



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE
DIFERENTES SENSORES PARA VERIFICAR SU
EFICIENCIA Y UTILIDAD EN ESTUDIOS
MULTITEMPORALES.**

Previa a la obtención de Grado Académico o Título de:

INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE

ELABORADO POR:

ANDREA ELIZABETH SUÁREZ MORILLO

DIRECTOR: ING. OSWALDO PADILLA

CODIRECTOR: ING. PABLO PÉREZ

SANGOLQUÍ, MARZO DE 2014

CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla A.

Ing. Pablo Pérez.

Certifican:

Que el trabajo titulado **“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE DIFERENTES SENSORES PARA VERIFICAR SU EFICIENCIA Y UTILIDAD EN ESTUDIOS MULTITEMPORALES.”**, realizado por Andrea Elizabeth Suárez Morillo, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a Andrea Elizabeth Suárez Morillo que lo entregue a Ing. Wilson Jácome, en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, 21 de Marzo de 2014

Ing. Oswaldo Padilla A.

DIRECTOR

Ing. Pablo Pérez S

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Andrea Elizabeth Suárez Morillo

Declaro que:

El proyecto de grado denominado **“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE DIFERENTES SENSORES PARA VERIFICAR SU EFICIENCIA Y UTILIDAD EN ESTUDIOS MULTITEMPORALES.”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 21 de Marzo de 2014

Andrea Elizabeth Suárez Morillo

AUTORIZACIÓN

Andrea Elizabeth Suárez Morillo

Autorizo a la Universidad de las fuerzas Armadas la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE DIFERENTES SENSORES PARA VERIFICAR SU EFICIENCIA Y UTILIDAD EN ESTUDIOS MULTITEMPORALES.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 21 de Marzo de 2014

Andrea Elizabeth Suárez Morillo

DEDICATORIA

Dedico todo este esfuerzo a las personas que más admiro y que llenan mi corazón de alegría que han dado todo de ellos para que sea mejor cada día, gracias por su esfuerzo constante, espero corresponder a todo lo que me han dado, es la mejor bendición que Dios me ha dado. Los amo Padres míos.

Dedico a mi mejor amigo, confidente y amado esposo Rafael, gracias por su paciencia por su preocupación es una gran apoyo para mi vida. Le amo.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a Dios por su amor incomparable, por la fuerza que me da cada mañana para seguir adelante, por siempre estar ahí cuando más lo necesito.

A mis Padres por ser una fuente amor, por su apoyo incondicional gracias por todo su esfuerzo.

A mi esposo Rafael por confiar en mí, gracias por su paciencia y amor incondicional.

A mis hermanos Santiago y Anneth son los mejores, gracias por compartir grandes momentos juntos.

A mi Director Ing. Oswaldo Padilla y Codirector Ing. Pablo Pérez además de ser unos excelentes profesionales tienen un gran corazón los aprecio mucho, gracias por su paciencia.

A mis amigas Diana, Anita, Johana y Jeanneth agradezco su preocupación su amistad incondicional, siempre las tendré presentes en mi corazón.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
1. ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.5 OBJETIVOS.....	8
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.6 METAS.....	9
CAPÍTULO 2.....	10
2.1 FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN.....	10
2.2 SENSORES REMOTOS.....	12
2.2.1 LANDSAT.....	12
2.2.2 ASTER.....	12
2.2.3 RAPIDEYE.....	12
2.3 BANDAS ESPECTRALES.....	13
2.4 CAMBIOS DE COBERTURA.....	15
2.5 DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA.....	16
2.6 REQUISITOS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	17
2.6.1 AJUSTE GEOMÉTRICO.....	18

2.6.2	HOMOGENEIZACIÓN RADIOMÉTRICA.....	18
2.6.3	CORRECCIONES TOPOGRÁFICAS.....	19
2.7	TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA.....	20
2.8	CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	21
2.8.1	FUSSY O BORROSA.....	21
2.8.2	LÓGICA FUSSY.....	21
2.8.3	CLASIFICACIÓN FUSSY O BORROSO.....	22
2.9	ÍNDICES ESPECTRALES.....	24
2.9.1	ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI.....	25
2.9.2	ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDII.....	26
CAPÍTULO 3.....		28
3.1	OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	28
3.2	ÁREA DE ESTUDIO.....	29
3.3	SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.....	30
3.4	CORRECCIÓN DE IMÁGENES.....	32
3.4.1	CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.....	33
	ORTORECTIFICACIÓN PARA IMÁGENES LANDSAT.....	33
	ORTORECTIFICACIÓN PARA IMÁGENES ASTER.....	40
	REPROYECCIÓN DE IMÁGENES RAPIDEYE.....	44
3.4.2	CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS.....	44
3.5	DEFINICIÓN DE LA ESCALA GENERAL DEL ESTUDIO.....	49
3.6	LEYANDA TEMÁTICA.....	50
3.7	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.....	51
3.8	CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.....	52
3.8.1	SEGMENTACIÓN.....	52
3.8.2	RASTERIZACIÓN DE SEGMENTOS.....	58
3.8.3	CLASIFICACIÓN DIFUSA (FUZZY).....	60

3.8.4 ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS.....	63
3.8.5 ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS TEMÁTICOS.....	63
3.9 LEVANTAMIENTO DE PUNTOS DE CAMPO.....	63
3.9.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	64
3.9.1.1 UNIDAD DE MUESTREO.....	64
3.9.1.2 NÚMERO DE MUESTRAS.....	64
3.9.1.3 DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS.....	64
3.9.1.4 PUNTOS DE LABORATORIO.....	64
3.9.2 PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN.....	66
3.9.2.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA EXISTENTE.....	66
3.9.2.2 GENERACIÓN DE MAPAS DE CAMPO Y DATOS DE SOPORTE.....	67
3.9.2.3 PLANIFICACIÓN.....	67
3.9.3 TOMA DE DATOS EN CAMPO.....	67
3.9.3.1 OCUPACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO.....	67
3.9.3.2 PUNTOS DE REFERENCIA.....	69
3.9.3.3 ALMACENAMIENTO DE DATOS Y VERIFICACIÓN...	71
3.9.4 CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN.....	71
3.10 VALIDACIÓN Y MATRICES DE CONFUSIÓN.....	73
3.10.1 DISEÑO DE LA MUESTRA.....	73
3.10.2 CREACION DE PUNTOS RANDÓMICOS.....	74
3.10.3 CREACION DE FEATURES CLASS PUNTOS DE VALIDACIÓN.....	76
3.10.4 ATRIBUTOS DE PUNTOS DE VALIDACIÓN.....	77
3.10.5 PROCESAMIENTO PARA LA ATRIBUCIÓN VISUAL.....	78
3.10.6 TRABAJO DE CAMPO.....	80
3.10.7 PRODUCTOS DE LA EVALUACION DE EXACTITUD.....	80
3.10.8 CREACION DE MATRICES DE CONFUSIÓN.....	82

TABLA 2.3 CADENCIA DE ACTUALIZACIONES PARA ESTUDIOS MULTITEMPORALES.....	17
TABLA 3.1 TABLA DE DATOS DE CALIBRACIÓN PARA IMÁGENES LANDSAT.....	45
TABLA 3.2 TABLA DE DATOS DE CALIBRACIÓN PARA IMÁGENES ASTER.....	46
TABLA 3.3 UNIDAD MÍNIMA DE MAPEO.....	49
TABLA 3.4 LEYENDA TEMÁTICA.....	50
TABLA 3.5 NÚMERO DE PUNTOS RANDÓMICOS.....	74
TABLA 3.6 EJEMPLO GENÉRICO DE UNA MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA UN MAPA CON TRES CLASES DE USO Y COBERTURA DEL SUELO.....	81
TABLA 3.7 FUERZA DE LA CONCORDANCIA (VALOR KAPPA).....	88
TABLA 3.8 CODIFICACIÓN DEL NIVEL 1.....	91
TABLA 3.9 CODIFICACIÓN POR FECHA DE LAS IMAGNES SATELITALES.....	94
TABLA 3.10 CODIFICACIÓN DE LA INTERSECCIÓN DE FECHAS EN ORDEN ASCENDENTE DEL PERÍODO 1990- 2000.....	96
TABLA 3.11 CODIFICACIÓN DE LA INTERSECCIÓN DE FECHAS EN ORDEN ASCENDENTE DEL PERIODO 2000- 2010.....	96
TABLA 3.12 TABLA DE COBERTURA POR INTERSECCIÓN.....	100
TABLA 4.1 SUPERFICIE DE PÉRDIDA O GANANCIA Y PORCENTAJE DE CAMBIO POR CATEGORÍA DE COBERTURA Y USO DE SUELO ENTRE LAS ÉPOCAS 1990,2000 Y 2010.....	110

TABLA 4.2 MODELO DE INTERPRETACIÓN PARA DOS COMPOSICIONES
MULTITEMPORALES.....112

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA 1. ESQUEMA METODOLÓGICO.....28

DIAGRAMA 2. TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES.....51

DIAGRAMA 3. PROCESOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES
SATELITÁLES.....52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SENSORES DE ALTA RESOLUCIÓN.....3

FIGURA 2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....6

FIGURA 3. ESQUEMA OPERATIVO DE SATÉLITES DE OBSERVACIÓN....10

FIGURA 4. ESQUEMA DE ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....11

FIGURA 5. COBERTURA ESPECTRAL DE LAS BANDAS DE LOS
PRINCIPALES SATÉLITES.....14

FIGURA 6. BANDAS ESPECTRALES DE LOS PRINCIPALES SATÉLITES...14

FIGURA 7. PROBABILIDAD TOMANDO UNA VARIABLE.....22

FIGURA 8. PROBABILIDAD TOMANDO DOS VARIABLES.....23

FIGURA 9. PUNTOS IMPORTANTES DEL MODELO.....24

FIGURA 10. CONTRASTE ESPECTRAL ENTRE LAS BANDAS DEL ROJO E
INFRARROJO CERCANO EN LOS QUE SE APOYAN LOS
ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....26

FIGURA 11. ÁREA DE ESTUDIO.....29

FIGURA 12. DETALLE DE IMÁGENES SATELITALES EN ÁREA DE ESTUDIO.....	32
FIGURA 13. SELECCIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO.....	32
FIGURA 14. IMAGEN LANDSAT QUE SE DESEA ORTORECTIFICAR.....	33
FIGURA 15. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO GEOMÉTRICO.....	34
FIGURA 16. DEFINICIÓN DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA.....	34
FIGURA 17. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COLECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.....	36
FIGURA 18. DE ACUERDO AL MÉTODO SELECCIONADO APARECEN VARIAS VENTANAS PARA TRABAJAR EN EL RECOLECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.....	36
FIGURA 19. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN LA IMAGEN A ORTORECTIFICAR.....	37
FIGURA 20. MATRIZ DE PUNTOS DE REFERENCIA Y CONTROL.....	38
FIGURA 21. VENTANA PRINCIPAL DEL PROCESO DE ORTORECTIFICACIÓN.....	39
FIGURA 22. PARÁMETROS DE ORTORECTIFICACIÓN.....	39
FIGURA 23. CONSTRUCCIÓN DE LA ORIENTACIÓN EXTERIOR.....	40
FIGURA 24. PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA E INGRESO DE PUNTOS DE CONTROL PARA CALCULAR LA ORIENTACIÓN EXTERIOR.....	41
FIGURA 25. REPORTE DE ERRORES DE LA ORIENTACIÓN EXTERIOR....	41
FIGURA 26. VENTANA PARA DEFINIR LA VISUALIZACIÓN DE LAS IMÁGENES CON UNA COMBINACIÓN RGB.....	42

FIGURA 27. VENTANA PARA COLECCIONAR PUNTOS DE CONTROL PARA ORTORECTIFICAR LA IMAGEN ASTER.....	43
FIGURA 28. REPROYECTAR LA IMAGEN.....	44
FIGURA 29. CAMBIO DE FORMATO EN PCI A TIFF A PIX.....	47
FIGURA 30. VENTANA PARA AÑADIR CANALES VACÍOS A UNA IMAGEN.....	47
FIGURA 31. VENTANA DONDE SE INGRESAN LAS ECUACIONES PARA CADA BANDA.....	48
FIGURA 32. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZANDO EL MÉTODO SIMPLIFICADO DE CHÁVEZ.....	49
FIGURA 33. PROCESO DE SEGMENTACIÓN.....	53
FIGURA 34. DEFINIR EL PARÁMETRO DE LA ESCALA.....	54
FIGURA 35. ELIMINACIÓN DE LOS SEGMENTOS MÁS PEQUEÑOS.....	55
FIGURA 36. PARÁMETRO OPCIONAL NO UTILIZADO EN EL PROCESO DE SEGMENTACIÓN.....	55
FIGURA 37. CÁLCULO DE ATRIBUTOS ESPACIALES Y ESPECTRALES DE LOS SEGMENTOS.....	56
FIGURA 38. EXPORTACIÓN DE LOS SEGMENTOS A UN ARCHIVO VECTORIAL.....	56
FIGURA 39. DEFINICIÓN DEL NOMBRE DEL ARCHIVO VECTORIAL.....	57
FIGURA 40. REPORTE DE LA SEGMENTACIÓN CON LOS PARÁMETROS UTILIZADOS.....	57
FIGURA 41. SELECCIÓN DE ÁREAS MENORES 1 HA.....	58
FIGURA 42. PROCESO ELIMINATE.....	58
FIGURA 43. CONVERT FEATURES TO RASTER.....	59

FIGURA 44. SELECCIÓN DEL CAMPO AVGBAN 1 PARA RASTERIZAR POR BANDA.....	59
FIGURA 45. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	61
FIGURA 46. CONFIGURACIÓN PARA CLASIFICACIÓN.....	61
FIGURA 47. PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN.....	61
FIGURA 48. CLASIFICACIÓN FUSSY DE UNA IMAGEN LANDSAT.....	62
FIGURA 49. CLASIFICACIÓN FUSSY DE UNA IMAGEN ASTER.....	62
FIGURA 50. CLASIFICACIÓN FUSSY DE UNA IMAGEN RAPIDEYE.....	62
FIGURA 51. SELECCIÓN DE PUNTOS EN ZONAS DE INCERTIDUMBRE.....	65
FIGURA 52. SELECCIÓN DE PUNTOS EN UN BUFFER DE 500m.....	66
FIGURA 53. VÍAS DE ACCESO EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	66
FIGURA 54. PUNTOS DE CALIBRACIÓN.....	68
FIGURA 55. PUNTOS DE REFERENCIA.....	69
FIGURA 56. HERRAMIENTA HAWTH'S ANALISIS TOOL.....	75
FIGURA 57. GENERACIÓN DE PUNTOS RANDÓMICOS.....	76
FIGURA 58. FEATURE CLASS DE LOS PUNTOS RANDÓMICOS.....	77
FIGURA 59. PUNTOS RANDÓMICOS A SER VALIDADOS.....	79
FIGURA 60. INTERPRETACIÓN DE LOS VALIDADORES.....	80
FIGURA 61. JOIN BASADO EN LA LOCALIZACIÓN ESPACIAL.....	83
FIGURA 62. CAMPOS NECESARIOS PARA EL ANÁLISIS DE VALIDACIÓN.....	83
FIGURA 63. MATRIZ DE CONFUSIÓN NIVEL1.....	84

FIGURA 64. MATRIZ DE CONFUSIÓN NIVEL 2.....	85
FIGURA 65. MATRIZ DE CAMBIO DE COBERTURA ENTRE LAS FECHAS T1 Y T2.....	89
FIGURA 66. MÁSCARA DE INFORMACIÓN PARA TRES ÉPOCAS.....	91
FIGURA 67. COBERTURA EN FORMATO RASTER DEL AÑO 1990.....	92
FIGURA 68. COBERTURA EN FORMATO RASTER DEL AÑO 2000.....	92
FIGURA 69. COBERTURA EN FORMATO RASTER DEL AÑO 2010.....	92
FIGURA 70. CAMBIO DE COBERTURA ENTRE LOS AÑOS 1990-2000.....	93
FIGURA 71. CAMBIO DE COBERTURA ENTRE LOS AÑOS 2000-2010.....	93
FIGURA 72. FECHA DE IMÁGENES DEL AÑO 1990.....	94
FIGURA 73. FECHA DE IMÁGENES DEL AÑO 2000.....	95
FIGURA 74. FECHA DE IMÁGENES DEL AÑO 2010.....	95
FIGURA 75. TRASLAPO ENTRE FECHAS DE LOS PERIODOS DE 1990- 2000.....	97
FIGURA 76. TRASLAPO ENTRE FECHAS DE LOS PERÍODOS DEL 2000 – 2010.....	97
FIGURA 77. CAMBIO DE COBERTURA ENTRE LOS AÑOS 1990 – 2000.....	98
FIGURA 78. CAMBIO DE COBERTURA ENTRE LOS AÑOS 2000 – 2010.....	98
FIGURA 79. HOJA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA ENTRE ÉPOCAS.....	99
FIGURA 80. HOJA DE CÁLCULO DE MATRICES DE CAMBIO Y NORMALIZACIÓN PARA EL ÁREA DESTUDIO.....	101

FIGURA 81. MATRIZ DE CAMBIO DE COBERTURA TOTAL DEL PERÍODO 1990-2000.....	101
FIGURA 82. ESQUEMA DE ALMACENAMIENTO INTERNO DE LA BASE DE DATOS GEOGRÁFICA DE PRODUCTOS.....	104
FIGURA 83. DISTRIBUCIÓN DE LAS SUPERFICIES POR CATEGORÍA Y POR AÑO.....	107
FIGURA 84. IMAGEN PARA EL ANÁLISIS DEL ÍNDICE NDVI.....	113
FIGURA 85. ÍNDICE NDVI PARA IMÁGENES LANDSAT.....	114
FIGURA 86. ÍNDICE NDVI PARA IMÁGENES LANDSAT Y ASTER.....	115
FIGURA 87. ÍNDICE NDVI PARA IMÁGENES LANDSAT Y ASTER.....	115
FIGURA 88. ÍNDICE NDVI PARA IMÁGENES LANDSAT Y RAPIDEYE.....	116
FIGURA 89. ÍNDICE NDVI PARA IMÁGENES ASTER.....	117

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTO 1. PUNTOS DE CALIBRACIÓN.....	70
FOTO 2. PUNTOS DE REFERENCIA.....	70
FOTO 3. BOSQUE NATIVO PCS051004O.....	72
FOTO 4. BOSQUE NATIVO PCS051004N.....	72
FOTO 5. BOSQUE NATIVO PCS051004E.....	72
FOTO 6. BOSQUE NATIVO PCS051004S.....	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACION 1. CÁLCULO DE LA ILUMINACIÓN.....	19
ECUACIÓN 2. MÉTODO TAILLET.....	19
ECUACIÓN 3. FÓRMULA DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL EVENTO.....	25
ECUACIÓN 4. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA.....	25
ECUACIÓN 5. ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDII.....	27
ECUACIÓN. 6. CÁLCULO DE REFLECTIVIDAD.....	48
ECUACIÓN 7. ERROR DE MUESTREO.....	86
ECUACIÓN 8. ESTADÍSTICA KAPPA.....	87
ECUACIÓN 9. FÓRMULA DE NORMALIZACIÓN PARA COBERTURA QUEHAN CAMBIADO.....	89
ECUACIÓN 10. FÓRMULA DE NORMALIZACIÓN PARA COBERTURAS QUE SE HAN MANTENIDO.....	90
ECUACIÓN 11. FÓRMULA PARA CALCULAR EL CAMBIO DE COBERTURA ENTRE ÉPOCAS.....	92
ECUACIÓN 12. TRASLAPO DE IMÁGENES EN CADA PERÍODO.....	95
ECUACIÓN 13. CAMBIO DE COBERTURA DE 1990-2000.....	98
ECUACIÓN 14. FÓRMULA PARA CALCULAR EL NDVI ENTRE DIFERENTES IMÁGENES DE DISTINTAS ÉPOCAS.....	110

RESUMEN

El cambio de uso de la tierra y la pérdida del recurso forestal han sido los resultados de una diversa actividad antrópica. Esta actividad, está relacionada con factores poblacionales y socioeconómicos, los cuales han sufrido grandes cambios con el pasar del tiempo, sin tomar en cuenta las consecuencias negativas que puede llevar la acelerada expansión de la frontera agrícola en áreas que por naturaleza son de bosques. El presente estudio determina los cambios de cobertura producidos en la zona de estudio entre los años 1990, 2000 y 2010 utilizando distintos métodos y técnicas de análisis multitemporal con imágenes satelitales previamente tratadas (correcciones radiométricas y geométricas). Además se utiliza la metodología de fussy y segmentación para identificar, discriminar las diferentes categorías que se van a clasificar. La información basada en imágenes de satélites se emplea cada vez más con el fin de evaluar el estado forestal, cobertura vegetal, riesgos naturales y de medir tanto la sustentabilidad medioambiental como económica. Los cambios de cobertura constituyen información cuantitativa y cualitativa importante, que una vez representados en mapas y datos estadísticos, servirán como una herramienta valiosa para plantear proyectos de conservación en las zonas más intervenidas.

Palabras Claves:

1. Multitemporal
2. Cambio de Uso
3. Pérdida de Cobertura
4. Actividad Antrópica
5. Imágenes Satelitales

ABSTRACT

The change in land use and the loss of forest resources have been the results of a diverse human activity. This activity is related to the demographic and socio-economic factors, which have undergone major changes over time, regardless of the negative consequences that can take the accelerated expansion of the agricultural frontier in areas that are naturally forested. This study determines the coverage changes produced in the study area between 1990, 2000 and 2010 using different methods and techniques of multi-temporal satellite imagery analysis with previously treated (radiometric and geometric corrections). Furthermore methodology fuzzy and segmentation is used to identify, discriminate the various categories to be rated. Information based on satellite images are increasingly used in order to assess the state forest, vegetation, natural hazards and measure both environmental sustainability and economic. Cover changes are important quantitative and qualitative information, which once represented on maps and statistical data will serve as a valuable tool for raising conservation projects in more treatment area.

Keywords:

1. Multitemporal
2. Change of Use
3. Loss of Coverage
4. Anthropic activity
5. Satellite Images

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1. ANTECEDENTES

Las misiones espaciales se inician con el propósito de monitorear las condiciones atmosféricas globales y el reconocimiento terrestre para la prospección de los recursos mineros, forestales y agrícolas.

Una de las inquietudes era demostrar la utilidad de las imágenes de satélites, frente a otras herramientas tradicionales. En esta etapa se produjo un gran desarrollo en los métodos cuantitativos para verificar y demostrar los niveles de precisión alcanzados en los diferentes mapas temáticos generados con imágenes satelitales. (M. José López García; Bernard. J. Demore. Los Satélites de Observación en la Tierra en el 2000)

Las imágenes satelitales tienen importantes cualidades que son la multiplicidad de aplicaciones, la posibilidad de estudiar áreas absolutamente inaccesibles, realizar actualizaciones en poco tiempo y en forma multitemporal. El análisis multitemporal¹ permite detectar cambios entre dos fechas de referencia,

¹ Análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas y permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que se han sido clasificadas.

deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio (Chuvienco, 1990).

La detección de cambios a partir de una secuencia multitemporal de imágenes de satélite es una de las aplicaciones más importantes en teledetección. Como es bien sabido, este proceso requiere de una adecuada corrección radiométrica² y geométrica³ de las imágenes, de manera que los cambios detectados solo sean atribuibles a verdaderas modificaciones del paisaje.

La comparación de imágenes multitemporales se ha venido empleando fundamentalmente en la detección de cambios en la cubierta terrestre, para seguir la evolución de áreas forestales, superficies quemadas, desastres naturales, recursos naturales, crecimiento urbano, etc. La mayoría de estas aplicaciones emplean sensores como (LANDSAT TM, NOAA-AVHRR, SPOT, etc.), que abarcan una gran área, con una resolución insuficiente para captar detalles propios de un escenario.

En los últimos años, gracias a la creciente disponibilidad comercial de imágenes de satélite de alta resolución (Ikonos, QuickBird, RapidEye, etc.), se abre un apasionante abanico de aplicaciones en el ámbito de la gestión y monitoreo de los recursos naturales.

Una de las principales ventajas en el uso de la teledetección en el ámbito forestal, es proporcionar información actualizada, periódica y precisa del medio, muy útil tanto en el campo científico como en el administrativo, para fines tales como la planificación territorial, gestión de recursos y estudios ambientales.

La mayoría de los estudios se realizan partiendo de imágenes ópticas, que recogen información en las regiones visible e infrarrojo del espectro

2 Proceso que consiste en reducir los efectos de la iluminación del sol, la topografía del terreno y las condiciones atmosféricas que han modificado los valores de energía radiante emitidos por la superficie terrestre y los que han sido capturados por el sensor.

3 Las correcciones geométricas en la imagen se hacen con el propósito de orientar la posición de los píxeles a un sistema de referencia.

electromagnético. Los resultados son satisfactorios a la hora de diferenciar áreas de bosques frente a otros usos como los cultivos, pastos, zonas urbanas o masas de agua. Pero la diferencia entre distintos tipos de bosques no resulta tan fácil dado que en ocasiones existen formaciones que tienen un comportamiento espectral⁴ similar y sus diferencias son apreciables por características de otro tipo como la estructura, formación geométrica, etc

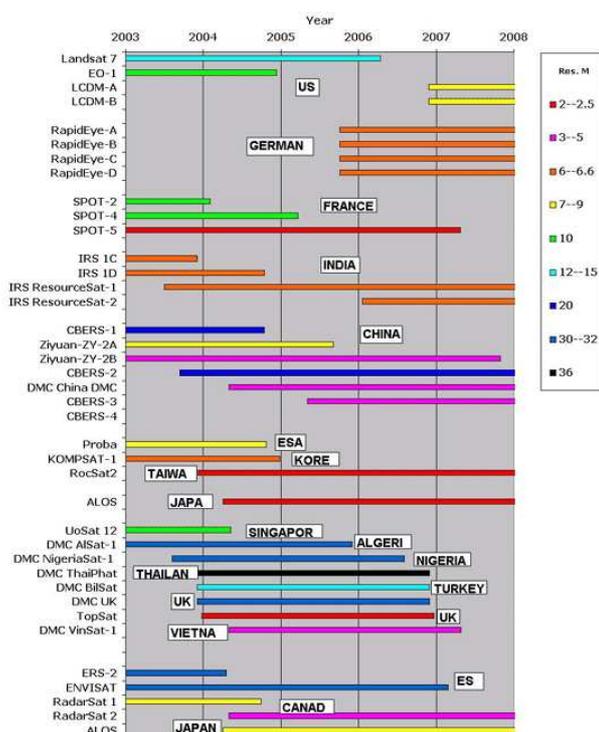


Figura 1. Sensores de Alta resolución
Fuente: MundoGeo, Nuevos sensores orbitales

El uso de la teledetección, en el siguiente trabajo permitirá observar el tipo de ocupación existente sobre el suelo, ya sea vegetación natural, cultivos agrícolas; y detectar los cambios que existan a lo largo del tiempo. Permitiendo cuantificar la disminución de la cobertura vegetal y uso de la tierra.

Las ciencias ambientales han estudiado la problemática y los posibles impactos de la degradación de los ecosistemas y principalmente de los bosques. La teledetección es una técnica que ha significado un gran aporte para este tipo de

⁴ Estudio de los espectros de emisión y de absorción.

ciencias. Esta técnica permite diferenciar las diferentes cubiertas terrestres, las cuales reflejan o emiten energía electromagnética de acuerdo a sus características físicas. Las características orbitales del satélite permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares geométricamente de observación, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El cambio de uso de la tierra y la pérdida del recurso forestal han sido los resultados de una diversa actividad antrópica. Esta actividad, está relacionada con factores poblacionales y socioeconómicos, los cuales han sufrido grandes cambios con el pasar del tiempo, sin tomar en cuenta las consecuencias negativas que puede llevar la acelerada expansión de la frontera agrícola en áreas que por naturaleza son de bosques.

En la actualidad los recursos forestales soporta la presión de la expansión agrícola y crecimiento demográfico, que conlleva a la degradación de la tierra. De esta manera, el suministro de bienes y servicios del recurso forestal y los ecosistemas naturales propios del área de estudio se ve en peligro con el pasar del tiempo.

“En los objetivos de milenio, en su objetivo nueve menciona la grave situación que atraviesa el Ecuador, por la pérdida desmedida de cobertura vegetal, como en el deterioro de las funciones ecológicas de los bosques”.(Ministerio del Ambiente Ecuador, 2010)

En la provincia de Sucumbíos, el principal recurso es la selva, que ha sido deforestada en ciertas áreas, debido a la colonización dirigida espontánea y la apertura de vías de acceso como consecuencias de la explotación petrolera.

Por ende, el estudio multitemporal de cambios de uso de la tierra por medio de la utilización de sensores remotos, pretende analizar los cambios producidos en los años de estudio, y a su vez brindar un valioso aporte espacial y estadístico para la toma de decisiones hacia un buen manejo forestal.

Para el Estudio Multitemporal utilizaremos imágenes de diferentes satélites, uno y muy novedoso es el Satélite RapidEye, tienen 5 sensores los cuales aportan un gran volumen de información y la continuidad temporal con la que visitan un mismo punto de la tierra. El tener imágenes cada 2 o 3 días de una misma área resulta vital para tareas de monitoreo y aplicaciones de sensores remotos. Su resolución espacial es de 5 metros. Esto resulta en un nivel de detalle intermedio entre aquellas imágenes tradicionales tomadas por el sistema Landsat (30 m) o Aster (15 m).

Lo que hace única y muy interesante a las imágenes de la constelación RapidEye es su resolución espectral. Las imágenes vienen particionadas en las regiones de la longitud de onda del azul, verde, rojo e infrarrojo cercano. Con estas imágenes se tiene acceso a la banda del "borde del rojo" (701nm) -red edge- donde la vegetación pasa rápidamente de unos valores bajos en el rojo a uno muy altos en el infrarrojo. Esta zona de transición entre rojo e infrarrojo resulta clave para estudios y análisis de vegetación.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La provincia de Sucumbíos se encuentra situada en la región nororiental del Ecuador con una extensión de 18.327 Km². Su capital es Nueva Loja, ciudad que nació con la búsqueda y explotación petrolera en la Amazonía Ecuatoriana.

Sus cantones son Lago Agrio, Gonzalo Pizarro, Putumayo, Shushufindi, Sucumbíos, Cascales, Cuyabeno.

Para este estudio se escogió tres sitios pilotos en la provincia de Sucumbíos, Gonzalo Pizarro, Shushufindi y Cuyabeno.

Tabla 1.1 Límites al área de estudio

LIMITES	UBICACIÓN
Norte	República de Colombia

Sur	Provincia de Napo
Este	Colombia y Perú
Oeste	Provincias del Carchi, Imbabura y Pichincha

Fuente. Elaborado por el autor

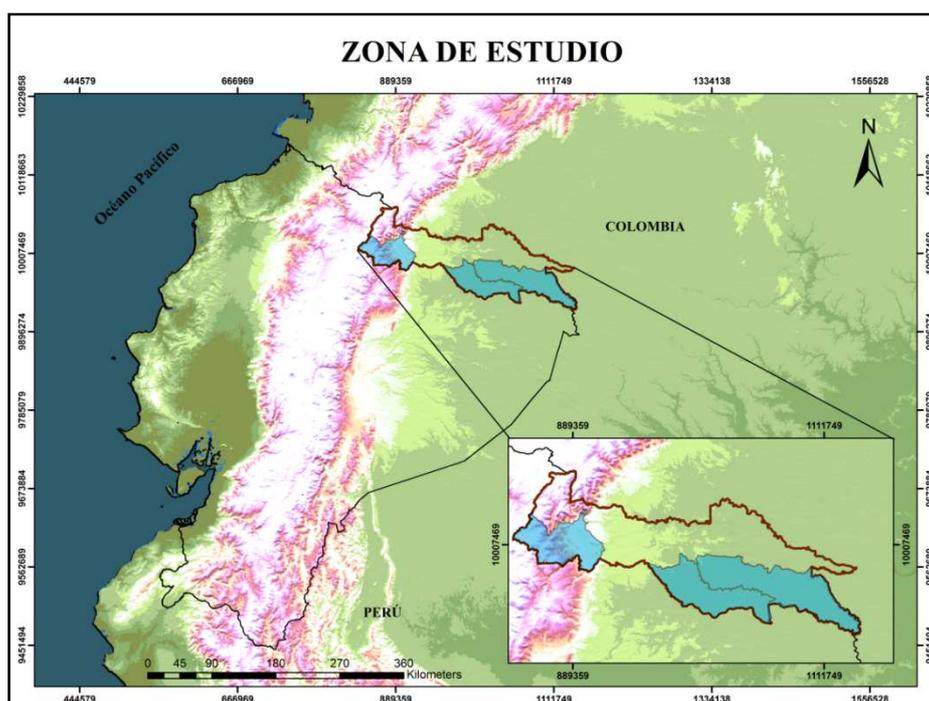


Figura 2. Ubicación de la Zona de Estudio
Fuente. Elaborado por el autor

Su relieve se divide en una zona montañosa, llamada tercera cordillera, donde está el volcán Reventador y otra zona de llanura Amazónica cubierta de selva. Sus principales ríos son: Aguarico, San Miguel y Putumayo.

En la parte alta de la cordillera, el clima es de páramo y conforme se desciende a la selva amazónica, va modificándose debido a factores como altitud, humedad, vientos y temperatura que lo convierten en tropical húmedo bastante caluroso.

Sus principales fuentes de ingreso además del petróleo es la actividad agropecuaria tanto comerciales y para autoconsumo de la población.

Tabla 1.2 Descripción del Área de Estudio

Nombre	Características	Fotografías
Sucumbíos (Noroccidente de Lago Agrio)	Bosque lluvioso de las tierras bajas	

Fuente: Socio Bosque

1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las imágenes de satélite muestran literalmente, mucho más de lo que el ojo humano puede observar, al desvelar detalles ocultos que de otra forma estarían fuera de su alcance.

Es importante mencionar que al trabajar con diferentes sensores, lo que se trata de lograr es homogenizar e intercambiar información buscando resultados adecuados y óptimos para los estudios que se generarán en el futuro.

“Lo que se quiere realizar es fusionar de un determinado tipo de datos, imágenes captadas por sensores que operan a distintas resoluciones espaciales y espectrales.” (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2010)

Para Yocky (1995), la combinación de imágenes de distintas resoluciones constituye una nueva técnica de procesamiento, denominada “fusión de imágenes” cuyo principal objetivo es la mejora aparente de las imágenes, así como el aumento de la fiabilidad de su interpretación (Pohl y VanGenderen 1998)

Al haber más satélites se dispone de imágenes en una cantidad creciente de tamaños de escenas, resoluciones espectrales⁵ y detalles espaciales.

⁵ Capacidad del sensor para discriminar la radiancia detectada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético.

La información basada en imágenes de satélites se emplea cada vez más con el fin de evaluar el estado forestal, cobertura vegetal, riesgos naturales y de medir tanto la sustentabilidad medioambiental como económica. RapidEye es un satélite de alta resolución que fue lanzado en el año 2008 por motivos totalmente comerciales, por lo que todavía no se han realizado estudios con estas imágenes, y lo que queremos obtener es cuán eficaz puede ser con respecto a otros satélites (LANDSAT, ASTER), y poder discriminar de acuerdo a los resultados que se obtengan del estudio multitemporal. Los satélites de alta y media resolución proporcionan imágenes con un nivel de detalle significativo, cuya utilización se traduce en reducción de costos, tiempo de trabajo y riesgos

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

- ❖ **ANALIZAR Y COMPARAR IMÁGENES DE DIFERENTES SENSORES PARA VERIFICAR SU EFICIENCIA Y UTILIDAD EN ESTUDIOS MULTITEMPORALES.**

1.5.2 Objetivos Específicos

- ❖ Generar una metodología para homogenizar (Geométrica, Atmosférica, Radiométrica) la información de los diferentes sensores.
- ❖ Generar mapas temáticos de uso de la tierra y cobertura vegetal para los diferentes periodo de estudio (1990, 2000, 2010)
- ❖ Analizar diferentes índices espectrales para las imágenes de diferentes sensores.

- ❖ Generar matrices de transición de la zona de estudio (Métodos Comparativos)
- ❖ Generar un estudio multitemporal del cambio de uso de tierra y cobertura vegetal, utilizando la clasificación borrosa (Fuzzy).
- ❖ Diseñar los procedimientos operativos para estudios multitemporales utilizando imágenes Rapideyes.

1.6 METAS

- ❖ Una base de datos de imágenes de diferentes sensores corregidos (Landsat, Aster, RapidEyes)
- ❖ Tres mapas temáticos de cobertura vegetal y tres de uso del suelo a escala 1:100000 en la época (1990, 2000, 2010)
- ❖ Un estudio comparativo de los índices espectrales con sus diferentes bandas de cada sensor.
- ❖ Dos matrices de transición (1990, 2000, 2010)
- ❖ Un análisis multitemporal del cambio de uso de la tierra y cobertura vegetal utilizando la clasificación Borrosa (Fuzzy) (1990, 2000, 2010)
- ❖ Un manual de procedimientos requeridos para estudios multitemporales para imágenes rapideyes.

Escala de trabajo para todos los mapas: 1:100000

Escala de presentación para todos los mapas: 1: 1000000

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN



Figura 3. Esquema operativo de Satélites de Observación.
Fuente.MundoGeo

La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con la superficie terrestre.

Todos los elementos tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. Esta se encarga de estudiar las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su *signatura espectral*.

La información se recoge desde plataformas de observación que pueden ser aéreas o espaciales, pues los datos adquiridos a partir de sistemas situados en la tierra constituyen un estudio preparatorio de la Teledetección propiamente dicha, y se consideran como campañas de *verdad terreno*.

Las plataformas de observación portan instrumentos que son susceptibles de recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo en una cierta gama de longitudes de onda, y para transformarla en una señal que permite localizar, registrar y digitalizar la información en forma de fotografía o imágenes numéricas grabadas en cinta magnética compatible con un ordenador.(Figura.3)

Los captorees son radiómetros de barrido multiespectral (MSS), radares y láseres, analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de la superficie terrestre en las longitudes de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta, visible, infrarrojo próximo, infrarrojo térmico, hiperefrecuencias) con el fin de reconocer la variada gama de formas y objetos. (Figura. 2). La organización de estas bandas de longitud de onda o frecuencias se denomina espectro electromagnético.

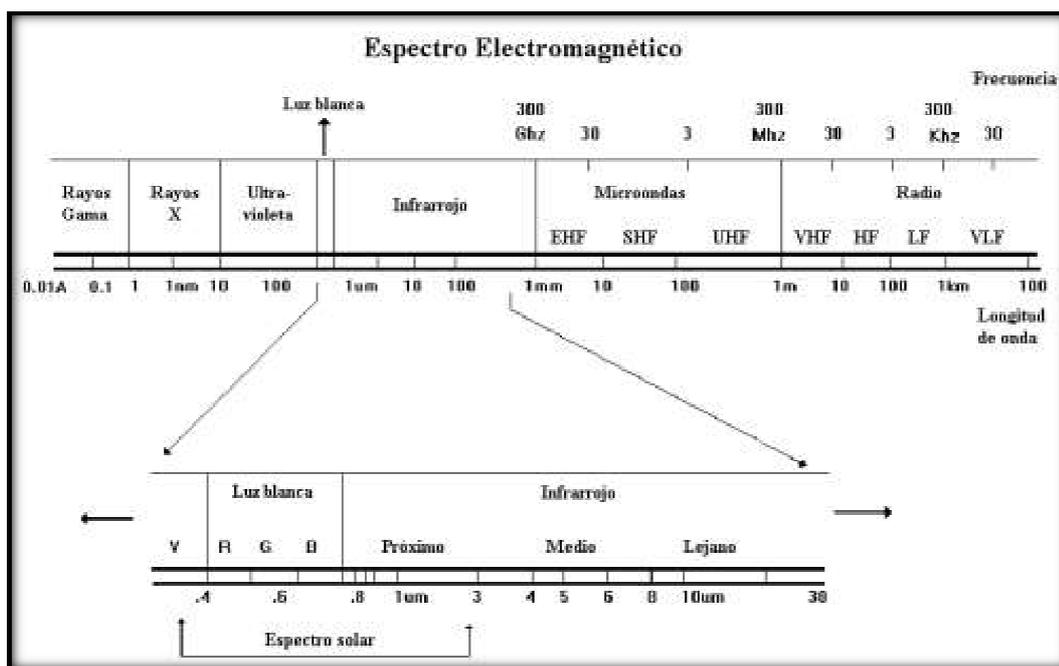


Figura 4. Esquema de Espectro Electromagnético.

Fuente. CLIRSEN

2.2SENSORES REMOTOS

En la actualidad existen diferentes sensores que son liderados por las grandes agencias espaciales nacionales que surgen con el objetivo de proporcionar datos sobre la superficie terrestre para la cartografía temática. Se trata de misiones continuas y ampliamente consolidadas, entre los que se destacan el programa Landsat, Aster y un nuevo satélite alemán como es el Rapideyes.

2.2.1 Landsat

Es uno de los más fructíferos de todas las series puesto que ha proporcionado datos multiespectrales más de 25 años, en la actualidad está operando con el sensor TM (ThematicMapper), diseñado para la cartografía temática proporcionando datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica, este tiene 7 bandas, tres de ellos en el visible, una en el infrarrojo próximo, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico. El Landsat 7 incluye una versión mejorada del sensor TM, el ETM (EnhancedThematicMapper) que incluye una banda pancromática (0.5-0.9um).

2.2.2 Aster

Es un esfuerzo corporativo entre la Nasa y el Ministerio de Comercio Económico e Industria de Japón, su objetivo es mejorar los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la tierra. Si bien las características de los datos ASTER son aplicables a estudios de todos los recursos naturales de amplia diversidad a escala semidetallada.

2.2.3 RapidEye

RapidEye es una iniciativa alemana que ofrece imágenes con resolución espacial igual en cada banda y permite la producción de las ortoimágenes, posee 5 bandas espectrales cubriendo un amplio rango del espectro, su banda Red Edge se encuentra entre el rojo y el infrarrojo cercano muy útil para discriminar la vegetación y los organismos del agua

Tabla 2.1. Cuadro de Comparación de Sensores

SISTEMA	LANDSAT	ASTER	RAPIDEYE
RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	30	VNIR (15) ; SWIR (30)	Multiespectral (5)
RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA (bits)	8	8	12
FRANJA DE BARRIDO (km)	185	60	77
CICLO	14 días	16 días	2 días
REPETITIVIDAD	7-14 días	16 días	1 día
FECHA DE LANZAMIENTO	1972	Diciembre 18, 1999	Agosto 29, 2008

Fuente: Fritz (1999), modificada

2.3 BANDAS ESPECTRALES

En la actualidad existe un creciente desarrollo en los sensores de alta resolución espectral, permitiendo registrar la reflectividad de un gran número de bandas, se trata de una colección de espectros que intentan recoger la reflectividad característica de una amplia variedad de materiales terrestres.

Los espectros disponibles que se mencionarán son los que utilizaremos aunque para cobertura vegetal son muy escasos, podemos empezar con el programa más utilizado y reconocido como es el Landsat que tiene curvas espectrales situadas entre (0.45-0.90 μm) incluyendo la pancromática, otro muy conocido es ASTER que va entre (0.4-2.5 μm) y finalizando está las de RapiEyes que van entre (0.44-0.85 μm).

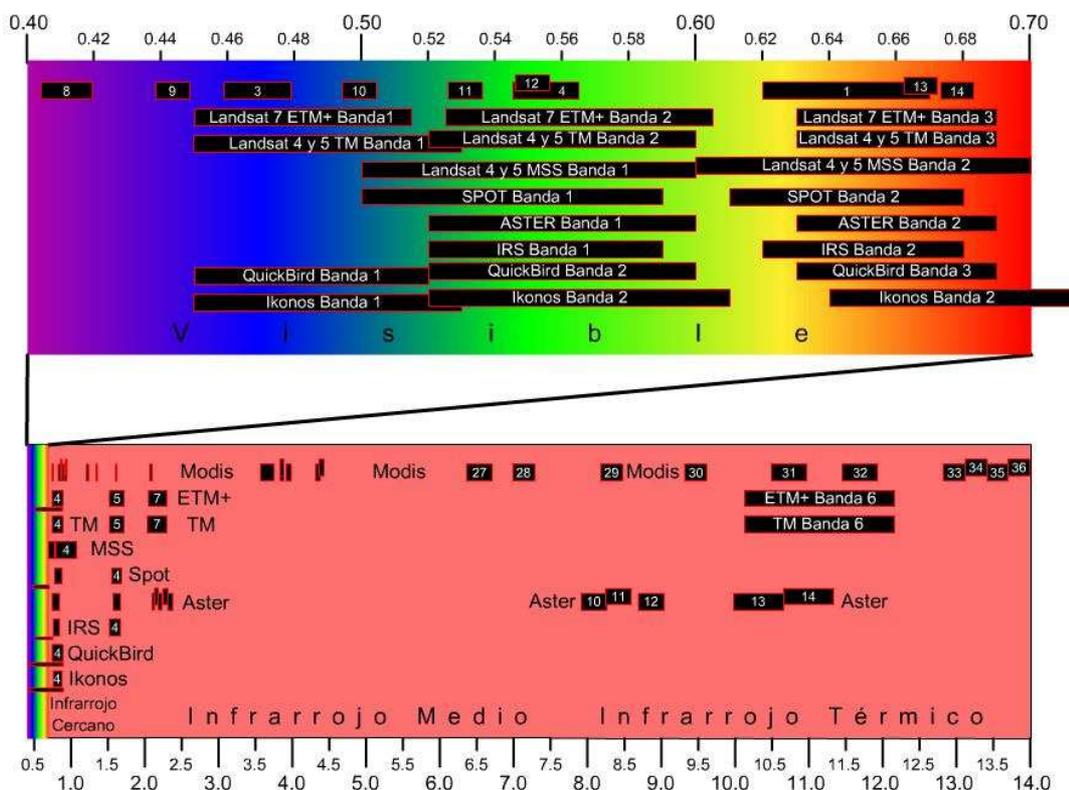


Figura 5. Cobertura espectral de las Bandas de los principales satélites, los números se encuentran en micrómetros (Imágenes Satelitales.net)
Fuente.<http://www.geowebrum.org>

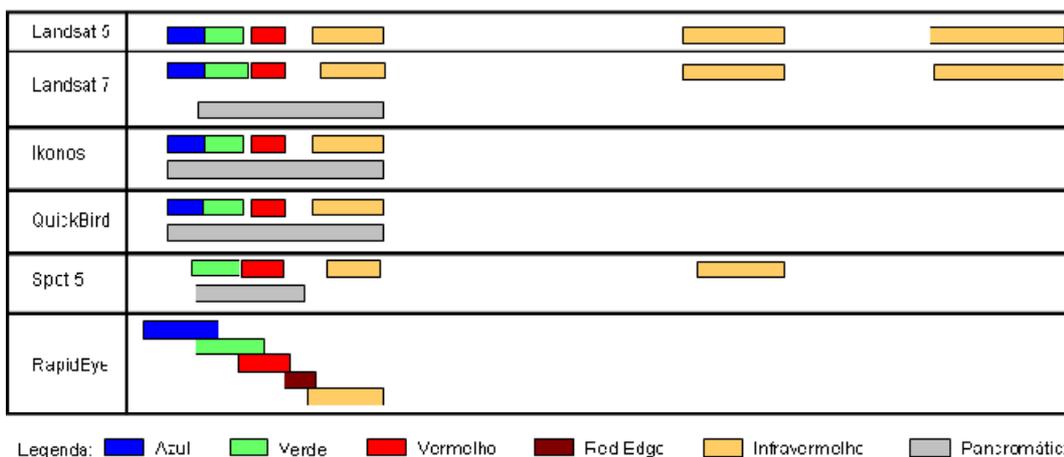


Figura 6. Bandas espectrales de los principales satélites (Santiago & Cintra Consultora, 2008)
Fuente.<http://www.geowebrum.org>

Tabla. 2.2 Bandas Espectrales de uso frecuente.

BANDAS	CARACTERISTICAS
--------	-----------------

Visible	Llamada así, por ser la percibida por los ojos, allí se presenta la máxima radiación solar, se distinguen tres bandas elementales azul (0.4-0.5 um), verde (0.5-0.6 um), rojo (0.6-0.7 um)
Infrarrojo Cercano	(0.7 a 1.3 um) este puede detectarse mediante películas dotadas por emulsiones especiales, en este se pueden diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad
Infrarrojo Medio	(1.3 a 8 um) donde se mezcla los procesos de reflexión de luz solar y emisión de la superficie terrestre
Infrarrojo Lejano	(8 a 14 um) corresponde a la porción emisiva del espectro terrestre
Microondas	(1 mm. En adelante) de gran importancia por ser energía transparente a la corriente nubosa.

Fuente: Fundamentos de Teledetección Espacial.

2.4 CAMBIOS DE COBERTURA

En el transcurso de la historia, el suelo ligado a la productividad agropecuaria, además del cambio de cobertura del suelo, de han constituido en factores importantes para el crecimiento y desarrollo de todas las culturas. En los últimos 29 años, ha resurgido la importancia verdadera y real que tiene la conservación de los recursos naturales, y como componente de éstos el recurso suelo como fuente de producción de alimentos para la humanidad (Dalence et al. 1999).

Los estudios sobre la cobertura y uso del suelo analizan y clasifican los diferentes tipos de cobertura y usos asociados que el hombre practica en una zona o región determinada. Actualmente, los cambios en el uso del suelo están transformando a la

cobertura rápidamente, sin que en la actualidad se tenga cuantificado este cambio a escala global, regional y local.

El uso del suelo resulta de las actividades productivas y asentamientos humanos que se desarrollan sobre la cobertura del suelo para satisfacer sus necesidades materiales. Las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos y culturales. La importancia de realizar un estudio sobre los cambios ocurridos en la cobertura y uso del suelo, es que la información obtenida puede ser un instrumento que apoye la toma de decisiones en la planificación del desarrollo futuro de la zona.

El crecimiento demográfico, la demanda, la expansión y la sobre explotación del uso de las tierras con fines agrícolas están provocando una serie de trastornos al ecosistema, debido a que éstas actividades producen un cambio en la cobertura del suelo (FAO, 1991).

Estos cambios en la cobertura y uso de la tierra se estudian por medio de análisis multitemporales generando información valiosa y útil en la planificación de un desarrollo sostenible en zonas de interés (FAO, 1991)

2.5 DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA

Una de las aportaciones más destacadas en la teledetección es su capacidad de seguir procesos dinámicos.

En el seguimiento de la dinámica de un determinado fenómeno conviene distinguir dos aspectos relacionados con el cambio (Rodin, 1998). En este sentido, el rango de los fenómenos ambientales que se estudian en teledetección puede ir desde unas pocas horas (ciclones tropicales, terremotos, erupciones volcánicas) hasta varios años (desertificación, crecimiento urbano). La frecuencia más idónea para poder observar un fenómeno dependerá de la duración y la pervivencia.

La tabla 2.3 se presentan algunas cadencias de observación, según los fenómenos que se pretenda observar (Jensen, 1983)

Tabla. 2.3 Cadencia de actualización para estudios multitemporales

FENÓMENO	PERÍODO DE OBSERVACIÓN
Dinámica atmosférica	15-30 min
Seguimiento de desastres	2-24 horas
Evaluación de desastres	1-7 días
Predicción de Cosechas	2-3 meses
Análisis de la deforestación	1-3 años
Actualización de mapas de cobertura	3-5 años
Dinámica Urbana	5-7 años
Actualización de mapas topográficos	10-20 años

Fuente. Chuvieco, 2002

2.6 REQUISITOS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Para una comparación multitemporal entre imágenes se realiza, comparando pixel a pixel los ND de las distintas fechas. Es necesario eliminar cualquier cambio en los ND de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta. Esto quiere decir que debe ser en la misma zona para ambas fechas y que la variable que estamos comparando se refiera a la misma escala de medida. La comparación temporal requiere una previa corrección geométrica y radiométrica de las imágenes que estamos utilizando.

Para poder obtener resultados ideales es necesario que las imágenes satelitales hayan tenido una previa corrección de ciertas anomalías como las correcciones geométricas que se trata de las distorsiones en la geometría de la imagen (posiciones de los pixeles) debida a diversos efectos, las correcciones radiométricas son anomalías que afectan a los Niveles Digitales de las celdillas (radiométricas) que deben ser corregidas para que la información que nos proporcionen estos ND sea lo más fiel posible a la realidad que se estudia. Mientras que las Correcciones Topográficas permite compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a variaciones altitudinales del terreno.

2.6.1 Ajuste Geométrico

Para estudios multitemporales es preciso que las imágenes se ajusten con gran nivel de detalle. Varios autores han demostrado que se requieren precisiones de ajuste superiores a 0.2 píxeles para asegurar un error inferior al 10% en la comparación multitemporal (DaiKhorram, 1998; Townshend et Alm, 1992).

Para realizar un buen ajuste geométrico es importante tener una serie de puntos de control para la imagen de referencia que se realiza el ajuste. A partir de la imagen de referencia se toman puntos entre las imágenes restantes tomando en cuenta los rasgos comunes como elementos hidrológicos, caminos, casas, etc., elegir todas estas características va depender de la resolución de la imagen.

2.6.2 Homogeneización Radiométrica.

Es preciso homogeneizar los ND de las imágenes que intervienen en el análisis. Para ello puede optarse por:

- Calibrar los ND de modo absoluto, convirtiéndolos a medidas de reflectividad o temperatura del suelo.
- Equiparar los ND entre imágenes.

Uno de los principales fundamentos para realizar estudios multitemporales es combinar o integrar en el proceso varias imágenes correspondientes a distintas fechas, pero es muy importante tomar en cuenta que existen factores que alteran el valor de cada píxel; como los distintos estados fenológicos, ángulo de toma de la imagen, día nublado, bruma, sombra, agua profunda, aguas claras, etc. En consecuencia, es preciso homogeneizar los niveles digitales de cada píxel de todas las imágenes, para ello existen modelos que calibran estos niveles digitales de modo absoluto transformando a medidas de reflectividad o parámetros físicos. Otra manera de homogeneizar es mediante un ajuste matemático entre fechas es decir una corrección relativa. En definitiva todas las metodologías para la homogeneización radiométrica tienen como objetivo el asignar valores digitales del mismo rango espectral evitando los errores que comúnmente existen en la adquisición de las imágenes.

2.6.3 Correcciones Topográficas.

La iluminación oblicua y una topografía irregular generan unos efectos de sombreado e iluminación que modifican la respuesta debida exclusivamente al tipo de superficie. Las zonas de umbría presentaban menos reflectividad de lo que debieran, mientras que las zonas en solana presentaban una reflectividad más alta de lo esperado. Para realizar la corrección topográfica es necesario calcular la iluminación (IL), es decir, el coseno del ángulo de incidencia (γ_i):

$$IL = \cos\theta\gamma_i = \cos\theta p \cos\theta_i + \sin\theta p \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_o)$$

Ecuación 1. Cálculo de la Iluminación **Fuente. Chuvieco, 2002**

Dónde:

θp = pendiente del terreno: La inclinación del terreno con respecto a la horizontal.

θ_i = ángulo cenital solar_ El ángulo complementario de la elevación solar.

ϕ_a = ángulo azimutal solar: La dirección del sol con respecto al norte.

ϕ_o = ángulo de orientación: El ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto

Un método semiempírico conocido como corrección (Taillet et al, 1982):

$$\rho_H = \rho_T \left(\frac{\cos\theta_i + C_k}{IL + C_k} \right)$$

Ecuación 2. Método Taillet **Fuente. Taillet, 1982**

Dónde:

$$C_k = \frac{b_k}{m_k}; \text{ para } \rho_T = b_k + m_k IL$$

Introduce un parámetro “ C_k ” que es el cociente entre la pendiente (b_k) y el término independiente (m_k) de la ecuación de regresión entre la ρ_T y la IL.

Para este proyecto no se realiza la corrección Topográfica ya que es una zona donde no tiene mucha pendiente y no son destacadas sus diferencias altitudinales.

2.7 TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA

Dentro del campo de la interpretación de imágenes, la detección de cambios de cobertura, resulta un gran compromiso en sustentar la variación que ha ocurrido o no, es decir evadir los errores de omisión, donde se tendría una carencia de información, y comisión o falsa alarma como se lo ha señalado anteriormente. Por lo tanto, la técnica que se aplique será la más conveniente para que los errores disminuyan dependiendo del objetivo del análisis.

Otro aspecto de interés en el análisis de cambios de cobertura hace referencia al tipo de transformaciones que pretenden delimitarse en una imagen, según se transformen los rasgos espectrales o espaciales (Robin, 1998); esto implica analizar, ya sea con valores de reflectividad o por tamaño de parcelas. Si se utiliza imágenes continuas se emplean técnicas cuantitativas como diferencias, regresiones, composición de color, etc.; mientras que para rasgos espaciales se compara entre imágenes previamente clasificadas. Las técnicas empleadas en este estudio para el análisis multitemporal son de tipos cuantitativas, es decir no se realizó una clasificación previa; dichas técnicas se describen brevemente a continuación:

Composiciones de color multitemporal: Detecta áreas de cambio mediante el análisis visual de imágenes en color provenientes de varias fechas (Chuvieco 2002). La metodología se basa en mezclar las mismas bandas o índices de distintos años en los cañones R G B para su posterior análisis.

Diferencia entre imágenes: Es una simple resta entre imágenes de diferente fecha, previamente tratadas, donde se discrimina aquellas zonas que han experimentado cambios.

Cociente multitemporal: Establece la proporción, donde se asigna un valor de alteración que existe en la diferencia de imágenes.

Regresión multitemporal: Comúnmente la regresión se emplea con variables que estén fuertemente asociadas a una variable de interés, pero para la detección de cambios, la regresión se utiliza para estimar cuales serían los cambios de los niveles digitales (ND) en el caso que no hubiera cambios

2.8 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.

La clasificación de una imagen digital consiste en categorizar una imagen multibanda. Se pasa de tener unos ND continuos medidos por los sensores a una escala nominal o categórica de manera que cada pixel pertenece a una categoría definida previamente. El ND de un pixel clasificado es, en definitiva, el identificador de la clase o categoría en la que se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de coberturas (variables nominal o categórica) o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Un ejemplo del primer tipo sería una clasificación de distintos niveles de daño producidos por un incendio.

La clasificación digital de imágenes es en cierta medida, parecida a la fotointerpretación. En este método, se identifica el patrón visual asociado a cada cobertura (categoría) de acuerdo a una serie de parámetros como son el tono, la textura, la forma, el contexto, la disposición, etc. Y después se identifican sobre las fotografías las superficies correspondientes a estas categorías, mediante su semejanza con el patrón-tipo previamente identificado. Por último es necesario una verificación de los resultados.

2.8.1 Fussy o Borrosa.

La lógica difusa fue desarrollada por Zadeh en la década de los 60 en la Universidad de California en Berkeley, esta propone que un elemento siempre pertenece en un cierto grado a un conjunto y nunca pertenece del todo al mismo, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no-lineales, y su base en el lenguaje natural. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos; los términos lingüísticos son inherentes menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

2.8.2 Lógica Fussy.

La lógica clásica establece que cualquier enunciado o proposición puede tener un valor verdadero o falso, en definitiva 1 y 0.

La lógica difusa llamada también lógica borrosa o fuzzylogic, lo que hace es, en vez de trabajar con el clásico concepto de inclusión o exclusión, introduce una función que expresa el grado de “pertenencia” de una variable hacia un atributo o “variable lingüística” tomando valores en rangos de 0 a 1. Las proporciones pueden ser representadas con grados de certeza o falsedad.

Un conjunto difuso A sobre un universo de discurso U (ordenador) es un conjunto de pares dado por:

$$A = \left\{ \mu_A \frac{(u)}{u} : u \in U, \mu_A(u) \in [0,1] \right\}$$

Donde:

μ : Función de pertenencia

μ_A : Grado de pertenencia del elemento u al conjunto difuso A.

Este grado oscila entre los extremos 0 y 1, $\mu_A(u) = 0$, indica que u no pertenece en absoluto al conjunto difuso A, $\mu_A(u) = 1$, indica que u pertenece totalmente al conjunto difuso A.

2.8.3 Clasificación Fussy o Borroso.

La clasificación difusa, borrosa o fuzzy evalúa la posibilidad de que cada elemento o píxel pertenezca a un determinado sistema o fenómeno (Guo et. al., 2004), este puede ser el caso de píxeles que pertenezcan o no a una clase específica en una banda de una imagen satelital. (Ver Figura 7).

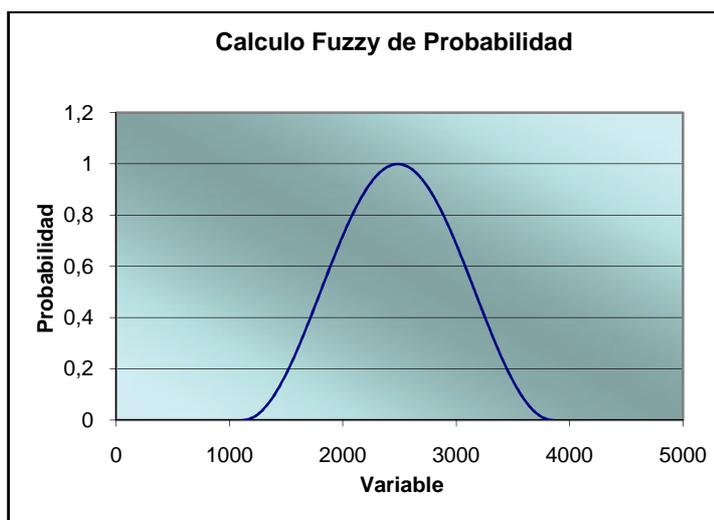


Figura 7. Probabilidad tomando una variable.
Fuente: Ing. Oswaldo Padilla

Se pueden tomar más de dos variables, como bandas disponga una imagen, y obtener la probabilidad individual de cada una de ellas. Al combinar dos variables se puede tener algo muy similar a una campana de base elipsoidal donde sus semiejes a y b corresponderán al rango de las variables tomadas (Ver Figura 8).

Las funciones sinusoidales o cosinusoidales se ajustan bastante bien a este tipo de representaciones, es por esto que utilizaremos ecuaciones en función de seno de alfa y coseno de alfa, (Ruiz Puente, et. al, 2007) donde alfa estará en función del fenómeno o variable que se desea modelar o representar, como se dijo antes este puede ser una clase en una imagen satelital.

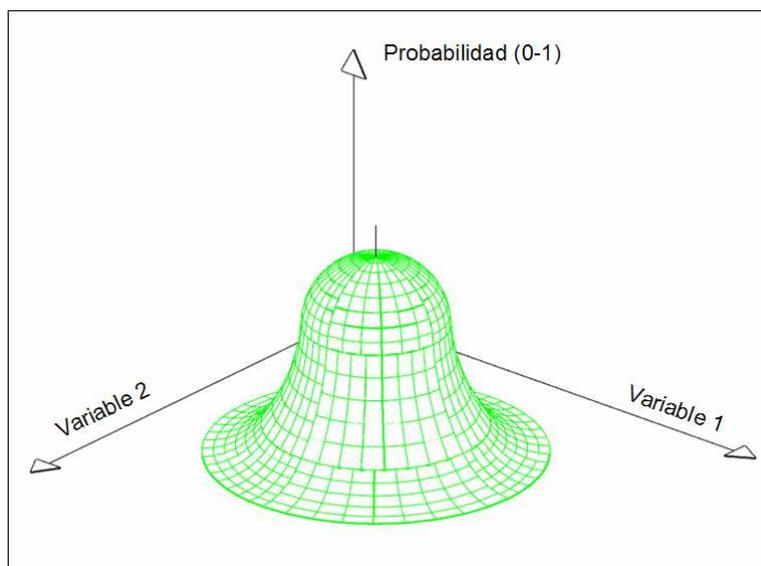


Figura 8. Probabilidad tomando dos variables.
Fuente: Ing. Oswaldo Padilla

Es así que la probabilidad se define de la siguiente forma:

$$P = f(\text{Sen}\alpha)$$

Ecuación 3. Fórmula de probabilidad de ocurrencia del evento

Donde:

P = Probabilidad de ocurrencia del evento o fenómeno

α = variable en función del evento o fenómeno

Mínima P= 0 o 0%

Máxima P= 1 o 100%

Para obtener una curva donde el rango sea de [0,1,0], usamos la función cuadrada del seno.

$$P = \text{Sen}^2\alpha$$

- **Puntos importantes en la función:**

Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma:

Punto A: Punto de valor mínimo en la variable a modelar

Punto B y C: Rango de valores donde se encuentran la mayor cantidad de datos de la variable

Punto D: Punto de valor máximo en la variable

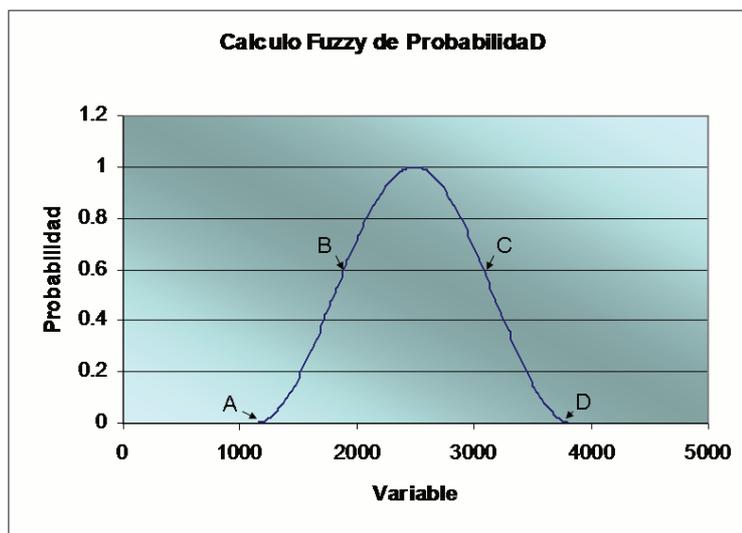


Figura 9. Puntos importantes del modelo.

Fuente: Ing. Oswaldo Padilla

2.9 ÍNDICES ESPECTRALES.

Para extraer información sobre la vegetación a partir de imágenes satelitales, es necesario realizar transformaciones a la imagen, las cuales pueden simplificar o reducir el volumen de datos. Estas operaciones permiten mejorar que los fenómenos de interés sean más evidentes. Las transformaciones más empleadas son índices de vegetación. Determinar los índices de vegetación a partir de imágenes de satélite implica efectuar una división, pixel a pixel entre los niveles digitales (*ND*) almacenados en dos bandas de la misma imagen, su empleo se justifica con dos propósitos: a) para mejorar la discriminación entre el suelo y vegetación, b) para disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Los índices de vegetación se utilizan para discriminar masas vegetales de alta actividad fotosintética de otras coberturas en fases fenológicas⁶ iniciales, y se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación. El comportamiento espectral característico de la vegetación sana muestra un alto contraste entre las bandas visibles, en especial la banda roja (0.6-0.7mm) y la infrarrojo cercano (0.7-1.1mm). En la región visible del espectro electromagnético, los pigmentos de las hojas absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias reflejan en forma mínima en el infrarrojo cercano. Por tal razón se produce un contraste espectral entre las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro. Esto permite separar con claridad la vegetación de otras coberturas. Estas diferencias forman la base para la definición de los índices de vegetación como función de la radiación de las bandas visibles (*Vis*) e infrarrojo cercano (*IRc*). Existen diversos índices de vegetación (*IVs*), los cuales tienen en común el uso de los valores de reflectancia y absorción las zonas espectrales del rojo e infrarrojo cercano (Gilabert, 1997:39 y Warren y Gowar 2004: 536-538).

2.9.1 Índice de Vegetación NDVI

El índice más usado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (*NormalizedDifferenceVegetationIndex*), NDVI (Gutman, 1991), el cual se define como:

$$NDVI = \frac{(IRc - Vis)}{IRc + Vis}$$

Ecuación. 4 Índice de Vegetación de diferencia normalizada
(*NormalizedDifferenceVegetationIndex*)

Fuente. Gutman, 1991

Donde:

IRc = Bandas del infrarrojo cercano

Vis = Bandas del rojo

⁶ Son fenómenos biológicos acomodados a cierto ritmo periódico como la brotación, la maduración de los frutos y otros.

Chuvieco (1996:86) menciona que cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés (acame, plagas, sequías, etc), su reflectancia será inferior en el infrarrojo cercano y el rojo, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor en relación con una vegetación sana de gran vigor.

Se puede mencionar que a mayor contraste entre las reflectancias de las bandas del infrarrojo y rojo, mayor vigor vegetal presentará una cobertura observada; y los bajos valores de esta relación indican una vegetación enferma, hasta llegar a coberturas sin vegetación como el suelo desnudo que reporta índices cercanos a cero. (Soria, 1998:39)

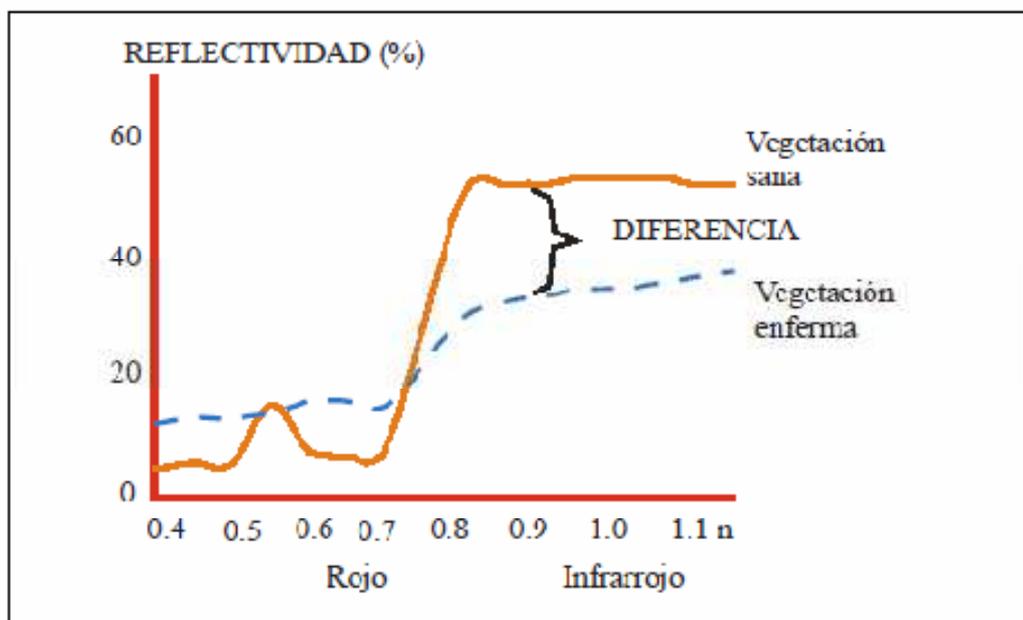


Figura 10. Contraste espectral entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano en los que se apoyan los índices de vegetación
Fuente.Chuvieco, 2002

2.9.2 Índice de Vegetación NDII

NDII ha sido reportado como un indicador muy preciso del contenido de humedad foliar en variados ecosistemas.

Debido al papel de las hojas verdes en una amplia gama de procesos biológicos y físicos, la densidad de la cobertura de las hojas en el terreno es medida a través del índice de área foliar (LAI). El modelado de ecosistemas a gran escala, que se utiliza

para simular una gama de respuestas en el terreno a la variabilidad y los cambios en el clima, requiere de incorporar un conjunto de variables del terreno entre las cuales el índice de área foliar es clave por sus implicaciones biológicas, biogeoquímicas y meteorológicas.

La estimación del LAI se realiza por métodos directos, que implican muestreo destructivo y la colecta de hojarasca, e insectos, basados en el registro del espectro electromagnético por sensores para radiometría y modelos de transferencia radiactiva.

$$NDII_i = \frac{P_{i,IRC} - P_{i,IRM}}{P_{i,IRC} + P_{i,IRM}}$$

Ecuación. 5 Índice de Vegetación NDII(NormalizedDifferenceInfrared Index)

Fuente. Chuvieco, 2002

Donde p_{IRC} y p_{IRM} son la reflectividad del infrarrojo cercano y medio respectivamente.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

En el Diagrama 1 presenta el esquema metodológico propuesto para la realización del Mapa de cobertura y Uso del suelo que serán aplicados.

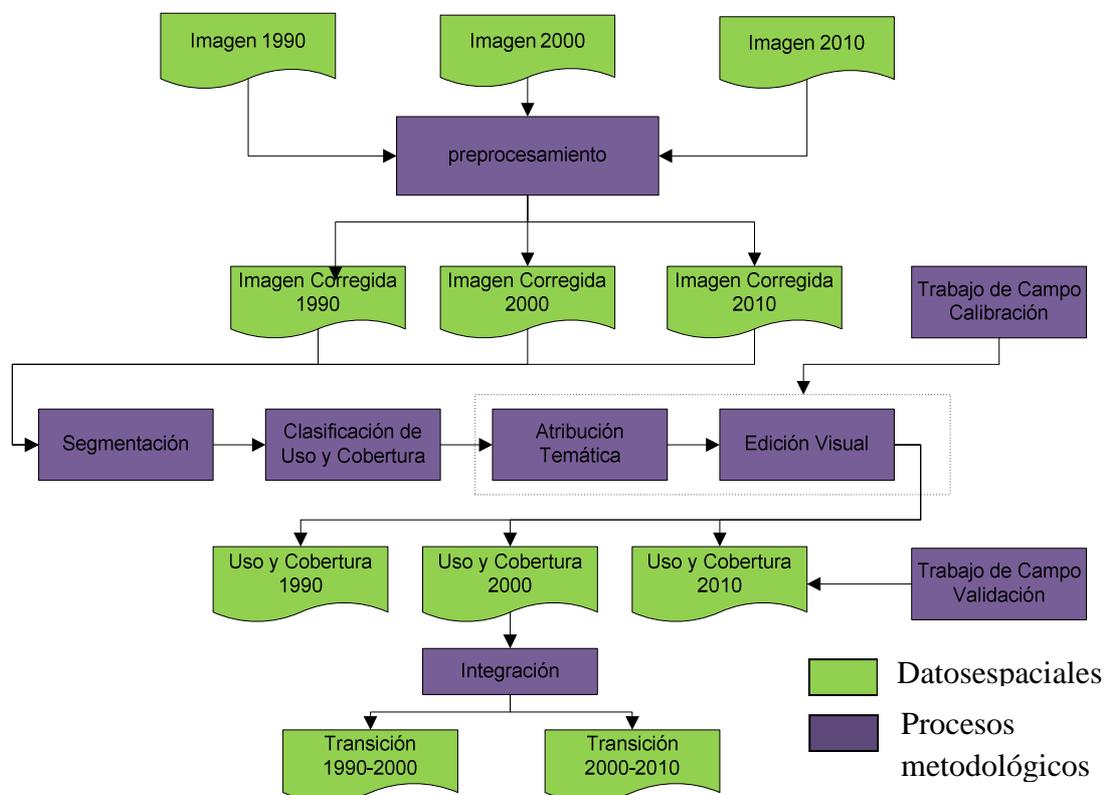


Diagrama1. Esquema metodológico.

Fuente. Elaborado por el autor

La información bibliográfica se obtendrá mediante el internet, libros y las imágenes satelitales serán dados por el Ministerio del Medio Ambiente (MAE). La información cartográfica base se encuentra a escala 1:50000 (Gonzalo Pizarro, Shushufindi y Cuyabeno) elaboradas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador que fueron sometidas a un proceso de edición y estructuración para el ingreso al SIG.

Para el mapeo de uso y cobertura vegetal se realizará utilizando sensores ópticos montados sobre plataformas satelitales, los sensores escogidos fueron LANDSAT TM, LANDSAT ETM+, ASTER y RAPIDEYE. Las imágenes satelitales fueron adquiridas a través del Ministerio del Ambiente (MAE). Estas fueron sometidas a las correcciones correspondientes para el análisis del cambio de cobertura y uso del suelo. La clasificación de uso y cobertura del suelo se realiza de forma independiente para cada año de referencia (1990, 2000 y 2010). La fecha efectiva de las imágenes utilizadas puede corresponder a años anteriores o subsiguientes a los años de referencia de acuerdo a la disponibilidad de imágenes sin cobertura de nubes.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

Para delimitar el área de estudio se tomaron en cuenta los límites cantonales, se propuso una zona donde abarca diferentes tipos de cobertura y uso del suelo para aplicar las diferentes metodologías de estudio.

Utilizando el modulo “*Mask*” se procedió a cortar cada una de las imágenes limitando así el área de estudio.

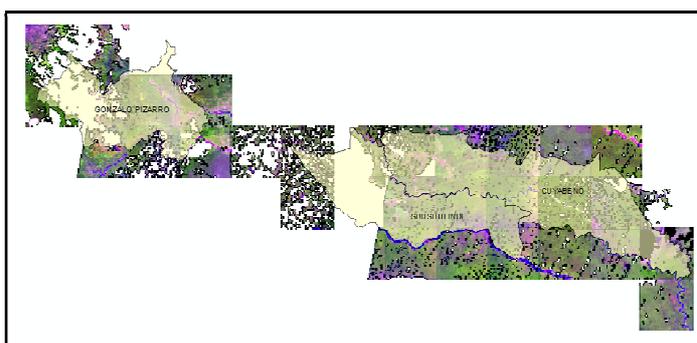
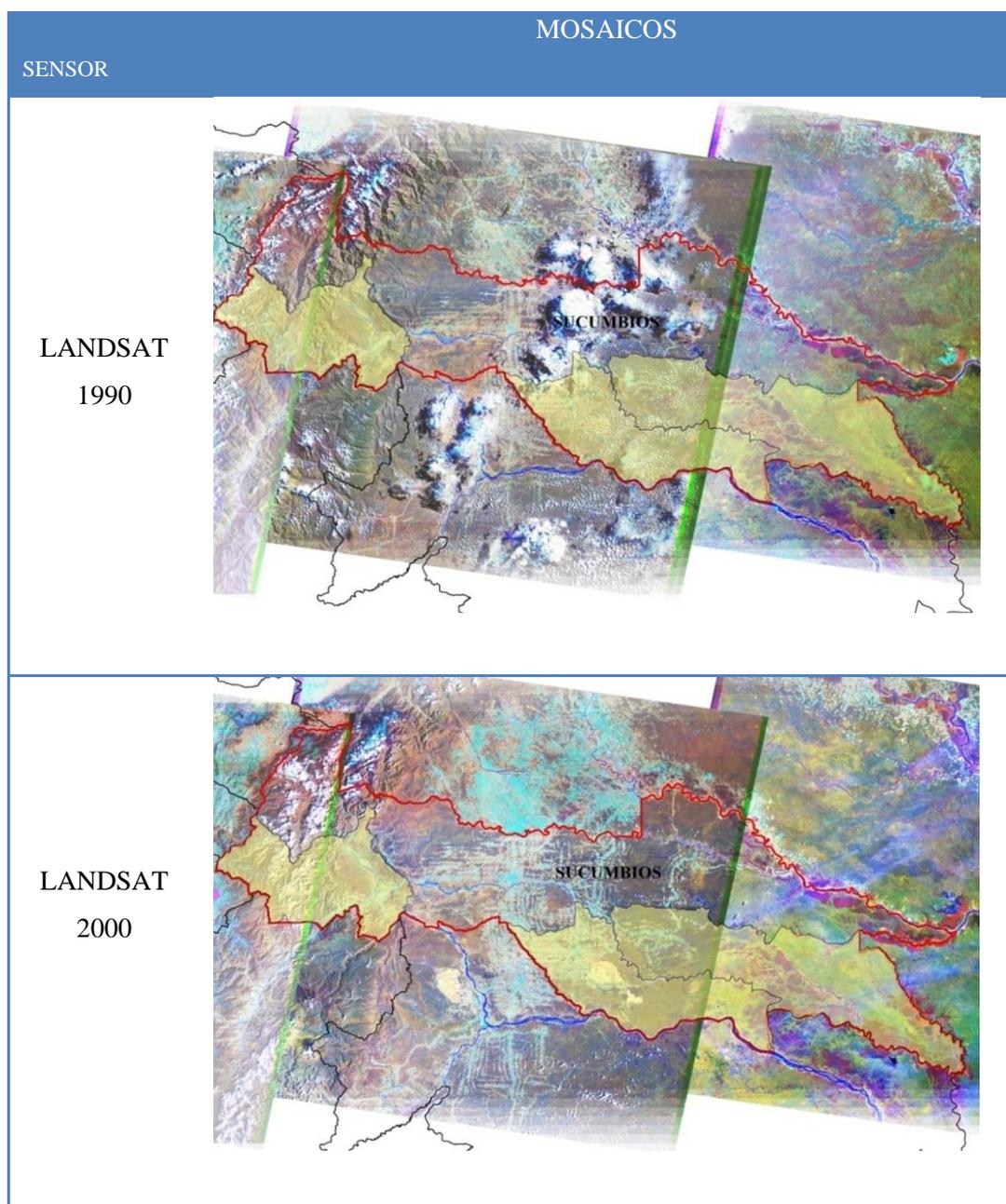


Figura 11. Área de Estudio
Fuente. Elaborado por el autor

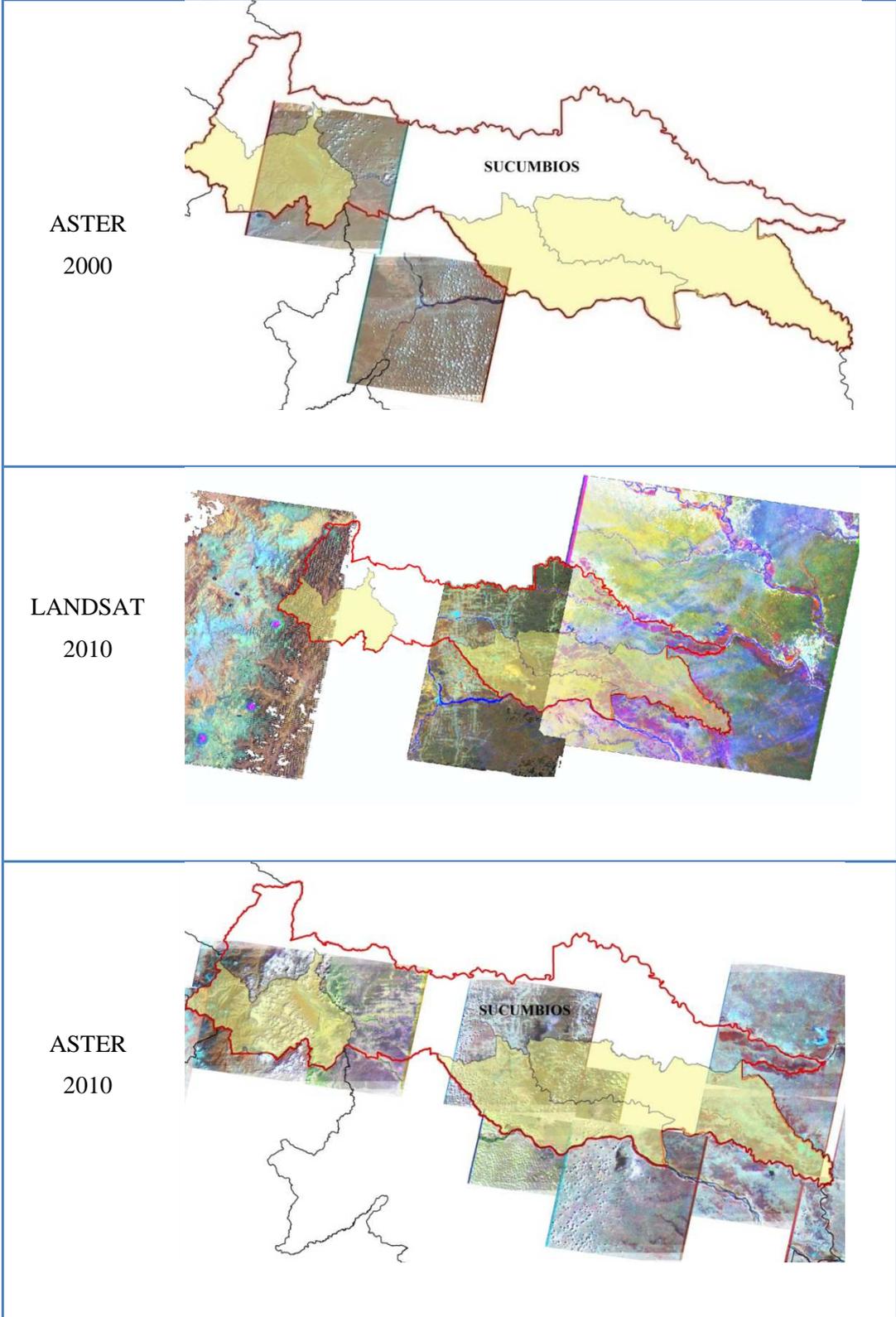
3.3 SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Para el mapeo de uso y cobertura del suelo se realiza utilizando sensores ópticos montados sobre plataformas satelitales. Los sensores escogidos fueron LANDSAT TM, LANDSAT ETM+, ASTER y RAPIDEYE.

A continuación se detalla las imágenes satelitales:



Continúa



Continúa

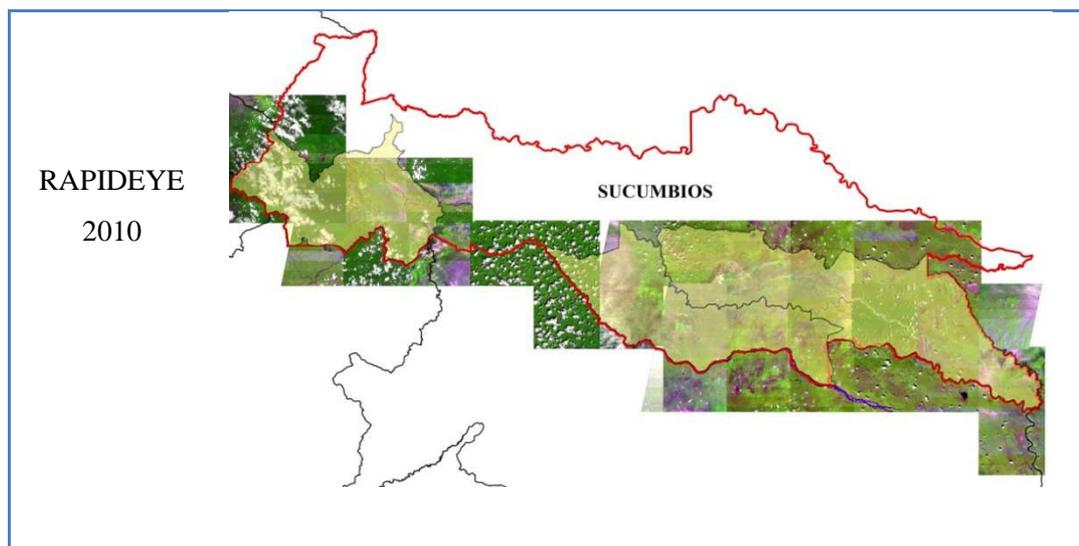


Figura 12. Detalle de imágenes satelitales en el área de estudio
Fuente: Elaborado por el autor

Para mayor detalle de las características de las imágenes satelitales ver en el Anexo1

3.4 CORRECCIÓN DE IMÁGENES

Los procedimientos de pre procesamiento permiten corregir problemas geométricos y espectrales de las imágenes generados por diversas fuentes tales como distorsiones originadas por la plataforma satelital, el sistema de registro de datos del sensor, la rotación terrestre y la influencia de la atmósfera (Chuvieco 2007). El pre procesamiento incluye correcciones radiométricas, geométricas y remoción de nubes.

Las imágenes Aster fueron adquiridas con un nivel de procesamiento L1B, el cual aplica coeficientes radiométricos y geométricos y proyecta la imagen en un mapa rotado, orientado a la trayectoria del satélite (Abrams et al. 2002). De forma similar, las imágenes Landsat fueron adquiridas en niveles de procesamiento L1G o L1T que incluyen correcciones radiométricas y geométricas sistemáticas. Para las imágenes Rapideye fueron adquiridas en un nivel 3A donde incluye ortorectificación y correcciones radiométricas.

3.4.1 Corrección Geométrica

El proceso de ortorectificación, aplicado ya sea sobre una fotografía aérea o sobre una imagen satelital, produce un archivo digital donde cada pixel representa una posición verdadera sobre el terreno. De forma similar, se aplica correcciones geométricas para referenciar una imagen no corregida a una corregida. Esto permite integrar y comparar la información temática de uso y cobertura del suelo derivado de distintas fechas para una misma área geográfica.

- **Ortorectificación para imágenes Landsat**

Para la ortorectificación para imágenes LANDSAT se realizará mediante la utilización del software ERDAS. Cuando se utilicen las imágenes para georeferenciar escenas LANDSAT, la imagen a utilizar como referencia deberá ser aquella que tenga mejor calidad espectral (ej. Menor cobertura de nubes o presencia de humedad atmosférica).

Lo que hacemos es abrir la imagen LANDSAT que se desea ortorectificar utilizando el menú *Viewer*. Dentro del visualizador seleccionar el menú *Data Preparation>ImageGeometricCorrection*, a continuación aparece una ventana denominada *Set GeometricModel*, la cual nos permite escoger el modelo geométrico a utilizar en la ortorectificación. Se debe seleccionar el modelo Landsat.

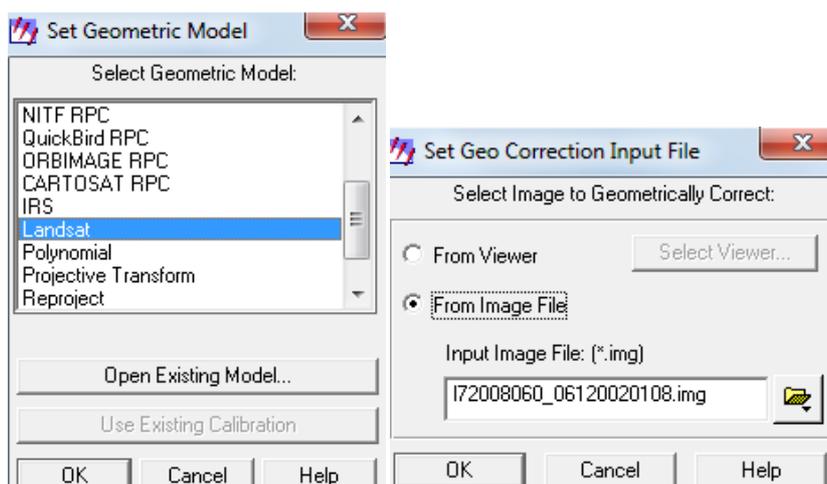


Figura 13. Selección del Modelo Geométrico.
Fuente. Elaborado por el autor

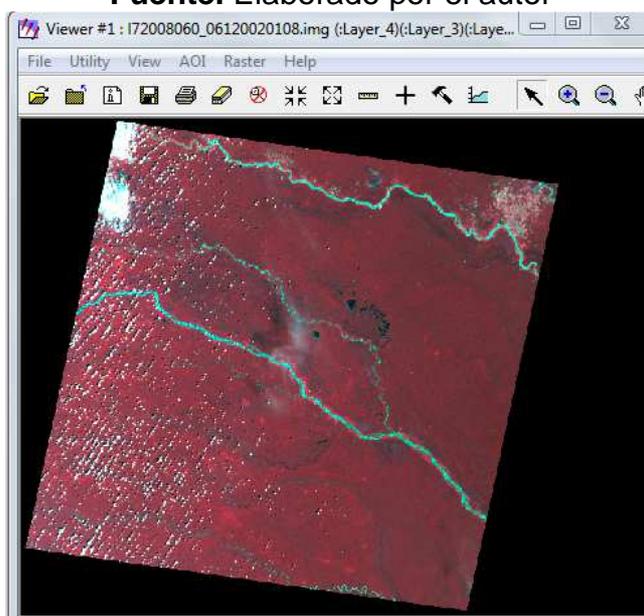


Figura 14. Imagen Landsat que se desea Ortorectificar.

Fuente. Elaborado por el autor

Una vez seleccionado el modelo geométrico aparecen dos ventanas, la ventana principal del proceso denominado *Geo Correction Tools*, y la ventana denominada *LandsatModelProperties*; esta última permite realizar el primer paso técnico del proceso de ortorectificación el cual consiste en definir los parámetros del modelo y la proyección cartográfica.

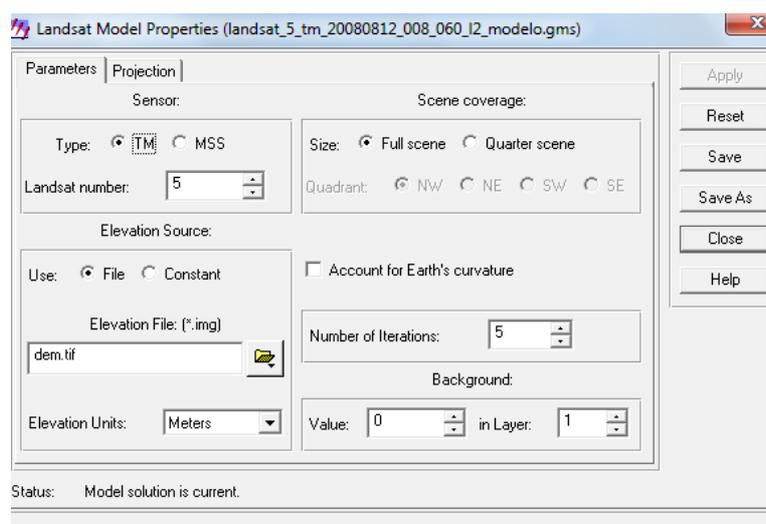


Figura 15. Definición de parámetros del Modelo Geométrico
Fuente. Elaborado por el autor

Los parámetros a ingresar son los mismos para ortorectificar una imagen en cualquier software a utilizarse, en las pestañas Parameters se explican a continuación:

- *Type*: Especificar si el sensor es MSS o TM. Esta información está incluida en los metadatos de la imagen satelital. Para imágenes provenientes del satélite LANSAT 7, se debe escoger la opción TM.
- *LandsatNumber*: Especificar el número del satélite. Esta información está incluida en los metadatos de la imagen satelital.
- *ElevationSource*: Seleccionamos la opción *File*, y especificamos el modelo digital de elevación. El archivo deberá ser del tipo SIGNED INTERGER 16 BIT⁷ y se denomina “*DEM.tif*”.
- *ElevationUnits*: Seleccionar las unidades de elevación del archivo de elevación. Seleccionar *Metros*.
- *SceneCoverge:fullScene*. Se recomienda ortorectificar la imagen completa sin ningún procesamiento previo.
- *AccountforEarth’sCurvature*: Este checkbox debe estar deseleccionado. Solamente se utilizará esta opción si a imagen a ortorectificar tiene un sistema de coordenadas geográficas definido.
- *Number of Iterations*: Se recomienda ingresar un valor mínimo de 20 iteraciones.
- *Background*: Se utilizará el *Value* por defecto (cero) en el Layer por defecto (1).

Dentro de la misma ventana “*LandsatModelProperties*” seleccionamos la pestaña *Projection*. Aquí presionamos el botón *Add/changeProjection* y definimos la proyección cartográfica que tendrá la imagen ortorectificada. La proyección aquí especificada debe ser idéntica a la proyección cartográfica asignada al Modelo Digital de Elevación *DEM*.

⁷Utilizar el modelo digital de elevación a 30 m de resolución generado por el Instituto Geográfico Militar sobre la base de la altimetría representada en cartas topográficas a escala 1:50.000

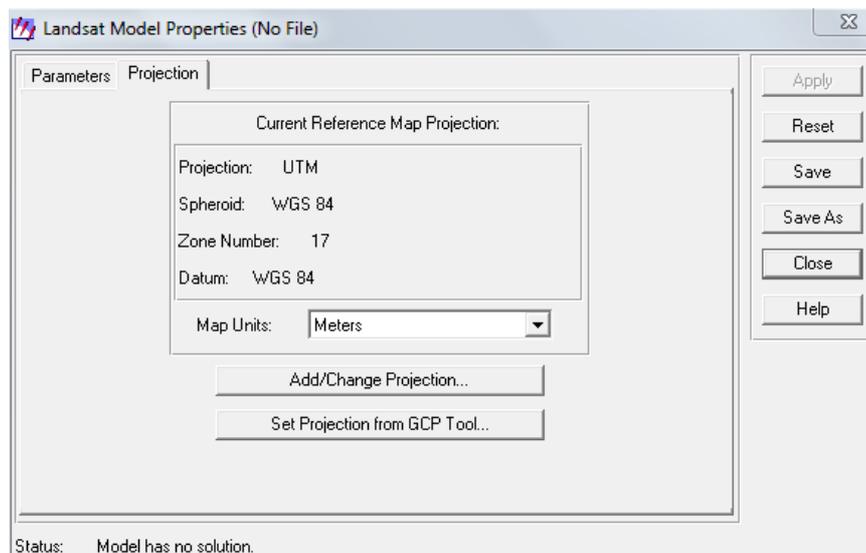


Figura 16. Definición de la proyección cartográfica.

Fuente. Elaborado por el autor

Una vez definidos los parámetros generales del modelo, procedemos a grabarlo como “codigoimagen_modelo.gms”

Luego de presionar el botón *close*, aparece la ventana *GCP Tool Reference Setup*, la cual nos permite escoger diversos métodos de creación de puntos de control.

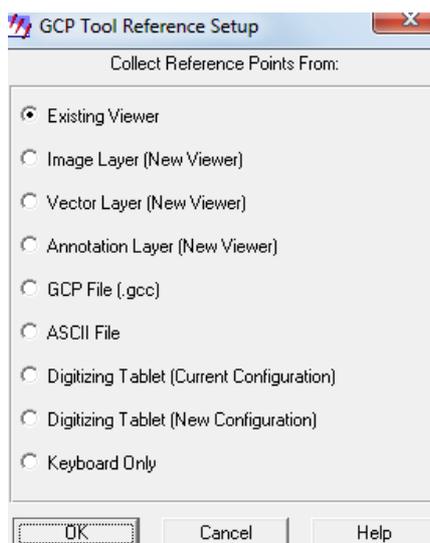


Figura 17. Selección del Método de Colección de puntos de control.

Fuente. Elaborado por el autor

A continuación se hará una breve descripción de los métodos que contiene:

- *ExistingViewer*: Seleccionar para extraer puntos de control de un visualizador activo, presionando con el ratón sobre dicho visualizador.
- *ImageLayer (New Viewer)*: Seleccionar para extraer puntos de control de un nuevo visualizador que contenga una imagen.
- *Vector Layer (New Viewer)*: Seleccionar para extraer puntos de control de un nuevo visualizador que contenga un archivo vectorial.
- *AnnotationLayer (New Viewer)*: Seleccionar para extraer puntos de control de un nuevo visualizador que contenga un archivo de anotaciones.
- *GCP File (.gcp)*: Seleccionar para definir los puntos de control a partir de un archivo GCC.
- *ASCII File*: Seleccionar para definir los puntos de control a partir de un archivo de texto.
- *Digitizing Tablet*: Seleccionar para definir los puntos de control a partir de una mesa o tableta digitalizadora.
- *KeyboardOnly*: Seleccionar para definir manualmente, a través del teclado.

Luego de haber seleccionado el método con que se va a trabajar, presionamos el botón *Ok*, aparecen algunas ventanas (el número de ventanas aparecen de acuerdo al método seleccionado), esto nos permite definir los puntos de control necesarios para la ortorectificación.

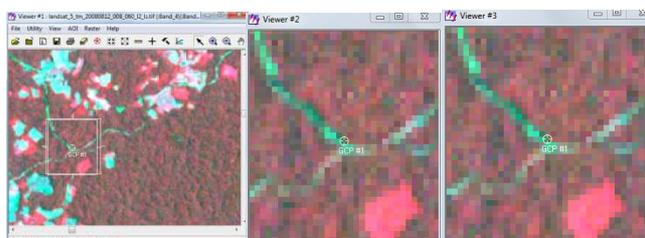


Figura 18. De acuerdo al método seleccionado aparecen varias ventanas para trabajar en la recolección de puntos de control.

Fuente. Elaborado por el autor

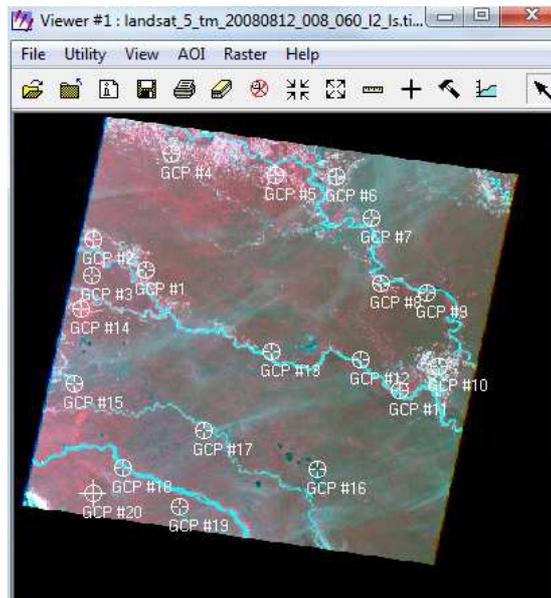


Figura 19. Ubicación de los puntos de control en la imagen a ortorectificar.

Fuente. Elaborado por el autor

Dependiendo de la opción seleccionada anteriormente, el proceso de puntos de control consiste en definir la ubicación de los puntos de control en la imagen a ortorectificar y asignar a estas coordenadas de imagen (X Input, Y Input) sus correspondientes coordenadas proyectadas (X Ref, Y Ref, Z Ref). Recordar que se debe ingresar las coordenadas X,Y,Z para cada uno de los puntos colectados.

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	Color	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	GCP #1		1062901.355	10032838.216		1062901.355	10032838.216	272.000	Control	-2.897	0.348	2.918	2.360	
2	GCP #2		1039166.362	10046742.146		1039166.362	10046742.146	244.000	Control	0.566	-0.193	0.598	0.484	
3	GCP #3		1038263.510	10030250.038		1038263.510	10030250.038	269.000	Control	-2.670	0.328	2.690	2.176	
4	GCP #4		1074929.390	10088608.729		1074929.390	10088608.729	225.000	Control	0.704	-0.325	0.776	0.627	
5	GCP #5		1122288.994	10078516.220		1122288.994	10078516.220	215.000	Control	0.498	-0.209	0.503	0.407	
6	GCP #6		1150658.630	10078476.093		1150658.630	10078476.093	225.000	Control	0.667	-0.204	0.697	0.564	
7	GCP #7		1166809.660	10057014.603		1166809.660	10057014.603	209.000	Control	0.406	-0.122	0.424	0.343	
8	GCP #8		1171183.480	10026277.487		1171183.480	10026277.487	221.000	Control	1.303	-0.223	1.322	1.069	
9	GCP #9		1132189.051	1002425.315		1132189.051	1002425.315	132.000	Control	0.129	-0.006	0.129	0.104	
10	GCP #10		1197426.396	9987896.092		1197426.396	9987896.092	195.000	Control	0.400	-0.083	0.408	0.330	
11	GCP #11		1179911.055	997242.557		1179911.055	997242.557	194.000	Control	-0.409	0.038	0.411	0.332	
12	GCP #12		1161512.925	9971186.615		1161512.925	9971186.615	198.000	Control	-0.524	0.059	0.527	0.426	
13	GCP #13		1120543.479	9995098.976		1120543.479	9995098.976	226.000	Control	-0.266	0.036	0.268	0.217	
14	GCP #14		1033528.549	10015982.114		1033528.549	10015982.114	242.000	Control	0.936	-0.074	0.911	0.413	
15	GCP #15		1030229.280	9980292.193		1030229.280	9980292.193	233.000	Control	1.073	-0.041	1.073	0.868	
16	GCP #16		1141890.294	9940486.424		1141890.294	9940486.424	187.000	Control	-1.605	0.257	1.626	1.316	
17	GCP #17		1089966.870	9958463.223		1089966.870	9958463.223	209.000	Control	-0.215	0.114	0.243	0.197	
18	GCP #18		1052729.215	9941108.389		1052729.215	9941108.389	220.000	Control	0.372	0.128	0.393	0.318	
19	GCP #19		1078530.737	9923091.463		1078530.737	9923091.463	205.000	Control	-0.249	0.197	0.318	0.257	
20	GCP #20		1038704.904	9928949.973		1038704.904	9928949.973	232.000	Control	2.474	-0.114	2.477	2.003	
21	GCP #21		>	>		>	>	>	Control					

Figura 20. Matriz de Punto de Referencia y control.

Fuente. Elaborado por el autor

Utilizando los botones   se puede actualizar el valor de elevación (Z) en los puntos de control.

Una vez seleccionado como un mínimo de 20 puntos representativos de los cambios topográficos existentes y homogéneamente distribuidos sobre la imagen, presionamos el botón Σ para proceder con el cálculo de la solución del modelo, el error no debe sobrepasar el valor de un pixel. Una vez que los puntos han sido colectados y el error está dentro de un valor razonable, procedemos a grabar los puntos de control y el modelo, tanto los puntos *input* como los de *referencia*.

Se los grabará con los siguientes nombres: “*codigoimagen_input.gcc*” y “*codigoimagen_referencia.gcc*”.

Terminado estos pasos procedemos a ortorectificar la imagen satelital presionando el ícono denominado *DisplayResampleImageDialog* .

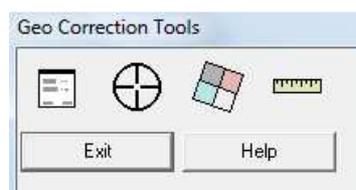


Figura 21. Ventana principal del proceso de ortorectificación
Fuente. Elaborado por el autor

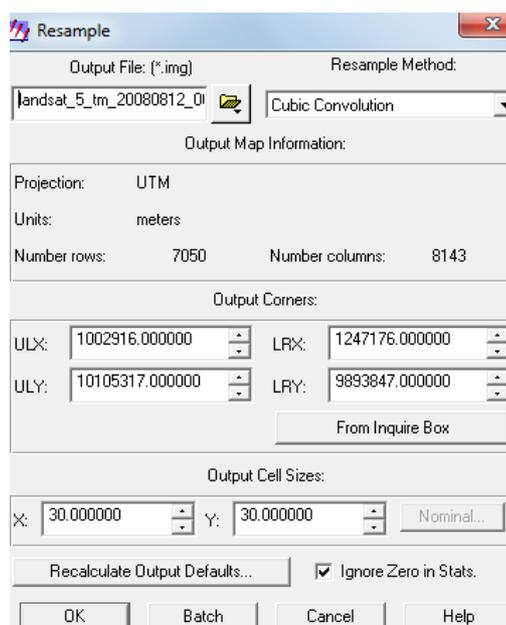


Figura 22. Parámetros de ortorectificación.
Fuente. Elaborado por el autor

En la ventana *Resample* permite ingresar el nombre que tendrá la imagen ortorectificada “*codigoimagne_orto*”, el tamaño del pixel y el método de *resampling*, se recomienda dejar tal como se presenta en la imagen.

- **Ortorectificación para imágenes Aster**

Para ortorectificar imágenes ASTER que no tiene los metadatos completos, específicamente los coeficientes poligonales denominados Pct. Para georeferenciar las imágenes ASTER se utilizará como referencia la imagen LANDSAT ortorectificada de mejor calidad espectral.

Antes de ingresar a ENVI lo primero q debemos realizar es, Layerstack o archivo multibanda a partir de bandas individuales a las imágenes ASTER, excepto las 5ta banda del infrarrojo térmico y la banda 3B q tiene una visión hacia atrás que escanea en la región espectral.

Seleccionamos el menú *Map>BuilRPCs*

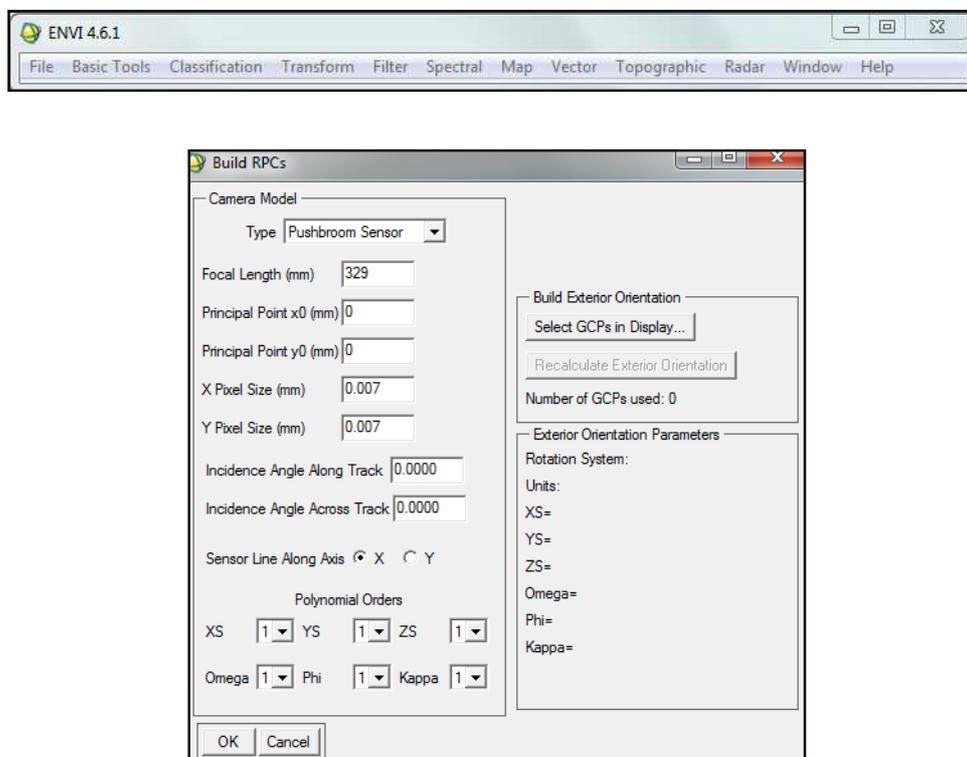


Figura 23. Construcción de la orientación exterior
Fuente. Elaborado por el autor

En la ventana BuildRPCs debemos llenar los parámetros para imágenes ASTER, una vez ingresados debemos presionar el botón **Select GCPs in Display...**, aquí debemos especificar la proyección cartográfica adecuada e ingresar cada uno de los puntos de control con sus coordenadas X,Y,Z. En la parte inferior de esta ventana podremos ver el error medio cuadrático (RMS) y podemos desplegar la lista de puntos colectados. El valor RMS no deberá exceder el tamaño de un pixel.

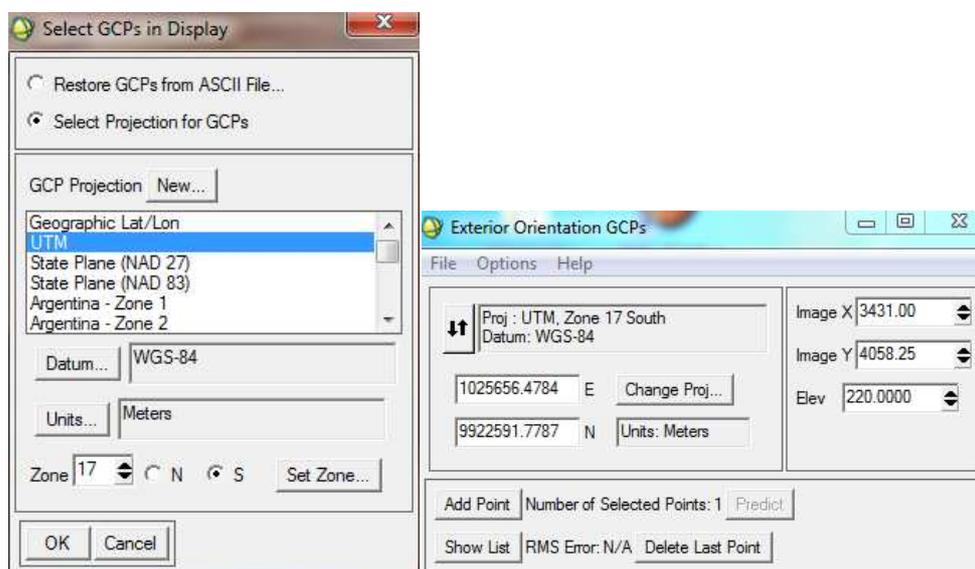


Figura 24. Proyección cartográfica e ingreso de puntos de control para calcular la orientación exterior.

Fuente. Elaborado por el autor

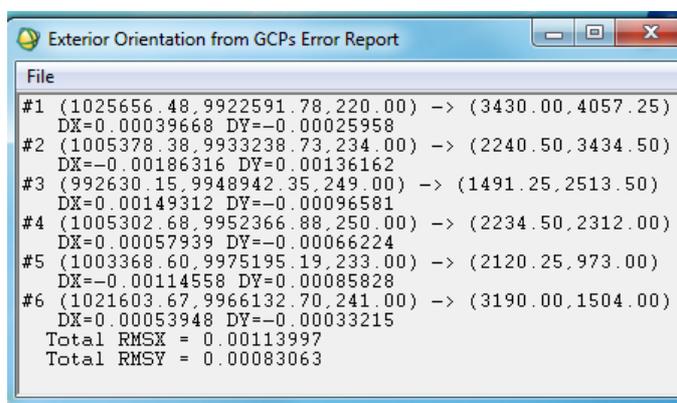


Figura 25. Reporte de errores de la orientación exterior

Fuente. Elaborado por el autor

Una vez definidos los GCPs grabarlos seleccionando el menú *File>SaveGCPs w/mapcoords...* El nombre q tendrá este archivo será “*codigoimagen_rpc.pts*”

Luego se escogió el menú *Options>ExportGCPstoBuild Repts Widget*, aparece una ventana denominada *Exterior OrientationfromGCPs Error Report*, donde podemos ver el error de cada uno de los GCPs colectados así como el error total en la dirección X e Y, grabamos este reporte con el nombre “*codigoimagen_error_rpc.txt*”

Luego volvemos a la ventana denominada build Repts, donde se deberá constatar que los parámetros de la orientación exterior han sido calculados correctamente.

Una vez creados los Repts para la imagen satelital, visualizar la imagen seleccionando el menú *file> Open Image File*.

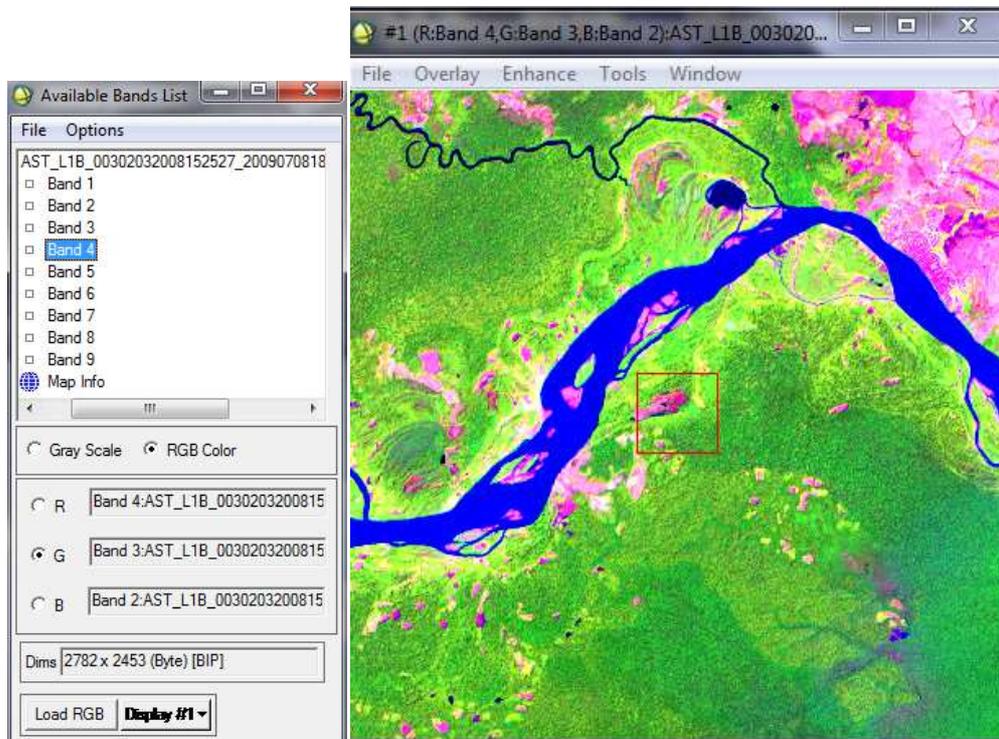


Figura 26. Ventana para definir la visualización de las imágenes con una combinación RGB.

Fuente. Elaborado por el autor

Seleccionar el menú *Map>Orthorectification>Generic RPC and RSM>Orthorectify using RPC or RSM with Ground Control*. A continuación aparece la ventana para seleccionar puntos de control (GCP). Como se está utilizando imágenes de la región amazónica seleccionar un mínimo de 20 puntos por imagen. Se debe ingresar coordenadas X,Y,Z. Grabar el archivo de puntos de control con el nombre “*codigoimagen_gcp.pts*”.

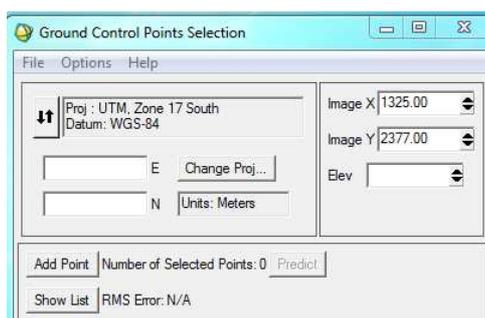


Figura 27. Ventana para coleccionar puntos de control para ortorectificar la imagen ASTER.
Fuente. Elaborado por el autor

En la ventana *OrthorectificationParameters* ingresar los siguientes parámetros:

Image Resampling:	Cubic Convolution
Background:	0
Input Height:	DEM
Select DEM File:	\\DEM\dem.tif ⁸
DEM Resampling:	Cubic Convolution
Geoid Offset:	0
Output Result:	“\\ codigoimagen_orto.tif”
Output Projection:	UTM WGS84 Z17S
X Pixel Size:	30
Y Pixel Size:	30
Output X Size:	Dejar valores por defecto
Output Y Size:	Dejar valores por defecto

⁸ Utilizar el modelo digital de elevación SRTM a 90m de resolución generado por la NASA

- **Reproyección de imágenes Rapideye**

Para la imágenes de Rapideye lo q se realizó fue una reproyección ya que su sistema de referencia se encontraba en la zona 18S, para ello ingresamos a ERDAS

- *Ingresamos a Menú>Interpreter>Utilities>ReprojectImages*

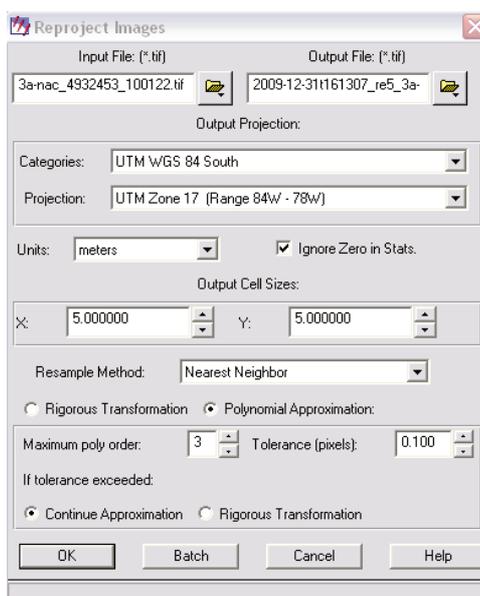


Figura 28.Reproyectar la imagen.

Fuente. Elaborado por el autor

3.4.2 Corrección Radiométrica

Las correcciones radiométricas permiten compensar el efecto de factores ambientales (ej. Factores atmosféricos) para obtener variables físicas tales como la reflectividad. Es esencial trabajar con magnitudes biofísicas especialmente si existen imágenes de distintos años y de diferentes sensores si se pretende realizar detección de cambios. Los ND de las imágenes se encuentran con valores relativos, por lo cual se complicaría comparar bandas entre si “*Un mayor ND entre dos bandas, no indica necesariamente mayor reflectividad*” (Emilio Chuvieco,2002).

Si se trabaja con reflectividad, variable biofísica, se establecerían parámetros homogenizados entre las imágenes, por lo cual nos permite realizar un análisis multitemporal garantizado que no existe errores de omisión y comisión. Existen varios modelos para la transformación a valores de reflectividad que se basan en los datos de calibración de las imágenes satelitales.

En esta metodología se realizará las correcciones radiométricas utilizando datos sacados del artículo científico “*Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local*” (O. Padilla, 2005), para imágenes Landsat y Aster. Para las imágenes de Rapideye no se realizarán correcciones radiométricas ya que tienen un nivel de procesamiento 3A que incluyen correcciones geométricas y radiométricas. Los datos obtenidos a partir de los metadatos incluidos para imágenes Landsat y Aster son los siguientes:

- Fecha de adquisición
- Hora
- Azimut Solar
- Elevación Solar

Calibración:

Tabla 3.1. Tabla de Datos de calibración para imágenes Landsat.

Banda	E0	a0(W/m ² mm)	a1	Tk
B1	1957	-6.200	1.176	0.70
B2	1829	-6.400	1.205	0.78
B3	1557	-5.000	0.938	0.85
B4	1047	-5.100	0.965	0.91
B5	219.3	-1.000	0.191	1.00
B7	74.52	-0.350	0.066	1.00

Fuente: Cartografía de áreas Quemada a Escala Local, Ing. O. Padilla 2005.

Tabla 3.2. Tabla de Datos de calibración para imágenes Aster.

Banda	E0	a0 (W/m ² mm)	a1	Tk
B1	1846	-0.676000	0.676000	0.78
B2	1555	-0.708000	0.708000	0.85
B3N	1120	-0.862000	0.862000	0.91
B3B	1120	-0.862000	0.862000	0.91
B4	231	-0.217400	0.217400	1,00
B5	79.0	-0.069600	0.069600	1,00
B6	74.4	-0.062500	0.062500	1,00
B7	70.5	-0.059700	0.059700	1,00
B8	59.6	-0.041700	0.041700	1,00
B9	56.3	-0.031800	0.031800	1,00
B10	10	-0.006882	0.006882	1,00
B11	10	-0.066780	0.066780	1,00
B12	10	-0.006590	0.006590	1,00
B13	10	-0.005693	0.005693	1,00

Fuente: Cartografía de áreas Quemada a Escala Local, Ing. O.Padilla 2005.

Ya adquirida la información que se necesita de cada imagen que se va utilizar, vamos al software *PCI Geomatica*, abrimos la imagen que se encuentra en formato *tiff*, lo que se debe hacer es cambiar de *tiff* a *pix* para que pueda ser tratada y corregida. En *file* encontramos la imagen que se abrió con anterioridad hacer clic derecho en la carpeta de la imagen y escoger *Translate (Export)*. En *Source file* ingresar la imagen a ser corregida, en *Destination file* se pone el nombre de salida que corresponde a la imagen a procesar, (*Ejm. ast_11b_0032008152527_20090708182511_14133_clip.pix*).

En *Output Format* se seleccionará el formato *Pix:PCIDSK* y por último se escogerá las bandas correspondientes a cada sensor en este caso si es ASTER serán 9 bandas o LANDSAT con 6 bandas y se exporta.

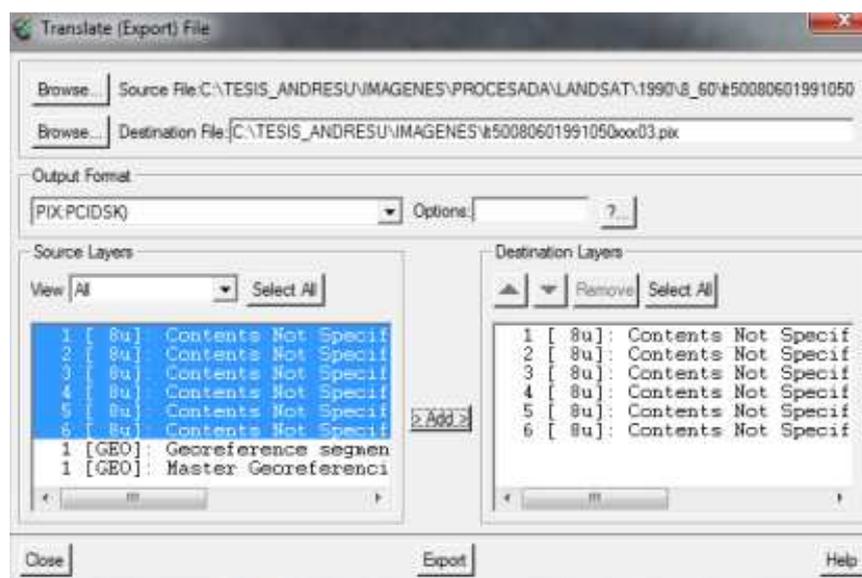


Figura 29. Cambio de Formato en PCI de Tiff a Pix
Fuente. Elaborado por el autor

Al pasar la imagen a formato *pix* añadimos canales vacíos de *32 bits*, para LANDSAT se añade 6 canales vacíos y para ASTER 9 canales.

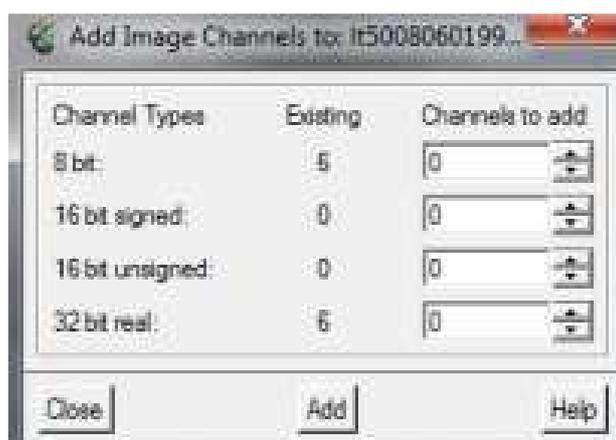


Figura 30. Ventana para añadir canales vacíos a una imagen.
Fuente. Elaborado por el autor

A partir de esto se corre el modelo *Tools > EASI Modeling*, la cual utiliza el método simplificado de Chávez en 1975 y ha ido mejorando en el transcurso

de los años. Consiste en asumir valores de radiancia espectral próximos a cero a las áreas que presentan fuerte absortividad como el agua, áreas con sombra. Para obtener dicha aproximación se debe restar los ND con el ND mínimo de cada banda de la imagen, pero los errores pueden ser considerables para valores de reflectividad altos al no tomar en cuenta las transmisividades del flujo incidente y reflejado. Para evitar este problema, chavéssuguiere estimar la transmisividad descendente a partir del espesor atmosférico definido por el ángulo cenital (θ_i) y además no considerar la irradiancia difusa para observaciones verticales.

Finalmente utilizamos valores de transmisividad estándar (T_{ki}), cuya fórmula de reflectividad es:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,K} - L_{a,K})}{E_{0,k} \cos \theta_i T_{k,i}}$$

Ecuación 6. Cálculo de reflectivida Fuente.Chavez, 1996

Donde,

$L_{a,K}$ Valores de radiancia espectral determinada por el nivel digital mínimo

$L_{sen,K}$ Valores de radiancia espectral detectada por el sensor

D Es un factor que tiene en cuenta la variación de la distancia Tierra-Sol, y se calcula a partir del día juliano

$$D = (1 + 0.01674 (\sin(2\pi(j - 93.5)/365)))^2$$

j = día juliano

Para la aplicación de esta metodología se realizó a través del *PCI> EASI Modeling*.

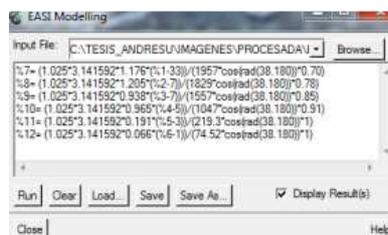


Figura 31. Ventana donde se ingresan las ecuaciones para cada banda

Fuente. Elaborado por el autor

Ya ingresadas las ecuaciones para cada banda, se corre el modelo desplegando en los canales vacíos las bandas ya corregidas.

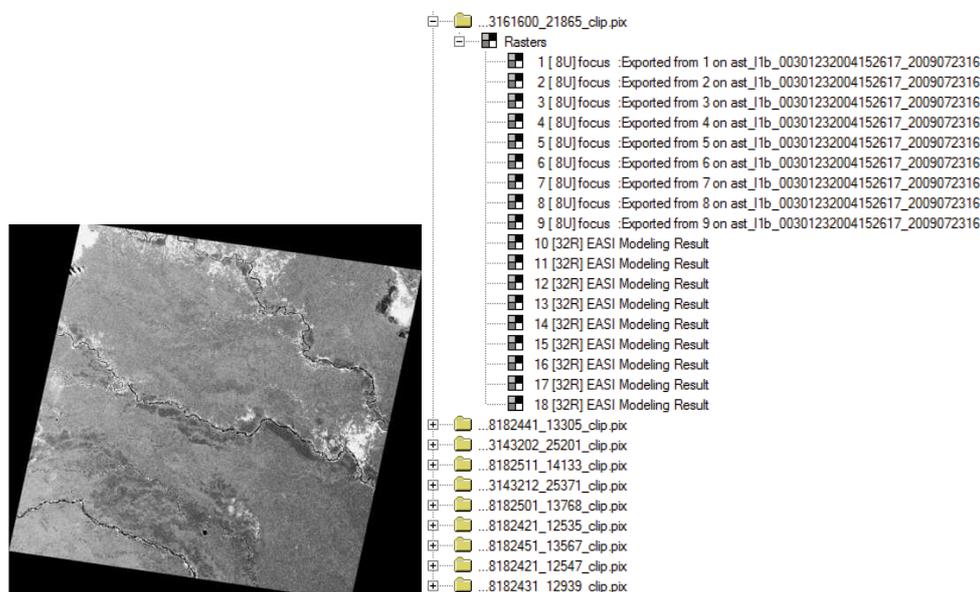


Figura 32. Aplicación de la Metodología utilizando el método simplificado de Chávez.

Fuente. Elaborado por el autor

3.5 DEFINICIÓN DE LA ESCALA GENERAL DEL ESTUDIO

Uno de los factores importantes para el desarrollo de un proyecto es definir la escala de trabajo, los aspectos considerados son: unidad mínima de mapeo, resolución espacial de cada imagen satelital y área de estudio. A partir de estas características se definió que la escala de trabajo para este estudio es de 1: 100000 ya q es la más conveniente para su desarrollo e interpretación.

Tabla 3.3. Unidad Mínima de Mapeo

Nivel de Detalle	Escala de trabajo	UMM	Alcance
Subregional	1:100000	1 ha	Mapeo de Cobertura y uso del suelo

Fuente. Ministerio del Ambiente-SocioBosque

3.6 LEYENDA TEMÁTICA

La presente propuesta de leyenda tiene como objetivo principal permitir caracterizar trayectorias de conversión de la cobertura boscosa a nivel nacional utilizando sensores remotos. La leyenda ha sido construida de forma jerárquica, con un primer nivel general que corresponde a las clases de uso y cobertura del suelo definido por el Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC). Los niveles subsiguientes representan clases de uso/cobertura más detalladas, que mantienen coherencia con las definiciones de la clase superior.

A continuación se presentan las clases de uso y cobertura del suelo, organizadas en tres niveles jerárquicos:

Tabla 3.4. Leyenda Temática

CÓDIGO NIVEL I	NIVEL I (IPCC)	CÓDIGO NIVEL II	NIVEL II
1	Bosque	8	Bosque Nativo
2	Áreas Agropecuarias	11	Cultivos Anuales
		12	Cultivos Semipermanentes
		13	Cultivos Permanentes
		14	Pasto Cultivado
		15	Mosaico Agropecuario
3	Vegetación Arbustiva y Herbácea	16	Vegetación Arbustiva
		17	Vegetación Herbácea
		18	Páramos
4	Cuerpos de Agua	19	Natural
		20	Artificial
5	Zonas Antrópicas	21	Zonas Pobladas
		22	Infraestructura
6	Otras Áreas	23	Glaciares
		24	Áreas sin cobertura vegetal
7	Plantación Forestal		

Fuente. Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC)

Las definiciones para el Nivel 1 y Nivel 2 siguen los lineamientos del IPCC (2006) que se encuentran en Anexo 2.

3.7 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

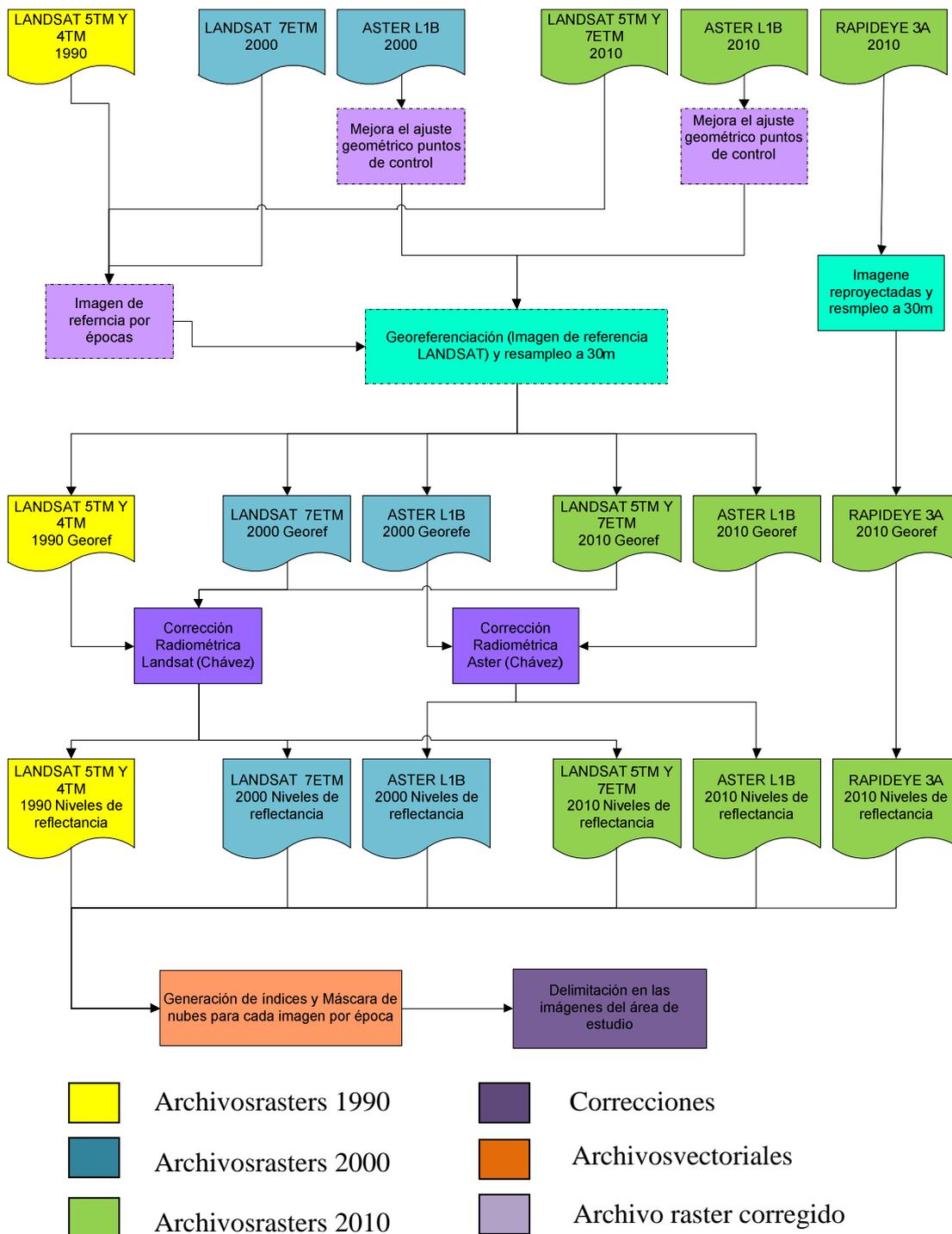


Diagrama 2. Tratamiento Digital de las Imágenes
Fuente. Elaborado por el autor

3.8 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.

Los procesos de clasificación de las imágenes combinan varios métodos a fin de obtener dentro del menor tiempo y con la utilización mínima de recursos, resultados confiables sobre el fenómeno espacial. De acuerdo a la metodología planteada por el Ministerio del Ambiente para generar mapas de cobertura vegetal está compuesto por cuatro procesos principales.

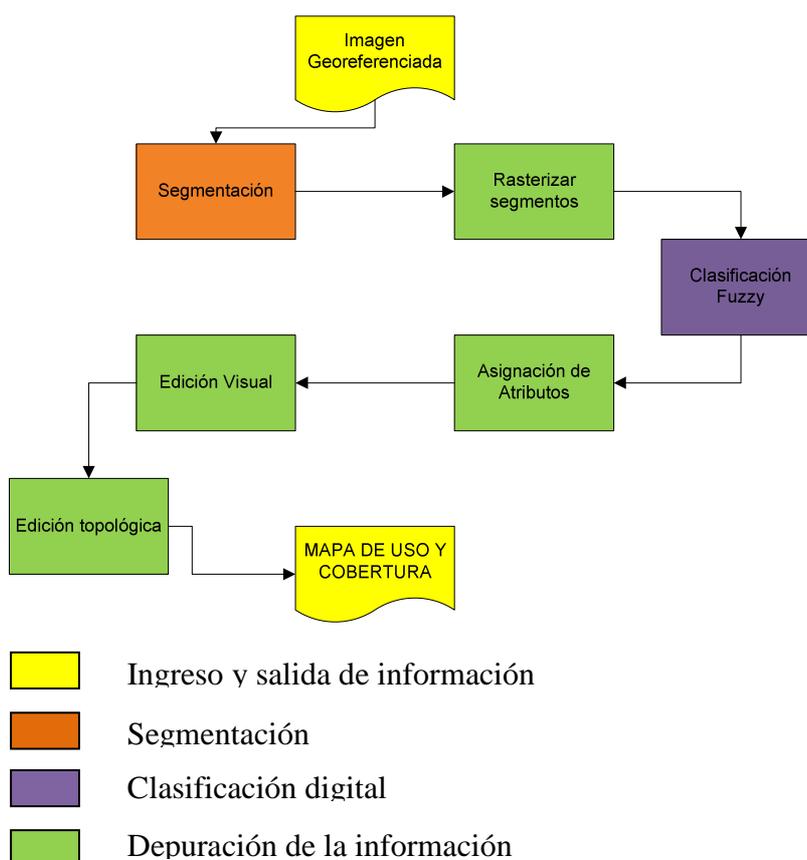


Diagrama 3. Proceso para la clasificación de imágenes satelitales.
Fuente. Elaborado por el autor

3.8.1 Segmentación

Los métodos tradicionales de clasificación de imágenes satelitales analizan y procesan las imágenes utilizando el píxel como unidad de análisis. El proceso de segmentación identifica conjuntos de píxeles que definen áreas geográficas homogéneas que representan algún tipo de unidad espacial. Cada uno de estos objetos geográficos es conocido como un segmento, el cual está compuesto

de un conjunto de píxeles relativamente homogéneos, ya sea en sus características espectrales, espaciales y de textura.

Los procedimientos relacionados con la segmentación se describen a continuación:

Se inicia el proceso de extracción de elementos, se ingresa al menú *Processing>featureExtraction*, el siguiente paso es seleccionar la imagen satelital ortorectificada, corregida que se utilizará en el proceso de segmentación.

Presionando el botón *Open File*, se procede a seleccionar la imagen satelital que será de base, en *MaskFile*, los archivos de máscaras son rasters binarios, de 1 bit, con la misma extensión espacial que la imagen base y se denominan *codigoimagen_mask.tif*



Figura 33. Proceso de segmentación
Fuente. Elaborado por el autor

La primera tarea es segmentar la imagen. El parámetro requerido es la escala. Mientras más alto es el valor, más generalizados son los segmentos generados. Aquí se debe definir un valor que permita delinear o mantener las zonas geográficas más pequeñas a ser representadas. Para evaluar qué valor utilizar, se debe activar el *Preview* dentro de la ventana de segmentación y verificar visualmente las zonas de la imagen y sus segmentos. Se recomienda utilizar valores entre 20 y 50. Una regla general es identificar elementos del

paisaje que sean importantes de discriminar⁹. Un valor óptimo es el mayor valor de escala que permite delinear esos elementos. Una vez definida la escala presionar el botón *Next*

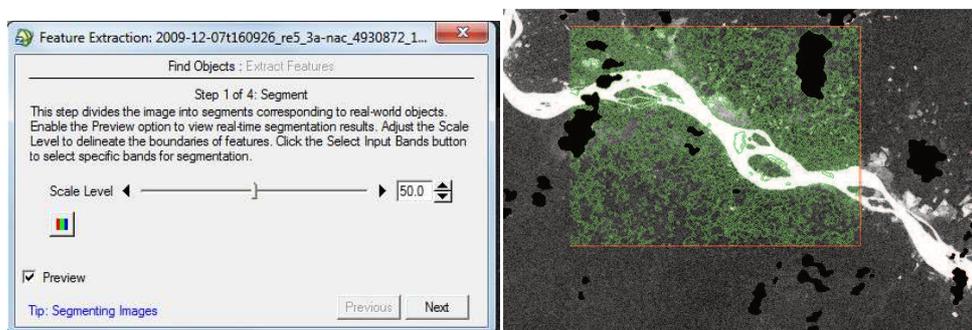


Figura 34. Definir el parámetro de la escala
Fuente. Elaborado por el autor

El proceso *merge* sirve para eliminar los segmentos más pequeños de la imagen, uniéndolos a sus vecinos de mayor tamaño. Se utiliza este proceso cuando existen demasiados segmentos generados en el proceso anterior. Mientras más grande es el valor de *merge*, más eliminación ocurre. De igual manera que en el proceso anterior, se debe utilizar la ventana de *preview* para verificar que el valor sea el adecuado. Se recomienda utilizar valores entre 60 y 80.

⁹Por ejemplo, en áreas intervenidas con zonas sin cobertura vegetal su nivel espectral es muy similar por lo que hay que ayudarse de los shapefile de zonas pobladas de vías e infraestructura.

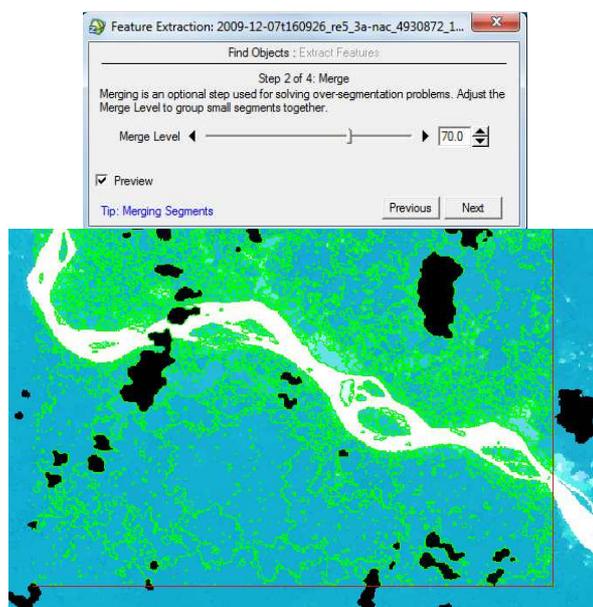


Figura 35. Eliminación de los segmentos más pequeños
Fuente. Elaborado por el autor

El proceso *refine* es opcional y no se utilizará debido a que este proceso se lo utiliza para extraer elementos ubicados en los extremos del histograma de respuesta espectral de la imagen. Por ejemplo, nubes y cuerpos de agua, tienen valores muy altos y muy bajos de reflectancia, respectivamente.

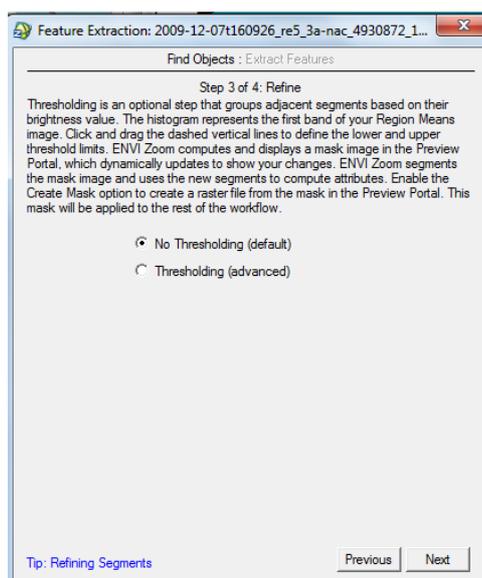


Figura 36. Parámetro opcional no utilizado en el proceso de segmentación
Fuente. Elaborado por el autor

A continuación se realiza el cálculo de atributos espaciales y espectrales. Se deben activar únicamente las casillas *Spatial*, *Spectral* y *Texture* similar a lo que muestra la siguiente figura.

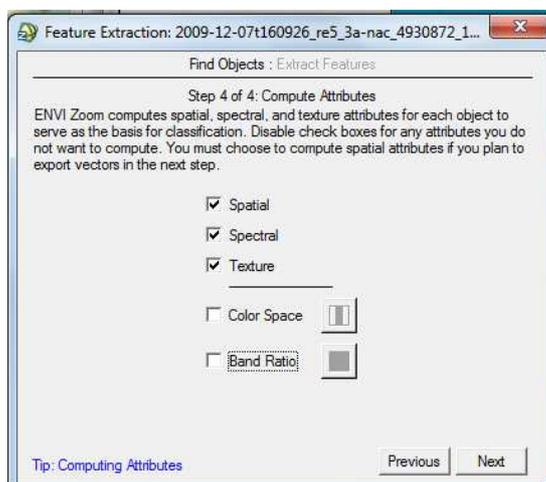


Figura 37. Calculo de atributos espaciales y espectrales de los segmentos

Fuente. Elaborado por el autor

Una vez terminada la fase de segmentación, se exportan los segmentos a un archivo *shapefile* seleccionando la opción *exportvectors*. Siempre se deberá activar la opción *exportattributes*. El producto final del proceso de segmentación es un archivo en formato vector que contiene los segmentos de la imagen satelital.

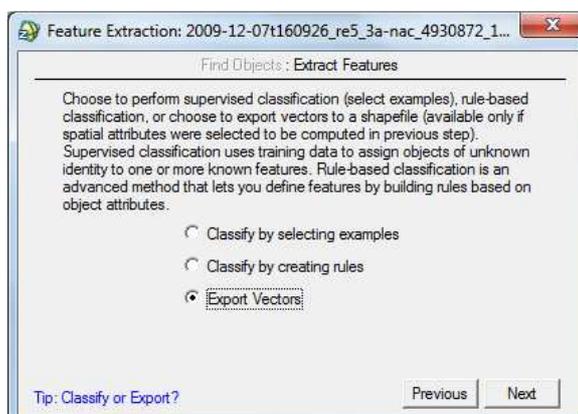


Figura 38. Exportación de los segmentos a un archivo vectorial

Fuente. Elaborado por el autor

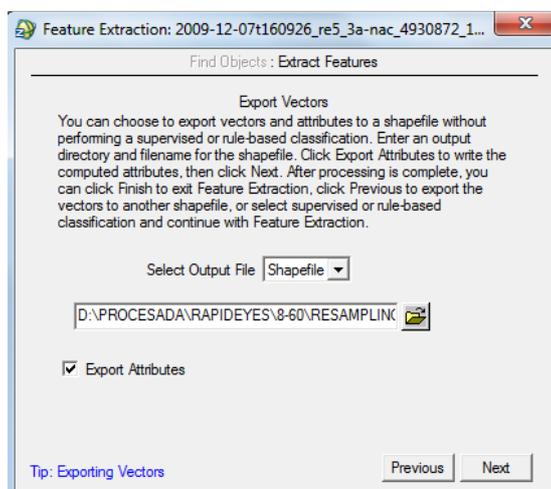


Figura 39. Definición del nombre del archivo vectorial
Fuente. Elaborado por el autor

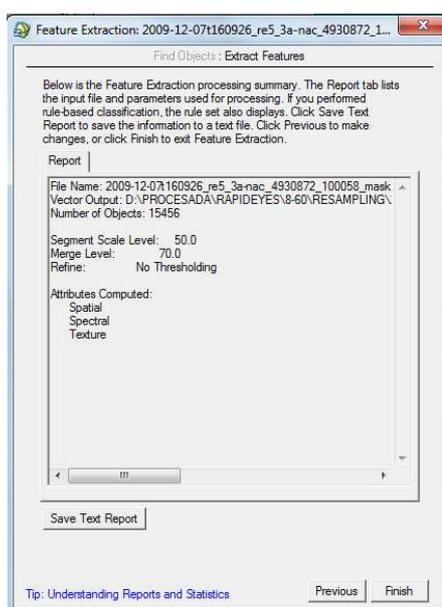


Figura 40. Reporte de la segmentación con los parámetros utilizados
Fuente. Elaborado por el autor

Al terminar el proceso de segmentación se obtiene un archivo en formato vectorial, el cual se debe proceder unir polígonos que son menores a 1 ha a un polígono más grande que se encuentre a su lado ya que son muy pequeños para ser interpretados, por lo que utilizamos la herramienta *eliminate* y con el área calculado procedemos a seleccionar los de menor área.

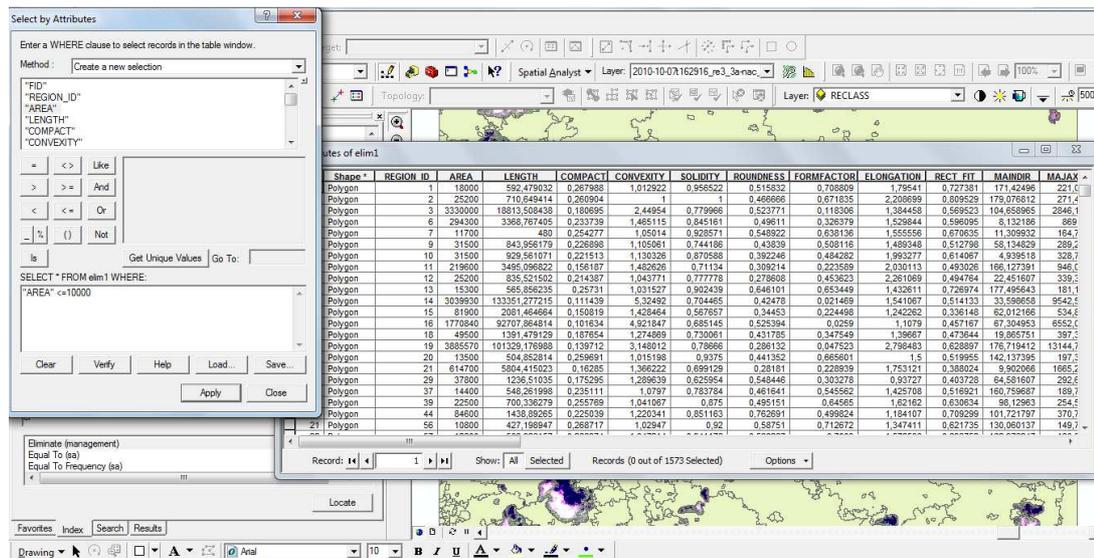


Figura 41. Selección de áreas menores a 1 ha
Fuente. Elaborado por el autor

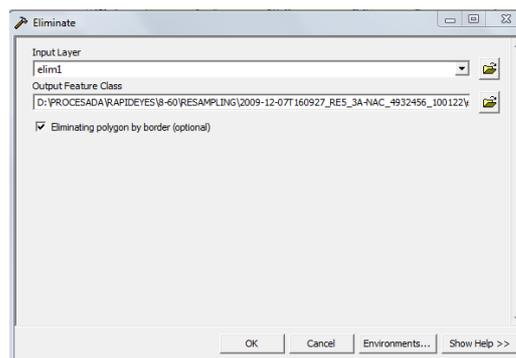


Figura 42. Proceso eliminate
Fuente. Elaborado por el autor

3.8.2 Rasterización de Segmentos

El proceso de rasterización permite obtener una imagen multibanda de los segmentos obtenidos en el proceso de segmentación, el valor asignado a cada segmento es el promedio de los valores espectrales de los píxeles que lo conforman. Se tendrá igual número de bandas que la imagen original; 6 bandas en imágenes Landsat, 9 bandas en imágenes Aster y 5 bandas en imágenes Rapideye, éstas se utilizarán para la clasificación fuzzy.

Para rasterizar se ingresa en el ArcGis,y se trabaja con la cobertura de segmentación generada utilizando la extensión del spatialanalyst, se escoge convertfeaturestoraster como se muestra en la imagen.

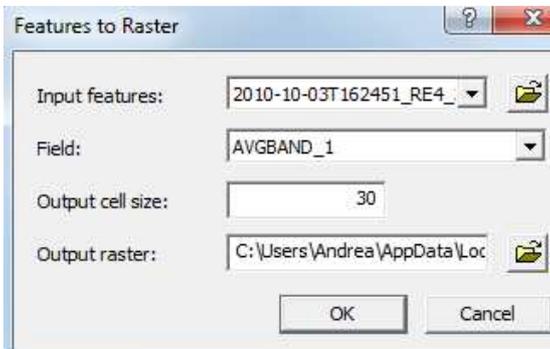


Figura 43. ConvertFeaturestoRaster Fuente. Elaborado por el autor

Se tiene que generar 6 bandas raster para imágenesLandsat, 9 bandas raster para imágenes Aster y 5 bandas raster para imágenes Rapidey, concluido el proceso de rasterización lo que se hace es un layerstack y como resultado obtenemos una imagen rasterizada.

MIRRANO_1	MIRRANO_2	MIRRANO_3	MIRRANO_4	MIRRANO_5	MIRRANO_6	MIRRANO_7	MIRRANO_8	MIRRANO_9	MIRRANO_10	MIRRANO_11	MIRRANO_12	MIRRANO_13	MIRRANO_14	MIRRANO_15	MIRRANO_16	MIRRANO_17	MIRRANO_18	MIRRANO_19	MIRRANO_20
4891	7994	5579.610581	229.64544	3687	7722	4723.485116	426.907978	1688	6237	2477.268027	443.690727	2637	6320	4229.67552	445.694304				
5651	6957	6243.898413	275.619691	4432	6516	5587.825397	393.582078	2509	5702	3953	619.994043	3696	5748	4004.428571	442.208231				
5093	6862	5557.895196	176.450307	3096	6759	6744.295481	324.1298	1900	4903	2467.981911	317.810627	3131	5976	4206.952514	378.571193				
4994	8699	5665.642033	260.919677	3539	7890	4836.845014	464.004864	1733	6101	2608.482338	515.519036	2779	7112	4337.235428	462.055914				
5513	5801	5623.307892	86.334026	4375	5640	5025.934662	292.943571	2320	2962	2504.284815	101.842639	4061	5316	4891.768231	346.946537				
5550	7374	6405.671429	476.534844	4566	6066	6074.136765	641.936765	2408	6715	6842.671429	664.505267	3796	6674	4706.714298	545.951223				
6043	6731	6327.375	175.171919	5297	6401	5973.166667	280.403229	3381	4740	4811.208333	367.264267	4473	5680	5191.041687	281.675385				
5435	6965	5972.863763	292.800941	4537	6465	5599.453003	498.606463	2244	4421	3222.731396	559.379688	4183	5860	5113.630082	443.768891				
5624	6348	5831.871795	185.733381	4966	6010	5279.205129	226.417893	2391	4267	2811.282051	300.366244	4603	5459	5013.153846	487.523828				
5576	6788	6187.15	285.007922	4687	6239	5486.975	356.852922	2538	4634	3593.675	552.148588	4111	5339	4845.326	312.969023				
5650	7404	6447.244262	393.346689	4624	6309	5844.229508	421.471339	2465	5194	4824.271462	723.524391	3794	5491	4816.983801	372.429208				
5362	13055	6036.241811	524.435502	4115	12316	5489.579418	588.91908	1994	12377	3288.858823	727.091702	3310	10067	4911.223714	480.805445				
5541	6174	5749.85014	141.004184	4953	5774	5196.953008	330.275927	2339	3535	2713.44186	259.636832	3869	5572	4886.910233	425.165144				
5603	6644	6129	224.464897	4236	6095	6226.192308	309.601726	2369	3595	496.959529	3768	5516	4994.038462	374.412321					
5123	7274	5856.499249	245.689104	3633	7123	4731.045568	424.65429	1819	5810	2967.842514	460.451033	2729	6299	4226.396294	465.969605				
5363	6588	6174.493659	214.917061	4295	6118	6133.016529	389.356204	2018	4694	2741.119308	462.626707	3662	5627	4714.520826	440.281308				
5347	6677	6229.344156	280.825699	3830	6237	6159.935065	460.270728	2039	4871	3181.827922	583.93829	2896	5670	4581.528221	486.354339				
5305	7012	6175.119583	282.152687	3953	6981	4974.999799	453.470053	1965	7244	2636.924623	666.002071	3057	6762	4563.386834	481.129518				
5390	6504	5886.339893	275.138311	4307	6096	5207.40978	426.462298	2045	4571	3281.644689	551.444303	3090	5456	4589.271186	503.154298				
5145	10185	5880.127875	255.731437	3589	9446	4791.612248	440.682109	1824	7701	2845.923596	523.134107	2564	6388	4310.50299	475.591394				
5208	5828	5528.610294	112.244785	4115	5183	4878.854412	214.986241	2916	3997	2328.625	146.514002	3229	5305	4226.784708	290.598837				
5089	6613	5521.508846	157.329919	3659	6176	4490.350075	304.503542	1608	6237	2370.305689	277.737768	2571	5801	3971.315845	401.228229				
5236	6686	5963.224138	284.672186	4045	6413	4859.962044	456.031423	2026	6195	2696.137931	614.084768	3401	6435	4492.824713	454.194617				
5035	11162	5533.846324	208.844881	3640	11377	6193.216316	382.216938	1940	6775	2435.895939	381.954928	2723	6074	4694.733905	403.929526				
5384	6380	5860.876191	247.200688	3915	6200	6241.809524	449.131478	2165	4279	3170.047619	459.210525	3447	5885	4654.214288	466.650574				
5283	6113	5572.734586	152.57319	3888	5566	4852.087719	300.218885	2141	4950	2511	301.548089	3274	4663	3926.716296	396.819846				
5465	5818	5837.069687	378.630013	4398	6709	6777.866667	1296.62147	2331	7371	3791.666667	639.681174	4046	6870	4906.268667	791.745174				
5381	7306	5820.260887	487.923283	4045	7115	4895.347828	743.288737	2287	5728	2914.391304	843.729208	2942	5865	4143.177313	479.287772				
5058	10847	5592.021763	239.224437	3958	10326	4743.65711	448.098009	1851	7178	2874.995714	473.312123	2545	7057	4268.5874	450.195807				
4976	9639	5464.450744	189.452366	3514	8523	4427.100317	342.435134	1762	7272	2354.918083	341.176046	2430	5676	3950.186229	404.208488				
5920	6251	6098	127.031965	5177	5766	5460.953333	150.947588	2693	2609	3276.25	317.281385	4623	5034	4622.3	193.04472				
6653	7150	6169.696967	568.304644	5114	7577	6030.5	683.380803	2841	6191	3690	300.654875	4373	5541	4908.76	381.205864				
5545	6089	5760.585386	115.981459	4441	5741	5193.219512	262.354875	2299	3981	2653.243902	253.825411	4044	5516	4501.699756	325.233753				
5347	6937	5967.814815	307.788898	4250	6158	6241.444444	542.203883	2219	6371	3713.203734	793.081413	2516	5816	4807.018189	536.583977				
5546	6253	5799.055556	231.15782	4425	5480	4989.166687	311.202459	2329	3821	2945.444444	386.70801	3116	4874	4333.833333	450.834887				
5540	5840	5866.920671	100.771229	4588	5690	4995.642657	278.628125	2267	3014	2530.357143	252.297324	4162	4984	4613.268714	280.860461				
5784	6634	6478.6	601.605383	4474	6952	6796.942687	891.126484	2728	6467	4173.271429	1039.957621	3451	6508	4684.571428	662.204328				
5427	7000	6080.849462	332.115508	4326	7000	5433.096774	490.309111	2317	5443	3498.645181	662.279112	3668	5851	4788.282806	459.353574				
7427	10195	9226.5	723.652211	7198	10332	9186.1	832.505913	6421	9646	7873.25	713.721004	5813	7181	6365.35	242.718225				
5986	7260	6679.696967	366.995512	4932	8056	6572.266667	499.92225	2865	5447	4441.666667	729.696764	3895	5394	4906.268667	408.805838				
5288	5800	5817.428887	108.764003	4050	5169	4634.914288	279.475177	2038	2682	2279.914288	150.573981	3414	5248	4305.714288	433.878565				
5677	7279	6698.626	504.201015	4515	6765	5389.541687	649.949299	2268	6538	4410.5	469.90788	3861	5590	4082.391687	502.708866				
5356	5689	5534.375	115.112005	4238	4999	4676.75	178.354889	2080	4311	2688.375	93.579111	3532	4842	4450.5	301.517663				
6780	6437	6505.125	201.790699	4693	5675	5196.25	303.974451	2956	4311	3696.375	434.048622	4074	5158	4556.4375	321.840534				
5449	6546	6110.853333	343.878188	4499	6273	5435.166687	607.694545	2504	4656	3828.996667	789.288462	3770	5544	4517.75	605.92078				
5078	5776	5511.078923	183.352785	4003	4911	4475.384615	289.337041	2092	2872	2339.538462	188.485753	2503	4525	3611.307682	749.536233				
5425	7950	6147.6189	308.501789	4263	6789	6515.233677	459.858837	2296	5393	3683.202749	650.451728	2917	5896	4972.051488	453.759388				
5267	6728	5510.571429	126.400299	4391	5143	4847.587143	205.292472	2173	2444	2044.999999	109.949539	3540	5348	4636.614288	514.343324				
5480	7236	6356.8	355.923499	4743	6494	4497.95	404.000192	3113	5688	4200.5	628.314244	3944	5200	4807.65	403.935023				
5575	6153	6633.303333	793.202991	4152	6289	6307.614615	1008.046497	2645	6075	4464.62063	1262.952946</								

3.8.3 Clasificación Difusa (Fuzzy)

El método de la clasificación fuzzy tiene en cuenta que hay píxeles entremezclados, esto es, que un píxel no puede ser definitivamente asignado a una categoría. Jensen menciona que “Claramente, debe existir una forma para que los algoritmos de clasificación sean más sensitivos a la imprecisión (fuzzy) de la naturaleza del mundo real”. (Jensen 1996).

La clasificación fuzzy está diseñada para ayudarle a trabajar con datos que no estén en una categoría o en otra exactamente. Esta clasificación trabaja utilizando una función de membrecía, en donde el valor de un píxel es determinado por su mayor cercanía a una clase que otra. Una clasificación fuzzy no tiene límites definidos y cada píxel puede pertenecer a diferentes clases (Jensen 1996).

Igual que la clasificación tradicional, la clasificación fuzzy usa entrenamiento, pero la mayor diferencia es que “también es posible obtener información sobre las diferentes clases encontradas en un píxel mixto” (Jensen 1996). El proceso de recolectar sitios de entrenamiento en una clasificación fuzzy no es tan estricto como en la clasificación normal. En el método fuzzy, los sitios de entrenamiento no deben tener los mismos píxeles exactamente.

A continuación se muestran los valores recomendados para los parámetros asociados a este método:

- Number of classes: Max: 40
- Maximum Iterations: 20
- Change Threshold: 2

Para empezar a realizar la clasificación fussy, Se abre Software PCI donde se selecciona la opción analysis<Imagen Classification<Unsupervised, donde se ingresa la imagen a ser clasificada en este caso se está utilizando imágenes Landsat, Aster y Rapideye de diferentes épocas.

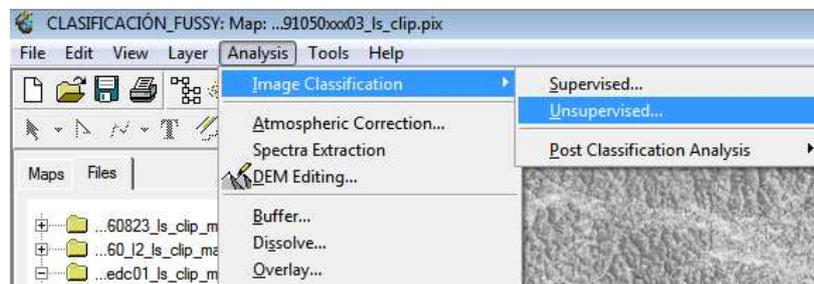


Figura 45. Clasificación no supervisada
Fuente. Elaborado por el autor

Al momento de ingresar la imagen a clasificar se debe escoger la combinación RGB de los cañones, dependiendo del sensor que se está utilizando y se toma en cuenta que se debe crear un layerraster vacío de 32bits para el resultado de la clasificación fussy.

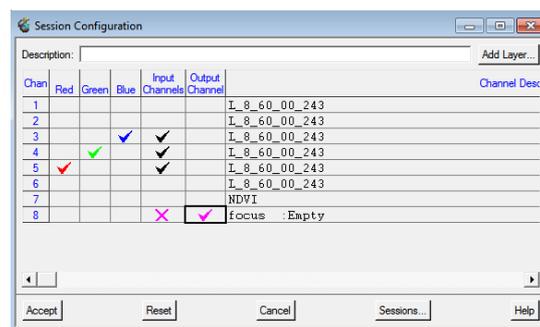


Figura 46. Configuración para la Clasificación.
Fuente. Elaborado por el autor

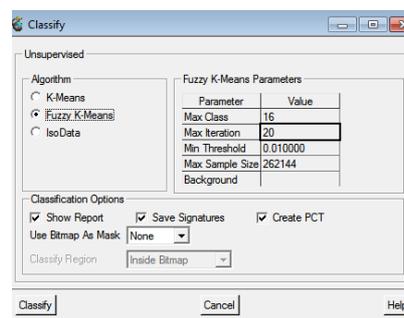


Figura 47. Parámetros para la Clasificación.
Fuente. Elaborado por el autor

Seleccionado los parámetros, se hace clic en classify y se obtendrá una imagen clasificada con 16 clases como se muestra en las figuras.

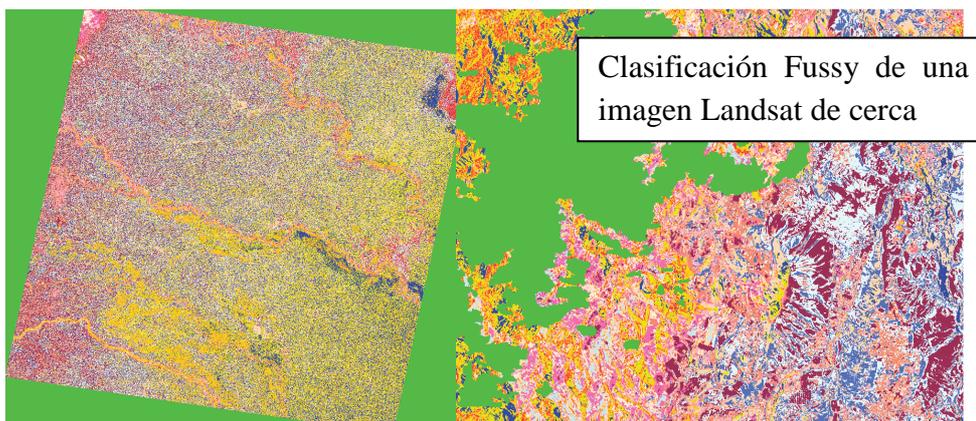


Figura 48. Clasificación fussy de una imagen Landsat.
Fuente. Elaborado por el autor

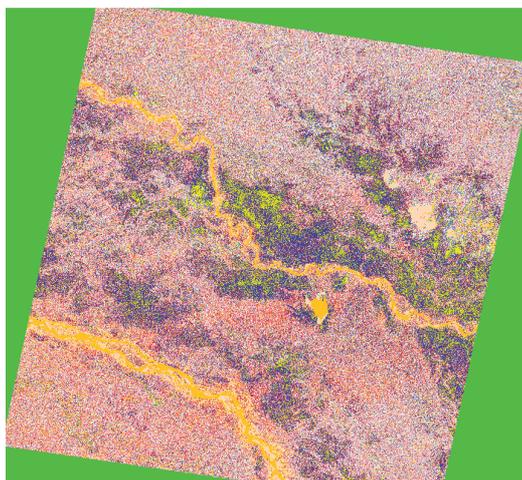


Figura 49. Clasificación fussy de una imagen Aster.
Fuente. Elaborado por el autor

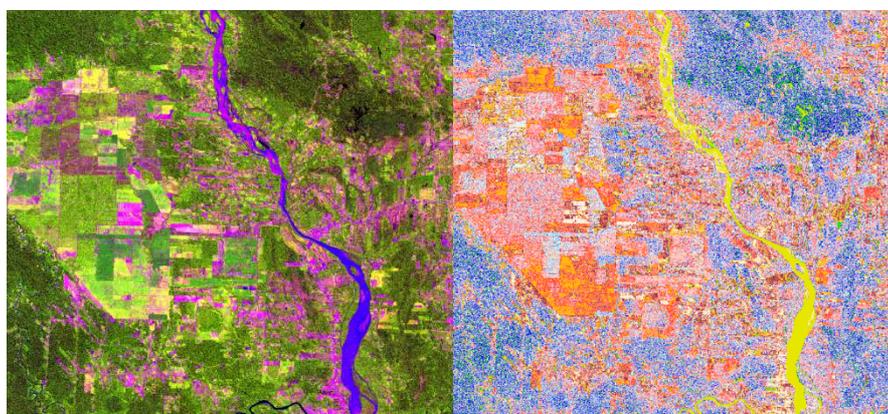


Figura 50. Clasificación fussy de una imagen Rapideye.
Fuente. Elaborado por el autor

3.8.4 Asignación de Atributos

Se crean 4 nuevos campos en el shapefile de segmentos: clas_num, clas_tem, Nivel_1, Nivel_2 yCodigo_Imagen. En el campo clas_num contiene el valor digital de las clases obtenidas de la clasificación digital, Mediante este proceso, el shapefile está listo para ingresar al proceso de edición visual.

3.8.5 Asignación de Atributos Temáticos

El proceso de asignación de atributos temáticos se realiza visualmente utilizando como referencia la imagen satelital, en una combinación visual de bandas que permita discriminar diferentes unidades de uso y cobertura vegetal. La imagen de referencia permitirá reasignar atributos temáticos a las clases discriminadas por la clasificación automática (Fussy). Para la asignación temática, se definen los siguientes criterios operativos:

Realizar el proceso de asignación temática, una clase a la vez, utilizando como referencia la leyenda de uso y cobertura del suelo establecido, utilizando el campo “clas_tem”.

Recordar que es necesario asignar la clase temática a todos los segmentos pertenecientes a una clase generada en la clasificación automática. Es inevitable que el proceso de clasificación automática genere mezclas entre las clases temáticas que se quieren representar

3.9 LEVANTAMIENTO DE PUNTOS DE CAMPO

Es importante capturar la heterogeneidad interna de cada clase de uso y cobertura, esto debe ser capturado de forma consistente por el intérprete para minimizar errores de omisión o comisión en la generación de los mapas de uso y cobertura del suelo. *Congal ton R, Green K. 2008.*

Se debe cubrir todas las clases definidas en la propuesta de leyenda temática, y tener una unidad mínima de muestreo, no es conveniente elegir al píxel como unidad de muestreo debido a problemas relacionados con la exactitud de la geolocalización de puntos de campo y la relación de un píxel con la

unidad mínima de mapeo (UMM). Por eso se plantea utilizar polígonos como unidades de muestreo en campo.

3.9.1 Diseño Experimental

El procedimiento a ser implementado incluye un diseño experimental donde se especifica el número y distribución espacial de las muestras a ser tomadas. Se plantea utilizar un diseño experimental no probabilístico basado en los siguientes criterios:

- Priorizar áreas con clases de uso y cobertura del suelo donde se tenga más dudas.
- Priorizar áreas con alta heterogeneidad de tipos de uso y cobertura.
- Priorizar áreas con mayor facilidad de acceso.

3.9.1.1 Unidad de muestreo.

Se plantea utilizar como unidad de muestreo la región generada por la segmentación de las imágenes. Esta área debería ser superior a la UMM, que se plantea de forma preliminar en 1 ha.

3.9.1.2 Número de muestras.

Es necesario recolectar un número de puntos de campo suficiente que permita caracterizar de forma adecuada la heterogeneidad que existe en el terreno.

3.9.1.3 Distribución de muestras.

En la validación probabilístico, los puntos de muestreo se define a priori utilizando un procedimiento específico (selección de puntos al azar) y se visitan posteriormente en el campo. Esto quiere decir que la ubicación de los puntos a muestrearse parte de un trabajo de laboratorio como de un proceso de selección de puntos durante la sesión de campo. *Congal ton R, Green K. 2008.*

3.9.1.4 Puntos de Laboratorio.

Para este procedimiento es necesario que las imágenes satelitales que se utilizaran en el GPS transformadas a MrSID. El proceso que se realiza es el siguiente:

- Se plantea utilizar un buffer de 500m alrededor de las vías y rutas de acceso existentes en la zona de estudio. La mayor parte de puntos debería encontrarse dentro de esta zona aunque puede ser necesario identificar puntos fuera del buffer y que correspondan a áreas prioritarias.
- Los puntos que van a ser visitados en campo deberían corresponder al centroide de los puntos asignados, si esto no es factible debido a problemas de accesibilidad, el punto de campo debería ser escogido de forma que se encuentre al menos a 200 m del punto a llegar.
- Crear un shapefile de puntos y añadir la ubicación de los puntos a visitarse en campo. Como se mencionó, los puntos deberán corresponder a zonas donde se tenga dudas sobre el tipo de uso y cobertura. Finalmente se debe verificar que existe un número suficiente de puntos por cada clase.
- Para minimizar la autocorrelación espacial de los puntos de muestreo, cada punto seleccionado debería estar separado al menos 500 m de los otros puntos correspondientes a la misma clase de uso o cobertura del suelo.

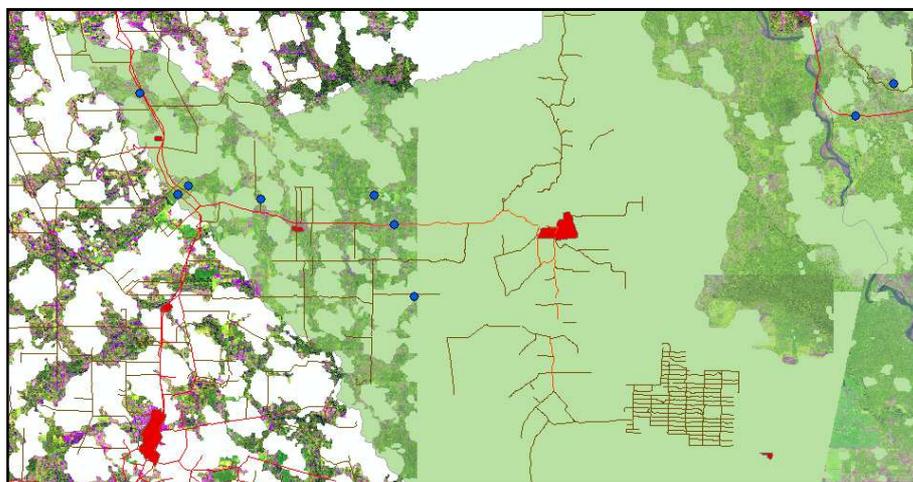


Figura 51. Selección de puntos en zonas de incertidumbre
Fuente. Elaborado por el autor

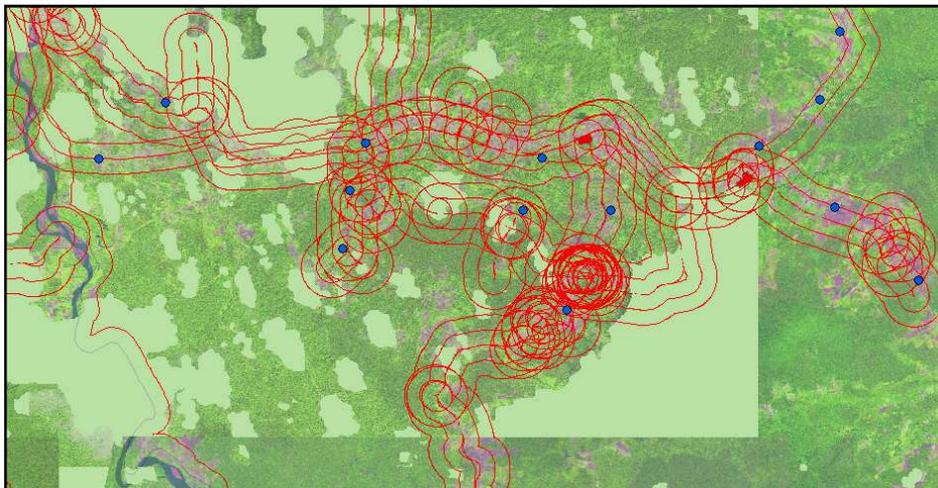


Figura 52. Selección de puntos en un buffer de 500m
Fuente. Elaborado por el autor

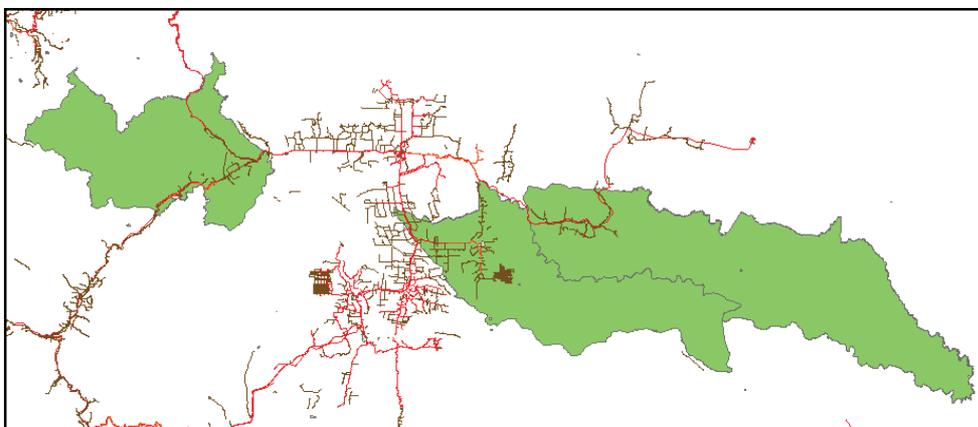


Figura 53. Vías de acceso en el área de estudio
Fuente. Elaborado por el autor

3.9.2 Preparación y planificación

3.9.2.1 Revisión de información secundaria existente.

Es importante revisar información existente sobre uso y cobertura del suelo para el área de trabajo, esto incluye mapas existentes, imágenes de alta resolución, fotografías aéreas, bases de datos y opinión de expertos.

3.9.2.2 Generación de mapas de campo y datos de soporte.

Se imprimirá a una escala adecuada (1:50 000), la imagen que está siendo clasificada y un mapa preliminar. Estos deberán contener información base correspondiente a vías y centros poblados.

Adicionalmente, las coordenadas de los puntos establecidos en laboratorio deben cargarse en la memoria del receptor GPS para guiar el acceso a los sitios de muestreo.

3.9.2.3 Planificación

Para la visita de los puntos de campo es necesario planificar y tomar en cuenta factores como la accesibilidad y la distribución espacial de los sitios. Se recomienda establecer un itinerario a ser cubierto cada día de trabajo en campo de acuerdo a los sitios de base.

3.9.3 Toma de datos en campo

3.9.3.1 Ocupación de puntos de muestreo.

Para el acceso a los puntos de campo de muestreo debe realizarse utilizando las capacidades de navegación del receptor GPS. Es importante tener en cuenta los permisos de acceso adecuados al sitio de muestreo. Si es imposible llegar físicamente al punto o a un lugar cercano por problemas de acceso, se identifica un punto alternativo siempre y cuando corresponda a la clase de uso o cobertura del punto original. Mientras se llegue al punto de muestreo, la recolección de datos contempla los siguientes procedimientos:

- Establecer las coordenadas del punto. Utilizando un receptor GPS permanecer en el punto por al menos 5 minutos¹⁰, verificando que las condiciones de recepción sean adecuadas en cuanto al número de satélites. Las coordenadas deben estar en un sistema UTM utilizando el datum WGS84 en la zona 17 sur. El punto debe grabarse en la

¹⁰ El período es útil cuando el receptor GPS tiene capacidad de promediar lecturas durante un periodo de tiempo determinado. En caso de no existir esa opción, el operador debe determinar el tiempo hasta que las coordenadas leídas por el receptor se estabilicen.

memoria del receptor GPS utilizando un sistema de identificación adecuado.

- Es necesario ingresar todos los campos del diccionario de datos en el receptor GPS de acuerdo a la leyenda temática y las definiciones operativas de las clases de uso y cobertura del suelo. En la sección de comentarios se debe incluir información relevante que permita caracterizar de mejor forma el sitio. Por ejemplo:
 - Presencia de otras coberturas vegetales que pueda tener una extensión más pequeña que la UMM.
 - Especies dominantes, especialmente en el caso de plantaciones forestales.
 - Si se tiene acceso a informantes locales, datos sobre el sitio tales como el tiempo de existencia de la cobertura o uso observada, edad del bosque en regeneración.
- Realizar el registro fotográfico de la unidad de muestreo. Este facilita vincular el punto específico donde se han establecido las coordenadas con la unidad de muestreo. Tomar cuatro fotos digitales en el sitio con dirección Norte, Sur, Este, Oeste y registrar los identificadores en el diccionario de datos ya establecido.

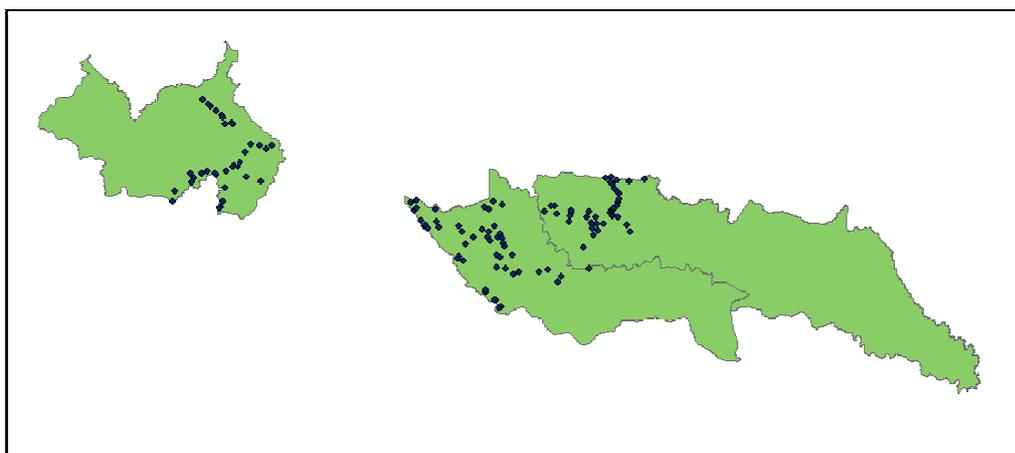


Figura 54. Puntos de Calibración
Fuente. Elaborado por el autor

3.9.3.2 Puntos de Referencia

Estos puntos se recogen en casos en los que no es posible ocupar físicamente un área de interés. Esto sucede cuando se identifican áreas con coberturas de interés a distancias largas o separadas por barreras geográficas, o cuando no se pueden registrar las coordenadas de un punto utilizando el receptor GPS. La idea básica de un punto referencial es ocupar un punto con coordenadas conocidas y registrar la dirección y distancia estimada hacia el punto o área de interés. Para tomar un punto referencial se requiere los siguientes procedimientos:

- Establecer las coordenadas del punto utilizando como referencia. Esto requiere los mismos procedimientos descritos para puntos de calibración. El punto debe grabarse en la memoria del receptor GPS utilizando un sistema de identificación adecuado que permita identificar entre puntos calibrados y referenciales e ingresar toda la información de los campos en el diccionario de datos perteneciente a puntos de referencia.
- Tomar una foto digital y registrar el rumbo de la toma y la distancia aproximada al punto o área de interés. Registrar el identificador de la fotografía digital en el diccionario de datos.

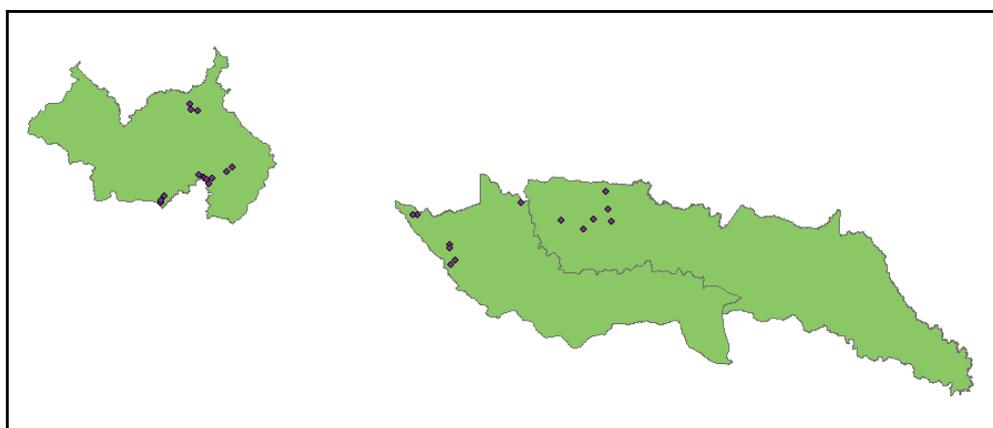


Figura55. Puntos de Referencia
Fuente. Elaborado por el autor

Los mapas de puntos de campo se encuentran en el Anexo 6.



Foto 1. Puntos de Calibración
Fuente. Elaborado por el autor



Foto 2. Puntos de Referencia
Fuente. Elaborado por el autor

3.9.3.3 Almacenamiento de datos y verificación

Ya culminado la recolección de puntos de campo, se crea respaldos de los datos digitales recolectados en un computador portátil. De forma óptima, esto debería incluir todos los elementos de información recopilados y el diccionario de datos. Como mínimo, deberían crearse respaldos de las coordenadas GPS recolectadas para los puntos de calibración y referencia¹¹ y del registro fotográfico digital.

De ser necesario debería verificarse la ubicación espacial de los puntos recolectados sobre la imagen y el mapa preliminar de uso y cobertura. Esto permite identificar de forma temprana problemas con la georreferenciación y establecer acciones para corregirlos. Finalmente se debe evaluar los puntos que no se pudieron acceder y establecer posibles sustitutos posibles.

3.9.4 Códigos de identificación.

Para poder identificar se sugirió los siguientes códigos de forma única los puntos de calibración y referencia y los datos asociados. Los identificadores tendrán 9 dígitos distribuidos de la siguiente manera:

PCS001004O

Punto de calibración PCS

Punto de referencia PRS

001: Es el número de salidas de campo que se han hecho por parte del ministerio de Ambiente

004: Es el número de la foto que se ha tomado

N, S, E, O: Es la dirección con la cual se toma de referencia la foto (Norte, Sur, Este, Oeste)

¹¹Existen herramientas sin costo que facilitan la descarga de datos GPS y su conversión a formatos de manejo de datos vectoriales como shapefile.



Foto 3. PCS051004O – Bosque Nativo
Fuente. Ministerio del Ambiente- Socio Bosque



Foto 4. PCS051004N – Bosque Nativo
Fuente. Ministerio del Ambiente- Socio Bosque



Foto 5. PCS051004E – Bosque Nativo
Fuente. Ministerio del Ambiente- Socio Bosque



Foto 6. PCS051004S – Bosque Nativo
Fuente. Ministerio del Ambiente- Socio Bosque

3.10 VALIDACION Y MATRICES DE CONFUSIÓN

La evaluación de la exactitud de los mapas de clasificación de uso y cobertura del suelo permite cuantificar el error asociado con la representación de las clases del mapa utilizando información independiente (IPCC 2003) (Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático). Es ampliamente reconocida la necesidad de contar con un método de evaluación de exactitud robusto en procesos complejos de análisis de imágenes satelitales. Adicionalmente, la evaluación de exactitud es el componente principal de un sistema adecuado de aseguramiento y control de la calidad (SCAC).

Para evaluar la exactitud de la interpretación, se utilizarán como referencia las imágenes a partir de las cuales se obtuvieron los mapas de uso y cobertura, y, en última instancia, verificación en campo (donde sea posible).

3.10.1 Diseño de la muestra.

Para este estudio, se deben generar entre 160 y 80 puntos para cada escena Landsat para asegurar una representatividad suficiente de la extensión y heterogeneidad de la imagen. Los puntos se ubican al azar,

está ubicación será automatizada utilizando herramientas disponibles de forma gratuita¹²

3.10.2 Creación de Puntos Randómicos.

Para iniciar con la primera etapa del diseño de la muestra se plantea la ubicación de puntos al azar o puntos randómicos, para lo cual, en primera instancia, su creación dependerá de lo siguiente:

Tabla 3.5. Número de Puntos Randómicos

Área de trabajo que cubre la imagen (%)	Número de puntos randómicos Imágenes LANDSAT	Número de puntos randómicos Imágenes ASTER	Número de puntos randómicos Imágenes RAPIDEYE
20 – 50%	160	120	100
50 – 75%	100	90	75
75 – 100%	50	60	50

Fuente. Elaborado por el autor

El procedimiento para la creación de los puntos randómicos utilizando la extensión Hawth's Analysis Tools para ArcGis, será descrito a continuación:

En la extensión Hawth's Tools, click en Sampling Tools / Generate Random Points

¹²Por ejemplo, Hawth's Analysis Tools es una extensión gratuita para ArcGIS que permite generar puntos utilizando un diseño estratificado al azar. Otra alternativa similar es el USGS Rapid LandCoverMapper.

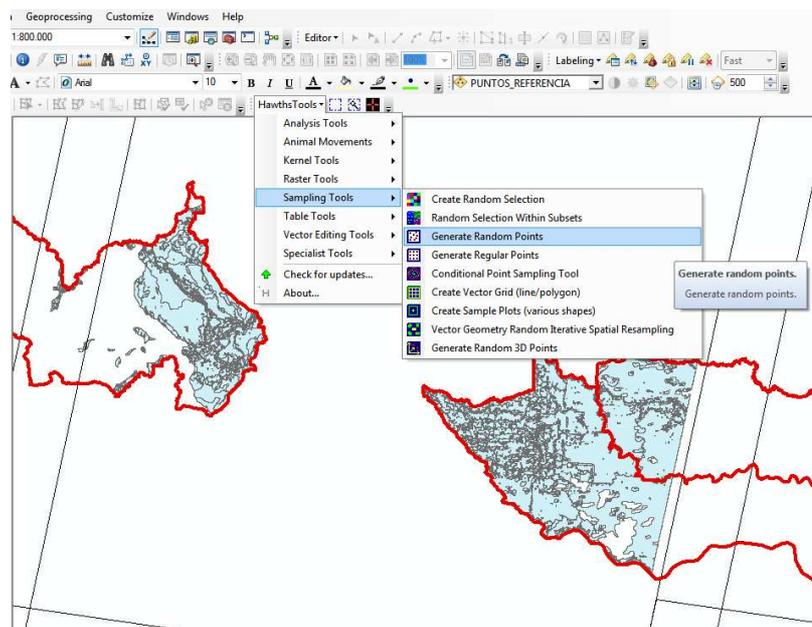


Figura 56. Herramienta Hawth's Analisis Tools.
Fuente. Elaborado por el autor

Aparecerá una ventana, en la cual se tomarán en cuenta las siguientes características:

Input >Reference layer Seleccionar polygon layers, y en select layer abrir el archivo shapefile de segmentos, se adiciona este archivo debido a que se encuentra intersecado con la máscara de nubes, lo cual nos garantiza que los puntos randómicos no serán generados sobre las nubes.

Minimum distance between points seleccionar

Enforce minimum distance between points y colocar el número 500, esto es para que la distancia entre los puntos generados no sea menor a 500m, que es la distancia mínima a la cual se tomaron puntos en el campo.

Sample Size > Unstratified sampling design seleccionar *Generate this number of random point*, y colocar el número de puntos randómicos según el tipo de imagen que se vaya a validar y el porcentaje de área de imagen utilizada en la edición visual. Ver tabla 3.5.

Output colocar el nombre del archivo shapefile que contendrá los puntos randómicosreados. Este archivo es temporal por lo que se guarda en cualquier carpeta interna de la computadora.

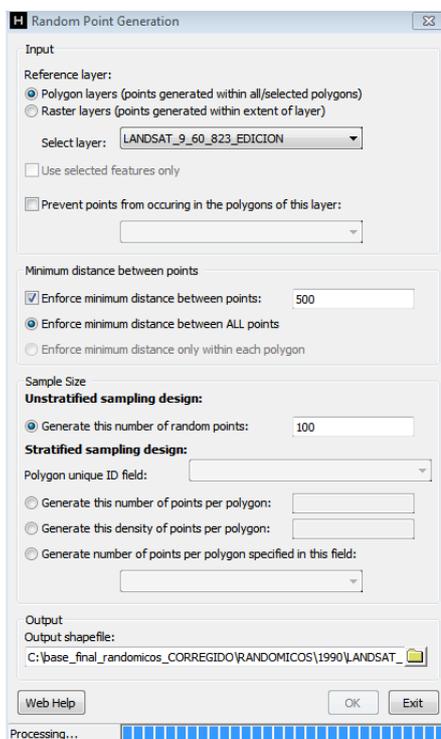


Figura 57. Generación de puntos randómicos
Fuente. Elaborado por el autor

3.10.3 Creación de FeatureClass Puntos de Validación

Luego de la creación de los puntos randómicos, estos deberán ser contenidos en un featureclass dentro de la Base de Datos, para lo cual se describe el siguiente procedimiento:

Abrir ArcCatalog y en el featuredataset PUNTOS_VALIDACION que se encuentra dentro de la geodatabase se crea unfeatureclass con el nombre de la imagen que se tomó como referencia para generar los puntos randómicos, luego se hace un *Append* para subir los puntos al featureclass creado.

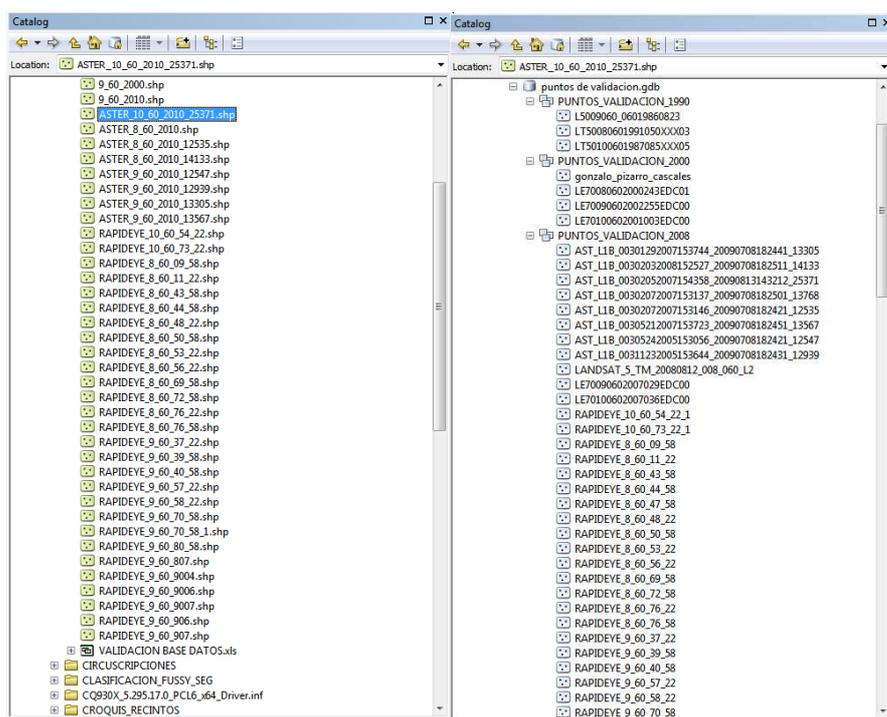


Figura 58. FeatureClass de los puntos randómicos
Fuente. Elaborado por el autor

3.10.4 Atributos de los puntos de validación

Una vez ubicados los puntos de validación dentro de la extensión completa del área de estudio, es necesario asignar el tipo de uso y cobertura del suelo a cada punto. Para asegurar la calidad y reducir el sesgo, los puntos van a ser interpretados al menos tres veces por intérpretes distintos. En caso de haber discrepancias entre los analistas, una cuarta persona deberá evaluar el uso y cobertura del suelo del punto de validación. La exactitud se evaluara utilizando las siete clases Nivel 1 de la leyendatemática (IPCC 2003), como también para las clases a Nivel II.

Para evaluar de forma óptima la exactitud de los mapas temáticos generados:

Se despliega los puntos de verificación usando las imágenes originales como referencia, con cada periodo de tiempo interpretado por separado. Este método genera un estimado de exactitud para cada año de referencia.

Tabla 3.4. Leyenda Temática

CÓDIGO NIVEL I	NIVEL I (IPCC)	CÓDIGO NIVEL II	NIVEL II
1	Bosque	8	Bosque Nativo
2	Áreas Agropecuarias	11	Cultivos Anuales
		12	Cultivos Semipermanentes
		13	Cultivos Permanentes
		14	Pasto Cultivado
		15	Mosaico Agropecuario
3	Vegetación Arbustiva y Herbácea	16	Vegetación Arbustiva
		17	Vegetación Herbácea
		18	Páramos
4	Cuerpos de Agua	19	Natural
		20	Artificial
5	Zonas Antrópicas	21	Zonas Pobladas
		22	Infraestructura
6	Otras Áreas	23	Glaciares
		24	Áreas sin cobertura vegetal
7	Plantación Forestal		

Fuente. Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC)

3.10.5 Procedimiento para la Atribución Visual

Basado en las siete clases del Nivel 1 según el IPCC, la categoría correspondiente al punto que se encuentra en validación, permitiendo que los interpretadores realicen este proceso más rápido y eficiente.

Abierto el programa ArcMap, añadir el featureclass PUNTOS_VALIDACION y su respectiva imagen satelital a validarse, aplicar una combinación de bandas y realces adecuados para la interpretación, con el fin de evitar que la información resultante este sesgada.

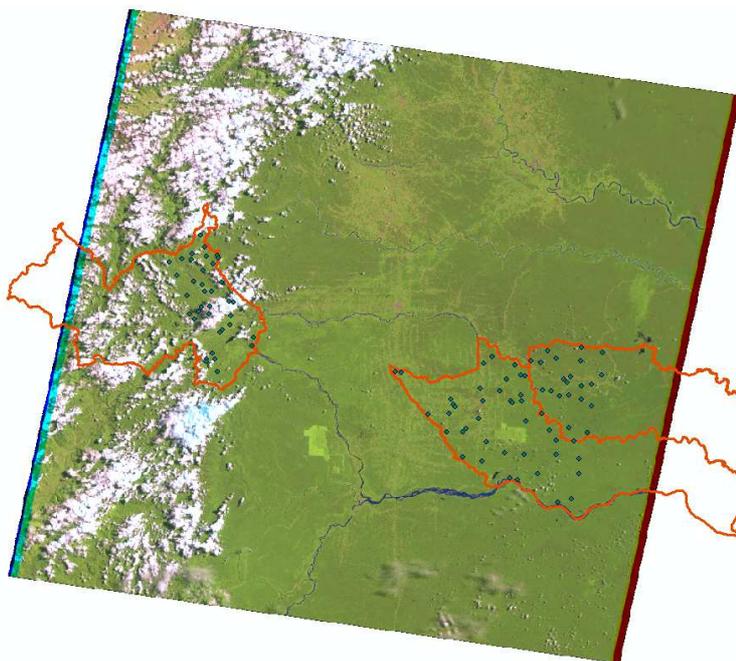


Figura 59. Puntos Randómicos a ser validados
Fuente. Elaborado por el autor

Se desplegará los atributos del featuresclass, la cual nos permitirá realizar el proceso de validación punto por punto, empezando por separado el intérprete 1 que llenará los campos de validación V_ORIG1, el intérprete 2 llenará el campo V_ORIG2 y el intérprete¹³ 3 hará el campo V_ORIG3. Hay que tomar en cuenta que la interpretación debe ser analizada con la segmentación que se generó. Llenos los campos de validación se procede hacer la Validación Final que es el promedio de las tres validaciones, la clase que más se repite, es predominante para el punto validado. Si ninguna clase se repite en la validación se utilizará un intérprete 4.

¹³ Para poder hacer el proceso de validación Los especialistas en Sensores Remotos del Ministerio del Ambiente – Socio Bosque fueron los que ayudaron a interpretar los campos de validación (Danilo Granja, Alexandra Chacón, Jeanneth Alvear y Mario Jijón)

OBJECTID*	SHAPE*	CODIGO	ID_IMAGEN	NIVEL_2	V_ORIG1	V_ORIG2	V_ORIG3	HI_RES	FUENTE_HI	ID_CAMPO	CAMPO	VALIDACION	V_ORIG4
1	Point				1	1	1					1	
2	Point				1	1	1					1	
3	Point				1	1	1					1	
4	Point				1	1	1					1	
5	Point				1	1	1					1	
6	Point				1	1	1					1	
7	Point				1	1	1					1	
8	Point				1	3	3					3	
9	Point				2	2	3					2	
10	Point				1	1	1					1	
11	Point				1	1	3					1	
12	Point				1	1	1					1	
13	Point				1	1	1					1	
14	Point				1	1	1					1	
15	Point				1	1	1					1	
16	Point				1	1	3					1	
17	Point				6	3	6					6	
18	Point				1	1	1					1	
19	Point				1	1	1					1	
20	Point				1	1	1					1	
21	Point				1	3	1					1	
22	Point				1	1	3					1	
23	Point				1	1	1					1	
24	Point				1	1	1					1	
25	Point				1	1	1					1	
26	Point				3	1	1					1	

Figura 60. Interpretación de los validadores Fuente. Elaborado por el autor

3.10.6 Trabajo de campo

Se utilizara la información de puntos de verificación de campo en áreas donde esta opción sea factible de acceder. Estos puntos deberán ubicarse estratégicamente en áreas prioritarias. Estas áreas pueden incluir zonas donde existe alta incertidumbre en las clases de uso y cobertura del suelo

Este método es el más robusto pero representa mayores costos y puede implementarse únicamente donde es económicamente factible y físicamente posible (por accesibilidad). La lógica asociada a esta alternativa es que cada punto que pueda ser evaluado en campo, también lo sea utilizando la imagen original. De esta forma puede servir para evaluar la exactitud.

3.10.7 Productos de la evaluación de exactitud

Los resultados de las validaciones deben compararse con los atributos editados en los mapas de uso y cobertura del suelo. Esto permite generar una matriz de confusión que permite comparar la clase del mapa y la clase obtenida con información de referencia. La tabla 3.6 presenta un ejemplo genérico de una matriz de confusión para un mapa hipotético con tres clases de uso y cobertura del suelo. Los valores en la diagonal representan el número de puntos para los cuales la clase representada

en el mapa coincide con la clase asignada. Los valores fuera de la diagonal representan errores de representación de las clases (diferencias entre la clase asignada en el mapa y la clase asignada al punto de validación).

Tabla 3.6. Ejemplo genérico de una matriz de confusión para un mapa con tres clases de uso y cobertura del suelo.

Datos Referencia					
D a t o s		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Total
M a p a	Clase 1	X11	X12	X13	X1...
	Clase 2	X21	X22	X23	X11
	Clase 3	X31	X32	X33	X11
	Total	X..1	X..2	X..3	X..=T

Fuente. Congalton 1991

La matriz de confusión permite calcular las siguientes medidas de exactitud (Congalton1991):

Exactitud Total, es la suma de la diagonal principal, dividido para el total de entradas en la matriz.

Exactitud del Productor, errores de omisión; se calcula, dividiendo el número de puntos interpretados correctamente en cada categoría, para el número total de puntos de referencia en la misma categoría. Esta medida muestra la probabilidad de clasificar correctamente una clase determinada.

Exactitud del Usuario, errores de comisión; se calcula dividiendo el número de puntos interpretados correctamente en cada categoría, para el número total de puntos clasificados para esa categoría. Esta medida representa la probabilidad de que un punto interpretado representa la categoría correcta.

Análisis Kappa, medida estadística de acuerdo, más allá de un efecto del azar, entre los puntos interpretados y los puntos de referencia (Cohen, 1960, Congalton et al. 1983). El análisis kappa incorpora errores de omisión y comisión (fuera de la diagonal de la matriz de confusión) en una sola medida.

3.10.8 Creación de Matrices de Confusión

Con la edición visual y los resultados de la referencia, es decir, los datos generados en la validación por los intérpretes. Se debe tomar en cuenta si existe información en el campo denominado “CAMPO”, en validación aparecerá la clase de campo. Si existe información en “V_ORIG1, V_ORIG2 y en V_ORIG3”, en validación aparecerá la clase que más se repita de los tres campos, por ejemplo: V_ORIG1 = bosque, V_ORIG2 = vegetación arbustiva y herbácea V_ORIG3 = bosque; el resultado de este punto será que en validación aparecerá bosque.

Se da mayor importancia a la información de campo, ya que es más precisa y confiable. Con la finalidad de contabilizar las coincidencias entre las clases, realizamos un *join* basado en la localización espacial, desde el *featureclass* PUNTOS_VALIDACION y seleccionando el *shapefile* en donde se encuentra la clasificación visual para la unión de los atributos. El resultado de esta unión es un *shapefile* en donde se encuentran todos los puntos aleatorios generados con los campos de la clasificación visual y los campos de la validación. Para el análisis es necesario dejar los campos de VALIDACION de los puntos aleatorios, el NIVEL 1 y NIVEL 2 de la clasificación de la edición visual.

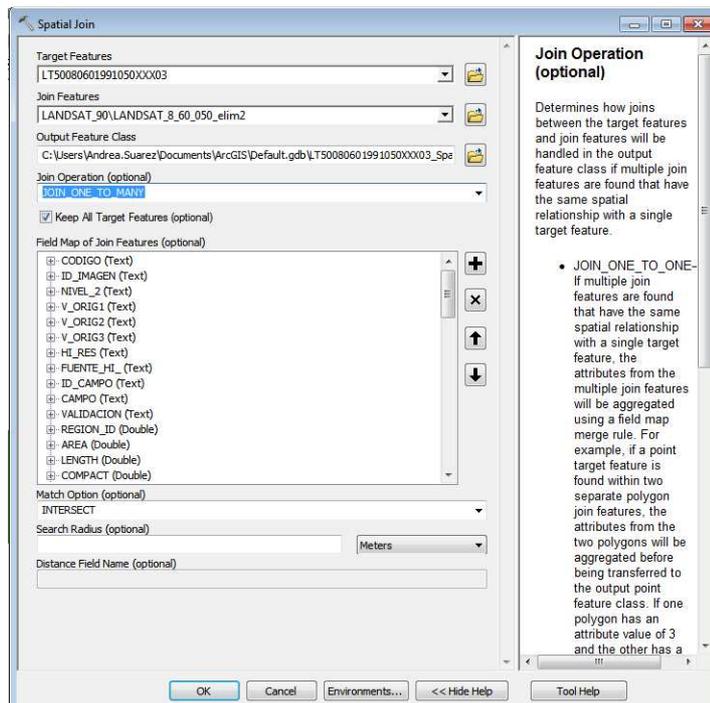


Figura 61. Join basado en la localización espacial Fuente. Elaborado por el autor

Para verificar las coincidencias es necesario tener en cuenta que el campo de validación está representado por el código del dominio.

TARGET_FID	JOIN_FID	CODIGO	ID_IMAGEN	NIVEL_2	V_ORIG1	V_ORIG2	V_ORIG3	HI_RES	FUENTE_HI	ID_CAMPO	CAMPO	VALIDACION	NIVEL_1	NIVEL_23	REGION_ID
1	1393			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3466
2	361			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	634
3	1202			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2684
4	1847			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4470
5	538			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	1318
6	1344			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3223
7	1485			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3799
8	1488			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3803
9	1093			4	4	4	4					4	CUERPOS DE AGUA	NATURAL	2363
10	395			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	735
11	1206			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2703
12	628			2	2	5	5					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	1529
12	661			2	2	5	5					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	1624
12	678			2	2	5	5					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	1656
13	1685			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4579
14	224			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	341
15	342			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	573
16	1754			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4760
17	1687			4	4	4	4					4	CUERPOS DE AGUA	NATURAL	4585
18	2085			4	4	4	4					4	CUERPOS DE AGUA	NATURAL	5687
19	1504			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3884
20	1337			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3204
21	829			1	3	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	1984
22	941			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2221
23	345			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	577
24	2870			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2669
25	1237			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2774
26	964			4	4	4	4					4	CUERPOS DE AGUA	NATURAL	2291
27	456			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	959
28	1130			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2582
29	1509			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3911
30	363			1	3	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	646
31	1685			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4579
32	83			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	79
33	1031			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2392
34	941			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2221
35	499			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	1133
36	2042			2	3	2	2					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	5591
36	2050			2	3	2	2					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	5604
37	942			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2222
38	563			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	1381
39	1474			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3772
40	1314			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3092
41	1737			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4707
42	1710			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4663
43	1359			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3434
44	783			2	2	2	2					2	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	1883
45	1685			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4579
46	1296			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	2703
47	1357			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	3309
48	311			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	527
49	1685			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	4579
50	555			1	1	1	1					1	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	1352

Figura 62. Campos necesarios para el análisis de validación Fuente. Elaborado por el autor

Error de comisión = 1 – Exactitud del Usuario

Fiabilidad Estimada: es la relación existente entre las clases bien estimadas y el número total de las clases. Este índice es global y no nos indica como la exactitud se reparte entre las diversas categorías individuales. Muchas veces las categorías individuales presentan exactitudes drásticamente diferentes pero se combinan de modo que esto no se refleja en la fiabilidad. Para evaluar la exactitud de las categorías individuales podemos utilizar la exactitud del productor y del usuario.

Fiabilidad estimada = (Clases bien estimadas * 100)/número total de clases

Error de muestreo: Se genera a partir de la siguiente fórmula del muestreo aleatorio simple:

$$EM = \sqrt{\frac{Fiabilidad\ Estimada * (100 - Fiabilidad\ Estimada)}{Total\ de\ Clases}}$$

Ecuación 7. Error de Muestreo

Fuente. Congaton, 1991

Fiabilidad Global: A partir de la Fiabilidad estimada se puede calcular el intervalo de confianza en donde se sitúa la fiabilidad real que tiene el mapa generado. Su fórmula es la siguiente:

$$F = \text{Fiabilidad estimada} \pm z * EM$$

Donde z es igual a **1,96** que es el valor estándar para realizar los cálculos al 95% de probabilidad.

Estadístico Kappa: Las medidas de exactitud que acabamos de considerar, aunque simples de usar están basadas en la diagonal principal, sea en las filas y columnas de la matriz de confusión solamente. Estas medidas no aprovechan la información contenida en dicha matriz

considerada en conjunto. Más aun, puede ocurrir que una distribución totalmente aleatoria de los puntos en las clases pueda conducir a resultados aparentemente correctos en la matriz de confusión. Buscando superar estos inconvenientes se ha propuesto un índice denominado coeficiente kappa. Este estadístico es una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un clasificador aleatorio.

La estimación de κ se obtiene a partir de la siguiente formula (Hudson y Ramn, 1987):

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}$$

Ecuacion 8. Estadístico Kappa

Fuente. Hudson y Ramn, 1987

En donde:

r: es el número de filas en la matriz.

X_{ii}: número de observaciones en el elemento de la fila i y columna i (es decir, sobre la diagonal mayor).

X_{i+}: total de observaciones en la fila i (es el total marginal a la derecha de la matriz)

X_{+i}: total de observaciones en la columna i (total marginal al pie de la matriz)

N: número total de observaciones incluidas en la matriz.

El estadístico kappa permite conocer el grado de acuerdo observado se aleja o no significativamente del esperado al azar. En definitiva, este índice pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías

de interés con exactitud significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria. Por lo que, un valor kappa igual a 1¹⁴ indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar.

Tabla 3.7. Fuerza de la concordancia (valor de kappa)

VALOR DE K	FUERZA DE LA CONCORDANCIA
< 0.20	Pobre
0.21 - 0.40	Débil
0.41 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Bueno

Fuente. Chuvieco, 2002

La matriz de confusión será almacenada en el mismo formato de las Figuras 63 y 64, para más detalle ver en Anexo 3.

3.11 TÉCNICA PARA EL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y COBERTURA VEGETAL

Los estudios de detección de cambios pueden aplicarse a una gran variedad de disciplinas (Mouat et., 1993). Tienen por analizar que rasgos presentan en un determinado territorio se han modificado entre dos o más fechas en este caso para tres épocas diferentes. Como en otras fases de la interpretación de imágenes, la localización de esos cambios suele implicar un compromiso entre errores de omisión y de comisión, esto es desechar un cambio que realmente existe, o detectar un cambio que no ha ocurrido. El objetivo preferente será evitar falsas alarmas y poner énfasis en reducir las omisiones.

¹⁴A partir de los valores de kappa menores a 0,7 es necesario revisar la clasificación de las imágenes, para continuar con la redistribución de puntos dentro del proceso de diseño de la muestra.

Otro aspecto es que en el análisis de cambios hace referencia al tipo de transformaciones que pretenden delimitarse en una imagen, según se transformen los rasgos espectrales o espaciales de una imagen (Robin, 1998). Se ha establecido que para el cálculo de las matrices de transición, se deberán considerar los cambios de cobertura del suelo dentro de cada intersección o traslapeo de imágenes, es decir que las áreas con las cuales se trabajaran, deben estar normalizadas y corregidas por cada intersección de imágenes, estas intersecciones vienen dadas por las fechas de cada imagen.

Para permitir ajustar las áreas de cambio y permanencia de cobertura esta metodología plantea la normalización de las áreas con respecto a la época de referencia del estudio, es decir, 1990, 2000 y 2010. Para calcular las matrices se deben comparar áreas iniciales y finales, en este, para lo cual es necesario establecer matrices de cambio de cobertura entre una época y otra, las cuales nos muestren las áreas de cambio (Figura 65).

$$CM(t_1, t_2) =$$

				$\sum_k C_{i \rightarrow k}$
	$C_{i \rightarrow i}(t_1 \rightarrow t_2)$	$C_{i \rightarrow j}(t_1 \rightarrow t_2)$		$TA_i(t_1)$
	$C_{j \rightarrow i}(t_1 \rightarrow t_2)$	$C_{j \rightarrow j}(t_1 \rightarrow t_2)$		$TA_j(t_1)$
	$\sum_k C_{k \rightarrow i}$	$TA_i(t_2)$	$TA_j(t_2)$	

Figura 65. Matriz de Cambio de Cobertura entre las fechas t1 y t2
Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

Estas áreas de cambio deben ser ajustadas de acuerdo a las fechas de las épocas de referencia, 1 de Enero 1990, 1 de Enero 2000 y 1 de Enero 2008.

$$C_{i \rightarrow j}(90 \rightarrow 97) = C_{i \rightarrow j}(t_1 \rightarrow t_2) \times \frac{\text{no.}_\text{days}(90 \rightarrow 97)}{\text{no.}_\text{days}(t_1 \rightarrow t_2)}$$

Ecuación 9. Fórmula de normalización para coberturas que han cambiado
Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

Donde:

$C_{ij}(t_1 \rightarrow t_2)$, es el área de la cobertura que ha cambiado entre las fechas.

$C_{ij}(t_1 \rightarrow t_2)$, área normalizada de la cobertura de cambio en el período.

no_days (90 ► 97), es el número de días julianos por período

no_days (t1 ► t2), es el número de días julianos por fechas

$$C_{i \rightarrow i}(90 \rightarrow 97) = TA_i(t_1) + \left[(TA_i(t_1) - TA_i(t_2)) \times \frac{\text{no.}_\text{days}(t_1 \rightarrow 90)}{\text{no.}_\text{days}(t_1 \rightarrow t_2)} \right] - \sum_{k \neq i} C_{i \rightarrow k}(90 \rightarrow 97)$$

Ecuación 10. Fórmula de normalización para coberturas que se han mantenido

Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

Donde:

$C_{i \rightarrow i}(90-97)$, es el área de la cobertura que se ha mantenido en el periodo.

$TA_i(t_1)$, área de la cobertura inicial de la categoría A.

$TA_i(t_2)$, área de la cobertura final de la categoría A.

no_days (90 ►97), número de días julianos desde la fecha inicial al período de ajuste.

$\sum_{k \neq i} C_{i \rightarrow k}(90 \rightarrow 97)$, Sumatoria de las áreas de cambio de la Cobertura A.

Estas fórmulas se deben aplicar a la matriz de áreas originales, y el resultado será una matriz con áreas ajustadas o normalizadas. La suma de todas estas matrices normalizadas, nos dará como resultado una matriz general de toda el área de estudio.

3.11.1 Matrices de Transición

Para el cálculo de las matrices de transición para cada período de tiempo entre 1990-2000 y 2000-2010 se deberá realizar los siguientes pasos adicionales que se les explicará a continuación con la finalidad de obtener 2 matrices de transición en los períodos indicados.

3.11.1.1 Generación de la máscara general de información en las tres épocas.

Se deberá generar una máscara de información para las tres épocas (Figura 66), esto se puede hacer utilizando estas mismas coberturas en cada año, luego se realizará una intersección de los tres períodos y esta será la máscara en formato shape, y transformándolas en base a un código común, que represente la información que existe para esa fecha.

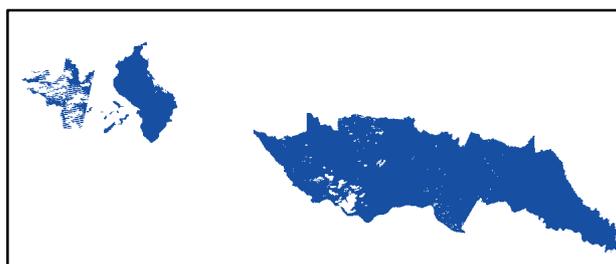


Figura 66. Mascara de información para tres épocas
Fuente. Elaborado por el autor.

Para iniciar con el cálculo de la matriz de transición anual se utilizará el archivo de ediciones visuales de toda el área de estudio para cada época de referencia. Utilizando el archivo final de ediciones visuales generado, se deberá hacer un clip con la máscara con respecto al área a ser analizada. Para determinar los cambios de cobertura del área de estudio, se deberá generar las coberturas para cada época de referencia, para esto se realizará un dissolve a los campos NIVEL1_90, NIVEL1_00 y NIVEL1_10, después se adicionará a cada archivo un campo denominado “COD_COBERT”, y se asignará un código numérico a cada uno de las coberturas identificadas en el NIVEL_1. Es necesario transformar el archivo a formato raster utilizando el campo “COD_COBERT”.

Tabla 3.8. Codificación del Nivel_1

NIVEL_1	COD_COBERT
Bosque	1
Áreas agropecuarias	2
Vegetación arbustiva y herbácea	3
Cuerpos de agua	4
Zonas antrópicas	5
Otras áreas	6

Fuente. Elaborado por el autor

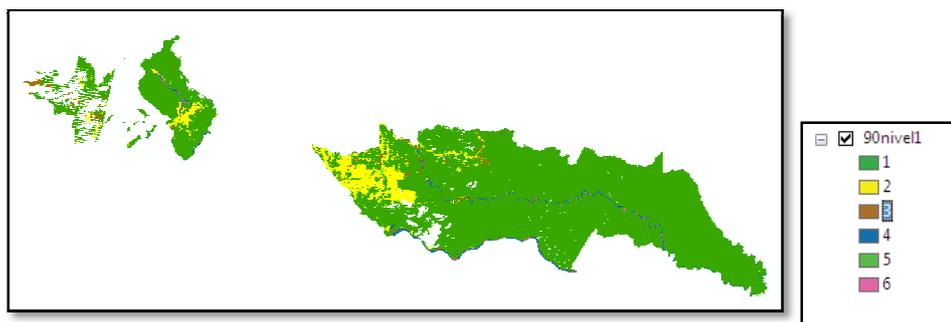


Figura 67. Cobertura en formato raster del año 1990
Fuente. Elaborado por el autor

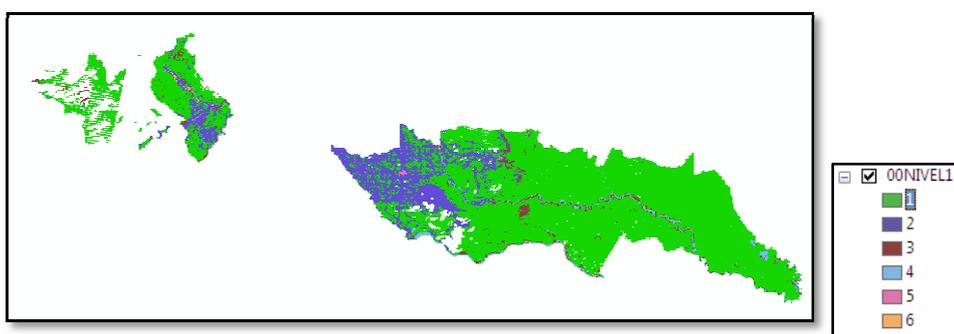


Figura 68. Cobertura en formato raster del año 2000
Fuente. Elaborado por el autor

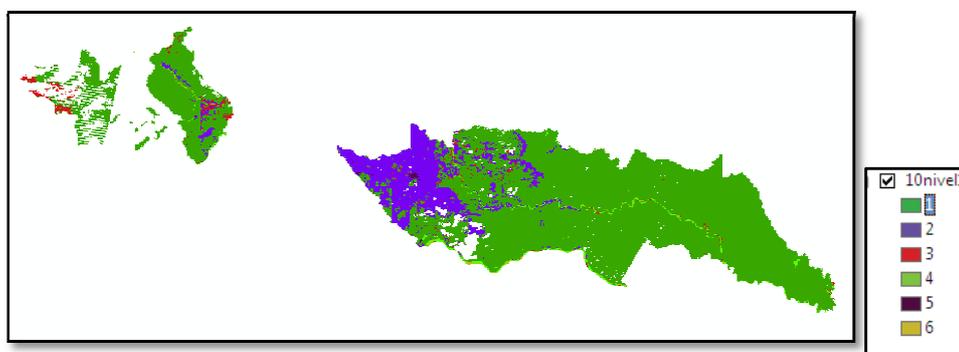


Figura 69. Cobertura en formato raster del año 2010
Fuente. Elaborado por el autor

Para determinar los cambios de cobertura entre dos períodos 1990 – 2000 y 2000 – 2010, se deberá realizar una operación entre las coberturas de cada época:

Ecuación 11. Fórmula para calcular el cambio de cobertura entre épocas
Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

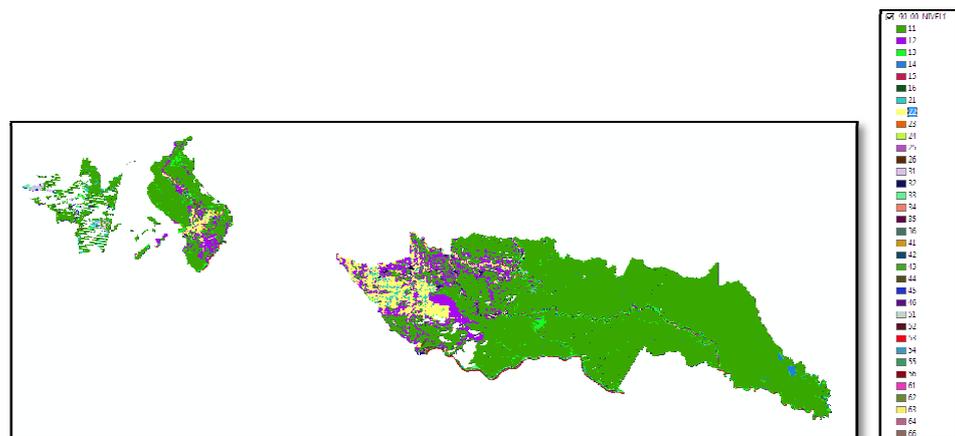


Figura 70. Cambio de coberturas entre los años 1990-2000
Fuente. Elaborado por el autor

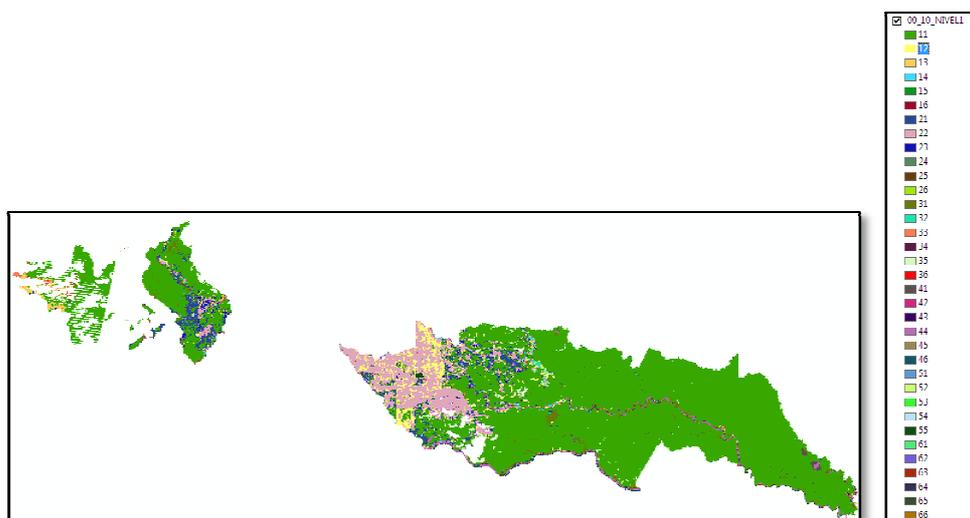


Figura 71. Cambio de coberturas entre los años 2000-2010
Fuente. Elaborado por el autor

3.11.1.2 Intersección y traslapos entre imágenes

Es necesario identificar el número de traslajos que existe entre imágenes en cada época, esto se puede obtener uniendo las ediciones visuales de cada año de acuerdo al área de estudio en de donde es posible obtener los códigos de las imágenes y las fechas de cada una de ellas. A estos archivos se les realiza un clip con la máscara de información de las tres épocas, realizado este procedimiento se procede a clasificar cada archivo en base a las fechas de las imágenes que los componen. Después, es necesario realizar un dissolve en base al campo Fecha, y se codificará cada fecha de la imagen por cada época de referencia: 1990, 2000 y 2010 (Tabla 3.10). La codificación se realiza con la finalidad de facilitar la identificación de los traslajos de las imágenes.

Tabla 3.9. Codificación por fecha de las imágenes satelitales

1990		2000		2010	
FECHAS	COD_IMA	FECHAS	COD_IMA	FECHAS	COD_IMA
07/08/1989	1	03/01/2001	1	03/02/2008	1
19/02/1991	2	12/09/2002	2	03/10/2010	2
23/08/1986	3	14/10/2002	3	05/01/2010	3
26/03/1987	4	18/11/2003	4	05/02/2007	4
		30/08/2000	5	07/02/2007	5
				07/10/2010	6
				07/12/2009	7
				10/09/2010	8
				11/08/2011	9
				12/08/2008	10
				13/01/2011	11
				13/09/2010	12
				15/03/2011	13
				21/05/2007	14
				22/09/2010	15
				23/11/2005	16
				24/05/2005	17
				27/09/2010	18
				29/01/2007	19
				29/04/2012	20
				31/12/2009	21

Fuente. Elaborado por el autor

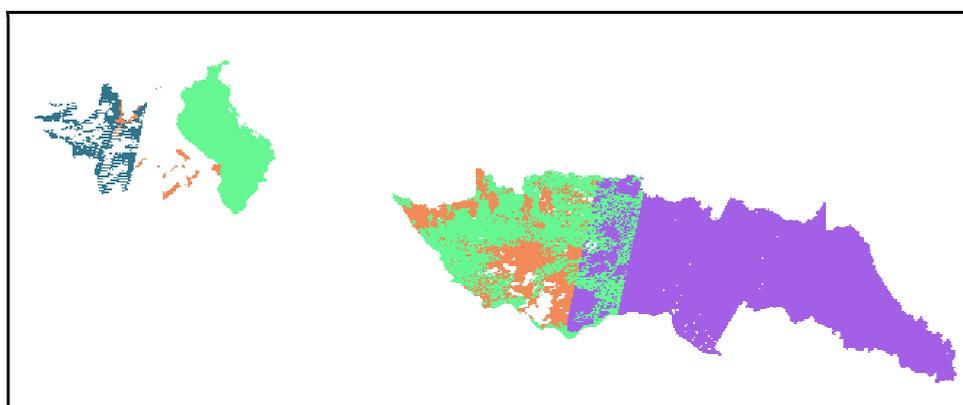


Figura 72. Fecha de imágenes del año 1990

Fuente. Elaborado por el autor

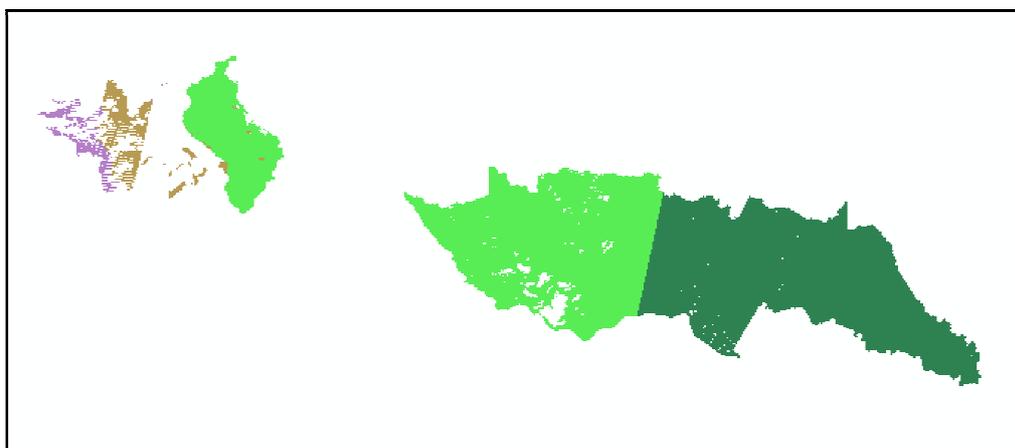


Figura 73. Fecha de imágenes del año 2000

Fuente. Elaborado por el autor

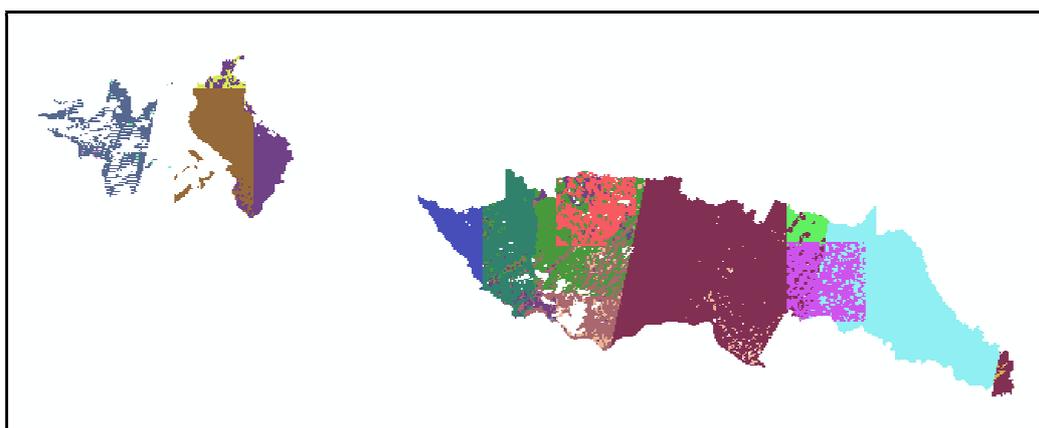


Figura 74. Fecha de imágenes del año 2010

Fuente. Elaborado por el autor

Una vez obtenidos los tres archivos raster por época de referencia, se utiliza la siguiente operación para determinar los traslapos en cada período

Ecuación 12. Traslapos de imágenes en cada período

Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

Esteraster que da como resultado de esta operación, en sus valores nos mostrara el número de intersecciones de imágenes en el período, para este archivo será necesario su reclasificación para una interpretación más sencilla

de los resultados, para lo cual se codificaran los códigos de intersección resultantes en orden ascendente.

Tabla 3.10. Codificación de la intersección de fechas en orden ascendente del periodo 1990-2000

CAMBIO DE FECHAS 1990-2000			
VALOR RASTER	FECHA 1990	FECHA 2000	RECLASS
102	07/08/1989	12/09/2002	1
103	07/08/1989	14/10/2002	2
104	07/08/1989	18/11/2003	3
202	19/02/1991	12/09/2002	4
205	19/02/1991	30/08/2000	5
301	23/08/1986	03/01/2001	6
302	23/08/1986	12/09/2002	7
303	23/08/1986	14/10/2002	8
401	26/03/1987	03/01/2001	9
403	26/03/1987	14/10/2002	10

Fuente. Elaborado por el autor

Tabla 3.11. Codificación de la intersección de fechas en orden ascendente del periodo 2000-2010

CAMBIO DE FECHAS 2000-2010			
VALOR RASTER	FECHA 2000	FECHA 2010	RECLASS
104	03/01/2001	05/02/2007	1
106	03/01/2001	07/10/2010	2
112	03/01/2001	13/09/2010	3
203	12/09/2002	05/01/2010	4
208	12/09/2002	10/09/2010	5
209	12/09/2002	11/08/2011	6
210	12/09/2002	12/08/2008	7
211	12/09/2002	13/01/2011	8
213	12/09/2002	15/03/2011	9
214	12/09/2002	21/05/2007	10
216	12/09/2002	23/11/2005	11
217	12/09/2002	24/05/2005	12
218	12/09/2002	27/09/2010	13
219	12/09/2002	29/01/2007	14
304	14/10/2002	05/02/2007	15

Continúa

308	14/10/2002	10/09/2010	16
312	14/10/2002	13/09/2010	17
316	14/10/2002	23/11/2005	18
319	14/10/2002	29/01/2007	19
408	18/11/2003	10/09/2010	20
501	30/08/2000	03/02/2008	21
502	30/08/2000	03/10/2010	22
505	30/08/2000	07/02/2007	23
507	30/08/2000	07/12/2009	24
510	30/08/2000	12/08/2008	25
517	30/08/2000	24/05/2005	26
518	30/08/2000	27/09/2010	27
521	30/08/2000	31/12/2009	28

Fuente. Elaborado por el autor

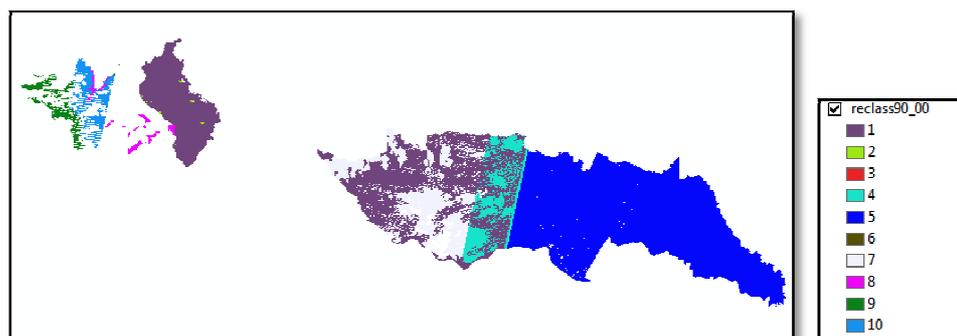


Figura 75: Traslapeo entre fechas de los períodos de 1990-2000

Fuente. Elaborado por el autor

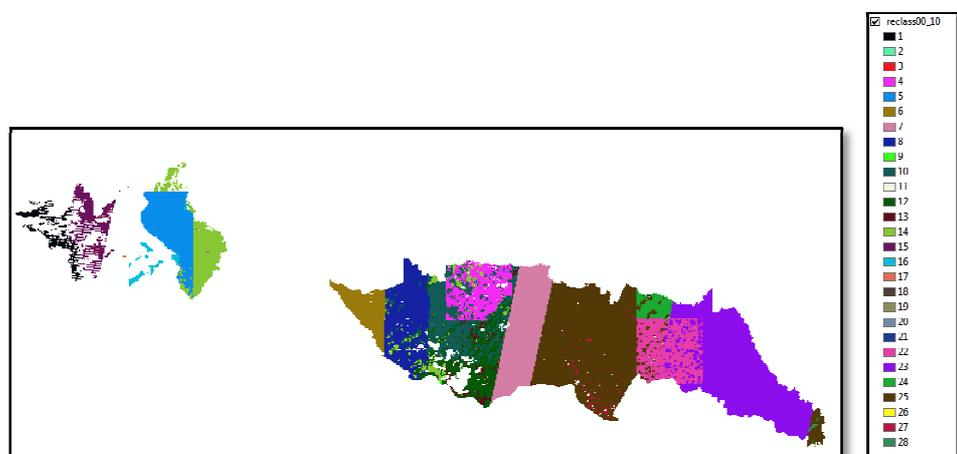


Figura 76: Traslapeo entre fechas de los períodos de 2000-2010

Fuente. Elaborado por el autor

3.11.1.3 Determinación de las matrices de transición

Para el cálculo de las matrices de transición se realizará de acuerdo a la determinación del cambio de coberturas dentro de cada intersección de imágenes del área de estudio, es decir, una vez establecidas las intersecciones o traslape de las imágenes en cada período de tiempo, es necesario identificar los cambios de coberturas de cada período dentro de estas intersecciones. Para esto se deberán utilizar los archivos de cambio de coberturas del año 1990-2000 y el 2000-2010 y el de traslapes de imágenes con estos dos archivos se realizará la siguiente operación

Ecuación 13. Cambio de Cobertura de 1990-2000

Fuente: Achard F., Hugh D. Eva, Stibig H-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau JP. 2002.

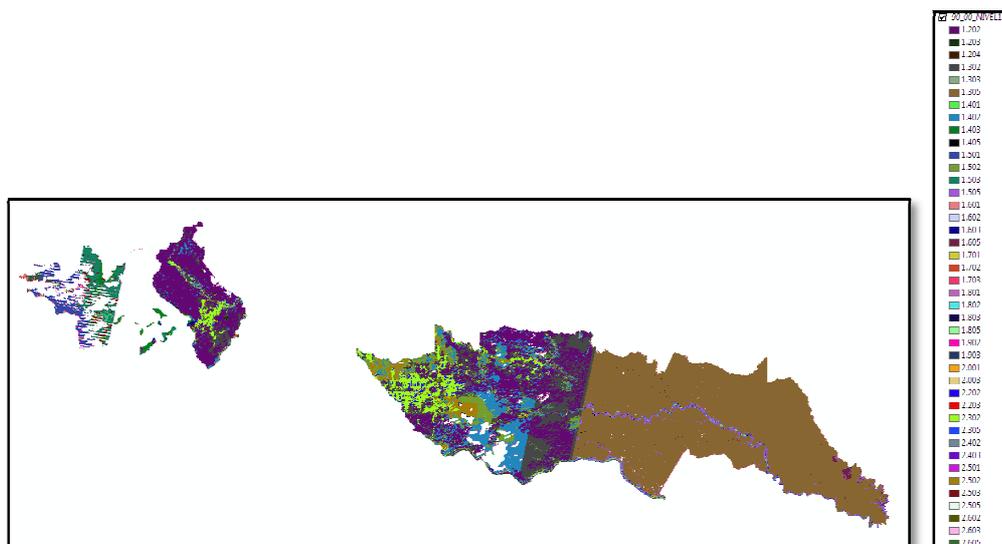


Figura 77: Cambio de Cobertura entre los años 1990-2000

Fuente. Elaborado por el autor

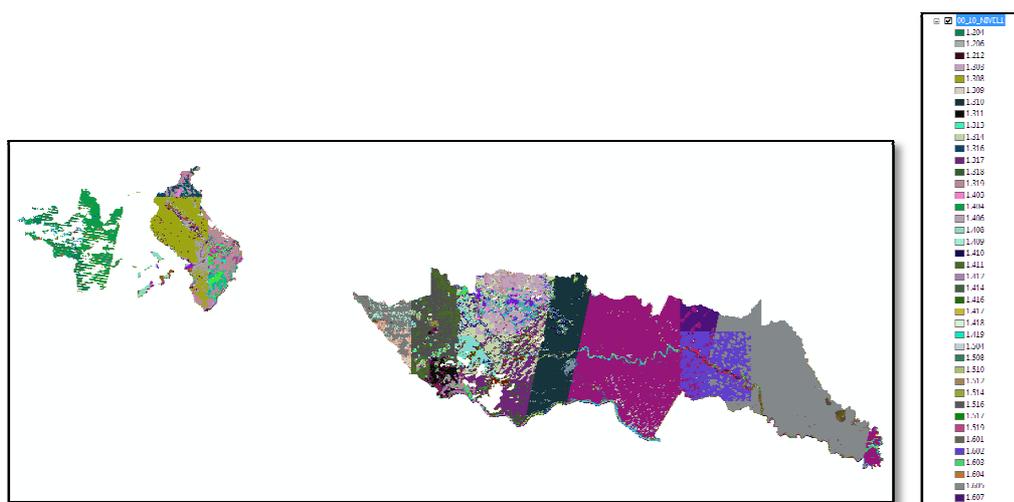
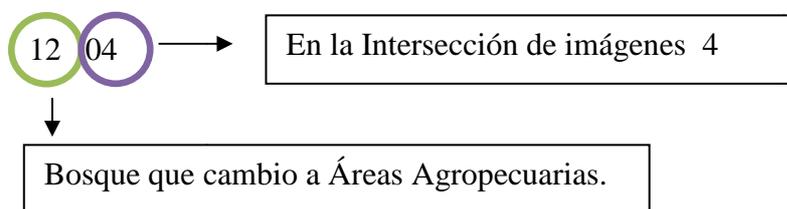


Figura 78: Cambio de Cobertura entre los años 2000-2010
Fuente. Elaborado por el autor

El resultado será una raster con valores de hasta 4 dígitos, que será ubicado por ejemplo:

1204, 1303, 1408, 1504, 1605.



La tabla de raster debe ser exportada como archivo .dbf que luego será copiado en una matriz que nos facilitará el cálculo de los cambios de cobertura por periodo. Abrimos el archivo .dbf y copiamos las dos columnas de VALUE y COUNT, en la hoja de cálculo del cambio de cobertura.

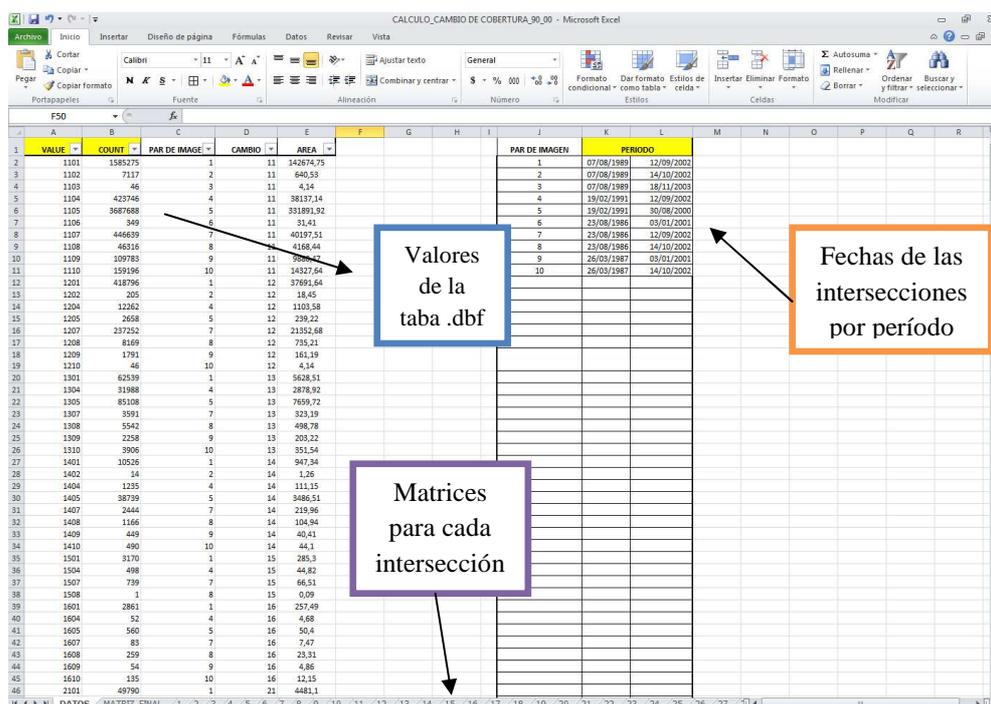


Figura 79. Hoja de Cálculo para la determinación del cambio de cobertura entre épocas
Fuente. Ministerio del Ambiente- SocioBoque

Dentro de la tabla, todos los campos que están resaltados con amarillo deben ser llenados. Las fechas deben ser registradas con anterioridad y guardadas en una tabla para poder insertarlas con mayor facilidad.

Para el cálculo del cambio de coberturas por periodo se basa en una matriz general, la cual contiene áreas normalizadas con valores ajustados a las épocas de referencia, en los cuales se han aplicado una serie de fórmulas que permiten su cálculo automático. Estas matrices han sido generadas para un número máximo de 50 intersecciones que es suficiente para el área de estudio. Después de insertar estos valores en las tablas principales de la matriz de datos, se desplegarán en las siguientes hojas de acuerdo a las intersecciones el número de par de imágenes, cambios de cobertura y el área que abarcan (tabla 3.12).

Tabla 3.12. Tabla de Cobertura por intersecciones

VALUE	COUNT	AR DE IMAGE	CAMBIO	AREA
1101	1585275	1	11	142674,8
1201	418796	1	12	37691,64
1301	62539	1	13	5628,51
1401	10526	1	14	947,34
1501	3170	1	15	285,3
1601	2861	1	16	257,49
2101	49790	1	21	4481,1
2201	312112	1	22	28090,08
2301	6971	1	23	627,39
2401	2820	1	24	253,8
2501	8008	1	25	720,72
2601	561	1	26	50,49
3101	4760	1	31	428,4
3201	23590	1	32	2123,1
3301	8106	1	33	729,54
3401	3485	1	34	313,65
3501	574	1	35	51,66
3601	765	1	36	68,85
4101	2404	1	41	216,36
4201	4115	1	42	370,35
4301	2787	1	43	250,83
4401	38803	1	44	3492,27
4501	2	1	45	0,18
4601	7198	1	46	647,82
5101	2	1	51	0,18
5201	1516	1	52	136,44
5301	19	1	53	1,71
5401	1	1	54	0,09
5501	2374	1	55	213,66
5601	4	1	56	0,36
6101	1104	1	61	99,36
6201	3075	1	62	276,75
6301	1945	1	63	175,05
6401	6043	1	64	543,87
6601	4054	1	66	364,86

Fuente. Ministerio del Ambiente - SocioBosque

Se deberán filtrar los datos de la columna “par de imagen” por orden ascendente, y copiar los valores desplegados a la hoja de cálculo 1 y así sucesivamente en las demás hojas a las cuales correspondan los valores de la intersección.

VALUE	COUNT	AR DE IMAGE	CAMBIO	AREA
1102	7117	2	11	640,53
1202	205	2	12	18,45
1402	14	2	14	1,26
2102	17	2	21	1,53
4102	48	2	41	4,32
4402	54	2	44	4,86

	DIA	MES	AÑO	DIA JULIANO
FECHA INICIAL:	7	8	1993	288
FECHA REFERENCIA INICIAL	1	1	1990	
FECHA FINAL:	14	10	2002	219
FECHA REFERENCIA FINAL	1	1	2000	
DOS BISIESTOS ENTRE FECHA	2			
DOS BISIESTOS ENTRE PERIOD	2			
DIAS JULIANOS ENTRE FECHA	4616			
DIAS JULIANOS ENTRE PERIOD	3652			
DIAS JULIANOS FECHA INICIAL/PE	584			

	BOSQUE	A. AGROP.	ARB.Y HE. DE AGUA	ZANTROPICAS	OTRAS AREAS	TOTAL
BOSQUE	640,53	18,45	0	1,26	0	660,24
A. AGROP.	1,53	0	0	0	0	1,53
V. ARB.Y HER	0	0	0	0	0	0
C. DE AGUA	0	0	0	4,86	0	4,86
Z. ANTRÓPICAS	0	0	0	0	0	0
OTRAS AREAS	0	0	0	0	0	0
TOTAL	642,06	18,45	0	6,12	0	666,63

	BOSQUE	A. AGROP.	ARB.Y HE. DE AGUA	ZANTROPICAS	OTRAS AREAS	TOTAL
BOSQUE	647,498347	13,95074	0	0,355465	0	662,4446
A. AGROP.	1,60207641	-1,682	0	0	0	-0,521761
V. ARB.Y HER	0	0	0	0	0	0
C. DE AGUA	0	0	0	4,7072	0	4,707209
Z. ANTRÓPICAS	0	0	0	0	0	0
OTRAS AREAS	0	0	0	0	0	0
TOTAL	648,6585548	12,30877	0	5,662674	0	666,63

Figura 80: Hoja de Cálculo de matrices de cambio y normalizaciones para el área de estudio.
Fuente. Ministerio del Ambiente - SocioBosque

En cada hoja de cálculo llenar los valores de los días bisiestos entre fechas. El resultado, vendrá desplegado en la hoja de cálculo “MATRIZ FINAL”, esta recopila toda la información de las matrices de cada hoja de cálculo de cada intersección.

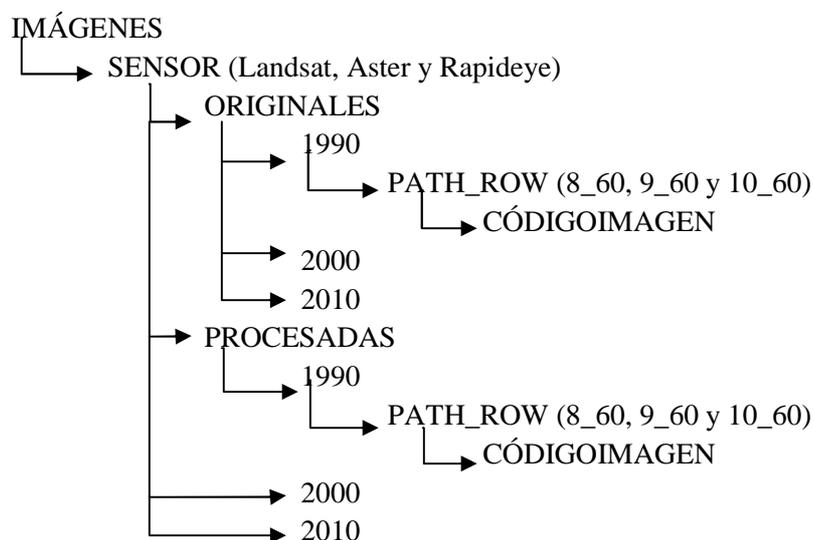
AREA DE ESTUDIO:	SHUSHUFINDI, CUYABENO Y GONZALO PIZARRO
PERIODO:	1990-2000
AÑOS:	10

	BOSQUE	A. AGROP.	V. ARB.Y HER	C.DE AGUA	Z. ANTRÓPICAS	OTRAS AREAS	TOTAL
BOSQUE	642003,3	30125,83216	15199,9793	4537,06534	256,6289609	264,893446	692387,74
A. AGROP.	5099,133	21499,82175	658,167653	206,883296	561,7884341	43,2393693	28069,033
V. ARB.Y HER	2055,499	1950,841857	3322,33247	436,672273	52,05950706	74,3865063	7891,7916
C.DE AGUA	0	300,1189291	600,51946	8183,75596	0,137436755	821,839819	9906,3716
Z. ANTRÓPICAS	0,798605	104,1809294	1,96678711	0,0688412	-43,8659094	0,27487351	63,424127
OTRAS AREAS	111,1729	216,8180863	438,704595	1432,5887	0	993,080028	3192,3643
TOTAL	649269,9	54197,61372	20221,6702	14797,0344	826,7484294	2197,71404	741510,72

Figura 81: Matriz de cambio de cobertura total del periodo 1990-2000.
Fuente. Elaborado por el autor

3.12 ALMACENAMIENTO DE DATOS GEOESPACIALES

La información generada en cada uno de los procesos desarrollados se almacenará en un carpeta para dicho fin llama TESIS DE ESTUDIO, y se subdividirá en varias carpetas que contengan los diferentes procesos en que se realizó el tema de estudio. Las imágenes satelital se procesará individualmente, y se almacenarán y documentarán todos los procesos ejecutados sobre una carpeta llamada PROCESADA. Así como también se guardaran las imágenes satelitales sin ningún tipo de procesamiento tal y como fueron entregadas en una carpeta llamada ORIGINALES, toda la información de imágenes satelitales se encontrará en una carpeta llamada IMAGENES.



En la CARPETA DE TRABAJO se almacenará todos los procedimientos que se realicen para la obtención de los resultados planificados.

NUBES

SEGMENTACIÓN

CLASIFICACIÓN FUSSY

AREAS DE TRABAJO NDVI

NDVI_TIFF

RASTERIZACIÓN

EDICIÓN_IMAGENES

INTERPRETACIÓN_UNION

PUNTOS DE CAMPO

MATRICES DE CONFUSIÓN

CAMBIO DE COBERTURA POR ÉPOCA

MAPAS

A continuación una breve descripción de las carpetas de almacenamiento:

La carpeta IMAGEN, se subdivide por sensores en la subcarpeta ORIGINALES donde se almacenará la imagen satelital original con sus metadatos y demás información recibida. La subcarpeta PROCESADA almacenará la imagen importada al formato de procesamiento que se vaya a utilizar y los subproductos generados en los procesos de corrección y ortorectificación.

En la carpeta CARTOGRAFÍA, almacenará los archivos de información base para el área de estudio.

La carpeta NUBES almacenará cada archivo de nubes generadas en zonas de nubosidad densa, este archivo debe estar en shapefile, en raster y reclassify.

La carpeta SEGMENTACIÓN almacenará los archivos generados, que es la segmentación, previa una clasificación de imágenes con su reporte.

La carpeta CLASIFICACION FUSSY se subdivide por sensores en las cuales contienen 4 subcarpetas, Pseudo Color, Cluster, Imagen Pix y fussy.

La carpeta AREAS DE TRABAJO NDVI almacenará los archivos generados en el proceso de obtención del Índice de vegetación NDVI de cada imagen de diferente sensor. En la carpeta NDVI TIFF se almacenará las imágenes NDVI en formato tiff.

En la carpeta EDICIONES VISUALES se encuentran los archivos segmentados por cada imagen con su respectiva edición visual. También los

segmentos para el área de estudio. La carpeta INTERPRETACION UNION, se encuentran las uniones de las ediciones visuales del área de estudio.

La carpeta PUNTOS DE CAMPO se encuentra los puntos de calibración, referencia y validación con sus respectivas fotos. También se encuentran los puntos randómicos generados. En la carpeta MATRIZ DE TRANSICIÓN se encuentran todas las matrices por edición visual e imagen.

En la carpeta CAMBIO DE COBERTURA POR ÉPOCA, se encuentran varias subcarpetas denominadas MASCARA, RASTER NIVEL1, FECHAS, CAMBIOS DE COBERTURA, MATRICES DE TRANSICIÓN. Y para finalizar tenemos la carpeta MAPAS donde se almacenan los MXD, los PDF y JPEG del área de estudio.

3.12.1 Almacenamiento en la Base de Datos Geográfica de Productos

La información generada se almacenará en una base de datos geográfica. Se utilizará una base de datos geográfica en formato *File Geodatabase* y se crearán *FeatureDatasets*, cada uno destinado a almacenar distintos productos finales. En la figura se puede ver el esquema de almacenamiento:

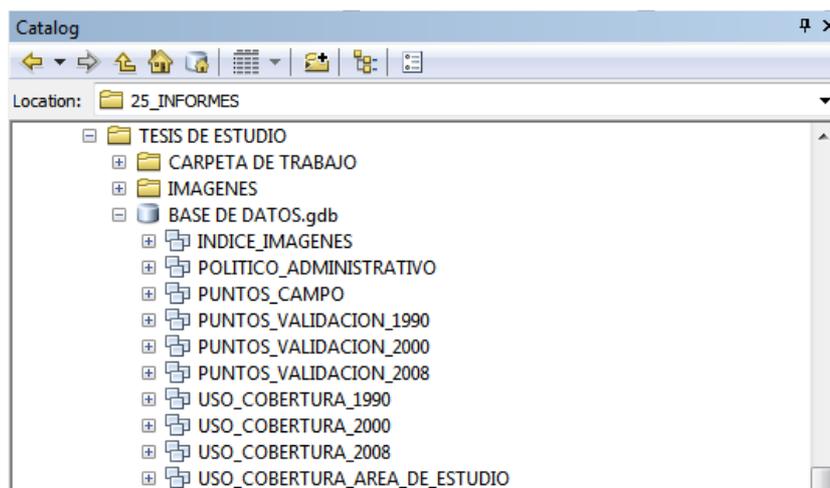


Figura 82: Esquema de almacenamiento interno de la base de datos geográfica de productos

Fuente. Elaborado por el autor

A continuación un listado de los *FeatureDatasets* y la información que almacenarán en la base de datos geográfica **BASE DE DATOS.gdb**

INDICE_IMAGENES: Almacenará archivos de geometría poligonal que contengan un índice gráfico de las imágenes satelitales procesadas del área de estudio.

POLITICO_ADMINISTRATIVO: Almacenará 4 *FeatureDataset* correspondientes al límite internacional, límite provincial, límite cantonal y límite parroquial.

PUNTOS_CAMPO: Almacenará los puntos GPS tomados en campo tanto de calibración, referencia y validación. Aquí se depositarán los archivos a nivel nacional provenientes del trabajo de campo.

PUNTOS_VALIDACION: Se almacenarán los puntos generados para realizar la validación de los mapas de uso y cobertura generados.

USO_COBERTURA_AÑO: Se almacenará el archivo de las ediciones visuales de cada año

USO_COBERTURA_AREA_DE_ESTUDIO: Se almacenará el archivo final con la cobertura de uso y cobertura vegetal.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA VEGETAL Y CAMBIO DE USO DE LA TIERRA DEL PERIODO DE ESTUDIO

En este capítulo se representan los resultados sobre cobertura vegetal y cambio de uso de suelo. Durante la realización de este trabajo, se evaluó el grado de error encada una de las etapas a realizar.

La matriz de confusión nos indica que todas las categorías se encuentran sobre el valor mínimo de exactitud (80%). El grado de error que presentan los datos es muy bajo, debido que al menos el 10% de los polígonos interpretados en las imágenes satelitales fueron visitadas en campo, esto ayudó a minimizar el grado de incertidumbre.

A través del análisis multitemporal de las imágenes de diferentes sensores de los años 1990,2000 y 2010 se obtuvieron los valores de cambio de cobertura en el área de estudio. Los resultados obtenidos en el área de estudio se presentan a continuación:

Las categorías que cubren la mayor parte de la zona de estudio en el año 1990, son el bosque (692380.022 ha) y áreas agropecuarias (28076.4679ha),

estas coberturas mencionadas cubren en conjunto el 97,16% del área de estudio.

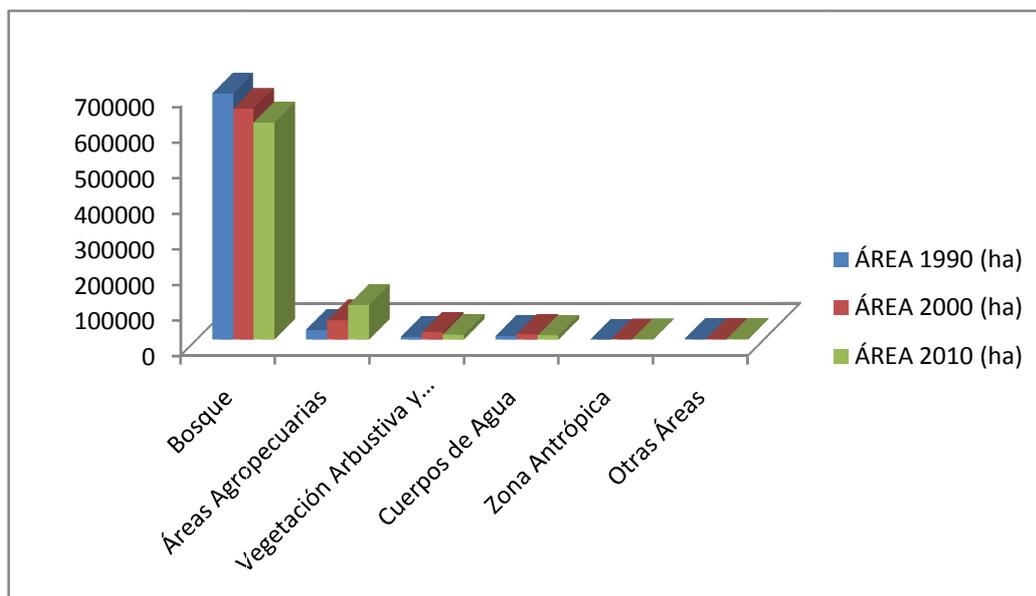


Figura 83. Distribución de las superficies por categoría y por año.

Fuente. Elaborado por el autor

Tabla 4.1 Superficie de pérdida o ganancia y porcentaje de cambio por categoría de cobertura y uso del suelo entre las épocas 1990, 2000 y 2010.

USO Y COBERTURA DEL SUELO	ÁREA 1990 (ha)	ÁREA 1990 (%)	ÁREA 2000 (ha)	ÁREA 2000 (%)	ÁREA 2010 (ha)	ÁREA 2010 (%)
Bosque	692380,02	93,37	649268,60	87,56	610278,13	82,75
Áreas Agropecuarias	28076,47	3,79	54199,82	7,31	97180,56	13,18
Vegetación Arbustiva y Herbácea	7891,83	1,06	20220,91	2,73	14421,29	1,96
Cuerpos de Agua	9906,51	1,34	14796,99	2,00	12016,89	1,63
Zona Antrópica	63,51	0,01	826,68	0,11	1226,71	0,17
Otras Áreas	3192,37	0,43	2197,72	0,30	2339,85	0,32
TOTAL	741510,72	100,00	741510,72	100,00	737463,42	100,00

Fuente. Elaborado por el autor

En el año 2000 las categorías que se encuentran mejor representadas en la zona es la misma que el año de 1990; y cubren el 94,87% del área de estudio. Para el año 2010 las categorías más representadas son bosque (610278.13 ha), áreas agropecuarias (97180.56 ha) que en su totalidad cubren el 95,93%.

La distribución espacial, de la cobertura vegetal y uso del suelo generalizadas del área de estudio de las épocas 1990, 2000 y 2010 se presentan en las mapas que se encuentran en el Anexo 6

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES ÍNDICES ESPECTRALES.

Lo que se trata de detectar son las áreas de cambio mediante el análisis visual de imágenes en color provenientes de varias fechas, el sistema de análisis digital de imágenes (ADI) permite obtener mezclas en color de 3 bandas de una imagen aplicando a cada una de ellas uno de los cañones de color disponible. (R,V,A). Si la imagen resultante aparece en tonos de color es debido a que las 3 bandas que se combinan presentan comportamientos espectrales diferentes. Si vemos un pixel en color es porque cuenta con un ND distinto en las 3 bandas ya que de otra manera se vería en tonos de gris. *Chuvienco (2009)*.

Para las composición de 2 fechas, resulta que se aplique el cañón rojo a la primera fecha y el verde a la segunda, dejando el azul vacío. Con este criterio aparecerá en tonos grises las áreas estables, en rojo las zonas que hayan reducido su ND entre las dos fechas y en cian (V+A) las que no hayan ganado. Manteniendo el criterio de rojo a la primera fecha y verde + azul a la segunda, los tonos rojos revelarían decremento de NDVI (en definitiva pérdida de cobertura vegetal debida a talas, cosechas, incendios), mientras que el cian indicaría aumento de NDVI (ganancia de vegetación). *Chuvienco (2009)*

. **Tabla 4.2** Modelo de interpretación para dos composiciones multitemporales.

IRC COLOR EN PANTALLA			
Bandas Espectrales	Tonos Rojo	Tonos verde	Tonos Amarillos
Tonos Rojos	Suelo a Agua	Suelo a Vegetación	Suelo Seco a húmedo
Tonos Verdes	Vegetación a Suelo	Agua a Suelo	Suelo Húmedo a seco
Tonos Amarillos	Vegetación	Vegetación	Sin Cambio

Fuente. Chuvieco, 2002

4.2.1 Diferencia entre Imágenes

Se resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogeneizadas radiométricamente y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre fechas, la zonas estables presentarán un valor cercano a cero mientras la que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivo o negativo).

La imagen de cambios presentará valores bajos o negativos (tonos oscuros) para las zonas que hayan reducido su ND, mientras lo más altos (tonos claros) corresponderá a aquellos que hayan ganado y los intermedios indican zonas estables.

4.2.1.1 Índice NDVI

Tomando imágenes multitemporales se procedió a realizar los índices para cada imagen satelital y luego proceder a restar los resultados.

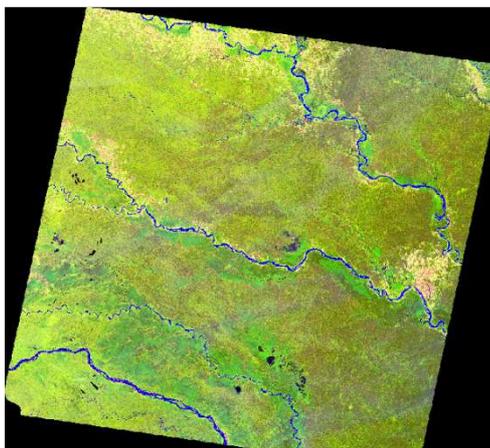


Figura 84. Imagen para el análisis del Índice NDVI.
Fuente. Ministerio el Ambiente - SocioBosque

Como la imagen se encuentra en formato tif, se le exporta a formato PIX:PCIDS, a este archivo se le agrega las imágenes que se van a trabajar en conjunto, y se añade un rasterlayer adicional de 32 bits para obtener los resultados del NDVI, con este raster se procede a calcular los NDVI utilizando la siguiente ecuación que se describe a continuación

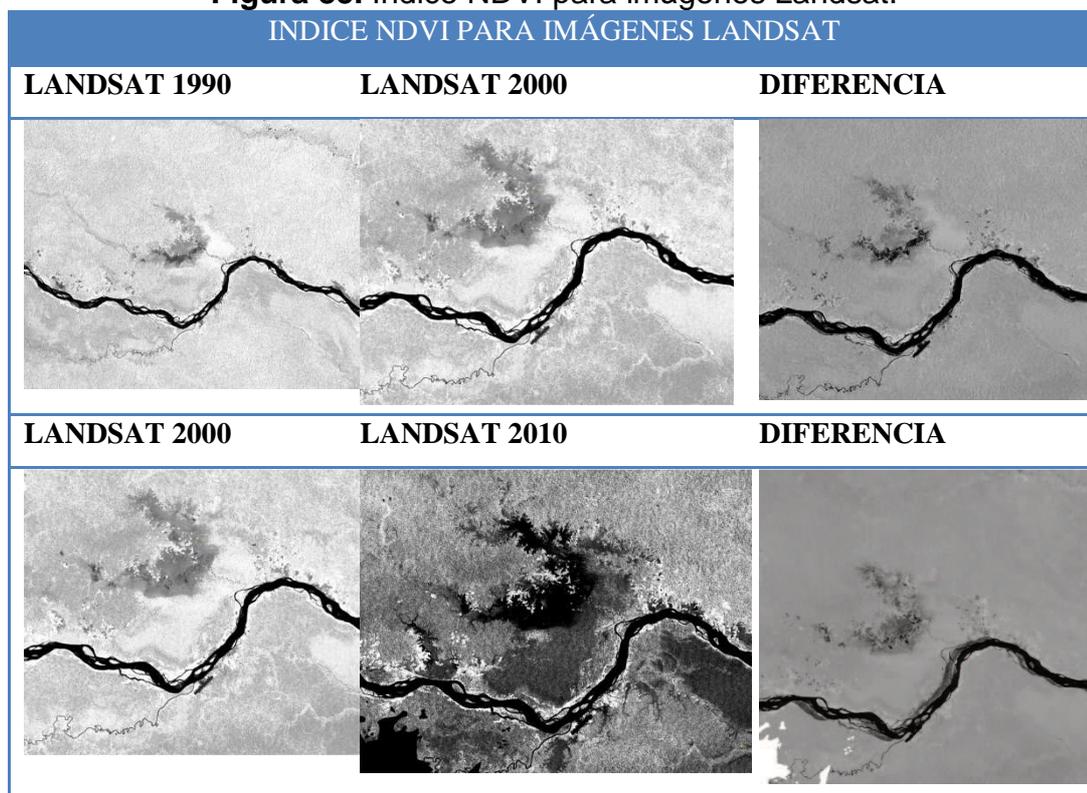
$$NDVI_i = \frac{\rho_{iIRC} - \rho_{iR}}{\rho_{iIRC} + \rho_{iR}}$$

Ecuación 14. Fórmula para calcular el NDVI entre diferentes imágenes de distintas épocas.

Fuente: Cartografía de áreas Quemadas a escala local por Oswaldo Padilla Almeida, Mayo 2001

Dónde:

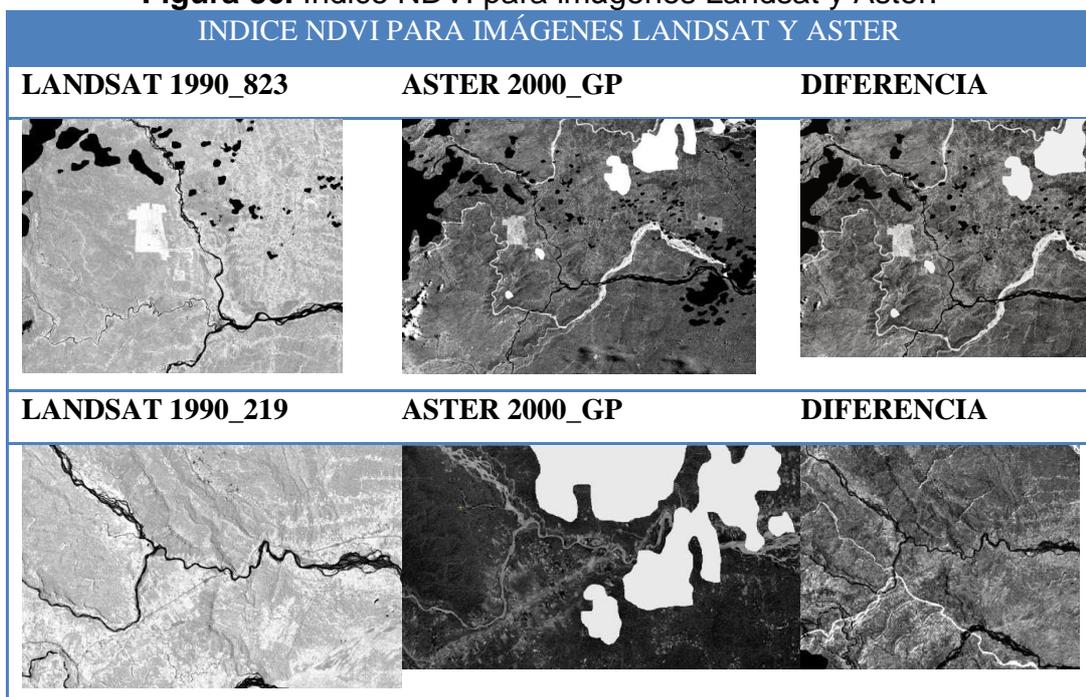
ρ_{iIRC} y ρ_{iR} indican las reflectividad del pixel i en la banda del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente.

Figura 85. Índice NDVI para imágenes Landsat.

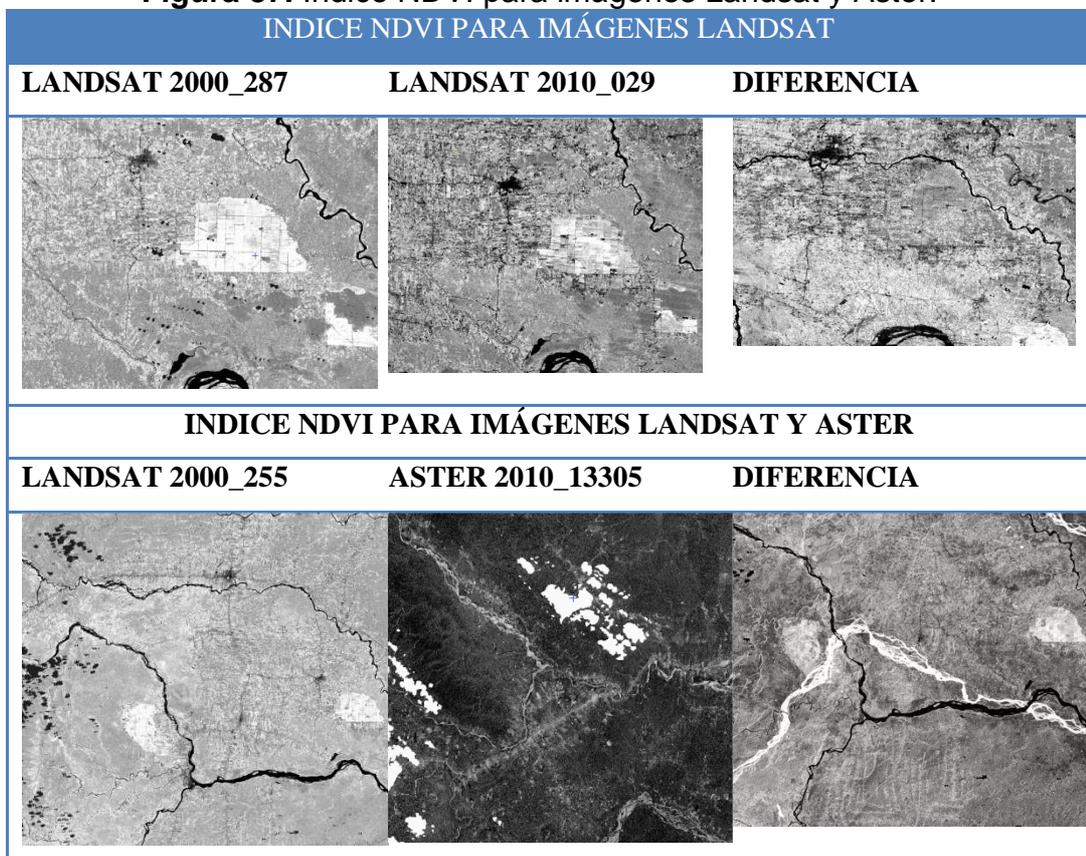
Fuente. Elaborado por el autor

La aplicación del índice a imágenes del mismo sensor de diferentes años podemos identificar que para el año 1990 no se puede discriminar las áreas, ya que su reflectividad no varía, pero cuando se obtiene la diferencia, se observa áreas definidas las cuales dan una mejor interpretación, se puede identificar que en las áreas de bosque no se ha presentado ningún cambio por eso se visualiza en tonalidades grises, bosque inundado presenta una capa fina de tonalidad oscuro , y claramente se ven las parcelas agrícolas.

Si aplicamos imágenes de sensores diferentes, en este caso Landsat y Aster observamos que los resultados de la diferencia, discrimina extensas áreas de actividad agrícola, pero actividades menores se hace más difícil de detectar contrastes y hasta se puede llegar a confundir con los que puede ser vegetación arbustiva.

Figura 86. Índice NDVI para imágenes Landsat y Aster.

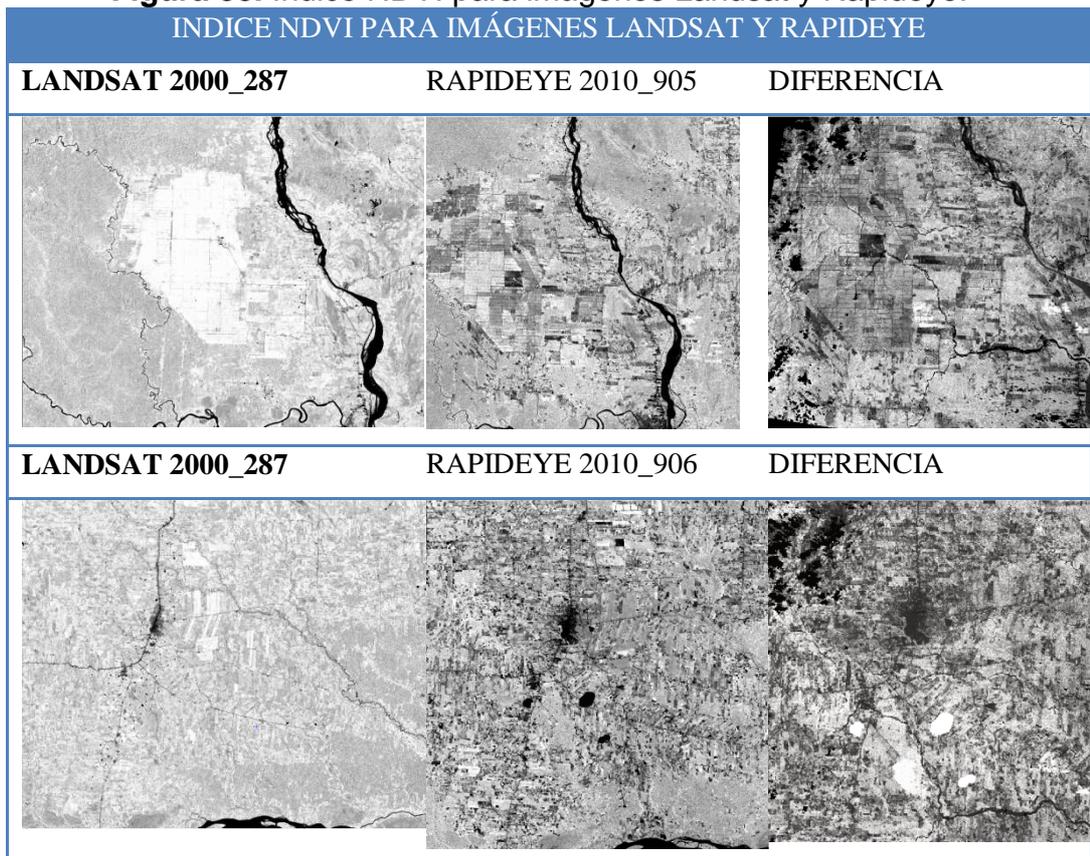
Fuente. Elaborado por el autor

Figura 87. Índice NDVI para imágenes Landsat y Aster.

Fuente. Elaborado por el autor

Se puede observar que al obtener los NDVI de cada imagen por separado, la imagen Aster, discrimina con mucha facilidad áreas donde existe actividad antrópica, áreas de bosque y cuerpos de agua, pero al momento de obtener la diferencia entre estas imágenes se vuelve más oscura y no permite diferenciar con facilidad áreas intervenidas.

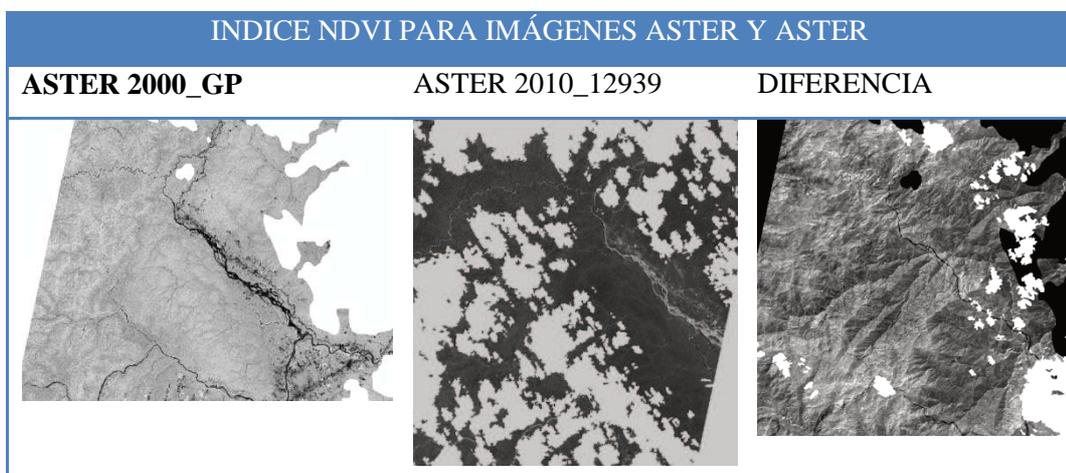
Figura 88. Índice NDVI para imágenes Landsat y Rapideye.



Fuente. Elaborado por el autor

Aplicando el índice para imágenes Landsat y Rapideye proporciona una buena discriminación entre áreas de actividad agrícola con áreas urbanas e infraestructura (carreteras), cuerpos de agua hasta los bosquesillos que se encuentran entre cultivos. Aunque se puede llegar a confundir los cultivos que tengan mucha reflectancia con áreas descubiertas.

Figura 89. Índice NDVI para imágenes Aster.



Fuente. Elaborado por el autor

Para imágenes Aster proporciona una buena discriminación por separado ya que se puede identificar áreas donde se ha perdido coberturas boscosa por actividad antrópica, al momento de obtener la diferencia entre ambas imágenes, su resultado no permite diferenciar el uso del suelo que se pueda estar dando, hasta se puede llegar a confundir.

Como resultado final de esta metodología se obtuvo imágenes con valores que varían de entre 1 y -1, los valores negativos representan pérdida de cobertura vegetal distinguiendo la ganancia y pérdida de valor digital respectivamente. En zonas con valores a 0 no se ha generado cambio alguno.

4.3 CONCLUSIONES

- ❖ Se tiene que hacer correcciones radiométricas y geométricas para estandarizar la información, que permita combinar imágenes de diferentes sensores para que no genere errores al momento de procesarlas, sin embargo, depende de las características de cada una de las imágenes que se utilizarán. Para las imágenes satelitales Rapideyeno se realizó ninguna corrección ya que tenían un nivel de procesamiento completo.

- ❖ La exactitud del proceso de ortorectificación depende del número y distribución de los puntos de control, como de la exactitud de sus coordenadas. Se tomó los siguientes criterios:
 - Seleccionar un mínimo de 20 puntos por imagen en áreas con poco relieve.
 - Distribuir los puntos de forma homogénea en la imagen.

- ❖ El utilizar imágenes de diferentes sensores ayuda a optimizar la información del área de estudio, ya que siempre se tendrá problemas con la nubosidad.

- ❖ El utilizar imágenes de alta resolución mejora la calidad del producto a presentarse ya que tiene mayor detalle de lo que pasa en la realidad, pero sus costos dificulta la integración de estas a un estudio que se quiera realizar.

- ❖ En el método de segmentación utilizado para la clasificación e interpretación de una imagen es necesario, que los segmentos vayan acorde con el cambio de transición de coberturas vegetales, mientras mayor sea la discriminación de clases, los resultados de la interpretación irán acorde con la realidad.

- ❖ El método de validación que se está utilizando, es más robusto ya que incorporando técnicos en análisis multitemporal, que aportan un resultado acorde con la realidad, validar solo con puntos de campo sería lo esperado pero suele ser muy costoso y no abarcaría la totalidad del área de estudio.
- ❖ En el análisis del índice NDVI, se observa en tonos oscuros las zonas donde el decremento de NDVI ha sido más intenso, y los tonos claros son las zonas donde su NDVI ha incrementado, esto coincide para la identificación de cobertura y uso de suelo, mientras que en tonos grises corresponden a zonas que no han alterado su cobertura vegetal entre las fechas de comparación.
- ❖ El método de diferencia multitemporal, obtuvo excelentes resultados combinando imágenes Landsat y Rapideye, discriminando, delimitando áreas de cobertura vegetal, útil para la interpretación de estudio multitemporal. En imágenes Landsat sus resultados fueron favorables y aún mayor en zonas donde no han tenido una variación en su cobertura vegetal. En imágenes Landsat, Aster sus resultados fueron aceptables ya que ofrece una discriminación pero que tiende a confundir al momento de interpretar de una cobertura a otra.
- ❖ En general, los cantones de Cuyabeno, Shushufindi y Gonzalo Pizarro presentan una pérdida de su cobertura vegetal en los últimos 20 años.
- ❖ La clase que sufrió el mayor aumento en el área de estudio, son las áreas agropecuarias, las cuales presentan en el año 1990 el 3,79% y ha ido incrementado durante los 20 años al 13,18%

4.4 RECOMENDACIONES

- ❖ Para correcciones radiométricas y geométricas los metadatos de cada una de las imágenes son necesarias para sus correcciones radiométricas.
- ❖ En la ortorectificación es importante escoger puntos que sean claramente identificables en la imagen que se está corrigiendo, escoger puntos de control asociados a elementos del paisaje estables en el tiempo como por ejemplo: cruce de vías, obras civiles, aeropuertos, elementos estables de la red hidrográfica y cuerpos de agua no estacionales.
- ❖ En zonas donde existe mucha nubosidad, y es imposible obtener información espacial, se recomienda utilizar nuevas metodologías como por ejemplo utilizar imágenes: Radar, Lidar entre otras, ya que existen nuevos estudios aplicados a temas de cambio de cobertura vegetal y cálculo de biomasa.
- ❖ Hacer convenios con empresas públicas o privadas que procesen imágenes de alta resolución, sería factible para estudios de investigación que se requieran.
- ❖ Al momento del procesamiento de la segmentación, tiene que hacerse con el mayor detalle posible, para poder tener una clasificación de acuerdo con la realidad.
- ❖ Al no llegar a un acuerdo de criterios entre las tres validaciones individuales, se tomará un cuarto validador para obtener la clase más predominante.

- ❖ Para el análisis del índice NDVI utilizando imágenes de diferentes sensores, se recomienda trabajar con las máscaras generadas, para no tener problemas con los valores de reflectancia que generan las nubes.
- ❖ Utilizar la combinación de imágenes de diferentes sensores para el análisis de índice NDVI ayuda a la discriminación e interpretación de una cobertura a otra, hasta se pueden utilizar los resultados generados para obtener nuevas clasificaciones.
- ❖ Usar productos de cambio de cobertura de diferentes instituciones para validar los mapas de cambio producidos.
- ❖ En 20 años se ha producido una deforestación considerable por actividades agrícolas y antrópicas generadas por el ser humano, debemos crear un pensamiento de preservación, motivar a la forestación y conservar nuestros bosques nativos.

4.5 BIBLIOGRAFIA

- (s.f.). Obtenido de http://www.ambiente.gob.ec/userfiles/5997/file/Mapa%20de%20Deforestaci%C3%B3n%20Hist%C3%B3rica%20del%20Ecuador%E2%80%9D_%20Implementaci%C3%B3n%20en%20%20tres%20Sitios%20Piloto.pdf
- (s.f.). Obtenido de <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>
- (s.f.). Obtenido de http://www.uc.cl/agronomia/c_extension/Revista/Ediciones/tecnologia.pdf
- Ambiente, M. d. (2010). Aprovechamiento de los recursos forestales. *Aprovechamiento de los recursos forestales*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Ambrosio, G., González, J., & Arévalo, V. (s.f.). *Detección de Cambios urbanos mediante comparación de imágenes multitemporales*. Obtenido de <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/viar/96.pdf>

- Change, I. P. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry Projects*. Geneva, Switzerland.
- Chuvieco. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid.
- Chuvieco. (2007). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Ariel.
- Congalton, R. G. (1991). *A Review of Assessing the Accuracy of classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sensing of Environment*.
- Congalton, R. G., Oderwald, R. G., & Mead, R. A. (1983). *Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.
- Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustibles con imágenes Landsat TM.* (s.f.). Obtenido de http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/IX_2/Riano_David.PDF
- Gilabert, M A; González, Piqueras; García Haro, F J;. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*.
- Padilla, O. A. (2005). Cartografía de áreas quemadas a Escala Local.
- Sacristán, R. F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista científica de la Sociedad Española de Acuicultura*.
- Soria, R. C., Ortiz, F. I., & Volke, V. (1998). Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*.
- Teledetección, A. E. (s.f.). *Fusión de imágenes multiespectrales y pancromáticas: nuevas alternativas metodológicas basadas en las transformaciones wavelet discreta empleando el algoritmo Mallat*. Obtenido de <http://www.aet.org.es/revistas/revista18/AET18-06.pdf>