas y las muestras recogidas en el software ENVI 4.7 tienen una muy buena coincidencia, estos resultados se obtuvieron mediante el ajuste de las imágenes que tenían un kappa muy bajo. Con estos procesos queda comprobada la exactitud de la clasificación de las imágenes.

#### **4.4. UNIÓN Y EDICIÓN DE LAS CLASIFICACIONES**

En la figura 4.8., se presenta la unión de todas las imágenes clasificadas, se observa cómo se van formando los ecosistemas, y las diferentes clases de cobertura que encontramos en la superficie del área de estudio, el procedimiento de la unión se detalla en el capítulo de metodología. Como se observa existen ciertas discontinuidades, vacíos de información; estos vacíos van a ser llenados con insumos mencionados de fotografías aéreas, estudios anteriores de ecosistemas, etc.



**Figura 4.8.** Unión y edición de clasificaciones de imágenes.

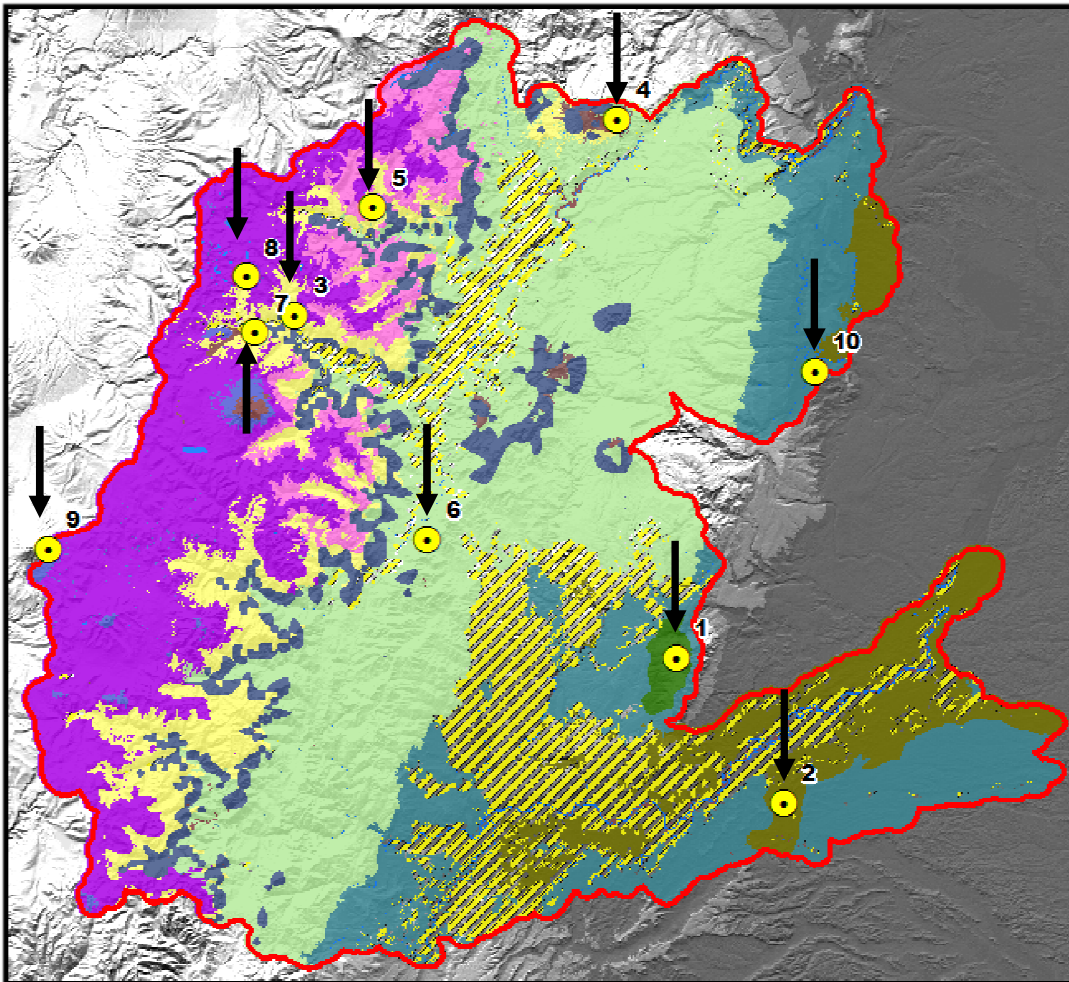
#### **4.5. INTEGRACIÓN DE LOS INSUMOS DEL LOS MODELOS DE BIOCLIMA Y GEOFORMAS**

Como se mencionó anteriormente la temperatura, la precipitación total anual, la variación mensual o estacional de la precipitación, la orografía y la geomorfología son factores que definen en un grado elevado la distribución de los ecosistemas, de aquí por qué se incluyen estos insumos para la mejor delimitación de los ecosistemas en la presente investigación.

Los modelos se incluyeron en la clasificación final, relacionando las clasificaciones de los modelos con las clases de ecosistemas encontradas en la clasificación final (ver figura 3.41). El resultado se lo observará en el producto final el mapa de ecosistemas de la Provincia de Napo.

#### **4.6. COMPROBACIÓN DE ECOSITEMAS EN CAMPO CON PUNTOS GPS.**

Debido a que la clasificación supervisada es controlada por el usuario, se puede seleccionar pixeles o polígonos donde la cobertura este en duda, para luego ser verificadas en campo y determinar si corresponde al ecosistema clasificado en gabinete. Por esta razón para que la clasificación sea supervisada se necesita de varias fuentes o insumos que ayuden a que el producto final tenga un el mayor grado de certeza; una de las fuentes, es la verificación de ecosistemas en campo mediante la adquisición de puntos GPS, cuya planificación se la realizará en gabinete para abarcarla mayor cantidad de ecosistemas verificados en menor tiempo (ver figura 4.9).



**Figura 4.9.** Puntos de Verificación planificados para investigación en campo.

CODIGO	ECOSITEMA	NORTE	ESTE
1	Bosque montano bajo y piemontano sobre afloramientos de roca caliza	9907899,903	884477,049
2	Bosque siempreverde de la penillanura de la Amazonía	9886190,791	899354,656
3	Bosque siempreverde montano alto	9958536,122	825312,427
4	Matorral saxícola montano de las cordilleras amazónicas	9989927,764	875368,542
5	Pajonal arbustivo montano alto	9966758,456	838216,456
6	Bosque siempreverde montano bajo	9926998,218	841314,663
7	Bosque siempreverde montano de neblina	9957551,001	820126,124
8	Pajonal montano alto paramuno	9966122,818	818784,903
9	Superpáramo húmedo	9925281,502	845689,652
10	Bosques siempreverdes piemontanos de la cordillera oriental	9971513,325	859785,652

**Tabla 4.6.** Ecosistemas de toma de puntos de verificación

Los puntos de verificación fueron tomados en cuenta para la revisión de la versión final del mapa de ecosistemas, donde se definió la existencia y ubicación de los ecosistemas en duda, se realizó los cambios necesarios en base a la información adquirida. Para la mejor observación y constancia de los puntos tomados en campo se realizó una base de datos fotográfica (anexo B).

#### **4.7. VERSIÓN FINAL DE LOS ECOSISTEMAS IDENTIFICADOS EN LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO).**

Después de realizar todos los pasos descritos en esta investigación, y después de incluir todos los insumos que hicieron posible que el mapa de la Zona Piloto (Provincia de Napo) posea una discriminación altamente fiable de ecosistemas, esto a su vez corroborado por la matriz de confusión y el coeficiente kappa, puntos de verificación, se presenta el producto final de los ecosistemas implementado en un mapa temático a escala 1:100000 (anexo G).

### **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

En este capítulo se va a discutir sobre los ecosistemas resultantes de los procesos detallados en los capítulos anteriores; son trece ecosistemas identificados para la provincia de Napo, diez de los cuales se encuentran en el sector norte-centro de la cordillera de los Andes y tres en la Amazonia, también se identificaron otras coberturas como otras áreas, agua e intervención. En total todas las clases de ecosistemas suman 12543,01 km<sup>2</sup>.

El total del área de ecosistemas representa un 83,65% del área de la provincia de Napo, esto quiere decir, que para el año 2011 más de las tres cuartas partes de la superficie de esta provincia cuenta con algún tipo de ecosistema. El 15.37% del área total de la provincia se encuentra intervenida por actividades antrópicas. El 74.76% del total de los ecosistemas pertenecen al sector norte-centro de la cordillera oriental de los Andes y el 18,89% corresponde al sector de la Amazonía.

Con objeto de análisis vamos a agrupar a los bosque siempre verde montano y montano bajo del norte de la cordillera oriental de los Andes y el herbazal montano alto y monta alto superior de páramo, en conjunto ocupan el 55.42% de total del área de ecosistemas (83,65%), esto en el sector norte-centro de la cordillera oriental de los Andes, sumado con los 11,78% del bosque siempreverde piemontano del sector de la amazonia, nos da un total de 67,20%; es decir, que en estos cuatro ecosistemas de la provincia de Napo se concentra el 80,33% del total de ecosistemas.

Con estos datos por ejemplo podemos identificar a los ecosistemas que tienen menor presencia en la provincia, y a partir de esto realizar políticas que permitan la sustentabilidad de los ecosistemas que se encuentren próximos a desaparecer. Esta información va a ser la base fundamental para la planificación de los gobiernos seccionales en los aspectos de conservación, ordenamiento territorial, riesgos naturales, expansión de la frontera agrícola, etc.

En la tabla también se puede analizar que el mayor porcentaje de ecosistemas se encuentra en zonas inferiores a 3000msnm con el 57,35% del total de los ecosistemas y 26,30% de ecosistemas en sectores mayores a 3000msnm, esto indica que en zonas donde predominan los diferentes tipos de bosque montano alto tienen menor representación que los bosque montano y montano bajo, pie de monte y penillanura. La diversidad de ecosistemas es mayor sobre los 3000msnm para el caso específico de esta provincia.

Como se observa en el mapa de ecosistemas la mayor concentración de actividades humanas se localizan en el sector sur-oriental de la provincia de Napo, conformado por los poblados de Tena, Archidona, Puerto Napo, Cotundo, Chontapunta, etc. Se observa también un gran conglomerado poblacional en el centro-norte de la provincia en las poblaciones de Chaco, Borja, Sardinias; Baeza, Cosanga entre las más importantes.

Con la metodología que se ha utilizado en el presente estudio, se va a poder identificar de la misma manera a los ecosistemas de las demás provincias que conforman el territorio continental ecuatoriano, las experiencias que dejó esta investigación servirá como base para identificar de mejor manera y con más conocimiento de causa los procesos y problemáticas que se presenten a futuro, pues ha sido un proceso bastante largo y exhaustivo de investigación y de transmisión de experiencias.

A continuación se presenta un gráfico con los porcentajes de cada uno de los ecosistemas y demás clases identificadas.



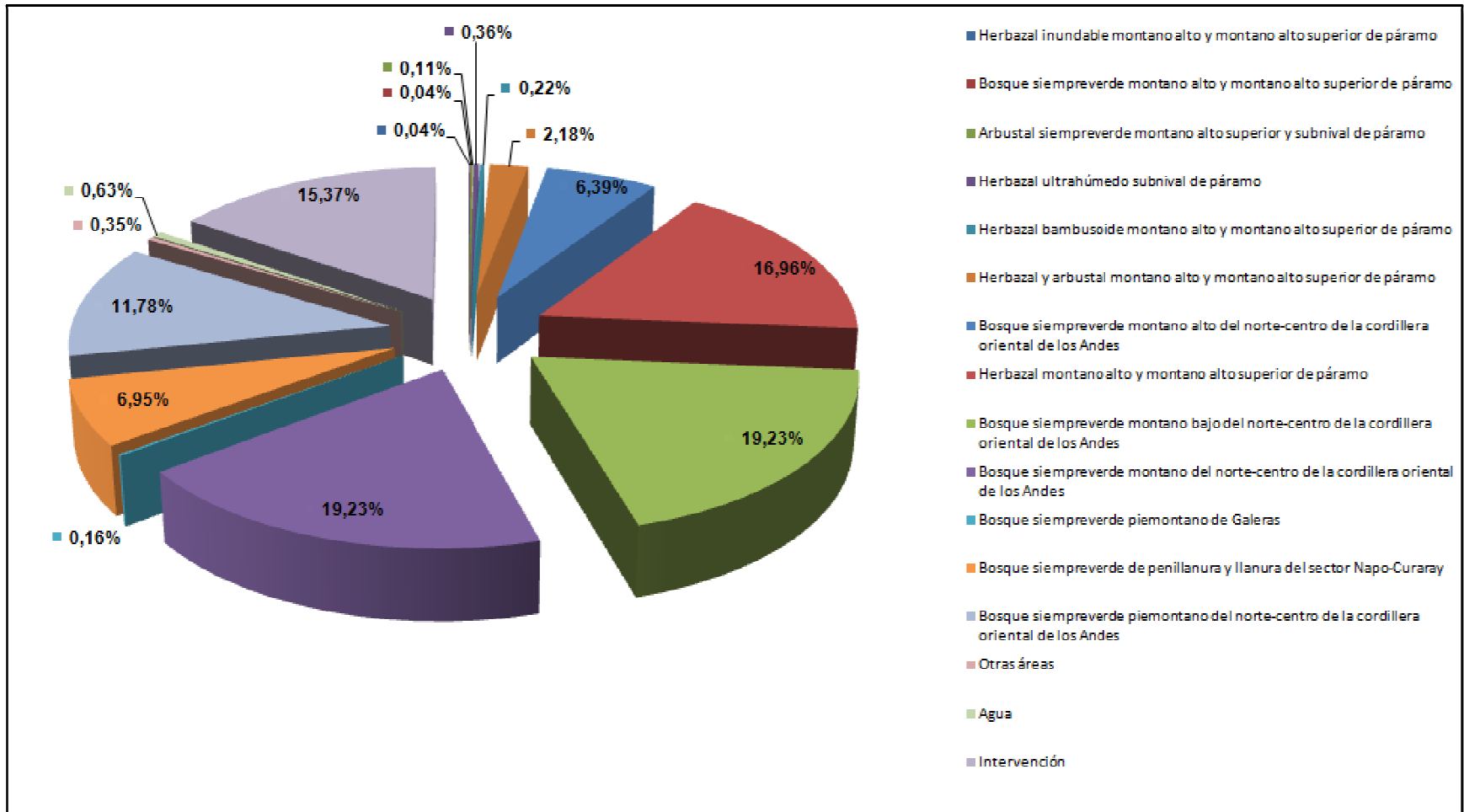


Figura 5.1. Gráfico de los ecosistemas identificados en porcentajes

## 6. CONCLUSIONES

- La adquisición de puntos de calibración GPS en campo, fue un aporte muy importante para el estudio, pues permitió identificar de mejor manera las regiones de interés, pues se relacionó el tipo de cobertura del punto levantado con la respuesta espectral en la imagen y así tener regiones de interés homogéneas y de mayor precisión, como se confirmó en precisión global de las imágenes.
- No solo se basó en los puntos de calibración para la toma de muestras espectrales, también se lo hizo con fotografía aérea de los sectores que existía esta información y estudios anteriores realizados por organismos estudios particulares.
- Las imágenes Landsat y Rapideye que se obtuvieron para este estudio tiene un nivel de procesamiento 1B, las imágenes Aster tenían un nivel de procesamiento 1A, por lo que se procedió a corregir geométricamente y radiométricamente a todas las imágenes, y ortorectificar a las imágenes Aster.
- Para la ortorectificación de imágenes Aster surgió un error al momento de utilizar el SRTM de 90x90 metros, ya que el RMS elegido fue superado teniendo errores superiores a 280 metros, por lo que se trabajó sin el SRTM y se lo reemplazó por una altitud constante de 500 metros obteniendo errores inferiores al RMS fijado dando buenos resultados.
- Para la ortorectificación en imágenes Aster, las imágenes que tenían pocos elementos visuales que sirvan de referencia (ríos, vías, etc.), se aplicó el

método de remuestreo de convolución cúbica, el mismo que permitió ajustar de mejor forma las imágenes satelitales.

- En el estudio resultó más conveniente elegir varias áreas de pequeño tamaño que una sola de mayores dimensiones, ya que con las áreas de mayor tamaño se tendía a infravalorarse la variabilidad de esa categoría.
- Es imprescindible verificar la separabilidad entre las clases, con el fin de que las reflectancias de los usos de la cobertura de la tierra no tiendan a confusión, ya que las respuestas espectrales pueden mostrar una compleja interrelación entre la cobertura y la influencia de la vegetación circundante.
- Una de las ventajas del software ENVI es que la clasificación supervisada trabaja directamente con ROIs (regiones de interés), esto facilita la ubicación de las muestras tomadas en la imagen y la comparación con otras muestras anteriormente delimitadas para realizar los ajustes necesarios.
- Para la agrupación de píxeles clasificados, se analizó cual de los métodos de ENVI presenta mejores resultados, donde el algoritmo de máxima verosimilitud presentó el mejor resultado por correspondencia en la imagen, de aquí se concluye que la probabilidad de píxeles pertenecientes a una misma clase representa la mejor clasificación para este estudio.
- Al momento de pasar los filtros en la etapa de post clasificación, se debe revisar cada vez de aplicar un filtro, pues puede perderse información relevante para el estudio.
- Una ventaja que se encontró en ENVI en el proceso de post clasificación, fue al momento de convertir de raster a vector, pues la tabla de atributos

creada etapa de recolección de los ROIs mantenía sus atributos, con lo cual se pudo visualizar directamente en el software ArcGis.

- En la unión de las clasificaciones, hay que tomar en cuenta el área de traslapo, pues la clasificación que está por encima predomina con sus atributos y la que está por debajo va a perder sus atributos, de tal manera que hay que tener bastante criterio al momento de trasponer una sobre otra, siempre observando las áreas continuas y si es necesario hay que editar las áreas traslapadas.
- La integración de los modelos de bioclima y geoformas ayudaron a la mejor delimitación de los ecosistemas y también a identificar ecosistemas que no se logró diferenciar en las imágenes, pues tenían una respuesta espectral semejante.
- El promedio de la exactitud global de todas las clasificaciones de la imágenes es de 86, 58% esto cae en la categoría de **muy bueno** según la tabla que propuso Landis y Koch para valorar el grado de acuerdo.
- Los vacíos de información que no lograron ser llenados con otras imágenes o con información recolectada en el campo, se aplicó la metodología de vecindad, es decir que las gaps fueron absorbidos por sus vecinos próximos.
- La experiencia por parte de los técnicos botánicos fue fundamental y se constituye en otro insumo de importancia para la conformación de los ecosistemas.
- Los datos de verificación de campo es el proceso final y prácticamente el cierre de los insumos para la clasificación supervisada, pues con ello se corrobora aun más la exactitud en la ubicación de los ecosistemas.

- En cada insumo que se utilizaba se generaba una versión nueva del mapa de ecosistemas, en total se llegaron a realizar ocho versiones, cada versión iba mejorando en su información de delimitación y composición de ecosistemas.
- Existieron varios problemas que se presentaron en la edición de los polígonos como inconsistencias geométricas o problemas de topología, esto se solucionó con herramientas de módulo ArcMap.
- Los resultados presentados en este estudio, están sujetos a cambios, pues en el futuro se piensa contar con imágenes Rapideye con resolución de 5 metros para toda la provincia de Napo, por lo que se tendrá una clasificación diferente en varias áreas de la zona de estudio.
- El total del área de ecosistemas identificados representa un 83, 65% del área de la provincia de Napo, esto quiere decir, que para el año 2011 más de las tres cuartas partes de la superficie de la provincia de Napo cuenta con algún tipo de ecosistema. El 15.37% del área total de la provincia se encuentra intervenida por actividades humanas.

## **7. RECOMENDACIONES**

- El intérprete debe conocer a plenitud el área donde va a trabajar, como también tener en mente que tipos de posibles ecosistemas se identifican en la imagen para recolectar los puntos de calibración.

- Se debe tener un conocimiento a fondo de las datos que van a ser utilizados, pues mientras mejor conocimiento se tenga de los datos, el interpreta mejor va a aprovechar éstos y se reflejara en los resultados.
- Se debe seleccionar los insumos que van a contribuir realmente con la discriminación de los ecosistemas y no alteren el producto determinado a partir de las imágenes satelitales. Los insumos deben convertirse en soporte del mapa pero no en su parte fundamental.
- La experiencia profesional del grupo interdisciplinario es una variable fundamental para la construcción del proyecto, por tal motivo se debe seleccionar adecuadamente el grupo de trabajo.
- Se debe crear una base de datos funcional donde la información sea almacenada en orden, la información debe ser identificada y codificada para que no exista confusión de datos en un futuro ya que esto trae una serie de problemas incluso perdida de información.
- Siempre investigar que herramientas tecnológicas tenemos y realizar pruebas para determinar cuál de ellas va a contribuir en mejor forma al desarrollo del estudio.
- Se debe fomentar talleres participativos con los miembros de trabajo para despejar inquietudes y proponer nuevas ideas paralelamente al desarrollo del estudio.
- Siempre buscar varios criterios o información de varias fuentes para la determinación final de un ecosistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALZATE, A. (2001): Imágenes espaciales de la superficie terrestre, Procesamiento digital, análisis y extracción de la información temática. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ARCGIS (2011): Página Oficial. Disponible en: <http://www.softwaregis.cl/arcgis.html>
- BAÉZ C. (2010): Propuesta Metodológica para la Representación Cartográfica de los Ecosistemas des Ecuador Continental.
- BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. (1998): Principles of geographic information systemsa for land resources assessment. Oxford, Clarendon.
- CAMPBELL, J. (1996): Introduction to Remote Sensing. 2da edition. New York. The Guilford.
- CANADA CENTER FOR REMOTE SENSING (2002): Remote Sensing Tutorial. Disponible en: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html>.
- CARTER, J. (1989): On defining the geographic information system. Fundamentals of geographic systems: a compendium. Falls Crurch Virginia, ASPRS/ACSM.
- CASANOVA, J.; SANZ, J. (1997): Teledetección Usos y Aplicaciones. 1ra Edición. España: Universidad de Valladolid.
- CHUVIECO, E. (2011): Teledetección Ambiental, La observación de la Tierra desde el Espacio. Cuarta edición actualizada. pp. 528.
- CHRISMAN, R. (2003): Exploring Geographical Information Systems. second edition. Hoboken, NJ:Wiley.
- ERDAS SOFTWARE IMAGE (2011): Página Oficial. Disponible en: [http://www.erdas.com.ar/productos\\_image.htm](http://www.erdas.com.ar/productos_image.htm).
- GEOTECNOLOGÍAS (2011): Página oficial de Geotecnologías. Disponible en: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/GIS.pdf>.
- HAY, A. (1988): The derivation of global estimates from a confusion matrix. International Journal of Remote Sensing, pp. 9:1385-1398.

- HOWARTH, P.; WICKWARE, G. (1981): Procedures for change detection using Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 2:277-291.
- IMAGING AND GEOSPATIAL INFORMATION SOCIETY (2002): The remote sensing core curriculum. Disponible en: <http://www.research.umbc.edu/~tbenja1/>.
- LONGLEY, P. (2001): *Geographic Information Systems And Science*. John Wiley & Sons, pp.13-17.
- MAPPING. (2008): Mapping Interactivo. Disponible en: [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1184](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1184).
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (2011): Modelo Bioclimático del Ecuador Continental.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (2011): Modelo de Unidades Geomorfológicas para la representación cartográfica de Ecosistemas del Ecuador Continental.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE; CONDESAN. (2010): Propuesta Metodológica para la Representación Cartográfica de los Ecosistemas del Ecuador Continental. OVIOL, R. (1998): Manual ENVI. Disponible en: <http://www.envi-sw.com>
- PHATFINDER (2011): Página Oficial. Disponible en: <http://www.prometric.com.mx/Productos/software/po.html>
- PREDIUM (2002): Teledetección. Disponible en: <http://www.premium.com/teledete.htm>
- SCHOWENGERDT, R. (1997): *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. 2da. Edición. New York.
- SELPER (Sociedad Latino Americana de Sensoramiento Remoto y Sistemas de Información Espaciales). (2002): Disponible en: <http://www.ltid.inpe.br/selper/frame.html>
- SHORT, N. (2002): *Remote Sensing Tutorial*. NASA (Nacional Aeronautic and Space Administration). Disponible en: <http://rst.gsfc.nasa.gov/Front/tofc.html>.
- SMITH, T.R; MENON, S.; STAR, J.; ESTES, J.: (1987) Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. *International Journal of Geographic Information Systems*.
- TELEDETE (2011): Manual de ENVI. Disponible en: <http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/maneenvi.htm>



- TELEDETE (2002): Percepción remota satelital. Disponible en: <http://www.teledet.com.uy/default.htm>.
- TRIMBLE (2011): Página Oficial. Disponible en: <http://global.trimble.com/es/products.asp?id=531>
- TUTORIAL DE PERCEPCIÓN REMOTA (2011): Imágenes Satelitales, Clasificación Supervisada. Disponible en: <http://tutorial-percepcion-remota-satelital.blogspot.com>.
- VELASCO, I.; DI LORENZO, N.; FLORES, A.; NUÑEZ, J. (2007): Guía para la enseñanza de la percepción remota en meteorología. Grupo SAT-RAD (Grupo Desarrollo de Productos Satélite y Radar), Dpto. Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires.

### ANEXO A. LEYENDA DE ECOSISTEMAS DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)

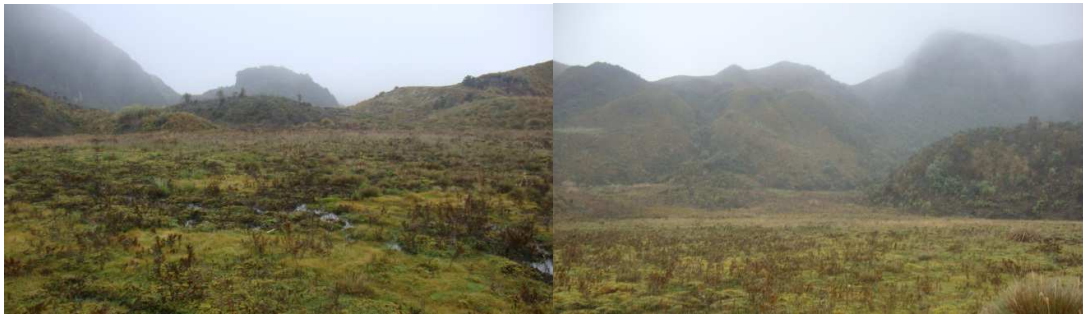
Nombre MAE: fisionomía+fenología+piso+sector	Área (km2)	%	Altitud mínima	Altitud máxima	COD
<b>Sector norte-centro de la cordillera oriental de los Andes</b>					
Herbazal inundable montano alto y montano alto superior de páramo	5,00	0,04	(+ 3300)	(+4500)	HIP
Bosque siempreverde montano alto y montano alto superior de páramo	5,25	0,04	3200	4100	BMAP
Arbustal siempreverde montano alto superior y subnival de páramo	13,42	0,11	4100	4500	ASP
Herbazal ultrahúmedo subnival de páramo	45,30	0,36	4400	4900	HUSP
Herbazal bambusoide montano alto y montano alto superior de páramo	27,98	0,22	3300(n) 3000(s)	4100(n) 3300(s)	HBP
Herbazal y arbustal montano alto y montano alto superior de páramo	272,95	2,18	3300(n) 2800(s)	3900(n) 3600(s)	HAP
Bosque siempreverde montano alto del norte-centro de la cordillera oriental de los Andes	801,98	6,39	3000	3700	BMAN
Herbazal montano alto y montano alto superior de páramo	2126,90	16,96	3400(n) 2800(s)	4300(n) 3900(s)	HMAP
Bosque siempreverde montano bajo del norte-centro de la cordillera oriental de los Andes	2411,43	19,23	1200	2000	BMBN
Bosque siempreverde montano del norte-centro de la cordillera oriental de los Andes	2412,53	19,23	2000	3000	BMN
<b>AMAZONIA</b>					
Bosque siempreverde piemontano de Galeras	19,61	0,16	600	1300	Am 15
Bosque siempreverde de penillanura y llanura del sector Napo-Curaray	872,33	6,95	0	350	Am 3
Bosque siempreverde piemontano del norte-centro de la cordillera oriental de los Andes	1477,83	11,78	400	1200	Am 6
<b>RESTO DE COBERTURAS</b>					
Otras áreas	44,36	0,35			OA
Agua	78,49	0,63			AGU
Intervención	1927,65	15,37			INT

## ANEXO B. FOTOGRAFÍAS DE ECOSISTEMAS EN PUNTOS DE CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN GPS

### Bosque montano bajo y piemontano sobre afloramientos de roca caliza



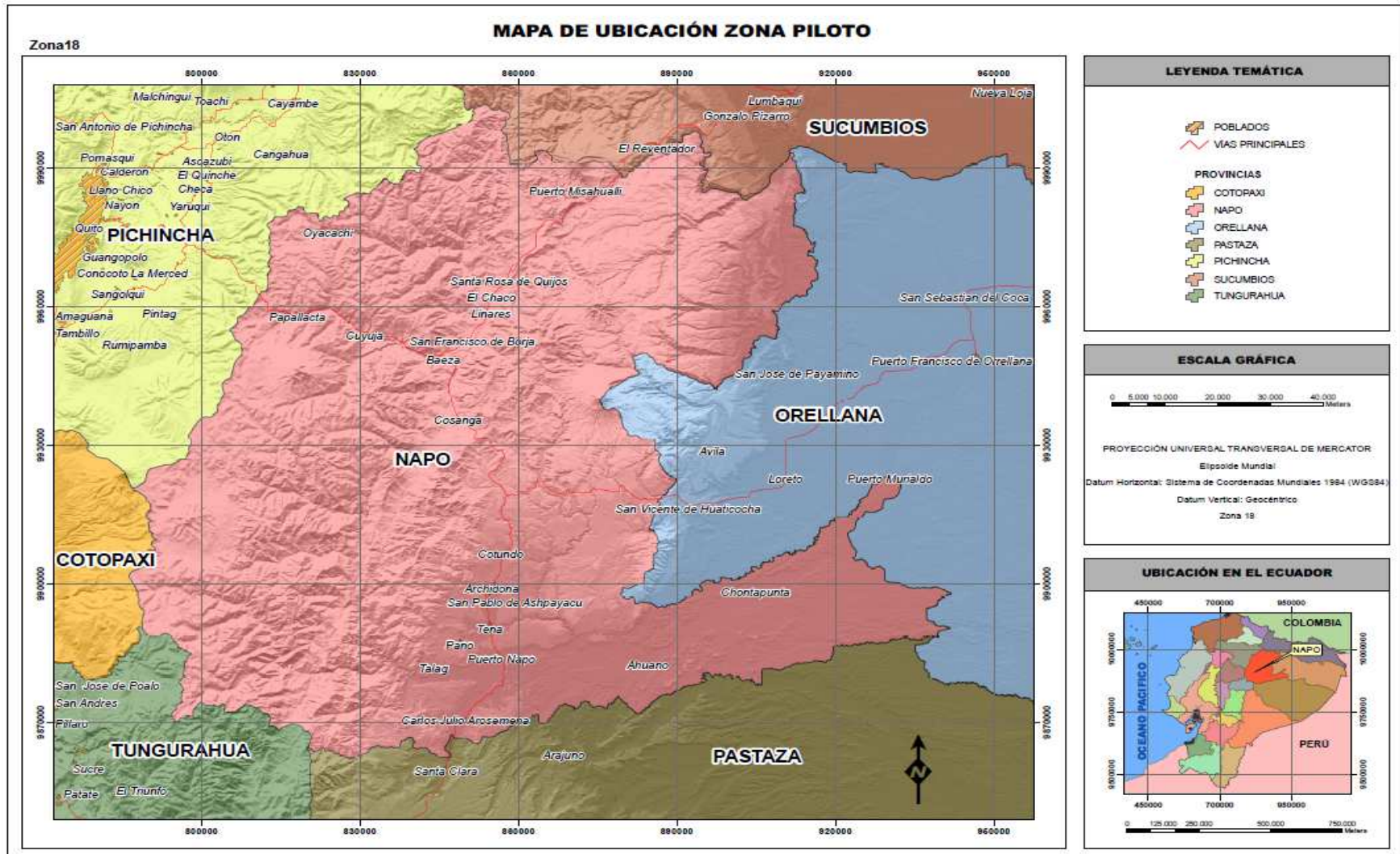
### Pajonal montano alto paramuno



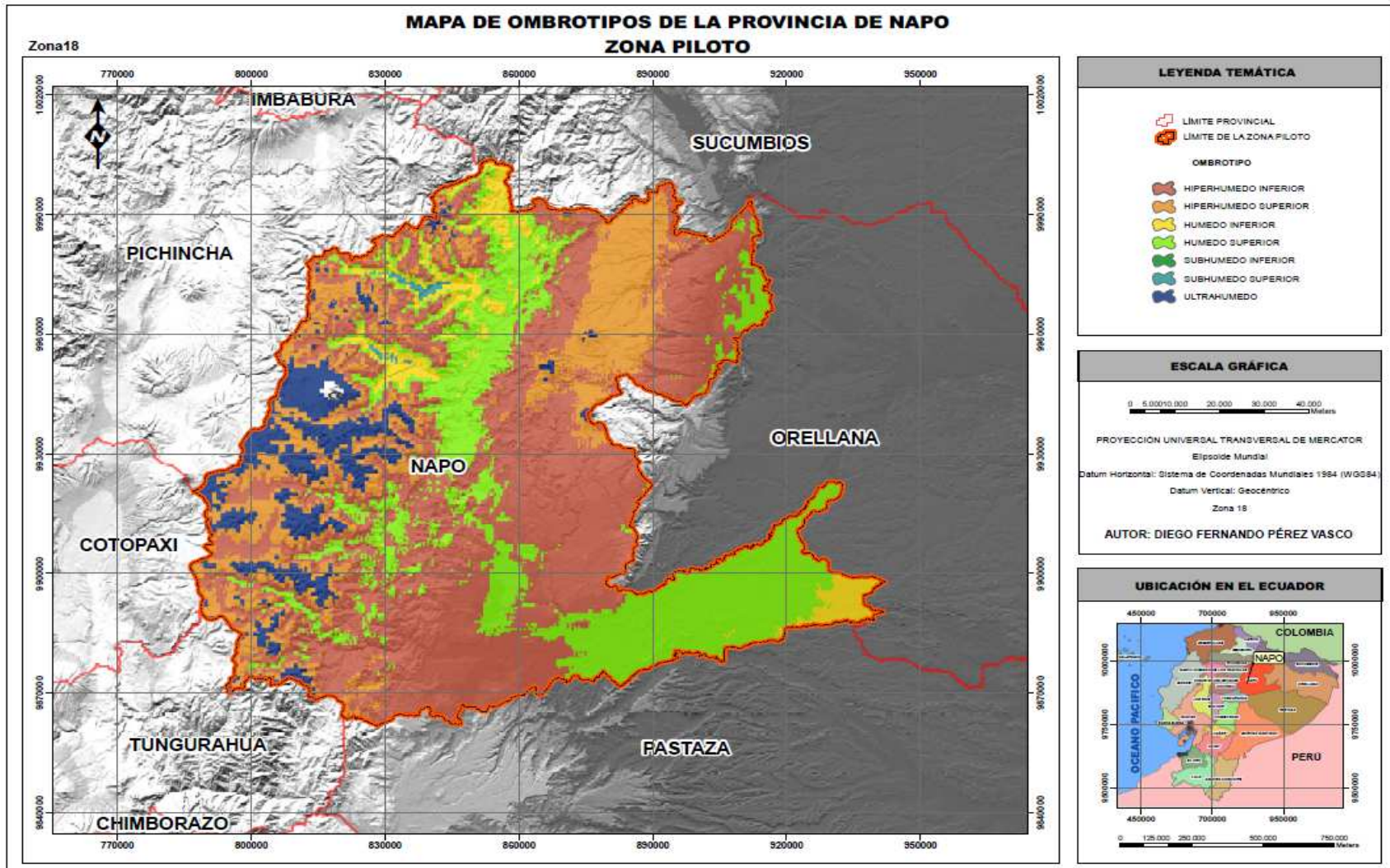
### Bosque siempreverde montano de neblina



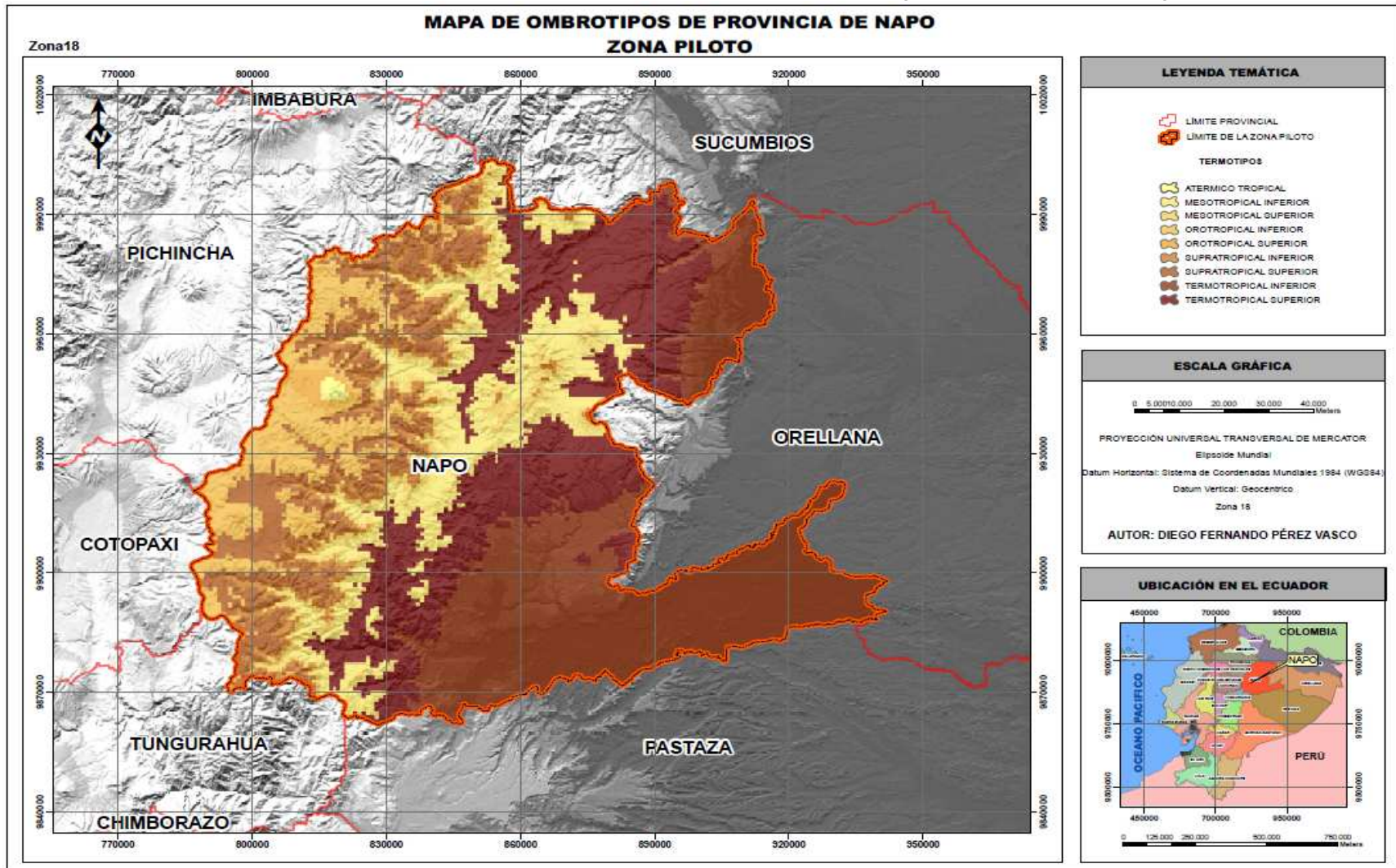
## ANEXO C. MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)



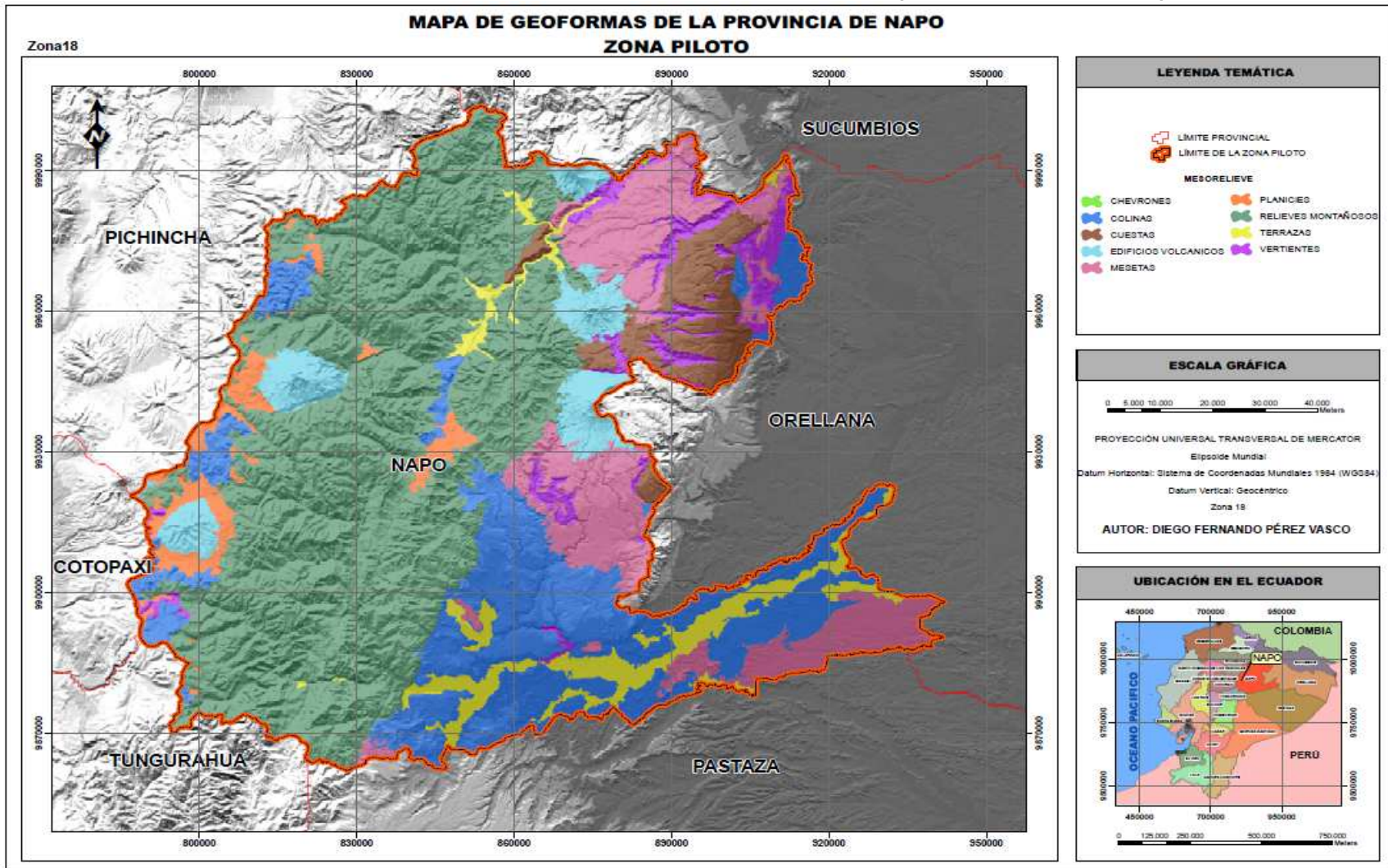
## ANEXO D. MAPA DE OMBROTIPOS DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)



## ANEXO E. MAPA DE TERMOTIPOS DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)



## ANEXO F. MAPA DE GEOFORMAS DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)



## ANEXO G. MAPA DE ECOSISTEMAS VERSIÓN FINAL DE LA ZONA PILOTO (PROVINCIA DE NAPO)

