

DETECCIÓN DE CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE LOS
BOSQUES UTILIZANDO CLASIFICACIÓN DIRECTA DE
CAMBIOS Y POST - CLASIFICACIÓN

Tesis de Maestría presentada por

ALONSO DANILO GRANJA VILLAMIL

Ante las Facultades de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
y de Ingeniería para optar por el grado académico de

MAGÍSTER EN GEOMÁTICA

DIRECTOR DE TESIS: MANUEL PERALVO

CODIRECTOR DE TESIS: JORGE SISTI

JURADO DE TESIS: ANALÍA ARGERICH

CLAUDIA INFANTE

ALEJANDRO MAGGI

Lugar y fecha de la defensa oral y pública: La Plata, 19 de
Junio de 2020

ÍNDICE

RESUMEN	9
1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 ANTECEDENTES	11
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA Y POLÍTICA DE LA ZONA	13
1.3.1 DESCRIPCIÓN PRODUCTIVA, SOCIOECONÓMICA Y DEMOGRÁFICA	15
1.3.2 ÁREAS BAJO CONSERVACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL.....	17
2 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN	19
2.1.1 DEFINICIÓN.....	19
2.1.2 COMPONENTES	19
2.1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	19
2.1.4 SENSORES REMOTOS.....	22
2.1.5 RESOLUCIÓN EN LOS SENSORES REMOTOS.....	23
2.1.5.1 Resolución temporal.....	23
2.1.5.2 Resolución espacial.....	23
2.1.5.3 Resolución radiométrica	24
2.1.5.4 Resolución espectral.....	24
2.1.6 APLICACIONES	25
2.1.7 SENSOR LANDSAT	26
2.1.7.1 Características técnicas del sensor Landsat 7 y 8.....	26
2.1.8 SENSOR RAPIDEYE	28
2.1.8.1 Características técnicas del sensor Rapideye.....	29
2.1.9 CORRECCIONES A LAS IMÁGENES SATELITALES.....	29
2.1.9.1 Corrección geométrica	30
2.1.9.2 Corrección atmosférica.....	30
2.1.9.3 Corrección radiométrica	30
2.1.10 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	31
2.1.10.1 Segmentación de imágenes	31
2.1.10.2 Clasificación de imágenes	32
2.1.11 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS.....	32
2.1.12 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS.....	32

2.1.12.1	Operaciones algebraicas	32
2.1.12.2	Transformaciones	32
2.1.12.3	Clasificación supervisada	33
2.1.12.4	Modelos avanzados	33
2.1.12.5	Análisis visual.....	33
2.1.13	EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD.....	34
3	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	37
3.1	DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	37
3.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	40
3.3	ADQUISICIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INSUMOS	41
3.4	CORRECCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES	42
3.5	LEYENDA TEMÁTICA	43
3.5.1	DEFINICIONES OPERATIVAS PARA EL NIVEL I	44
3.5.2	DEFINICIONES OPERATIVAS PARA LOS MAPAS DE CAMBIOS DE COBERTURA BOSCOSA.....	44
3.6	CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES	45
3.6.1	NORMALIZACIÓN RADIOMÉTRICA.....	45
3.6.2	SEGMENTACIÓN	48
3.6.2.1	SEGMENTACIÓN POST-CLASIFICACIÓN.....	48
3.6.2.2	SEGMENTACIÓN DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS.....	48
3.7	CLASIFICACIÓN TEMÁTICA.....	49
3.7.1	MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN	49
3.7.2	MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS	50
3.8	EDICIÓN VISUAL.....	51
3.8.1	MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN	51
3.8.2	MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS	51
4	CAPÍTULO 4. RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSION.....	52
4.1	COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN.....	52
4.1.1	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA BOSCOSA MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN	52
4.1.2	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA BOSCOSA MÉTODO DETECCIÓN DE CAMBIOS DIRECTO	54
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS MAPAS DE CAMBIO UTILIZANDO LOS DIFERENTES MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN	56
4.3	EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD	56
4.3.1	DISEÑO DE MUESTREO MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN.....	56
4.3.2	DISEÑO DE MUESTREO MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS.....	58

4.3.3	DISEÑO DE RESPUESTA MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN.....	59
4.3.4	DISEÑO DE RESPUESTA MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS.....	64
4.3.5	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
4.3.5.1	Análisis de resultados periodo 2001-2013 post – clasificación y clasificación directa.....	67
4.3.5.2	Análisis de resultados periodo 2013-2014 post – clasificación y clasificación directa.....	69
4.4	IMPLICACIÓN DEL MONITOREO DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA.....	70
4.4.1	ANÁLISIS ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN Y REGENERACIÓN	70
4.4.2	MONITOREO DE LAS DINÁMICAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA.....	71
5	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
6	BIBLIOGRAFÍA.....	75
7	ANEXOS.....	80
8	ACRÓNIMOS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantones dentro del área de estudio.....	13
Tabla 2. Coordenadas de la zona de estudio	14
Tabla 3. Sector biogeográfico del área de estudio	15
Tabla 4. Datos de población urbana, rural y pobreza de las diferentes parroquias.....	15
Tabla 5. Bosque y vegetación protectora presentes en el área de estudio	18
Tabla 6. Ejemplo de sensores remotos y su resolución temporal	23
Tabla 7. Ejemplo de sensores remotos y su resolución espacial	24
Tabla 8. Ejemplo de sensores remotos y su resolución espectral	25
Tabla 9. Niveles de procesamiento de productos Landsat	26
Tabla 10. Características técnicas del sensor Landsat 7	27
Tabla 11. Bandas espectrales del sensor ETM+	27
Tabla 12. Características técnicas del sensor Landsat 8	27
Tabla 13. Bandas espectrales del sensor OLI	28
Tabla 14. Características Técnicas de imágenes RapidEye	29
Tabla 15. Bandas espectrales del sensor Rapideye	29
Tabla 16. Ecosistemas del área de estudio	37
Tabla 17. Deforestación en los ecosistemas boscosos para los periodos 1990 a 2014.	38
Tabla 18. Categoría de cultivos y cobertura agropecuaria que se encuentran dentro del área de estudio	38
Tabla 19. Dinámica de la cobertura y uso de la tierra del área de estudio	39
Tabla 20. Imágenes satelitales utilizadas.....	40
Tabla 21. Leyenda Temática	43
Tabla 22. Definiciones operativas Nivel I (IPCC)	44
Tabla 23. Definiciones operativas de cambio de cobertura boscosa	45
Tabla 24. Resultados de los mapa de cobertura y uso de la tierra 2001, 2013 y 2014.	52
Tabla 25. Resultados del mapa de cambio post-clasificación de cambio de cobertura boscosa 2001 – 2013 y 2013 - 2014	54
Tabla 26. Resultados del mapa de detección directa de cambios de la cobertura boscosa 2001 – 2013	55
Tabla 27. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2001 – 2013 método de post-clasificación.....	56
Tabla 28. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2013-2014 método de post-clasificación.....	56
Tabla 29. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación.....	57
Tabla 30. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación.....	57
Tabla 31. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2001 – 2013 método de clasificación directa	58
Tabla 32. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2013-2014 método de clasificación directa	58
Tabla 33. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa	59
Tabla 34. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa	59

Tabla 35. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación.....	60
Tabla 36. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación.....	60
Tabla 37. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación.....	61
Tabla 38. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2013-20014, método de post-clasificación.....	61
Tabla 39. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2001-2013, método de post-clasificación.....	62
Tabla 40. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2013-2014, método de post-clasificación.....	62
Tabla 41. Error estándar calculado para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación..	63
Tabla 42. Error estándar calculado para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación..	63
Tabla 43. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación	63
Tabla 44. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación	63
Tabla 45. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa.....	64
Tabla 46. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa.....	64
Tabla 47. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa.....	65
Tabla 48. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2013-20014, método de clasificación directa.....	65
Tabla 49. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2001-2013, método de clasificación directa.....	65
Tabla 50. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2013-2014, método de clasificación directa.....	66
Tabla 51. Error estándar calculado para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa.....	66
Tabla 52. Error estándar calculado para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa.....	66
Tabla 53. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa..	67
Tabla 54. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa..	67
Tabla 55. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación	67
Tabla 56. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación.....	68
Tabla 57. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa..	68
Tabla 58. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2001 - 2013, método de clasificación directa.....	68
Tabla 59. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación	69
Tabla 60. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación.....	69
Tabla 61. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa..	70
Tabla 62. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2013 - 2014, método de clasificación directa.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones del espectro electromagnético. Fuente: (American Society of Photogrametry, 1975)	20
Figura 2. Firma espectral de vegetación Fuente: (Tucker y Sellers, 1986)	21
Figura 3. Diagrama de la metodología utilizada. Fuente: Propia	40

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Área de Estudio	14
Mapa 2. Áreas bajo conservación y manejo ambiental	17
Mapa 3. Imágenes satelitales Landsat utilizadas	41
Mapa 4. Imágenes Landsat normalizadas	47
Mapa 5. Mapas CUT 2001, CUT 2013 y CUT 2014	53
Mapa 6. Mapas Post Clasificación CCUT 2001-2013, CCUT 2013-2014	54
Mapa 7. Mapas Clasificación Directa CCUT 2001-2013, CCUT 2013-2014.....	55

RESUMEN

El enfoque de este estudio es apoyar el monitoreo relacionado con la dinámica de la cobertura boscosa en el bosque alto andino, un ecosistema de gran importancia para el Ecuador y la región Andina debido a que se encuentran sobre los ecosistemas forestales andinos que representan a los más diversos y amenazados ecosistemas terrestres. La propuesta metodológica utiliza como insumos imágenes satelitales de mediana resolución con políticas de libre acceso y una importante cobertura histórica que permita contar con un monitoreo sustentable.

Debido a la permanente presencia de nubes en estos ecosistemas, una de las consideraciones es la elección de la escala temporal para la generación del monitoreo, con el propósito de contar con una mayor amplitud temporal para la adquisición de imágenes satelitales y lograr así mayor superficie efectiva sin nubes.

La propuesta es comparar y validar los resultados de detección de cambios de cobertura boscosa utilizando métodos de clasificación directa y post-clasificación, además de realizar la evaluación de la exactitud de los resultados con imágenes de mediana resolución para los periodos 2001 – 2013 y 2013 – 2014.

Palabras clave: Monitoreo, clasificación directa, post-clasificación.

1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso y la disponibilidad gratuita de sensores remotos, acompañado por las diferentes técnicas de procesamiento de las imágenes satelitales es un tema de gran importancia debido a su amplio espectro de uso con la finalidad de entender las relaciones que tenemos con el ambiente.

Una de las aplicaciones más importantes relacionadas con la observación de la tierra y con las políticas de acceso a los insumos de imágenes satelitales, es la detección temporal de cambios debido a que podemos contar con información multitemporal precisa y de calidad de la cobertura global de la tierra en un corto periodo de tiempo, de forma sustentable.

La detección de cambios se define como el proceso de identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno de observación de la tierra en diferentes fechas (Singh, 1989). Existen cambios importantes ocasionados en el territorio producto de las actividades antrópicas, entre estos procesos, uno de los de mayor relevancia son los relacionados con la pérdida de la cobertura boscosa que conlleva consecuencias adicionales como la pérdida de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos.

El enfoque de este estudio está centrado en apoyar el monitoreo relacionado con la dinámica de la cobertura boscosa en el bosque alto andino, un ecosistema de gran importancia para el Ecuador y la región Andina debido a que los Andes tropicales albergan los ecosistemas tropicales de altura más diversos del mundo, con más de 45.000 plantas vasculares y 3.400 especies de vertebrados en apenas el 1% de la masa continental de la tierra (Myers, 2000). Estos ecosistemas proveen servicios fundamentales para los países andinos, que dependen de la provisión de agua para el consumo humano y la generación de energía hidroeléctrica (Bradley y Mustard 2006). La provisión de agua para los sistemas productivos constituye el elemento clave para la seguridad alimentaria y el bienestar, en particular de los pequeños agricultores que dependen de estos servicios ecosistémicos para el mantenimiento de sus formas de vida (Young y Lipton 2006).

Existen dos cambios de la cobertura boscosa que presentan diferencias sustanciales independientes del ecosistema boscoso, los cuales son: deforestación y regeneración. Deforestación es un proceso de conversión antrópica del bosque en otra cobertura y uso de la tierra. Regeneración es la recuperación del bosque en ausencia de la intervención humana después de haber sufrido anteriormente una alteración. El monitoreo de este cambio de la cobertura boscosa es esencial, por ejemplo, para responder actualmente a los requerimientos para acceder a los mercados internacionales de carbono bajo los mecanismos de emisiones por deforestación y degradación de los bosques y la función de conservación de reservorios de carbono, manejo sostenible de bosques e incremento de contenidos de carbono de los bosques (REDD+).

La preocupación global en términos de monitoreo de los ecosistemas requiere mayor atención sobre el cambio de la cobertura forestal. Recientemente con el desarrollo y políticas de acceso a imágenes satelitales de alta resolución espectral y espacial, la detección de cambios de la cobertura boscosa usando imágenes satelitales es una técnica eficiente para analizar la alta complejidad de las dinámicas de la cobertura boscosa. Detección de cambios automática en

imágenes de una escena adquirida en diferentes épocas es uno de los temas más interesantes en el campo de la teledetección (Huang et al. 2009).

Uno de los principales retos de generar un monitoreo de ecosistemas de montaña es que presentan patrones excepcionales de recambio de especies y comunidades, debido, en parte, a la enorme heterogeneidad de hábitats producto de los fuertes gradientes ambientales. (Kessler et al. 2001). Además, los bosques montanos debajo de los 1.500 m.s.n.m., son tan diversos como los de tierras bajas y presentan patrones de composición florística similares a éstos (Gentry 1995).

Adicionalmente debido a la permanente presencia de nubes en estos ecosistemas, una de las consideraciones importantes es la elección de la escala temporal para la generación del monitoreo de cambios sobre la cobertura boscosa, con el propósito de contar con una mayor amplitud temporal para la adquisición de imágenes satelitales y lograr así mayor superficie efectiva sin nubes. Se puede explorar además el uso de otras fuentes de información directa como es el caso de imágenes radar con la finalidad de cubrir las áreas de nubosidad permanente. A los fines de seguir el manual de buenas prácticas en la generación de la evaluación de la exactitud de los resultados, se sugiere contar con insumos de mayor resolución espacial y que preferentemente correspondan al mismo periodo del monitoreo, aun cuando signifique una complejidad adicional el acceso a un conjunto de datos principales robustos que cumplan con los requisitos mínimos sugeridos.

La información secundaria adicional necesaria para poder discriminar la distribución y extensión real de los bosques en ecosistemas de montaña, considerando que con imágenes satelitales se hace difícil definir clases de vegetación solamente en función de la respuesta espectral, debido a las condiciones y heterogeneidad propia del paisaje que afectan dichas respuestas espectrales. Se requiere contar con técnicos de experiencia en estos tipos de ecosistemas para poder realizar una revisión visual y validación exhaustiva a los fines de obtener un producto de calidad. Finalmente se espera lograr una estandarización de los métodos de procesamiento, validación y análisis de la información que permitan consolidar un sistema nacional de monitoreo de bosques.

1.2 ANTECEDENTES

A lo largo de los años, el Ecuador ha venido utilizando información sobre deforestación proveniente de diversas fuentes a falta de un dato oficial. El único dato referencial que manejaba el país era el generado por el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), actualmente Instituto Ecuatoriano Espacial (IEE), institución que reportó para el periodo 1991-2000 una tasa anual de deforestación correspondiente a 1,47%, una de las más altas en Latinoamérica. Para la misma década la organización no gubernamental Conservación Internacional (CI) en el 2008 reportó una tasa anual de deforestación de aproximadamente 0.39% bajo la aclaración de no haber logrado cubrir un 30% del territorio ecuatoriano, debido a una alta presencia de nubes en la parte andina y la provincia de Esmeraldas. Por esta razón la generación de información por parte de iniciativas gubernamentales y privadas bajo metodologías, escalas, periodos y niveles de exactitud diferentes han impedido tener información que permita monitorear la real pérdida de cobertura vegetal en el país.

El Ministerio del Ambiente del Ecuador como parte del monitoreo forestal cuenta con los mapas de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental para los años 1990, 2000, 2008, 2014 y 2016, con los cuales se calculó la deforestación promedio anual para los periodos 1990-2000, 2000-2008, 2008-2014 y 2014-2016 (Ministerio de Ambiente, 2016). Además gracias a la

generación del mapa de ecosistemas se tiene la caracterización de 91 ecosistemas para el Ecuador Continental (Ministerio de Ambiente, 2013) y finalmente el levantamiento del primer inventario forestal a nivel nacional. Los mismos fueron utilizados para la generación del Nivel de Referencia de Emisiones Forestales por Deforestación (NREF-D) presentado a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

El indicador relacionado con la pérdida de los bosques tiene gran relevancia a nivel mundial, es así que existen iniciativas globales que generan esta información, como el Instituto de Recursos Mundiales (WRI por sus siglas en inglés), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT-Terra-i), Observación Global del Bosque (GFW por sus siglas en inglés), entre otras.

El uso de los sensores remotos es una herramienta fundamental que permite la extracción de la información con el propósito de identificar, analizar y cuantificar las dinámicas del bosque, para ello existen diferentes métodos que permiten extraer la información como la detección de cambios para entender las relaciones e interacciones entre los humanos y la naturaleza con el propósito de promover tomas de decisión (Lu et al. 2003). Es por esta razón que la finalidad de este trabajo es responder a la necesidad de contar con una metodología estandarizada a nivel nacional que permita el monitoreo de las dinámicas del bosque de una forma robusta.

Con la finalidad de monitorear las dinámicas de los bosques, la búsqueda de técnicas de detección de cambios es un tópico muy activo, y constantemente nuevas técnicas son desarrolladas como por ejemplo, la detección de cambio usando dos fechas de imágenes satelitales ópticas. Existen clasificadores automáticos como son SVM (Support Vector Machine) (Vapnik, 1995) Random Forest (Breiman, 2001), y Continuous Degradation Detection (CODED) (Zhu & Woodcock, 2014).

Otros ejemplos son la detección de cambio usando series históricas continuas utilizando sensores ópticos con los algoritmos (BFAST/BFAST (Breaks For Additive Season and Trend), LandTrendr (Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery) (Verbesselt et al. 2010; Kennedy et al. 2010).

Otro ejemplo de series temporales que se puede citar es la clasificación de probabilidades (Reiche et al. 2018). Utiliza el algoritmo bayes que permite utilizar series temporales mediante el uso de sensores ópticos utilizando el índice de vegetación normalizado (NDVI) y datos de retrodispersión para los datos radar, permite identificar perturbaciones en la cobertura boscosa y que puede ser utilizado para la generación de alertas tempranas de deforestación. Para el uso de series de tiempo se requiere contar con un nivel de cómputo y capacidad de almacenamiento exigente, así como también el acceso a una gran cantidad de imágenes satelitales.

El área de estudio ha sido seleccionada cuidadosamente y corresponde a los ecosistemas forestales andinos, de difícil acceso, que representan a los más diversos y amenazados ecosistemas terrestres (Etter y Villa 2000), lo que hace particularmente necesaria la implementación de herramientas que permitan monitorear sus dinámicas.

La detección de cambios en la cobertura forestal mediante la teledetección no es sencilla porque los ecosistemas forestales presentan constantes cambios. Sin embargo estas modificaciones en la cobertura forestal muestran un orden de magnitud diferente en todos los ecosistemas forestales: deforestación y regeneración. Mientras que la deforestación es la eliminación de un bosque, la regeneración corresponde a la recuperación del bosque. El monitoreo de estos dos cambios forestales es esencial para los sistemas de contabilidad de

carbono. Por otra parte también se requiere información acerca de estos cambios para la evaluación de la gestión forestal. Los sistemas de monitoreo de bosques capaces de detectar dos tipos de cambio son por lo tanto necesarios para proporcionar el estado actualizado de las condiciones del bosque (Desclee et al. 2007).

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar, comparar y validar los resultados de diferentes metodologías para la detección de cambios de cobertura y uso de los bosques andinos y evaluar la exactitud de los resultados con imágenes de mediana resolución.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar mapas de cobertura y uso de los bosques para los años de referencia 2001, 2013 y 2014 utilizando los métodos de post-clasificación y detección directa de cambios para identificar espacialmente trayectorias de cambio de uso y cobertura de los bosques en los periodos 2001 – 2013 y 2013 – 2014.
- Generar mapas de trayectorias de cambio de cobertura y uso de los bosques utilizando clasificación directa de cambios de imágenes multitemporales compuestas 2001 – 2013 y 2013 – 2014.
- Evaluar la exactitud de los mapas generados utilizando los métodos de post-clasificación y detección directa de cambios.
- Generar recomendaciones para monitorear los ecosistemas frágiles como es el caso de los ecosistemas forestales andinos, utilizando imágenes satelitales de mediana resolución.

1.3 DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA Y POLÍTICA DE LA ZONA

La zona de estudio (Mapa 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), presenta un área efectiva de 249.293 ha, se encuentra ubicada entre los cantones Sigchos, Quito, Mejía, San Miguel de los Bancos y Santo Domingo (Tabla 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 1. Cantones dentro del área de estudio

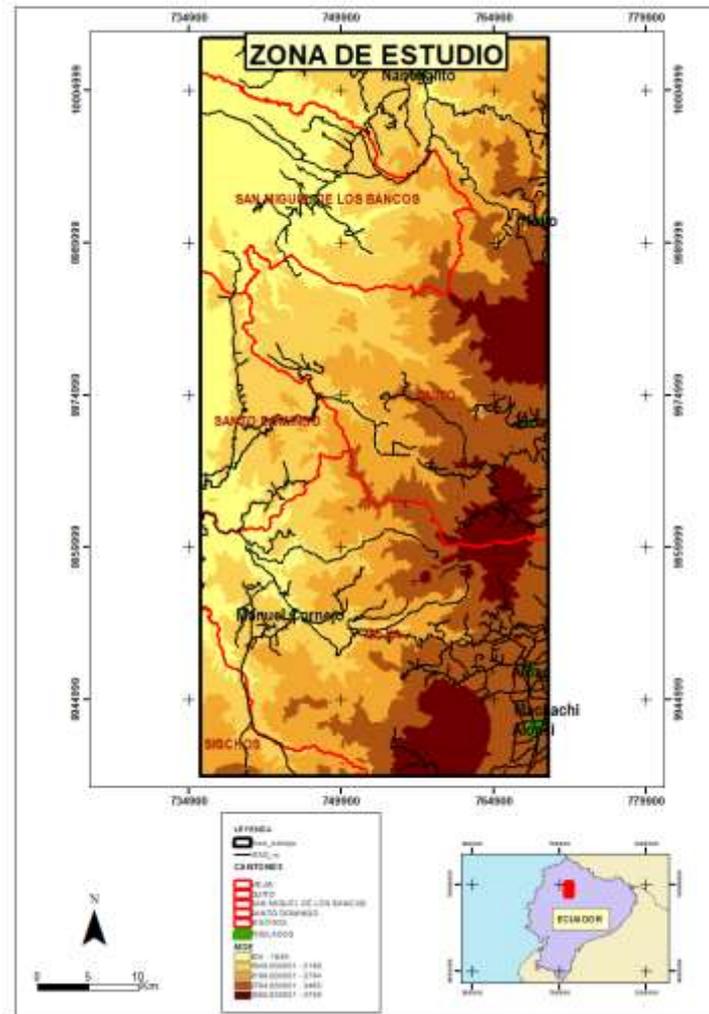
Provincia	Cantón	Área (ha)	%
COTOPAXI	SIGCHOS	9.186	3,68
PICHINCHA	QUITO	100.230	40,21
PICHINCHA	MEJIA	79.483	31,88
PICHINCHA	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	38.785	15,56
SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS	SANTO DOMINGO	21.609	8,67
TOTAL		249,293	100

Las coordenadas del área de estudio referidas a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 17 sur, Datum World Geodetic System (WGS-84), son las siguientes (Tabla 2).

Tabla 2. Coordenadas de la zona de estudio

Punto	Este (m)	Norte (m)
1	736.066	9.937.386
2	736.077	10.010.151
3	770.334	10.010.154
4	770.322	9.937.373

La extensión en dirección Norte – Sur es de 73 kilómetros y en la dirección Este – Oeste es de 34 kilómetros.



Mapa 1. Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en un rango altitudinal que va de los 840 hasta los 4.759 metros sobre el nivel del mar.

En la zona de estudio el 98% de la superficie se ubica en el bioclima pluvial y el 2% en el bioclima pluviestacional, haciendo referencia a la interrelación entre temperatura, precipitación, evaporación a escalas regionales y su correspondencia con diferentes tipos de vegetación.

La cuenca del río Esmeraldas contiene el área de estudio, las subcuencas que lo atraviesan son río Blanco, río Guayllabamba y la unidad hidrográfica 1529.

El sector biogeográfico en el que se encuentra es la cordillera occidental de los Andes, parte norte de la cordillera oriental de los Andes y zona de páramo que nos permiten conocer la diversidad biológica del área de estudio (Tabla 3). En el anexo 1 se detalla cada uno de los sectores biogeográficos.

Tabla 3. Sector biogeográfico del área de estudio

Sector Biogeográfico	Área (ha)
CORDILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES	227.821
NORTE DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE LOS ANDES	230
PÁRAMO	21.242

1.3.1 DESCRIPCIÓN PRODUCTIVA, SOCIOECONÓMICA Y DEMOGRÁFICA

En el área de estudio la principal ciudad periférica es Quito con una población de 2.239.191 habitantes y la distancia aproximada a las ciudades principales es 38 Kilómetros a Machachi y 30 Kilómetros a Sangolquí, además de varias localidades urbanas y rurales-agro productivas como son: Aloag, Manuel Cornejo, Lloa, Mindo, Nono, Nanegalito y Aloasí, pertenecientes a los cantones Quito, Mejía y San Miguel de los Bancos de la provincia de Pichincha.

Utilizando los datos del último censo de población y vivienda se muestran los datos (Tabla 4), para las parroquias que se intersecan con el área de estudio.

Tabla 4. Datos de población urbana, rural y pobreza de las diferentes parroquias

Parroquias	Población			NBI		
	Total	Urbana	Rural	Total	Pobres	No Pobres
Sigchos	7.933	1.947	5.986	7.906	7.066	840
Palo Quemado	1030	0	1.030	1.027	982	45
Quito	1.619.146	1.607.734	11.412	1.607.378	412.265	1.195.113
Calacalí	3.895	0	3.895	3.889	2.053	1.836
Gualea	2.025	0	2.025	2.021	1.746	275
Lloa	1.494	0	1.494	1.468	980	488
Nanegal	2.636	0	2.636	2.628	2.022	606
Nanegalito	3.026	0	3.026	3.013	2.074	939
Nono	1.732	0	1.732	1.730	1.518	212
Pacto	4.798	0	4.798	4.795	3.983	812
Machachi	27.623	16.515	11.108	27.477	11.247	16.230
Aloag	9.237	0	9.237	9.167	5.686	3.481
Aloasí	9.686	0	9.686	9.630	5.545	4.085
Cutuglahua	16.746	0	16.746	16.740	14.722	2.018
El Chaupi	1.456	0	1.456	1.455	948	507
Manuel Cornejo Astorga (Tandapi)	3.661	0	3.661	3.655	3.053	602
Tambillo	8.319	0	8.319	8.302	4.161	4.141
San Miguel de los Bancos	13.731	4.810	8.921	13.516	10.458	3.058
Mindo	3.842	0	3.842	3.596	2.514	1.082

Santo Domingo de los Colorados	305.632	270.875	34.757	304.409	216.207	88.202
Alluriquín	9.725	0	9.725	9.710	9.122	588

El área de estudio se interseca con 3 provincias Pichincha, Cotopaxi y Santo Domingo de los Tsáchilas

La población económicamente activa de la provincia de Pichincha es del 49%, de los cuales la ocupación principal corresponde al empleo privado 48%, cuenta propia 19% y empleado del estado 13% como las actividades principales. El analfabetismo es del 4%, y el analfabetismo digital es del 17%.

La población económicamente activa de la provincia de Cotopaxi es del 42%, de los cuales la ocupación principal corresponde a cuenta propia 45%, empleado privado 20% y jornalero o peón 16% como las actividades principales. El analfabetismo es del 14%, y el analfabetismo digital es del 41%.

La población económicamente activa de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas es del 41%, de los cuales la ocupación principal corresponde a cuenta propia 29%, empleado privado 32% y jornalero o peón 15% como las actividades principales. El analfabetismo es del 6%, y el analfabetismo digital es del 27%.

Debido a que Pichincha es la provincia más representativa del área de estudio se utiliza la información del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Pichincha para el 2025 (GAD Provincial de Pichincha, 2015), se describe la siguiente información, la provincia está constituida por ocho cantones con 53.313 unidades de producción agropecuaria (UPAs) en 623.773 has. (Según el Censo Agropecuario 2000). La producción agropecuaria de la provincia se presenta en cuatro zonas relevantes que estructuran cadenas productivas: 1) corredor lechero – florícola que incluyen los cantones Cayambe – Tabacundo – Quito andino, debido a su condición climática. 2) corredor lechero – hortícola Machachi – Sangolquí incluye los cantones Mejía, los principales productos de exportación es la alcachofa, brócoli- 3) corredor frutícola – hortícola Guayllabamba – Perucho – Minas los principales frutales son: aguacates, chirimoyas y hortalizas 4) corredor cultivos tropicales Nanegalito – San Miguel de los Bancos – Pedro Vicente Maldonado – Puerto Quito entre los que se encuentra la explotación de cultivos permanentes: plátano, palma africana, caña de azúcar, palmito y cacao.

La variabilidad de sectores biogeográficos permite una variabilidad climática que amplía las posibilidades productivas, y propicia una diversidad de alimentos, base fundamental para la seguridad y soberanía alimentaria. Esta característica le ha permitido al sector contar con rubros de exportación como los generados por la producción de flores, palmito, legumbres y hortalizas (alcachofa) que aprovechan la disponibilidad del aeropuerto internacional de Quito.

El sistema vial provincial integra dos ejes nacionales, con dos ejes intra-provinciales y dos anillos periféricos urbanos. En la provincia se ha consolidado una estructura espacial, a partir del reconocimiento y articulación de un sistema de ciudades, conformado por: a) Ciudad Central Metropolitana b) Red de ciudades periféricas: (Sangolquí, Machachi, Cayambe y Tabacundo) y c) Localidades urbanas y rurales-agro productivas.

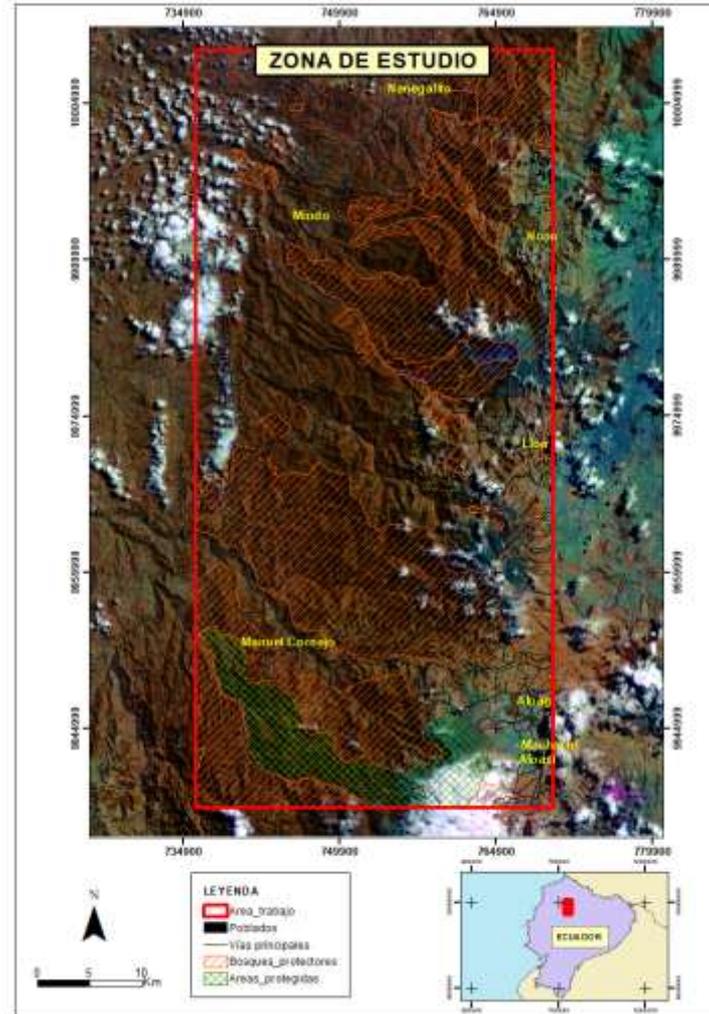
Por su ubicación estratégica en el centro del país y la disponibilidad de infraestructura logística de transporte (Aeropuerto Internacional, Terminales Terrestres) el buen estado de las vías de

interconexión nacional y regional, la provincia mantiene una adecuada funcionalidad interna y externa, basada en la generación de fuertes intercambios de personas y productos.

Es una provincia con peligro por amenazas naturales: movimientos en masa, sismos, erupciones volcánicas y deshielo de glaciares (Cayambe, Antisana, Cotopaxi). La expansión de la frontera agrícola es otro gran problema que afecta a las áreas de páramo, bosques y áreas naturales protegidas, especialmente donde la deforestación y las malas prácticas agrícolas generan grandes problemas erosivos, ocasionando una pérdida gradual de productividad de los suelos.

1.3.2 ÁREAS BAJO CONSERVACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL

Debido a la diversidad e importancia que representa el bosque andino y los ecosistemas de páramo que existen en la zona de estudio la reserva ecológica los Ilinizas abarcan un área de 15.525 ha, que representa el 10% con respecto al área de estudio. La vegetación remanente que presenta la reserva es del 91% y las áreas antrópicas corresponden al 9% utilizando el mapa de cobertura y uso de la tierra 2014. Además, se encuentran presentes 20 áreas dentro de la categoría de bosque y vegetación protectora que cubre un área de 101.019 ha, que representa el 65% del total de la superficie de la zona de estudio. Con respecto a la vegetación remanente que se encuentra presente en los bosques y vegetación protectora esta es del 84% y las áreas antrópicas corresponden al 16% utilizando el mapa de cobertura y uso de la tierra 2014 (Mapa 2 y Tabla 5).



Mapa 2. Áreas bajo conservación y manejo ambiental

Tabla 5. Bosque y vegetación protectora presentes en el área de estudio

#	Bosque y vegetación protectora	Área (ha)	%
1	Toachi Pilatón	46.998	46,52
2	Cuenca Río Guayllabamba (área 2)	1.024	1,01
3	Umbría	561	0,56
4	Estación Científica Río Guajalito	385	0,38
5	Zarapullo	9.043	8,95
6	Maquipucuna	2.141	2,12
7	San Francisco	275	0,27
8	Hacienda San Eloy	37	0,04
9	La Balsa	556	0,55
10	Concepción de Saloya	239	0,24
11	La Paz y San José de Quijos	399	0,39
12	San Carlos de Yanahurco	645	0,64
13	Caracha	260	0,26
14	Tulipa Pachijal	74	0,07
15	Predio Pacay	519	0,51

16	Mindo Nambillo	19.483	19,29
17	Flanco Oriental de Pichincha y Cinturón Verde de Quito	3.612	3,58
18	Cuenca río Guayllabamba (área 1)	10.924	10,81
19	Santa Rosa y Yasquel	2.597	2,57
20	Toaza	1.247	1,23
TOTAL		101.020	100

2 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN

2.1.1 DEFINICIÓN

Existen muchas definiciones acerca de lo que significa la Teledetección (Remote Sensing).

“Teledetección es la ciencia que se encarga de obtener información acerca de objetos o áreas a distancia, generalmente desde aeronaves o satélites” (NOAA, 2018).

“Teledetección es la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que graban la interacción entre la energía electromagnética y la materia” (Sabins, 1996).

El término “teledetección significa descubrir la superficie de la tierra desde el espacio mediante el uso de las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos, con el propósito de mejorar el manejo de los recursos naturales, uso de la tierra y la protección del ambiente” (Naciones Unidas, 1986).

“Teledetección es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por dispositivos que no tienen contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación” (Lillesand et al. 2015).

“Teledetección es definida como la adquisición de información de un objeto sin estar en contacto físico con él” (Elachi y van Zyl, 2006).

“Teledetección es el grupo de técnicas para obtener imágenes u otras formas de datos acerca de las mediciones hechas a distancia de un objeto, el procesamiento y análisis de los datos”. (CCRS, 2018).

2.1.2 COMPONENTES

Los principales componentes que conforman un sistema de la teledetección son: fuente de energía, cobertura terrestre, sensor, recepción, intérprete y usuario (Chuvienco, 2006).

En el presente trabajo, la fuente de energía consiste en la energía solar; con respecto a la cobertura terrestre el mayor énfasis se centra en la cobertura forestal y sus cambios; los sensores utilizados corresponden al satélite Landsat 7 con los sensores ópticos ETM+ Y TM y el satélite Landsat 8 con los sensores ópticos OLI y TIRS; finalmente, la recepción de la información se realiza directamente sobre los portales de la USGS (<http://espa.cr.usgs.gov/> y <http://espa.cr.usgs.gov/>).

2.1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La principal fuente de energía proviene del sol, y de la cual la luz visible forma parte y se denomina energía electromagnética. Esta energía para el caso de la teledetección es transferida mediante la radiación.

La energía electromagnética, según la teoría ondulatoria se transmite de un lugar a otro acorde a un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales, eléctrico y magnético (Chuvienco, 2006).

El espectro electromagnético es la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo a la frecuencia y a la longitud de onda en la que viaja la energía, para la teledetección las longitudes de onda más utilizadas corresponden a aquellas ubicadas en el rango del visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo lejano o térmico y la radiación en microondas. En la figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un resumen de las diversas regiones del espectro electromagnético.

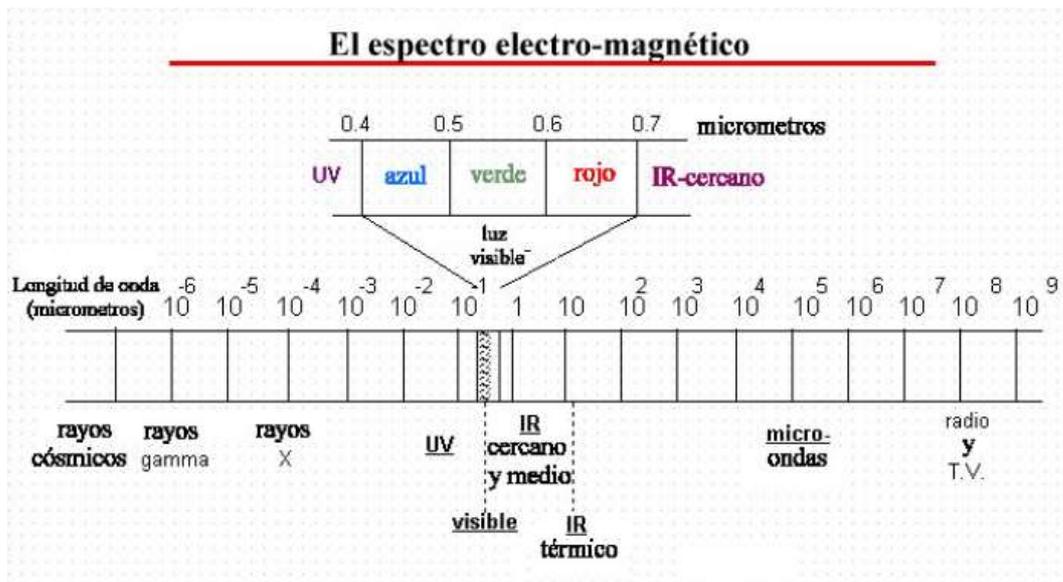


Figura 1. Regiones del espectro electromagnético. Fuente: (American Society of Photogrametry, 1975)

La radiación electromagnética puede ser reflejada, absorbida o transmitida. La cantidad de energía que refleja, transmite o absorbe cada objeto es diferente para cada longitud de onda (Chuvieco, 2006).

La atmósfera es importante ya que influye en el paso de energía solar en dos etapas: fuente-sensor y objeto-sensor. El fenómeno de la interferencia atmosférica es selectivo para cada longitud de onda y se debe a fenómenos de absorción, dispersión, emisión, refracción y reflexión.

Las superficies terrestres tienen diferentes grados de absorción, modificando la cantidad de energía reflejada, los coeficientes de absorción varían según las longitudes de onda en función de la altura y composición de la atmósfera. La atmósfera absorbe gran parte de las radiaciones para las diferentes longitudes, pero es posible encontrar algunas bandas donde pasa esta energía y se conoce como ventanas atmosféricas.

Las partículas en la atmósfera como gas, agua y humo producen la dispersión, la misma que según el tamaño de las partículas se dividen en tres tipos:

- Dispersión rayleigh, el tamaño de las partículas es menor a la longitud de onda
- Dispersión mie, cuando el tamaño de las partículas es aproximadamente igual al tamaño de la longitud de onda
- Dispersión no selectiva, cuando el tamaño de las partículas es mayor a la longitud de onda.

Debido a que la atmósfera es un medio gaseoso se produce la refracción, lo que genera que la propagación de las ondas no sea en línea recta.

La emisión en microondas así como la emisión en el infrarrojo térmico de los cuerpos naturales están relacionadas con la temperatura de los mismos. Todos los objetos emiten energía en microondas, pero en cantidades muy pequeñas y difícilmente perceptibles.

Finalmente la reflectancia corresponde a la capacidad de la superficie de reflejar la energía incidente, se mide mediante la reflectividad que es la relación entre el flujo incidente y el flujo de energía reflejada. Depende del tamaño de las irregularidades de la superficie en relación con la longitud de onda, si la superficie es suave y la rugosidad es menor que la longitud de onda, se produce una reflexión especular. En las superficies rugosas se produce una reflectividad en todas las direcciones, estas superficies se conocen como reflectores difusos.

La reflectividad de una superficie rugosa depende de la propia superficie en relación a la longitud de onda incidente y del ángulo de iluminación, y que un objeto puede responder en forma especular, lambertiana o mixta. La ley de Lambert enunció que de una superficie perfectamente difusa se percibe un brillo que no cambia con el ángulo de observación.

El rango del espectro electromagnético utilizado en este estudio se ubica entre 0,4 μm y 3 μm que corresponde al rango visible y del infrarrojo cercano y medio.

El comportamiento espectral de la vegetación depende fuertemente de las propiedades de las hojas y la estructura del dosel de la vegetación y la orientación de las mismas.

La cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida en las diferentes longitudes de onda por las hojas, depende de otros factores como por ejemplo la respuesta espectral del suelo, presencia de vegetación senescente, elevación angular del sol y del sensor, la geometría de la propia cobertura de los cultivos y los cambios fenológicos.

La reflectancia espectral de la cobertura vegetal varía con la longitud de onda, reflejando más en ciertas longitudes de onda que en otras. La figura 2, presenta la curva de la reflectividad típica de la vegetación sana.

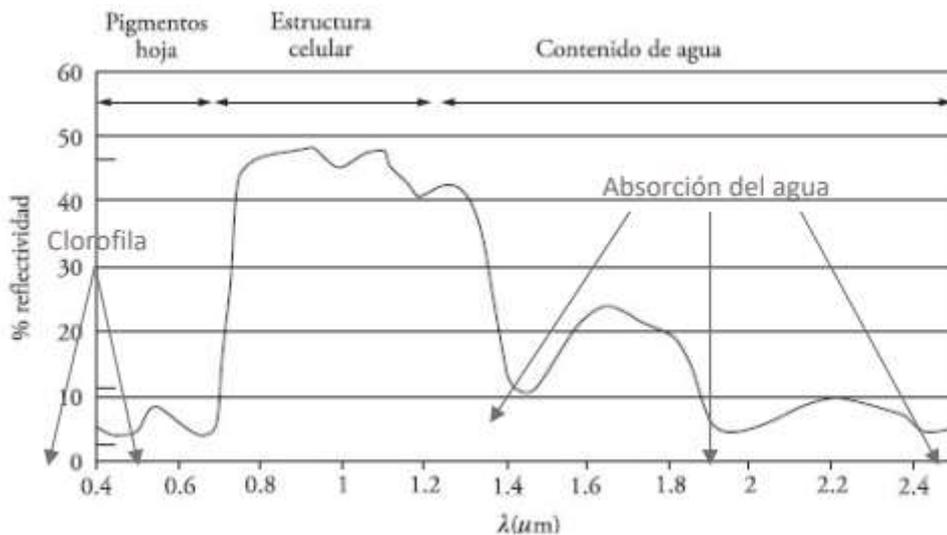


Figura 2. Firma espectral de vegetación Fuente: (Tucker y Sellers, 1986)

Ejemplo de las diferentes regiones espectrales:

El espectro visible, verde que va de 0,498 a 0,581 μm , permite capturar la reflectividad máxima de la vegetación y estudiar el vigor de la vegetación.

El espectro visible rojo, que va de 0,581 hasta 0,660 μm , permite detectar la banda de absorción de la clorofila y por lo tanto puede utilizarse en la detección de tipo de vegetación y contenido de clorofila.

En el caso del infrarrojo cercano que va de 0,666 hasta 1,3 μm , es la banda de reflectividad máxima de la vegetación sana. Las diferencias en reflectividad pueden utilizarse para discriminar entre tipos de vegetación y para detectar grados de estrés en la vegetación.

Finalmente el infrarrojo medio que va de 1,3 a 3 μm está en una banda sensible al contenido de humedad de la vegetación y por lo tanto muestra muy bien el estrés hídrico.

En las porciones del espectro azul y rojo, la radiación es fuertemente absorbida por los pigmentos foliares en especial la clorofila, presentes en los cloroplastos para el proceso fotosintético. En la porción verde, la absorción es menor y la reflectancia mayor en comparación con las dos anteriores.

La radiación en el infrarrojo es fuertemente reflejada presente en el parénquima esponjoso de las hojas, de modo que mientras más desarrollados estén estos tejidos con aire, mayor será la reflectancia.

La senescencia de las hojas implica la desaparición de la clorofila y la aparición de otros pigmentos y que causan un fuerte incremento de la reflectancia en el rojo.

Otros factores alteran también la reflectancia de las hojas, son las enfermedades y plagas afectan directamente a la clorofila y la desaparición de los espacios de aire; asimismo las esporas y las hifas cubren la superficie de las hojas con consecuencias en el comportamiento espectral.

Las características geométricas de las plantas, principalmente su área foliar, forma de las hojas, su distribución en la planta, la geometría del dosel o canopia son además factores que influyen en la radiación final detectada por el sensor.

El comportamiento espectral de la vegetación está determinado por la combinación de sus componentes: tipo, densidad, grado de desarrollo, estado fenológico y el estado del suelo.

2.1.4 SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos permiten identificar y analizar un objeto sobre la superficie de la tierra usando datos adquiridos desde un satélite con la ayuda de sus sensores, utilizando una amplia gama de parámetros espaciales, espectrales y temporales en base a la información provista por los satélites y los sensores que recopilan la información.

Los datos obtenidos son principalmente las variaciones del espectro electromagnético entre las diferentes coberturas terrestres y épocas que adecuadamente procesadas e interpretadas permiten tener información de una misma área geográfica después de un periodo de tiempo lo que resulta ideal para realizar un adecuado monitoreo, la información es almacenada en formato digital y su cobertura es global en la mayoría de los casos. Dentro de las aplicaciones más utilizadas se encuentran las dinámicas de cambios de la cobertura y uso de la tierra relacionada con la superficie boscosa y la agricultura.

La clasificación más utilizada para clasificar los sensores remotos es por su fuente emisora: pasivo, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de la superficie terrestre en su

mayoría o de una fuente exterior, y activo, cuando son capaces de emitir su propia fuente de energía.

2.1.5 RESOLUCIÓN EN LOS SENSORES REMOTOS

Otra característica importante de los sensores remotos es la resolución de un sensor, la cual depende del efecto combinado de todas sus partes. El concepto de resolución implica al menos cuatro tipos de resoluciones.

2.1.5.1 Resolución temporal

Es la frecuencia de cobertura del sensor, o la periodicidad con la que este adquiere imágenes de la misma porción de superficie terrestre. El intervalo de revisita depende de las particularidades de las órbitas de los satélites.

La resolución temporal adquiere vital importancia en el monitoreo, permitiendo evaluar zonas de cambio como por ejemplo la deforestación de los bosques, debido a la cobertura de repetición para la misma zona de la tierra. (Tabla 6)

Tabla 6. Ejemplo de sensores remotos y su resolución temporal

Sensor	Resolución temporal (días)
MODIS	1 – 2
Landsat OLI	16
Rapideye	5,5
Planet	0,25
Sentinel 2	5
Spot 6/7	1
Aster Terra	16

La resolución temporal presenta una importancia alta para zonas de ecosistemas forestales andinos como las de este estudio donde existe una nubosidad permanente, para ello resulta de mucha utilidad contar con sensores que tengan una resolución temporal alta que permita disminuir las zonas sin información y de esta forma contar con un monitoreo continuo.

2.1.5.2 Resolución espacial

Se refiere a las dimensiones del rasgo más pequeño que es posible detectar, lo cual define el detalle espacial que se distingue en una imagen. En el caso de los sensores pasivos, depende del campo instantáneo de vista o IFOV, que es el cono angular de visibilidad del sensor. Éste determina el área vista por el sensor a una altura dada. En la siguiente tabla se puede observar un ejemplo de las diferentes resoluciones espaciales de varios sensores remotos (Tabla 7)

Tabla 7. Ejemplo de sensores remotos y su resolución espacial

Sensor	Resolución espacial (m)
MODIS	250
Landsat OLI	30, 15

Rapideye	5
Planet	3
Sentinel 2	10
Spot 6/7	1,5
Aster Terra	15, 30

Un ejemplo claro de la resolución espacial es la comparación de los patrones espaciales de deforestación de países amazónicos como Brasil y Ecuador. La primera diferencia está relacionada con el área mínima de mapeo que es de 6,25 ha y de 1 ha para los casos de Brasil y Ecuador respectivamente.

Las principales causas de deforestación en Brasil se relacionan con la expansión de la frontera agrícola utilizando métodos mecanizados y la ganadería a gran escala, con lo cual los patrones espaciales de deforestación pueden ser detectados con mayor facilidad utilizando sensores de resolución espacial baja y media.

Para el caso de Ecuador la principal causa de deforestación es la ampliación de la frontera agrícola en especial para utilización de pastos, pero existen actividades puntuales que utilizan métodos mecanizados como el caso del cultivos de palma africana, generalmente la agricultura a pequeña escala provoca deforestación pero que en términos de extensión y contribución es menor que la agricultura mecanizada por lo que para poder detectar se requiere el uso de sensores remotos con una resolución espacial media y alta.

2.1.5.3 Resolución radiométrica

La resolución radiométrica hace mención a la sensibilidad del sensor, o lo que es igual, a la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. El número máximo de niveles digitales que puede detectar un sensor óptico-electrónico, es lo que recibe el nombre de resolución radiométrica. Los primeros sensores ofrecían 64 o 128 niveles digitales, actualmente ofrecen más de 1024. Por ejemplo para Landsat 7 ETM+, utiliza 8 bits, el rango de valores va de 0 a 255 niveles digitales.

2.1.5.4 Resolución espectral

Se refiere al número y ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Además se dividen en sistemas multispectrales y los hiperespectrales. Los insumos utilizados con mayor frecuencia corresponden a los sistemas multispectrales. (Tabla 8)

Tabla 8. Ejemplo de sensores remotos y su resolución espectral

Sensor	Resolución espectral
MODIS	36 bandas
Landsat OLI	*11 Bandas (3 visibles, 1 NIR, 2 SWIR, 1 Pan, 2 TIRS, 1 Coastal, 1 Cirrus)
Rapideye	5 bandas (3 visibles, 1 NIR, 1 red)

	egde)
Planet	4 bandas (3 visibles y 1 NIR)
Sentinel 2	8 bandas (3 visibles, 1 NIR, 2 SWIR, 1 Coastal, 1 Cirrus)
Spot 6/7	3 bandas (2 visibles y 1 IR)
Aster Terra	14 bandas (3 visible y NIR, 6 bandas SWIR y 5 TIR)

* Pan Pancromática, NIR Infrarrojo cercano, SWIR infrarrojo de onda corta, TIR infrarrojo térmico Coastal detecta finas partículas en la atmósfera, cambios sutiles en el color del océano, Cirrus detecta nubes de gran altitud.

Las bandas espectrales con las que se trabaja para este estudio corresponden a las bandas azul - 2, verde - 3, rojo - 4, NIR - 5, SWIR 1 - 6 y SWIR 2 - 7 para Landsat 8 y bandas azul - 1, verde - 2, rojo - 3, NIR - 4, SWIR 1 - 5 y SWIR 2 - 7 para Landsat 7.

2.1.6 APLICACIONES

El mayor interés en el uso de los sensores remotos en la práctica se centra en el monitoreo del ambiente a largo plazo con la finalidad de facilitar el análisis de datos de los diferentes sensores adquiridos en diferentes épocas, los datos extraídos pueden ser utilizados en algoritmos que permiten modelar los parámetros de los sensores remotos para generar variables geofísicas (Schowengerdt, 2006).

Debido a la temática de estudio nos centramos en las aplicaciones de deforestación y cambio de la cobertura de la tierra donde la generación de información a través de las imágenes satelitales permite documentar las tasas de cambios de la cobertura de la tierra.

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.

Los algoritmos más utilizados para clasificación de imágenes satelitales son clasificación basada en máxima verosimilitud es un método de clasificación supervisada ampliamente utilizado (Maussel et al., 1990), redes neuronales artificiales construye adaptativamente vínculos entre los datos de entrada, como las características de imágenes satelitales y los datos de salida, como las clases de cobertura (Rumelhart et al., 1986), Support Vector Machines (SVM), un método de clasificación supervisado de aprendizaje estadístico no paramétrico para resolver problemas de clasificación (Smola y Schoelkopf, 1998), clasificación basada en bosques aleatorios, una implementación mejorada de árboles de decisión, es un algoritmo de aprendizaje que combina múltiples clasificaciones de los mismos datos para producir precisiones de clasificación más altas que otras formas de árboles de decisión (Cutler et al., 2007).

La interpretación visual es un método simple y robusto, pero que requiere tiempo, una combinación de métodos automatizados pueden ayudar a disminuir el tiempo, como la segmentación multifecha y la clasificación supervisada de objetos, incluso procesos completamente automatizados requieren de un análisis visual para asegurar un resultado apropiado.

Actualmente gracias a la capacidad de computo elevada es posible utilizar técnicas de detección de cambio usando series históricas continuas utilizando sensores ópticos con los

algoritmos (BFAST/BFAST (Breaks For Additive Season and Trend), LandTrendr (Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery) (Verbesselt et al. 2010; Kennedy et al. 2010).

Dentro de los cambios de la cobertura boscosa se encuentra la degradación del bosque o perturbación del dosel, para ellos existen técnicas como el análisis de mixtura espectral utilizando datos multiespectrales ópticos (Asner et al. 2009), técnicas LIDAR para medir cambios en la altura del dosel (Kellndorfer et al. 2010) y técnicas utilizando Radar de apertura sintética que permiten la detección de cambios de la biomasa aérea (Ryan et al. 2012).

2.1.7 SENSOR LANDSAT

El programa Landsat tiene 47 años de proveer imágenes satelitales calibradas de la superficie de la tierra, apoyando a una amplia gama de usuarios que incluyen investigadores, academia, gobiernos locales y nacionales, usuarios privados y público en general entre otros.

Landsat 8 es el último de una serie continua de sensores que comenzó desde 1972, la misión del programa es proveer datos de resolución multiespectral media de toda la superficie de la tierra, con una política de acceso libre a la información a través del portal de la USGS.

Los datos son disponibles para descarga y tienen varios niveles de procesamiento: nivel 0R, nivel 1T, nivel 1GT y nivel 1G (Tabla 9), el sensor tiene una revisita de 16 días para toda la superficie terrestre y se encuentran disponibles a través de varios portales de la USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>., <http://glovis.usgs.gov/>, <https://espa.cr.usgs.gov>) donde es necesario registrarse, para su adquisición.

Tabla 9. Niveles de procesamiento de productos Landsat

Nivel	Procesamiento
Nivel 0R	Sin procesamiento
Nivel 1T	Corrección geométrica usando puntos de control sobre el terreno.
Nivel 1 GT	Corrección geométrica con modelo digital de elevación y parámetros de la plataforma y sensor.
Nivel 1G	Corrección geométrica a partir de parámetros de la plataforma y sensor.

2.1.7.1 Características técnicas del sensor Landsat 7 y 8

El satélite Landsat 7 fue lanzado en abril de 1999 tiene dos sensores, ETM+ (Thematic Mapper+) y TM (Thematic Mapper). (Tabla 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 10. Características técnicas del sensor Landsat 7

Características	Landsat 7
Tipo de sensor	ETM+ Y TM
Órbita	705 km 98.2 grados de inclinación (WRS2)
Tiempo de cruce	10:00 (Aproximadamente)
Resolución temporal	16 días
Resolución espacial	30 metros – 15 metros

El sensor ETM+ almacena datos de 8 bandas espectrales, tiene un ancho de barrido de 185 Km y una resolución espacial de 30 metros para las bandas del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, excepto los 15 metros de la banda pancromática e infrarrojo térmico de 60 metros. (Tabla 11).

Tabla 11. Bandas espectrales del sensor ETM+

Bandas	Landsat 7 (ETM+)	Bandas (μm)
Banda 1	30 m Azul	0.45 – 0.52
Banda 2	30 m Verde	0.53 – 0.61
Banda 3	30 m Rojo	0.63 – 0.69
Banda 4	30 m NIR	0.78 – 0.90
Banda 5	30 m MIR	1.55 – 1.75
Banda 6	60 m Térmico	10.40 – 12.50
Banda 7	30 m	2.08 – 2.35
Banda 8	15 m Pancromática	0.52 – 0.90

El satélite Landsat 8 lanzado en febrero de 2013 tiene dos sensores, OLI (Operational Land Imager) y el sensor infrarrojo termal (TIRS). (Tabla 12).

Tabla 12. Características técnicas del sensor Landsat 8

Características	Landsat 8
Tipo de sensor	OLI y TIRS
Órbita	705 Km 98.2 grados de inclinación (WRS2)
Tiempo de cruce	10:00 (Aproximadamente)
Resolución temporal	16 días
Resolución espacial	30 metros – 15 metros

El sensor OLI almacena datos de las 9 bandas espectrales, y el sensor TIRS almacena datos de las 2 bandas para el infrarrojo térmico, tiene un ancho de barrido de 190 km y una resolución espacial de 30 metros para las bandas del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, excepto los 15 metros de la banda pancromática. Las bandas azul profundo (banda 1) para estudios costeros y aerosoles y banda Cirrus (banda 9) para detección de nubes cirrus son igual de 30 metros. Las bandas 10 y 11 corresponden al infrarrojo térmico (Tabla 13).

Tabla 13. Bandas espectrales del sensor OLI

Bandas	Landsat 8 (OLI)	Bandas (μm)
Banda 1	30 m Aerosol costero	0.43 – 0.45
Banda 2	30 m Azul	0.45 – 0.51
Banda 3	30 m Verde	0.53 – 0.59
Banda 4	30 m Rojo	0.64 – 0.67
Banda 5	30 m NIR	0.85 – 0.88
Banda 6	30 m SWIR – 1	1.57 – 1.65

Banda 7	30 m SWIR – 2	2.11 – 2.29
Banda 8	15 m Pancromática	0.50 – 0.68
Banda 9	30 m Cirrus	1.36 – 1.38
Banda 10	100 m Infrarrojo térmico TIRS 1	10.60 – 11.19
Banda 11	100 m Infrarrojo térmico TIRS 2	11.50 – 12.51

Las observaciones del satélite Landsat siguen una dirección en el terreno, conocidas como caminos o path definidos por el segundo sistema de referencia mundial (WRS-2). WRS-2 es un sistema de coordenadas (path/row) usado como catálogo para todos los datos de las imágenes adquiridas desde el satélite Landsat 4 al satélite Landsat 8.

Los datos de los sensores son radiométricamente corregidos y co-registrados a una proyección cartográfica con correcciones para los desplazamientos del terreno resultando en una imagen ortorectificada estándar denominada nivel 1T.

El archivo de metadatos es creado durante la generación del producto y contiene información específica del producto. El archivo identifica los parámetros de la escena con la extensión espacial de la escena y los parámetros de procesamiento usados para generar el producto a nivel 1.

Los valores de los niveles digitales de las imágenes puede ser convertidos a radiancia espectral usando los factores de radiancia que provee el archivo de metadatos, similar a la conversión a radiancia, el producto a nivel 1 puede también ser convertido a reflectancia al tope de la atmósfera o reflectancia superficial.

Una comparación entre los dos sensores nos permite identificar que las bandas espectrales de los sensores Landsat 8 OLI y TIRS, de resolución radiométrica (12 bits), aunque similares al sensor Landsat 7 ETM+ (8 bits), genera una mejora en relación a los sensores utilizados en misiones anteriores generando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre, sobre todo con la incorporación de dos bandas espectrales diseñadas para estudios hídricos y el canal infrarrojo para nubes cirrus. Adicional existe una banda de control de calidad la misma que presenta información relacionada con nubes, agua y nieve.

Los productos de datos a nivel L1T consisten en productos de datos L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84, o a su versión actual.

2.1.8 SENSOR RAPIDEYE

Rapideye es una constelación de 5 satélites idénticos que monitorean la tierra permanentemente, esta constelación de satélites permite capturar información con una revisita de 24 horas, lo cual permite gran cantidad de imágenes multispectrales en todo el planeta tierra, las imágenes Rapideye son imágenes de alta resolución espacial que pertenecen a una empresa privada. (Tabla 14).

Tabla 14. Características Técnicas de imágenes RapidEye

Características técnicas	Rapideye
Tipo de sensor	Radiómetro de empuje (push-broom multispectral)
Órbita	630 km (órbita heliosincrónica)
Tiempo de cruce	11:00 (Aproximadamente)

Sensor	Multiespectral (pushbroom imager)
Resolución temporal	1 día (reorientado el sensor) / 5.5 días (orientado al nadir)
Resolución espacial	5 metros
Resolución radiométrica	16 bits
Resolución espectral	5 bandas (3 visibles, 2 IR)

2.1.8.1 Características técnicas del sensor Rapideye

Los niveles de procesamiento son: Nivel 1B con un nivel mínimo de procesamiento sin corrección geométrica de 77 Km * 300 Km, el posicionamiento y efemérides son aplicados a los datos a bordo del satélite, con 6,5 de tamaño de pixel. Nivel 3A producto ortorectificado con corrección radiométrica, geométrica y del terreno, la exactitud geométrica de los productos depende de la calidad de los datos de control (GCPs) y DEM utilizados, los productos son realizados individualmente como tiles (celdas) de 25 Km por 25 km, con 5 metros de tamaño de píxel, nivel 3B imágenes ajustadas en bloque 77Km * 300 Km, nivel 3M mosaico de múltiples imágenes para cubrir toda una región o un país, imágenes ortorectificadas.

El satélite tiene 5 bandas espectrales y una resolución espectral de 5 metros para las bandas del visible (azul, verde, rojo), infrarrojo cercano y red-edge. (Tabla 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 15. Bandas espectrales del sensor Rapideye

Bandas	Rapideye	Bandas (nm)
Banda 1	Azul	440 – 510
Banda 2	Verde	520 – 590
Banda 3	Rojo	630 – 685
Banda 4	Red – Edge	690 – 730
Banda 5	Infrarrojo cercano	760 - 850

Los datos se encuentran disponibles para su visualización a través de la herramienta online eyefind.blackbridge.com.

2.1.9 CORRECCIONES A LAS IMÁGENES SATELITALES

Un proceso de detección de cambios necesita imágenes satelitales de la misma zona en diferentes periodos de tiempo, debido a este motivo existen diferencias por la influencia de varios factores ambientales como las condiciones atmosféricas, humedad del suelo y características fenológicas propias del proceso de adquisición que influyen en la aplicación de la detección de cambios.

Las correcciones a las imágenes satelitales que se realizan generalmente son: calibración a radiancia, calibración a reflectancia, corrección atmosférica, normalización radiométrica, corrección geométrica, corrección topográfica y enmascaramiento de zonas sin formación.

2.1.9.1 Corrección geométrica

Los errores de superposición de las imágenes son muy representativos en el momento de la detección de cambios, todas las imágenes tienen que ajustarse con un gran nivel de detalle. Varios autores han demostrado que se requieren precisiones de ajuste superiores de una

quinta parte de un píxel para asegurar un error inferior al 10% en la comparación multitemporal (Townshend et al. 1992).

Si no existe un buen nivel de correlación entre imágenes, al aplicar los métodos multitemporales, existirán errores de comisión u omisión, es decir se estarían suponiendo cambios donde no existen y viceversa. Por lo tanto para realizar un buen ajuste geométrico es importante tener una serie de puntos de control para la imagen de referencia sobre la que se realiza el ajuste.

Para mejorar el análisis de una serie continua de cambios de cobertura de la tierra, es necesaria una consistencia geométrica de las imágenes satelitales. Históricamente la corrección geométrica se ha convertido en un factor limitante en el procesamiento de una gran cantidad de datos y vuelve costoso el procedimiento de corrección que es necesario emplear para el análisis de las imágenes para una serie temporal extensa.

Dentro de los procesos de corrección geométrica se puede mencionar el subproceso de georreferenciación mediante el cual se asignan coordenadas con una proyección y datum específicos a un objeto o superficie en el plano en un archivo raster o vector.

Otro subproceso puede ser la ortorectificación en donde se corrigen los desplazamientos y distorsiones en la imagen, causados por la inclinación del sensor y la influencia del relieve.

2.1.9.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera (Arias et al. 2014).

Se puede aplicar el enmascaramiento de nubes y neblina o la corrección de neblina, lo que se espera de este proceso es mejorar la separabilidad espectral de los objetos presentes en la imagen corregida respecto a la imagen original, mejorando los resultados finales del proceso de clasificación.

2.1.9.3 Corrección radiométrica

Hay varios niveles de calibración radiométrica. La primera convierte los números digitales del sensor a radiancia y requiere información de la calibración del sensor. La segunda es transformar los valores de radiancia del sensor a radiancia en la superficie de la tierra, el nivel final de la calibración a superficie de reflectancia se consigue mediante la corrección topográfica.

En el 2016 la USGS realizó la calibración por reflectancia de los datos Landsat 7 ETM+ para ser consistentes con Landsat 8 OLI y permitir realizar estudios multitemporales.

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 homogenización radiométrica tienen como

objetivo el asignar valores digitales del mismo rango espectral evitando los errores que comúnmente existen en la adquisición de las imágenes.

2.1.10 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

2.1.10.1 Segmentación de imágenes

La segmentación consiste en el agrupamiento de píxeles a objetos más significativos. A medida que cada objeto es adquirido, estos son caracterizados y sus atributos extraídos; algunos de estos atributos son: media, varianza, área, perímetro, excentricidad y linealidad de los bordes (Schowengerdt, 2006).

Los atributos espaciales son las variables que miden y se relacionan con la forma, la geometría, el tamaño y la relación que puede existir entre ellas, del objeto a estudiar.

Los atributos espectrales son definidos mediante estadística básica calculada en base a los valores del nivel digital de la banda de una imagen, para el objeto a identificar.

Los atributos texturales corresponden a las variables que cuantifican estadísticas básicas, que determina la textura: rango, media, varianza, y entropía de una matriz de píxeles, que representan el objeto, usadas para limitar una operación a un subconjunto de píxeles de la imagen (Townshend et al. 1992).

La importancia de la segmentación es que permite realizar una simplificación de la imagen pero tomando en cuenta el conjunto de atributos definidos de cada una de las variables identificadas que se convierten en límite o restricciones.

La segmentación de imágenes satelitales tiene dos enfoques distintos: métodos basados en gradientes, que se basa en una detección local de bordes y los métodos de crecimiento de la región, que identifican grupos espaciales de píxeles coherentes.

Uno de los algoritmos de crecimiento de la región más populares consiste en agrupar objetos juntos siempre que la varianza normalizada de los valores de píxeles dentro del objeto fusionado permanezca por debajo de un umbral (Baatz & Schäpe, 2000).

Otros algoritmos que se encuentran implementados tanto en software comerciales como gratuitos son delineación de cuencas hidrográficas y cambio de media.

La segmentación multifecha usando bandas de imágenes satelitales de diferentes periodos de tiempo permite crear una capa que contenga información espectral de los objetos basado en cada periodo de tiempo.

Existe la posibilidad de realizar un método híbrido que combina segmentación y técnicas de clasificación a partir de interpretación visual y una validación de los polígonos clasificados permitiendo obtener un método simple, robusto y sustentable.

2.1.10.2 Clasificación de imágenes

La clasificación de una imagen satelital consiste en asociar los atributos espectrales a características específicas que se encuentran en la superficie terrestre.

La clasificación de imágenes multiespectrales permite extraer de la imagen valores homogéneos llamados categorías, las cuales forman otra nueva imagen del mismo tamaño y de características similares a la original, en donde se plasma el extracto de la cartografía temática y un inventario por clases del número de píxeles contenidos en él, la cual permite una tabulación de resultados (Chuvieco, 2006).

2.1.11 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

En un análisis multitemporal la selección del método de clasificación es importante en función del sistema de monitoreo que se desea implementar en base a los insumos, tiempos de procesamiento y resultados que se quieren obtener. La detección de cambios permite obtener resultados directos en el proceso de identificar diferencias de un objeto observado en imágenes satelitales de diferentes fechas.

Los tres pasos necesarios previo a la implementación de una técnica de detección de cambios es el preprocesamiento de las imágenes satelitales incluyendo corrección geométrica, radiométrica y atmosférica; selección de técnicas adecuadas para implementar el análisis de detección de cambios y finalmente la evaluación de la exactitud (Lu et al. 2003).

2.1.12 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

Uno de los estudios más completos relacionados con las diferentes técnicas de detección de cambios, permite analizar la revisión de las diferentes técnicas (Lu et al. 2003). Pero además nos muestra que la búsqueda de nuevas técnicas es todavía un tema activo y con el tema adicional que las nuevas técnicas buscan incorporar los sensores remotos disponibles actualmente. A continuación un resumen de las diferentes técnicas de detección de cambios.

2.1.12.1 Operaciones algebraicas

Son métodos simples de implementar, debido a que se basa en diferenciación de imágenes, la desventaja es que no proporciona matrices de cambio, y es necesaria la selección de umbrales.

Las técnicas más utilizadas son: diferencia de imágenes, diferencia de índices de vegetación, cociente de imágenes, regresión de imágenes y vectores de cambio. Dentro de los algoritmos utilizados podemos mencionar support vector machines (Smola y Schoelkopf, 1998)

2.1.12.2 Transformaciones

Estos métodos trabajan directamente con los componentes, la desventaja es que no proporciona matrices de cambio, además es necesaria la selección de umbrales y dificulta la interpretación del cambio.

Entre las principales técnicas se encuentran: análisis de componentes principales, transformación Tasselled cap, transformación Gramm-Shmidt y Chi-cuadrado.

2.1.12.3 Clasificación supervisada

Estas técnicas se basan en la experiencia del intérprete para seleccionar muestras de entrenamiento de los cambios lo cual se convierte en una desventaja debido a la necesidad de definir de forma precisa la calidad y cantidad de las muestras para producir resultados

confiables. La ventaja es la capacidad de proporcionar matrices de cambio.

Una de las principales técnicas utilizadas es el clasificador de máxima verosimilitud el cual parte del supuesto de que los valores de reflectividad en cada una de las clases siguen una distribución de probabilidad normal multivariante. Se utiliza entonces el vector de medias y la matriz de varianzas y covarianzas para estimar la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada una de las clases. El pixel se asignará finalmente a la clase cuya probabilidad de pertenencia sea mayor, además se pueden usar umbrales de probabilidad para cada categoría. (Chuvieco, 2006; Tso y Mather, 2009)

Otras técnicas son: Comparación post-clasificación, análisis combinado espectral de series temporales, detección de cambios no supervisado, detección de cambios híbrido, redes neuronales artificiales (Rumelhart et al., 1986), clasificación basada en árboles de decisión (Huang and Jensen, 1997), clasificación basada en random forest una mejora de árboles de decisión (Cutler et al., 2007).

2.1.12.4 Modelos avanzados

Estos métodos utilizan modelos lineales o no lineales para poder convertir los valores de reflectividad de la imagen a parámetro biofísicos debido a la complejidad se convierte en una desventaja por el tiempo que demanda y porque es necesario asociarlas a mediciones en campo.

Las técnicas más utilizadas son: Li-Strahler modelo de reflectividad, modelo de mezcla espectral y método de parámetros biofísicos.

2.1.12.5 Análisis visual

Se basa en la interpretación directa de datos multitemporales de las imágenes satelitales. Este método depende de la experiencia del intérprete y del conocimiento del área de estudio. La desventaja de este método es el tiempo.

Cada uno de los métodos mencionados tiene fortalezas y debilidades y pueden ser utilizados para la clasificación de imágenes satelitales, pero es necesario dimensionar la cantidad de entrenamiento para utilizar los diferentes algoritmos, seleccionar muestras de entrenamiento, determinar parámetros de entrada, y la intensidad de contar con un robusto procesamiento. Todas estas características deben ser identificadas previas a la selección de los algoritmos.

Para la investigación se utiliza la clasificación supervisada utilizando la comparación post-clasificación y la detección directa de cambios a través de la técnica de análisis visual, ambos métodos ampliamente utilizados en la detección de cambios de cobertura boscosa los cuales permiten apoyar el análisis de recursos naturales.

2.1.13 EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD

Todo proceso de monitoreo de dinámicas de cambio de cobertura boscosa debe incorporar procedimientos estándar de validación de la calidad temática de los mapas, para el efecto se necesita realizar una validación en campo y/o fuentes independientes.

La exactitud y consistencia de la información sobre área de bosques y áreas de cambio de bosque son importantes para transparentar los resultados, lo que se considera una buena práctica en la generación de reportes, y es un requerimiento, por ejemplo, para que los países accedan a los pagos basados en resultados por REDD+.

Las buenas prácticas precisan que un mapa de cambio sea sujeto a una evaluación de la exactitud basada en un muestreo con información de alta calidad. La clasificación de referencia de alta calidad es comparada con la clasificación del mapa sobre localizaciones específicas que permitan cuantificar la exactitud del mapa de cambio y estimar el área (Olofsson, P. et al. 2013 y 2014, GFOI, 2016, GOF-C-GOLD, 2016).

La metodología de evaluación de la exactitud utiliza tres componentes, el diseño de muestreo, el diseño de respuesta y el análisis.

El diseño de muestreo se utiliza con la finalidad de evaluar las transiciones de interés y asegurar la estimación de exactitud por estrato. El tamaño de la muestra por estrato es definido por la superficie de cada clase, el diseño además permite incrementar el tamaño de las muestras para las clases de cambio y permitir un tamaño de muestra más equitativo.

El tamaño de muestreo depende de la información sobre exactitud, área, y rangos de error deseables que se define a priori. Para el muestreo aleatorio estratificado, se utiliza la fórmula del tamaño de muestreo:

$$n = \frac{(\sum W_i s_i)^2}{[s(\delta)^2] + (\frac{1}{n}) \sum W_i s_i^2} \approx \left(\frac{\sum W_i s_i}{s(\delta)} \right)^2$$

Ecuación 1

Dónde:

n= número de unidades en la región de interés.

$S(\delta)$ = error estándar deseado para la estimación total de la exactitud que se quiere obtener, en este caso se empleó un error estándar igual a 0,01.

W_i = proporción mapeada del área de la clase i.

s_i = desviación estándar del estrato i, definida de acuerdo a la ecuación 2.

$$s_i = \sqrt{U_i(1 - U_i)}$$

Ecuación 2

Donde U_i representa la exactitud del usuario, el mapeo de cambios produce errores de comisión relativamente comunes para las clases de cambio mientras que las clases estables son más precisas. Por esta razón se determinó un valor de exactitud de usuario de 0,6 – 0,7 para las dos clases de cambio y la exactitud de usuario de 0,9 – 0,95 para las clases estables. En este caso se eligió el valor de 0,9 para las clases bosque y no bosque estable, 0,7 para deforestación y 0,6 para regeneración.

La recomendación más importante es que el diseño de muestreo permita la probabilidad de inclusión de la muestra y aleatoriedad en su distribución. El diseño debe ser fácil de implementar, espacialmente bien distribuido sobre la región de interés, costo efectivo y fácil de modificar en la fase de diseño.

El diseño de respuesta considera todos los pasos que llevan a una decisión sobre el acuerdo entre las clasificaciones de los datos de referencia y del mapa. Además, incluye el escoger una

unidad espacial de evaluación de la exactitud de la muestra, seleccionar los datos de referencia de mayor exactitud y la clasificación de las muestras.

Finalmente, en la sección de análisis se genera las matrices de confusión que permitan obtener las medidas de exactitud obtenidas como resultado de la evaluación de la exactitud. La matriz de confusión es un método usualmente aceptado como indicador de la exactitud del resultado.

La matriz de confusión, permite confrontar la información de los sitios de verificación con aquella de la base cartográfica que se pretende evaluar. En la matriz de confusión, las filas representan generalmente las clases de referencia y las columnas las clases del mapa. La diagonal de la matriz expresa el número de sitios de verificación para los cuales hay concordancia entre el mapa y los datos de referencia, mientras los marginales indican errores de asignación. La proporción de puntos correctamente asignados (diagonal) expresa la confiabilidad del mapa. Se distinguen dos tipos de error según si la lectura de la matriz se hace con base en las líneas o en las columnas. El error de comisión representa la proporción de sitios de verificación cartografía da en una cierta clase, pero que en realidad pertenece a otra categoría. El error de omisión se refiere a la proporción de sitios de verificación correspondiente a una categoría que fue cartografiada en otra (Aronoff, 1982).

Una medida comúnmente utilizada es el coeficiente kappa (Congalton & Green, 2009). Los problemas asociados con kappa incluyen, 1) la corrección de un acuerdo de probabilidad hipotético produce una medida que no es descriptiva de la exactitud que encontraría un usuario del mapa (kappa subestimaría la probabilidad de que un píxel seleccionado al azar sea correcto), 2) la corrección por acuerdos de oportunidad usado en la formulación de kappa es basado en un supuesto de cambio aleatorio que no es razonable porque utiliza las proporciones marginales del área del mapa en la definición de acuerdos de oportunidad y estas proporciones son claramente no seleccionadas al azar, 3) kappa está altamente correlacionada con la exactitud general, por lo que reportar kappa es redundante con la exactitud total. (Foody, 1992; Liu et al., 2007; Pontius & Millones, 2011; Stehman, 1997). De acuerdo con la recomendación de (Strahler et al. 2006) el uso de kappa no es aconsejable, ya que a pesar de que su uso es generalizado, no cumple una función útil en la evaluación de la exactitud o estimación de área.

Dentro de las medidas de exactitud que se pueden calcular corresponde:

Exactitud total (\hat{O}): es la proporción de la superficie del mapa asignada correctamente, se refiere a la probabilidad de que una muestra seleccionada al azar en el mapa esté correctamente clasificada. Se calcula como la sumatoria de las coincidencias de las proporciones de área, en base a la ecuación 3.

$$\hat{O} = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{jj}$$

Ecuación 3

Exactitud de usuario (\hat{U}_i): se relaciona con el error de comisión, este implica que en el mapa se cometió el error de asignar las muestras a una clase del mapa, ya que los datos de referencia no realizan esa clasificación. Al cometer errores de comisión disminuye la exactitud de usuario. Se calcula dividiendo los aciertos conseguidos entre el mapa de cobertura con respecto a los datos de referencia en una clase, para el total de muestras la clase de los datos del mapa.

$$\hat{U}_i = \frac{\hat{p}_{ii}}{\hat{p}_{i.}}$$

Ecuación 4

Exactitud del productor (P_j): se relaciona con el error de omisión, este implica que en el mapa se cometió el error de no asignar las muestras a una clase del mapa, ya que los datos de referencia si incluyen esta clasificación. Se obtiene dividiendo los aciertos conseguidos en la matriz de proporción de área, divididos por el total de proporción de área para la clase de los datos de referencia.

$$\hat{P}_j = \frac{\hat{p}_{jj}}{\hat{p}_{\cdot j}}$$

Ecuación 5

3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se definió sobre ecosistemas forestales andinos que se encuentran entre los más diversos y amenazados. Además por su complejidad en temas de accesibilidad y

disponibilidad de información requieren ser monitoreados con la finalidad de conocer su distribución y dinámica.

Debido a que presenta un fuerte grado de intervención antrópica, además el tener un amplio rango altitudinal que va de los 840 metros hasta los 4.759 metros, permite contar con una variabilidad de ecosistemas resaltando los bosques siempre verde montano alto, siempre verde montano, siempre verde montano bajo y piemontano de la cordillera occidental de los Andes.

Utilizando el insumo generado por el Ministerio de Ambiente como es el mapa de ecosistemas del Ecuador continental 2013, podemos conocer los ecosistemas que se encuentran presentes en el área de estudio resaltando el ecosistema bosque siempre verde montano de la cordillera occidental de los Andes, además de otros ecosistemas naturales, el área de estudio además presenta un fuerte grado de intervención antrópica (Tabla 16).

Tabla 16. Ecosistemas del área de estudio

Ecosistemas	Área (ha)	%
Agua	2	0,001
Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes	1.273	0,51
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	379	0,15
Bosque siempreverde del Páramo	107	0,04
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	21.365	8,57
Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental de los Andes	54.686	21,94
Bosque siempreverde montano de Cordillera Occidental de los Andes	76.291	30,60
Bosque siempreverde piemontano de Cordillera Occidental de los Andes	10.585	4,25
Herbazal del Páramo	10.762	4,32
Herbazal húmedo subnival del Páramo	1.617	0,65
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	134	0,05
Intervención	70.679	28,35
Otras Áreas	1.080	0,43
Sin información	333	0,13
TOTAL		100

Utilizando la serie histórica levantada por el Ministerio de Ambiente para el monitoreo de la deforestación podemos conocer que los bosques montanos presentan una fuerte presión (Tabla 17) siendo de ellos el bosque siempreverde montano bajo de cordillera occidental de los Andes el que sufre la mayor afectación, motivo por el cual este estudio enfoca sus esfuerzos en la relevancia de estos ecosistemas boscosos considerando la importancia de servicios ecosistémicos que brindan para el país.

Tabla 17. Deforestación en los ecosistemas boscosos para los periodos 1990 a 2014.

Ecosistema	Deforestación (ha/año)		
	1990-2000	2000-2008	2008-2014
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	336	290	272

Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental de los Andes	3.388	2.389	2.918
Bosque siempreverde montano de Cordillera Occidental de los Andes	1.086	1.467	4.021
Otros ecosistemas boscosos	9.373	12.626	4.384

El análisis del mapa de cobertura y uso de la tierra generado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería a escala 1:250.000 del año 2015 nos permite conocer a detalle los tipos de cultivos y cobertura agropecuaria que se encuentran dentro del área de estudio (Tabla 18).

Tabla 18. Categoría de cultivos y cobertura agropecuaria que se encuentran dentro del área de estudio

Cultivo	Cobertura	Área (ha)
ALFALFA	CULTIVO PERMANENTE	6
ALISO	CULTIVO PERMANENTE	112
AVENA FORRAJERA	CULTIVO PERMANENTE	41
BALSA	CULTIVO PERMANENTE	13
CAFE	CULTIVO PERMANENTE	97
CAÑA GUADUA O BAMBÚ	CULTIVO PERMANENTE	37
CEDRO	CULTIVO PERMANENTE	1
EUCALIPTO	CULTIVO PERMANENTE	715
HELECHO	CULTIVO PERMANENTE	1
LIMÓN	CULTIVO PERMANENTE	2
MISCELÁNEO DE FRUTALES	CULTIVO PERMANENTE	112
MISCELÁNEO FORESTAL	CULTIVO PERMANENTE	32
PACHACO	CULTIVO PERMANENTE	1
PASTO CULTIVADO	CULTIVO PERMANENTE	7.228
PASTO CULTIVADO	CULTIVO PERMANENTE	34.227
PASTO CULTIVADO CON PRESENCIA DE ÁRBOLES	CULTIVO PERMANENTE	4.070
PINO	CULTIVO PERMANENTE	227
ROSAS	CULTIVO PERMANENTE	159
ALCACHOFA	CULTIVO ANUAL	6
ARVEJA	CULTIVO ANUAL	1
CEBADA	CULTIVO ANUAL	106
CHOCHO	CULTIVO ANUAL	5
HABA	CULTIVO ANUAL	44
MAÍZ	CULTIVO ANUAL	263
MISCELÁNEO DE CEREALES	CULTIVO ANUAL	32
MISCELÁNEO DE CICLO CORTO	CULTIVO ANUAL	1.455
MISCELÁNEO DE HORTALIZAS	CULTIVO ANUAL	2
PAPA	CULTIVO ANUAL	743
QUINUA	CULTIVO ANUAL	8
TRIGO	CULTIVO ANUAL	21
ZANAHORIA AMARILLA	CULTIVO ANUAL	3
CAÑA DE AZÚCAR ARTESANAL	CULTIVO SEMIPERMANENTE	40

GRANADILLA	CULTIVO SEMIPERMANENTE	3
MORA	CULTIVO SEMIPERMANENTE	2
NARANJILLA	CULTIVO SEMIPERMANENTE	7
PITAHAYA	CULTIVO SEMIPERMANENTE	15
PLÁTANO	CULTIVO SEMIPERMANENTE	9
TOMATE DE ÁRBOL	CULTIVO SEMIPERMANENTE	7

Se puede concluir que los cultivos permanentes presentan la mayor representatividad con el 94%, seguido de los cultivos anuales con el 5% y menos de 1% para los cultivos semipermanentes, de los cuales los cultivos que presenta la mayor cobertura es el pasto cultivado con 83%, seguidos de misceláneo de ciclo corto con un 3% y cultivos de papa con 1,5%.

Empleando los mapas de cobertura y uso de la tierra generada para el Ecuador continental se puede conocer la dinámica que existe en la zona de estudio relacionada con la cobertura y uso de la tierra desde el año 1990 hasta el año 2014 (Tabla 19) donde existe información generada utilizando una metodología que permite que la información sea comparable (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

Tabla 19. Dinámica de la cobertura y uso de la tierra del área de estudio

Cobertura y uso de la tierra	1990 Área (ha)	2000 Área (ha)	2008 Área (ha)	2014 Área (ha)
ZONA ANTROPICA	1.075	1.354	1.994	2.304
OTRAS TIERRAS	330	1.200	871	887
BOSQUE	177.109	173.816	159.722	157.038
TIERRA AGROPECUARIA	51.449	54.279	69.735	68.909
CUERPO DE AGUA	547	547	546	623
VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	18.783	18.097	16.425	19.532

El análisis de revisión de la cobertura y uso de la tierra la pérdida del bosque permite identificar un fuerte grado de dinamismo, además se evidencia el aumento en el transcurso de los años de la tierra agropecuaria al igual que la zona antrópica, con lo cual se demuestra la importancia de conocer las dinámicas que enfrentan los bosques andinos.

Las tasas de deforestación bruta de las áreas de cobertura boscosa es 329 Has/año para el periodo 1990 – 2000, 1.761 Has/año para el periodo 2000 – 2008 y 671 Has/año para el periodo 2008 – 2014 (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

Otro factor importante a ser analizado es la disponibilidad de información a partir de la utilización de sensores remotos que permitan realizar un monitoreo sostenible, para ello el uso de imágenes satelitales ópticas de mediana resolución se convierten en el mejor insumo ya que gracias a su política de acceso gratuito a las imágenes satelitales Landsat permiten generar información completa del cambio de cobertura forestal de forma multitemporal.

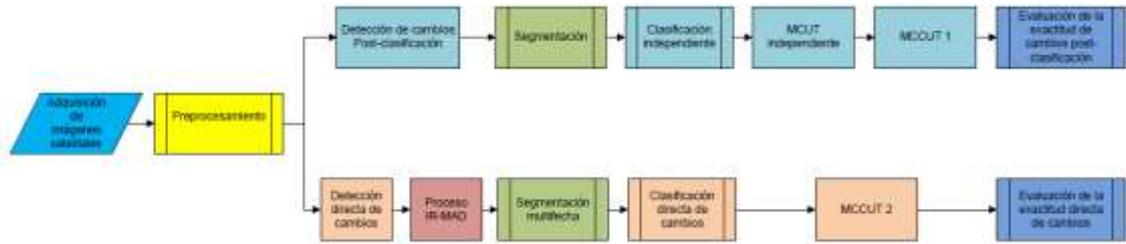


Figura 3. Diagrama de la metodología utilizada. Fuente: Propia

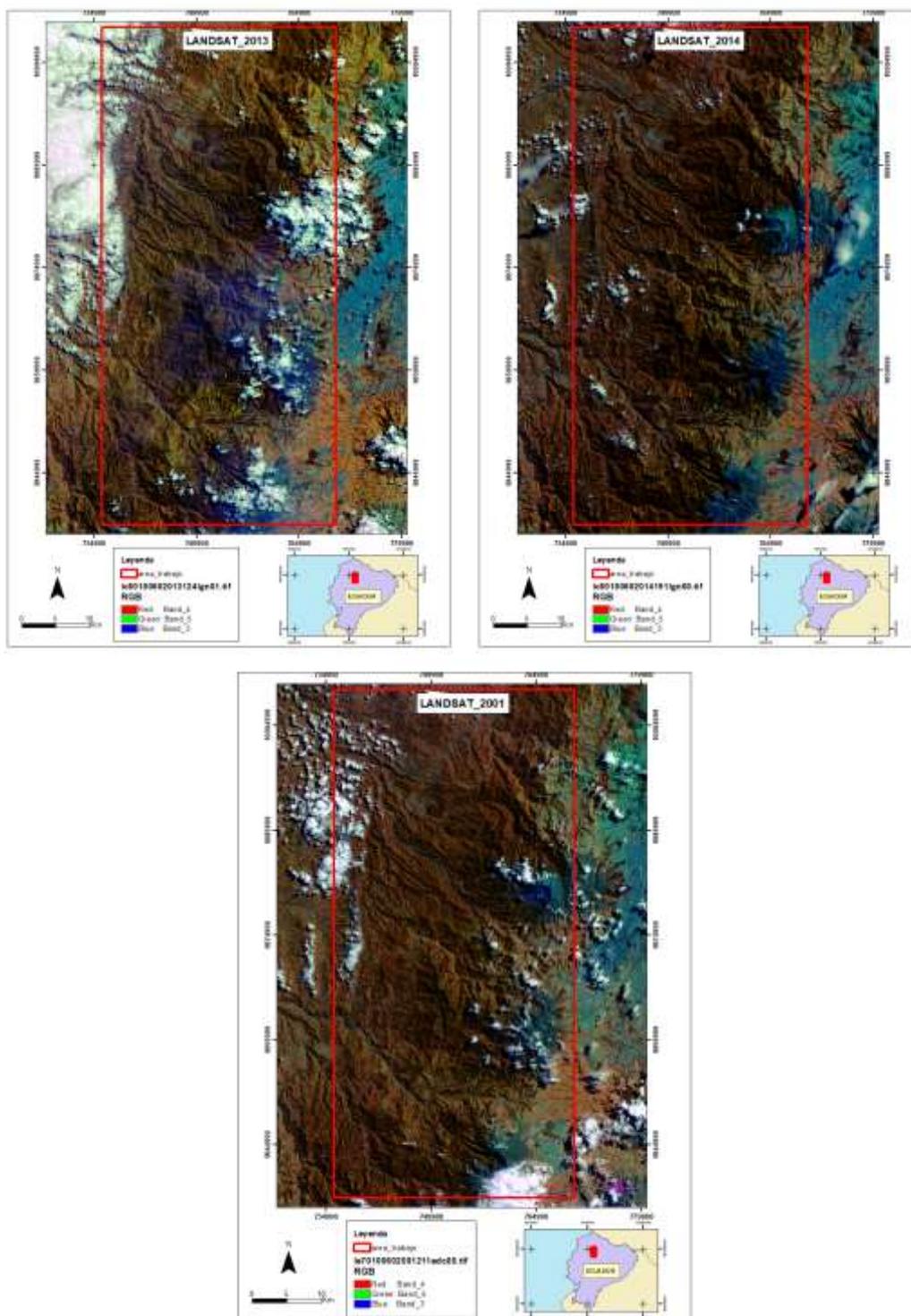
3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La zona de estudio corresponde al path/row 10_60, utilizando el sistema de referencia global (WRS) utilizado para los datos Landsat. El cual permite obtener información de las imágenes satelitales de mediana resolución de cualquier parte del mundo mediante la especificación de una escena designada por los números path (franja vertical) y row (fila horizontal).

Las imágenes satelitales Landsat fueron seleccionadas considerando la proximidad a la fecha del período de estudio y el menor porcentaje de nubosidad (Tabla 20). Además, las imágenes con un nivel de procesamiento L1T permiten tener datos radiométricamente corregidos y co-registrados a una proyección cartográfica con correcciones para los desplazamientos del terreno resultando en una imagen ortorectificada estándar.

Tabla 20. Imágenes satelitales utilizadas

Código de imagen	Sensor	Fecha	Nivel de procesamiento
LC80100602013124LGN01	Landsat 8 OLI_TIRS	2013-05-04	L1T
LC80100602014191LGN00	Landsat 8 OLI_TIRS	2014-07-10	L1T
LE70100602001211EDC00	Landsat 7 ETM	2001-07-30	L1T



Mapa 3. Imágenes satelitales Landsat utilizadas

3.3 ADQUISICIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INSUMOS

La generación del mapa de cambios de cobertura boscosa (CCB) utiliza imágenes de mediana resolución del satélite Landsat, ya que permite asegurar un monitoreo continuo y sostenible gracias a las políticas de adquisición de las imágenes satelitales, elemento clave en el momento de elegir el monitoreo de una zona de estudio.

El factor que impulso el uso del satélite fue la consistencia con misiones anteriores asegurando un monitoreo de los patrones de cambio y una diferencia mínima en relación con la resolución radiométrica.

Este sensor además se suma a una lista válida para cumplir con los requerimientos de buenas prácticas de REDD+ para la cuantificación de los datos de la actividad que es uno de los elementos necesarios para determinar las emisiones de carbono, causadas por el cambio de la cobertura boscosa a otras tierras.

Finalmente la selección de las fechas de las imágenes satelitales para realizar el análisis de cambio de cobertura, permite reducir las diferencias atmosféricas, ángulo de iluminación, humedad del suelo y eliminar las diferencias de estacionalidad.

Es necesario asegurar un inventario de imágenes Landsat para la zona de estudio apoyados de los portales con los que cuenta la USGS (<http://espa.cr.usgs.gov/> y <https://earthexplorer.usgs.gov/>) con lo que se permite generar una serie temporal que permita revisar los temas de estacionalidad y fechas de adquisición para establecer una línea base de las dinámicas de cambio de la cobertura boscosa.

La adquisición de las imágenes se realizó mediante una revisión de una de las plataformas con la que cuenta la USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), teniendo en cuenta las consideraciones iniciales relacionadas con la fecha próxima al periodo de estudio y el menor porcentaje de nubosidad, además esta plataforma permite cargar el shapefile del área de estudio facilitando la búsqueda de las imágenes o a su vez es necesario conocer el path/row de las escena requerida que para nuestro caso es 10_60, finalmente para realizar la descarga es necesario registrarse para que se pueda habilitar la opción de descarga.

3.4 CORRECCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Todas las escenas adquiridas a nivel 1 son procesadas por la USGS con una corrección sistemática del terreno (L1Gt) o un nivel 1 estándar de corrección de exactitud del terreno (L1T). Un nivel 1 completo contiene 13 archivos: bandas 1-9 (un archivo por banda), un archivo específico de metadatos y un archivo de evaluación de la calidad (QA).

El nivel de procesamiento L1T para las imágenes satelitales Landsat presentan corrección radiométricamente y valores a nivel de reflectancia al tope de la atmósfera. Además de correcciones geométricas sistemáticas utilizando para ello puntos de control terrestre o información de posición integrada en el sensor. Adicionalmente los datos también contienen una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve, es decir una ortorectificación (realizada utilizando un DEM global durante la etapa de pre-procesamiento). Esto permite mantener un ajuste geométrico adecuado de las imágenes satelitales.

Por ejecutar esta investigación en un área montañosa, un tema fundamental es la realización del registro relativo entre imágenes satelitales de diferente época con la finalidad de que la identificación de cambios sea precisa y se eviten cambios por diferencias posicionales. Se garantiza así que los cambios de cobertura boscosa mapeados sean reales y no correspondan a un desplazamiento relativo en la posición de objetos comunes entre las dos imágenes.

El procedimiento utilizado para asegurar la calidad de georeferenciación se realizó tomando como referencia las cartas topográficas generadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) en colaboración con el Interamerican Geodetic Survey (IAGS) a escala 1:50.000 de Mindo (1988), Nono (1990), Alluriquin (1991), Quito (1990), Manuel Cornejo Astorga (1992)

y Amaguaña (1990) que cubren el área de estudio. El parámetro de evaluación utilizado fue el error medio cuadrático (RMS). Se adquirió las cartas escaneadas por el IGM y se georreferenció las cartas topográficas. Se seleccionó puntos de evaluación en las cartas topográficas y la imagen satelital, se seleccionaron un total de 10 puntos por carta y para la cuantificación de la calidad se determinó el RMS, finalmente los valores de RMS se encontraron cercanos a la resolución espacial de la imagen Landsat. Con esta revisión lo que se comprueba es que la exactitud posicional del nivel de procesamiento L1T de las imágenes Landsat es suficiente para realizar un análisis adecuado de cambio de cobertura boscosa.

Otro método que nos permite garantizar la coherencia geométrica es una verificación cualitativa comparando visualmente las imágenes para los 10 puntos seleccionados en áreas específicas de cambio, con la finalidad de evaluar si la calidad de corrección es homogénea en toda la imagen satelital, observando que el nivel de procesamiento L1T tiene una calidad de registro geométrico adecuado para el objetivo propuesto en este estudio que es la detección de cambios de la cobertura boscosa, por lo que se determinó que no es necesario realizar un proceso adicional de ortorectificación y registro entre las imágenes satelitales.

3.5 LEYENDA TEMÁTICA

Existen estándares nacionales e internacionales para establecer una leyenda temática, para la generación de información se utilizó la leyenda temática de cobertura y uso de la tierra. Siempre es necesario establecer una leyenda con la finalidad de representar adecuadamente clases de cambio asociadas al área de estudio. La leyenda empleada fue la generada por la línea base de deforestación del Ecuador continental, la misma fue acordada a nivel nacional, entre instituciones generadoras de información temática como el Ministerio de Ambiente, Ministerio de Agricultura e Instituto Espacial Ecuatoriano.

La leyenda tiene como objetivo principal caracterizar la cobertura y uso de la tierra utilizando sensores remotos (Tabla 21). La leyenda cuenta con un primer nivel que guarda correspondencia con las clases de cobertura y uso de la tierra definidos por el grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC).

A continuación se presentan las clases de cobertura y uso de la tierra para el nivel 1

Tabla 21. Leyenda Temática

CÓDIGO NIVEL I	NIVEL I (IPCC)
1	Bosque
2	Tierra agropecuaria
3	Vegetación Arbustiva y Herbácea
4	Cuerpo de Agua
5	Zona Antrópica
6	Otras Tierras
0	Sin Información

3.5.1 DEFINICIONES OPERATIVAS PARA EL NIVEL I

Las definiciones para el Nivel 1 de la leyenda temática siguen los lineamientos del IPCC (2006) con las modificaciones realizadas para Ecuador (Tabla 22).

Tabla 22. Definiciones operativas Nivel I (IPCC)

Nivel I	Definición operativa	Fuente
Bosque	<p>Comunidad vegetal de por lo menos una hectárea, con árboles de 5 m de altura y con un mínimo de 30% de cobertura del dosel o capa aérea vegetal.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incluye: las áreas cubiertas de bambú y palmas nativas, siempre que éstas alcancen el límite mínimo establecido en cuanto a altura y cubierta de copas. • Excluye: las formaciones de árboles utilizadas en sistemas de producción agrícola, por ejemplo plantaciones frutales, plantaciones de palma africana y sistemas agroforestales. Excluye también los árboles que crecen en parques y jardines urbanos. 	MAE (2011)
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Áreas cubiertas por arbustos y vegetación herbácea producto de un proceso biológico natural, que no incluye áreas agropecuarias.	MAE-MAG-IEE (2012)
Tierra Agropecuaria	Área bajo cultivo agrícola y pastos plantados, o que se encuentran dentro de una rotación entre éstos.	MAG - IEE (2012)
Cuerpo de Agua	Área que se encuentra cubierta o saturada de agua estática o en movimiento, natural o artificial que reposa sobre la superficie terrestre por todo o una parte del año.	MAE-MAG-IEE (2012)
Zona Antrópica	Asentamiento humano y la infraestructura que lo complementa.	MAE-MAG-IEE (2012)
Otras Tierras	Áreas con poca o ninguna vegetación, afloramientos rocosos, glaciares y otras clases que no estén incluidas en ninguna de las otras categorías.	MAE-MAG-IEE (2012)
Sin Información	Corresponde a áreas que no han podido ser mapeadas.	

3.5.2 DEFINICIONES OPERATIVAS PARA LOS MAPAS DE CAMBIOS DE COBERTURA BOSCOsa

Las definiciones operativas relacionadas con los cambios de cobertura boscosa corresponden a la asociación de la leyenda de los mapas de cobertura generados de forma independiente (Tabla 23).

Tabla 23. Definiciones operativas de cambio de cobertura boscosa

Categoría	Definición	Fuente
Bosque estable	Corresponde a la categoría de bosque del nivel I de la leyenda que se mantiene como bosque en un periodo de tiempo	Propia
No bosque estable	Corresponde a las categorías de no bosque agrupadas de acuerdo a la definición operativa del nivel 1 de la leyenda, que se mantienen sin cambio en un periodo de tiempo.	Propia
Deforestación	Es la diferencia entre la pérdida y ganancia de la superficie del bosque en un periodo de tiempo	AM 116 Plan de Acción REDD+
Regeneración	Es la recuperación del bosque nativo a través de procesos naturales o por actividades antrópicas. Como resultado de este proceso se presentan bosques secundarios en diferentes estados de desarrollo.	AM 116 Plan de Acción REDD+

3.6 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Previo a realizar la clasificación de imágenes satelitales se deben seleccionar las imágenes y definir la imagen de referencia sobre la cual se va a realizar la normalización radiométrica para las imágenes de los dos años posteriores, para el análisis inicial se seleccionan las imágenes que corresponden al path/row 10_60. La primera corresponde al 30 de Julio de 2001 (LE70100602001211EDC00) que es la imagen de referencia seleccionada por ser la imagen con la menor cantidad de nubes, la segunda corresponde al 4 de Mayo del 2013 (LC80100602013124LGN01) y la tercera corresponde al 10 de Julio del 2014 (LC80100602014191LGN00).

3.6.1 NORMALIZACIÓN RADIOMÉTRICA

Para realizar detección de cambios de la cobertura de la tierra se han desarrollado dos niveles de corrección radiométrica, absoluta y relativa. La corrección radiométrica absoluta es posible relacionando los números digitales de una imagen a datos de radiancia para la superficie de la tierra, requiriendo los coeficientes de calibración del sensor, correcciones atmosféricas entre otras correcciones.

Adicional a que en la selección de las imágenes se utilizó las imágenes con la menor cobertura de nubes para el área de estudio, como un paso previo es necesario realizar un enmascaramiento de nubes, sombras y bruma de todas las imágenes utilizadas, una vez que se genera máscaras individuales es necesario realizar una máscara combinada con la finalidad de generar un análisis comparativo del área de estudio libre de zonas sin información.

Para la normalización radiométrica relativa se asume que las radiaciones en el sensor registradas en dos tiempos diferentes de regiones de reflectancia constante pueden aproximarse por funciones lineales. El aspecto crítico es la determinación de características adecuadas invariantes en el tiempo sobre los cuales basar la normalización (Canty et al. 2004).

La normalización relativa basada en la información radiométrica de las mismas imágenes es una alternativa, este tipo de corrección es ampliamente utilizado en estudios relacionados con la determinación de cambios de la cobertura de la tierra.

Existen varios métodos para realizar normalización radiométrica de imágenes multiespectrales para realizar análisis multitemporales. Todos los métodos parten de la premisa que existe relación entre los valores de radiancia y reflectancia de las imágenes de dos fechas diferentes que son espacialmente homogéneas y pueden ser aproximadas utilizando funciones lineales.

Encontrar características invariantes en el tiempo sobre las cuales basar la normalización es lo más difícil y consume mucho tiempo.

El método MAD (Nielsen, 1998) propuesto originalmente está basado en la técnica de análisis de correlaciones canónicas: para datos multitemporales de variables adquiridas en dos puntos del tiempo y que cubren la misma región del área geográfica, se calculan las variables canónicas y se abstraen para cada uno. Estas diferencias ortogonales contienen máxima información junto con los cambios en todas las variables (bandas espectrales). La detección de cambios es invariante para separar las transformaciones lineales en las variables de las medidas originales en dos puntos al mismo tiempo, como 1) cambios en ganancia y compensación en el dispositivo de medición utilizado para adquirir los datos, 2) normalización de datos o calibración de esquemas que son lineales en valores de grises de las variables originales o 3) ortogonales u otras transformaciones afines como componentes principales o transformaciones de factores de autocorrelación máxima (MAF).

El método IR-MAD (Nielsen, 2007) calcula primero ecuaciones canónicas ordinarias y variables originales MAD. La idea del método IR-MAD es un esquema iterativo que coloca altos pesos sobre observaciones que exhiben pequeños cambios en el tiempo. Las ponderaciones de las primeras iteraciones no se utilizan en el esquema, solo se usan los pesos de la iteración final.

La técnica de normalización radiométrica utilizada corresponde a la detección de alteración multivariada o transformación MAD (Detección de alteración multivariada), entre las propiedades que tienen las componentes MAD una es la ortogonalidad no correlacionada, cuyas varianzas se guardan en una matriz. La correlación mide el valor y dirección de esa asociación de píxeles de una manera lineal.

Este algoritmo se complementa con la aplicación del algoritmo iterativo de detección de alteración multivariada (IR-MAD), el cual se basa en un análisis multivariante que establece la correlación canónica de los cambios para los datos multivariados adquiridos para dos puntos en el tiempo y que cubren la misma región geográfica.

Este esquema transforma dos series de observaciones multivariantes en una diferencia entre dos combinaciones lineales de las variables originales, estas diferencias cuantifican el cambio máximo en todas las variables simultáneamente.

El procedimiento IR-MAD es superior a la transformación ordinaria MAD para identificar cambios significativos, particularmente para un conjunto de datos en el que los píxeles invariantes son relativamente pequeños.

Para realizar la normalización radiométrica se utilizó el software ENVI el cual cuenta con un módulo que permite realizar la normalización radiométrica entre dos imágenes, la primera

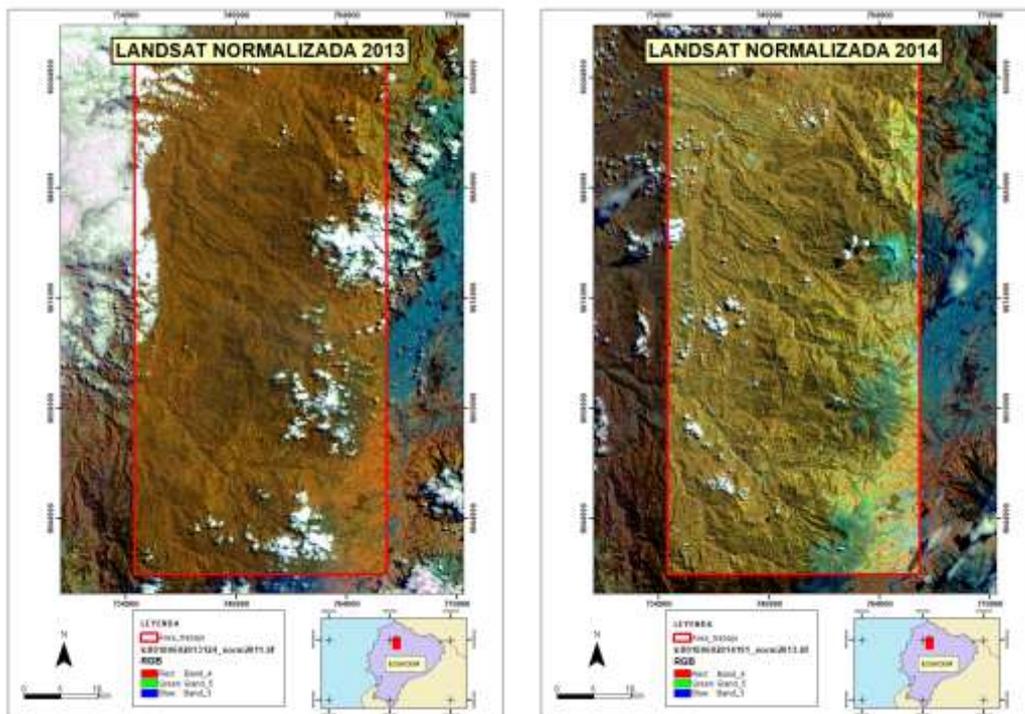
normalización radiométrica relativa entre las primeras dos imágenes toma como imagen de referencia el año 2001 que permite generar la imagen normalizada del año 2013.

Este método utiliza una imagen de cambios, utilizando la transformación IR-MAD para identificar los píxeles invariantes que permiten construir modelos estadísticos de regresión que transforman los niveles digitales de una imagen a la misma escala de los niveles digitales de la imagen de referencia.

Los píxeles de las áreas radiométricas invariantes se seleccionan para cada imagen sobre la base de la detección de cambio multispectral en relación con la imagen de referencia, el método de regresión utilizado es la regresión lineal ortogonal.

Posteriormente se realizó el mismo procedimiento para el segundo par de imágenes generando la imagen normalizada del año 2014, debido a que la metodología de detección de cambios utiliza simultáneamente la información de las imágenes satelitales. Para este proceso se utilizó la corrección radiométrica relativa basada en el método propuesto, este algoritmo permite normalizar de forma relativa la escala radiométrica de las dos imágenes procesadas 2013 y 2014, tomando como base la imagen de referencia 2001.

Los valores de reflectividad de la imagen de referencia 2001 son ahora comparables con los de la imagen normalizada 2013 y la imagen normalizada 2014, la información mantiene la misma distribución estadística (media y desviación), y se reducen los efectos atmosféricos y de calibración.



Mapa 4. Imágenes Landsat normalizadas

3.6.2 SEGMENTACIÓN

Para la segmentación se utilizó el software ENVI que utiliza el algoritmo de borde que tiene en cuenta los límites, píxel por píxel, agrupando aquellos con las diferentes características de las imágenes satelitales como son: color, textura, brillo y tonalidades de acuerdo a su vecino más cercano. El algoritmo permite definir varios parámetros para generar la segmentación como son la escala, que determina el grado de generalización de los segmentos de acuerdo a la heterogeneidad de la imagen satelital, es necesario realizar varias pruebas que mediante un análisis visual nos permite seleccionar el valor ideal.

Para realizar la generalización que fusiona los segmentos adyacentes con atributos espaciales y espectrales similares en segmentos de mayor tamaño, el algoritmo seleccionado es lambda que combina segmentos pequeños dentro de las áreas de mayor tamaño y textura. El algoritmo primero calcula los valores espectrales promedio para cada banda en cada segmento adyacente y calcula la distancia euclidiana entre los segmentos, se combina de forma iterativa los segmentos adyacentes sobre la base de una combinación de información espectral y espacial (Robinson et al. 2002). La fusión se produce cuando el algoritmo encuentra un par de regiones adyacentes de tal manera que el costo de fusión sea inferior a un valor de umbral definido. La finalidad es que los segmentos permitan diferenciar los cambios representativos previamente identificados.

El proceso de segmentación utilizado es diferente para cada una de las metodologías de acuerdo a como se identifica en el flujo de procesos previamente expuesto en la sección 3.1.

3.6.2.1 SEGMENTACIÓN POST-CLASIFICACIÓN

En la metodología de cambios post-clasificación, como la misma consiste en realizar la segmentación de las imágenes satelitales independientes para definir zonas homogéneas representativas, previamente es necesaria una identificación visual para poder representar las clases que conforman la cobertura a nivel 1 de la leyenda del mapa de cobertura y uso de la tierra.

El resultado se exporta en formato vector debido a que se utiliza un método manual de atribución temática visual de segmentos que utiliza como insumos las imágenes satelitales de los periodos de estudio, la leyenda temática e insumos secundarios como mapas de cobertura históricos. Los segmentos en formato vector representan las características independientes en base a la leyenda a nivel 1 del mapa de cobertura y uso de la tierra.

3.6.2.2 SEGMENTACIÓN DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS

Para la metodología de detección directa de cambios, el proceso de segmentación consiste en realizar la clasificación de las imágenes satelitales de cambio es decir utilizar el proceso de segmentación de dos fechas para ello se integró las bandas de las imágenes satelitales Landsat de los periodos 2001 – 2013 y posteriormente 2013 – 2014 para definir zonas homogéneas representativas, donde previamente es necesaria una identificación visual para poder representar las clases que conforman la leyenda del mapa de cambios de cobertura boscosa.

De la misma forma como se realiza con el método anterior, el resultado se exporta en formato vector debido a que se utiliza un método manual de atribución temática visual de segmentos que utiliza como insumos las imágenes satelitales combinadas de los periodos de estudio. El resultado para la clasificación de las imágenes de cambio son los segmentos en formato vector

y se obtiene los cambios de cobertura boscosa (CCB) para el periodo de análisis de las imágenes de cambio, de acuerdo a la leyenda.

3.7 CLASIFICACIÓN TEMÁTICA

3.7.1 MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN

La clasificación de cobertura y uso de la tierra se realiza de forma independiente para cada año de referencia 2001, 2013 y 2014. Para realizar la clasificación temática del área de estudio se utilizó la clasificación supervisada para generar los mapas de cobertura y uso de la tierra.

La clasificación supervisada se realiza de forma independiente para cada imagen satelital, en la cual se requiere de un intérprete con experiencia y familiaridad de la zona de estudio para definir las regiones de interés que para nuestro caso son los segmentos previamente generados que sirven de insumo para la clasificación, de cada una de las categorías propuestas en la leyenda temática propuesta, la finalidad es producir mapas consistentes de cobertura y uso de la tierra.

Para realizar el proceso de clasificación se utilizó el software ENVI, se utilizó aproximadamente un mínimo de 30 muestras por clase. Se realiza una evaluación de las muestras utilizando las herramientas de evaluación estadística básicas del software utilizado que permite analizar si las clases se superponen estadísticamente. Adicionalmente se realizó un análisis de separabilidad con la finalidad de discriminar mejor las clases.

Para lograr una clasificación temática, es necesario reunir un grupo de muestras representativas y completas esto quiere decir que incluya la variabilidad espectral que describa el patrón de respuesta espectral para cada clase de cobertura de la tierra presentes dentro de la imagen. El algoritmo utilizado para la clasificación supervisada es la agrupación de máxima probabilidad (Maximum Likelihood) que contempla los procedimientos de agrupación de los segmentos de una imagen conforme a su similitud espectral, finalmente se obtiene la clasificación final de la imagen satelital. Las zonas sin información correspondiente a nubes y sombras que son reclasificadas como sin información.

La metodología de detección de cambios post-clasificación necesita generar primero mapas independientes de cobertura y uso de la tierra, la forma de apoyar la generación de los mapas utilizando la clasificación supervisada es almacenar las regiones de interés con la finalidad de acortar el tiempo y mantener la consistencia temática, pero en zonas de alta nubosidad es necesario modificar con frecuencia estas muestras. Otra buena práctica consiste en generar varias categorías para seleccionar muestras de una misma clase con la finalidad de una vez realizado el análisis de separabilidad conseguir una mayor coherencia entre las clases finales definitivas que incluyen áreas sin información.

La detección de cambios de coberturas utilizando el primer método se realiza mediante un proceso de post-clasificación, en este método se utilizan las imágenes satelitales normalizadas para cada año de referencia se obtiene la clasificación del mapa de cobertura y uso de la tierra de forma independiente para cada año de referencia 2001, 2013 y 2014 y la detección de cambios se realiza comparando pares consecutivos de los mapas de cobertura y uso de la tierra una vez que fueron generados. Los mapas generados por este primer método fueron los mapas independientes de cobertura y uso de la tierra CUT 2001, 2013 y 2014. Para finalmente obtener los mapas de cambios de cobertura boscosa CCB 2001-2013 y CCB 2013 - 2014.

Finalmente la clasificación supervisada es editada visualmente para resolver problemas de mezcla espectral entre clases temáticas.

3.7.2 MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS

La detección de cambios directo es el segundo método propuesto y se realiza entre pares de imágenes, el primer mapa se obtiene mediante las primeras dos imágenes, la imagen de referencia 2001 y la imagen normalizada del año 2013. Y el segundo mapa se genera entre las imágenes normalizadas de los años 2013 y 2014.

Los insumos utilizados son las dos imágenes seleccionadas y la transformación IR-MAD, además es necesario ingresar la máscara de zonas sin información para las dos imágenes, debido a encontrarse en áreas de cordillera donde es habitual el encontrar zonas sin información (nubes, sombras y bruma).

El algoritmo permite seleccionar el número de iteraciones y penalizaciones la finalidad es cumplir la convergencia de resultados. El resultado del algoritmo de la transformación IR-MAD es generar una nueva imagen cuyas bandas maximizan los cambios de cobertura que existen en el periodo de estudio al combinar la información espectral de las bandas que conforman las dos imágenes satelitales y en donde se puede apreciar las zonas que sufrieron variaciones entre las dos fechas de adquisición de las imágenes.

La imagen de cambios generada utiliza la transformación IR-MAD, la misma se somete a un proceso de segmentación para definir zonas homogéneas utilizando el software ENVI, este proceso requiere definir algunos parámetros como es la escala un valor alto de este parámetro generalizará los segmentos, se utilizó un valor de escala de 35, este valor fue seleccionado después de varias iteraciones, la verificación se realiza utilizando las imágenes satelitales y el conocimiento del intérprete y puntos de referencia de cambios previamente seleccionados y conocidos. El siguiente parámetro es el de generalización que permite fusionar los segmentos vecinos, se utilizó un valor entre 75 y 80, que fue seleccionado después de varias iteraciones y una verificación se realiza utilizando imágenes satelitales y puntos de referencia previamente seleccionado que permitan definir un nivel razonable de detalle.

Para la clasificación temática el método seleccionado es visual/manual para asignar la atribución temática de los segmentos para las clases que conforman la leyenda del mapa de cambios de cobertura boscosa.

La clasificación se realiza de forma visual utilizando como insumos los segmentos, la imagen de cambios y las dos imágenes originales. En este proceso es importante el conocimiento del intérprete sobre las dinámicas de CCB del área de análisis. Los segmentos generados a partir de la imagen de cambio sirven como segmentos iniciales para generar un mapa de CCB, permitiendo tener mayor control sobre el resultado y énfasis en las áreas priorizadas.

La atribución visual de las clases de cambio se generan al definir dos campos para cada segmento de cambio, en el primero se registra la clase de cobertura y uso de la tierra de partida (CUT_inicial) y en el segundo se registra la clase de cobertura y uso de la tierra de llegada (CUT_final). El nombre que se le asigna a las clases de partida y de llegada corresponde a la leyenda de clases de cambio.

El mismo procedimiento es utilizado para la generación del mapa de cambios del periodo 2013-2014.

3.8 EDICIÓN VISUAL

La definición de unidad mínima de mapeo (UMM) depende del objetivo del estudio y de las trayectorias de cambio de cobertura y uso de la tierra que se necesita priorizar, además otro criterio es los estándares de representación nacional de clases de cobertura y uso de la tierra. Debido a la necesidad de priorizar la detección de bosque se utilizó la definición oficial de Ecuador en la cual uno de sus parámetros menciona una comunidad vegetal de por lo menos una hectárea la misma que nos permite definir nuestra UMM para este estudio. Considerando las recomendaciones dadas por el Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC – GOLD, 2016), considera el uso de imágenes satelitales de mediana resolución para el monitoreo de cambios de cobertura forestal por lo cual para este estudio se utilizó imágenes satelitales Landsat, que permite monitorear cambios de cobertura boscosa entre uno a cinco hectáreas como UMM, considerando adicionalmente el esfuerzo que esto representa en relación con el costo y tiempo empleado, además de la exactitud de los mapas de cambio esperados, permitiendo adicionalmente contar con un monitoreo de la cobertura forestal sustentable.

El proceso de edición visual utiliza la habilidad del intérprete para relacionar tonos, colores y patrones espaciales que conforman la imagen satelital. El intérprete además examina los segmentos que conforman los elementos representados en la imagen identificando su relación con otro segmento, su individualidad y su relación con los patrones de la imagen que representan los diferentes tipos de cobertura o los diferentes tipos de cambio.

La interpretación visual depende de varios factores, la experiencia del intérprete que consiste en identificar los tipos de cobertura de la tierra y su relación con la región geográfica de la zona de estudio, además de la capacidad de analizar los posibles cambios de uso de la tierra y finalmente apoyarse en el insumo principal que corresponde a la imagen satelital.

3.8.1 MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN

El proceso de edición visual se realiza primero sobre los mapas de cobertura y uso de la tierra que se realizan de forma independiente para cada año de referencia 2001, 2013 y 2014. Estos archivos requieren ser revisados y editados visualmente para resolver problemas de mezcla espectral o mezcla entre clases temáticas y obtener los mapas finales.

Dentro del proceso de edición visual que se realiza en el método post-clasificación se revisan los cambios que se producen del cruce de los mapas independientes sobre el cual se podrá corregir los posibles errores producidos por transiciones durante el proceso de clasificación independiente.

3.8.2 MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS

El proceso de edición visual sobre cambios directos es un proceso más complejo y se necesita un conocimiento adecuado de la zona para poder interpretar de forma adecuada las transiciones de bosque especialmente la deforestación y la regeneración forestal.

4 CAPÍTULO 4. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

En esta sección se busca comparar los resultados generados utilizando los diferentes métodos de detección de cambios, para ello se realizará una revisión de los resultados de la detección de cambios utilizando la post-clasificación y la detección de cambios directa.

Es necesario señalar que para efectos de comparación de los resultados se utilizó una máscara compuesta utilizando las zonas de información de los tres años para asegurar una homogeneidad de los resultados.

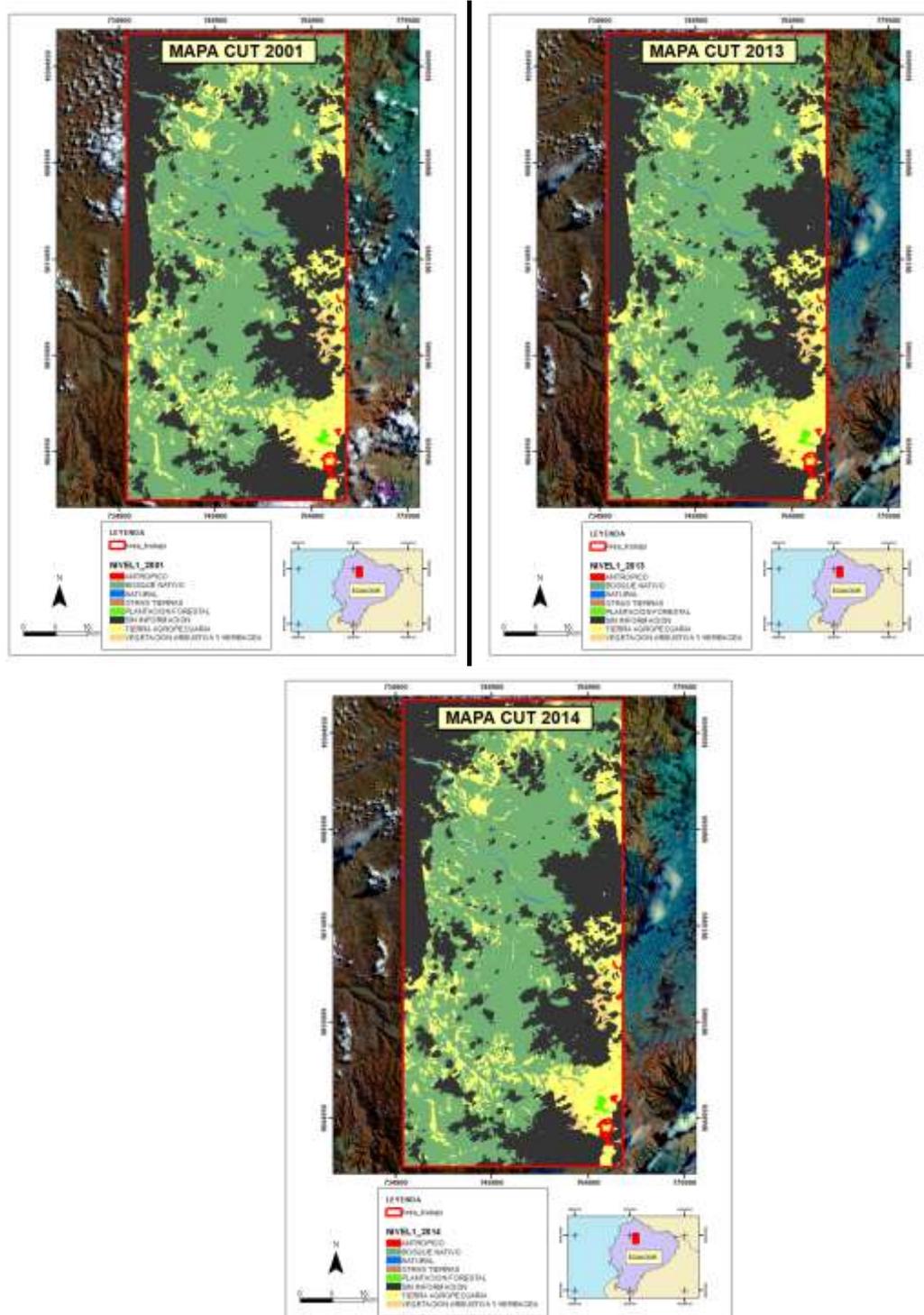
4.1.1 MAPAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA BOSCOsa MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN

En el anexo 2 se presentan los resultados intermedios relacionados con los resultados utilizados para realizar la segmentación de múltiples fechas para generar la detección directa de cambios y el número de muestras utilizadas para realizar la clasificación supervisada para realizar los mapas de cobertura y uso de la tierra realizado de forma independiente.

Resultados de los mapas de cobertura y uso de la tierra realizado de forma independiente para los años 2001, 2013 y 2014, realizado de forma independiente en base a la leyenda a nivel 1 (Tabla 24).

Tabla 24. Resultados de los mapa de cobertura y uso de la tierra 2001, 2013 y 2014.

Categoría (NIVEL 1)	2001	2013	2014
	ÁREA (Ha)	ÁREA (ha)	ÁREA (ha)
ANTRÓPICO	849	851	988
BOSQUE NATIVO	116.902	115.138	113.698
NATURAL	690	714	686
OTRAS TIERRAS	89	89	82
PLANTACIÓN FORESTAL	337	344	408
SIN INFORMACIÓN	93.239	93.239	93.239
TIERRA AGROPECUARIA	34.537	36.251	37.636
VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	2.069	2.084	1.974



Mapa 5. Mapas CUT 2001, CUT 2013 y CUT 2014

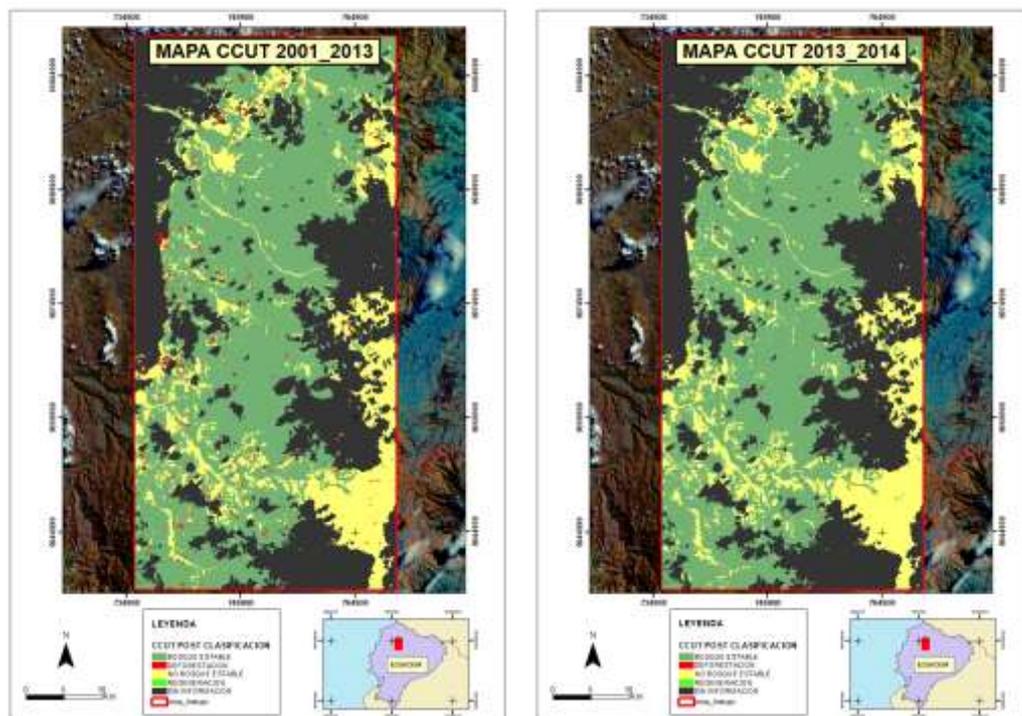
La comparación de los resultados generados por los mapas independientes nos permite identificar los cambios generados a nivel general, además es posible la generación de matrices de transición para evaluar los diferentes tipos de cambios, algo que utilizando el método de detección de cambios directo no es posible.

Los resultados de los mapas de transición utilizando los mapas independientes en base a la leyenda de los mapas de cambios de cobertura boscosa, nos permite evaluar cuatro tipos de cambios con la finalidad de poder realizar una comparación de los resultados obtenidos.

A continuación se presenta los resultados de los mapas de cambio de cobertura boscosa de los periodos 2001 – 2013 y 2013 – 2014 utilizando el método de post-clasificación, en base a la leyenda de cambios (Tabla 25).

Tabla 25. Resultados del mapa de cambio post-clasificación de cambio de cobertura boscosa 2001 – 2013 y 2013 - 2014

MAPA CAMBIO	2001 – 2013	2013 - 2014
	Área (ha)	Área (ha)
BOSQUE ESTABLE	114.944	113.668
DEFORESTACIÓN	1.958	57
REGENERACIÓN	194	30
NO BOSQUE ESTABLE	38.378	41.718



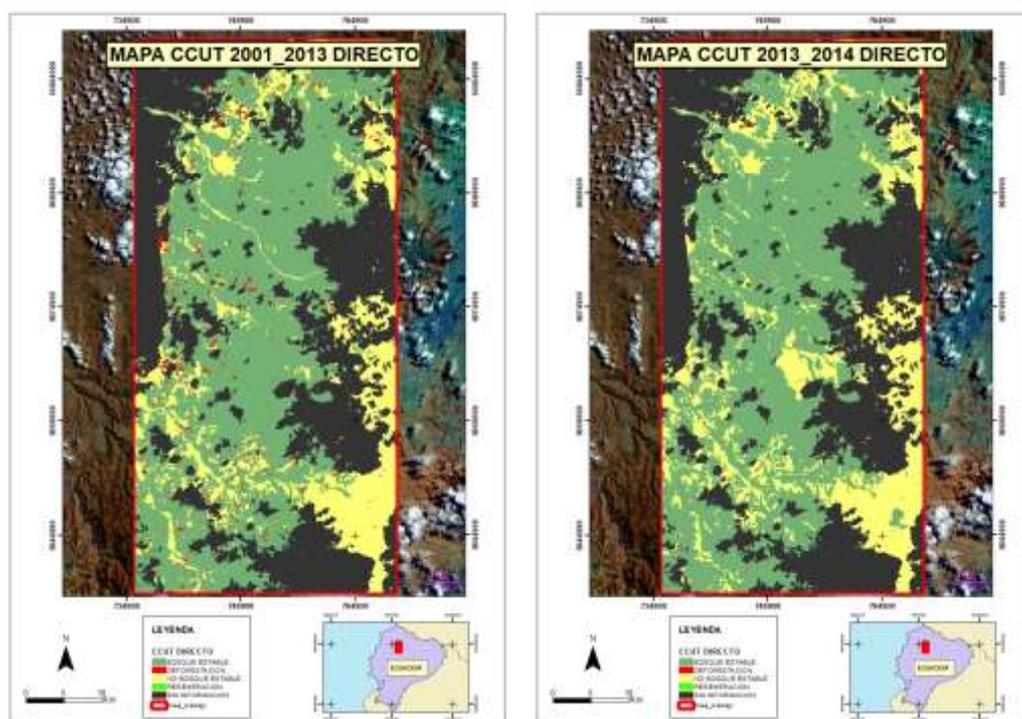
Mapa 6. Mapas Post Clasificación CCUT 2001-2013, CCUT 2013-2014

4.1.2 MAPAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA BOSCOsa MÉTODO DETECCIÓN DE CAMBIOS DIRECTO

Resultados obtenidos utilizando el método de detección de cambios directos utilizando la leyenda de cambios y una máscara compuesta de las zonas sin información para poder realizar la comparación de los resultados de los mapas de cambio de cobertura boscosa de los periodos 2001 – 2013 y 2013 – 2014 utilizando detección de cambios directa (Tabla 26).

Tabla 26. Resultados del mapa de detección directa de cambios de la cobertura boscosa 2001 – 2013

MAPA CAMBIO	2001 – 2013	2013 - 2014
	Área (ha)	Área (ha)
BOSQUE ESTABLE	113.127	112.424
DEFORESTACIÓN	2.422	154
REGENERACIÓN	602	13
NO BOSQUE ESTABLE	39.322	42.882



Mapa 7. Mapas Clasificación Directa CCUT 2001-2013, CCUT 2013-2014

Analizando los resultados de los mapas de cambios, la transición de regeneración se puede apreciar que es un cambio muy complejo debido a que el área no es representativa, además existe una diferencia muy significativa comparando los resultados en ambos periodos entre el 68% y 57% respectivamente, con el detalle adicional que en el primer periodo el método de detección directa detecta mayor regeneración y en el segundo periodo es lo contrario.

Los resultados de deforestación para el primer periodo son del 19%, pero en el segundo periodo se tiene una diferencia significativa que corresponde al 63%, considerando que es un cambio fácil de detectar sobre todo cuando se utiliza un proceso riguroso de edición visual. Para los dos periodos de estudio la deforestación es menor con respecto al método de cambio directo.

El análisis de estas dos transiciones antes señaladas se vuelve más relevantes debido a que sobre estas se realizan los datos de actividad que asociados a contenidos de carbono permiten entrar en mecanismos REDD+ por ejemplo, pero es importante analizar la importancia de una adecuada validación, para poder analizar la calidad de los resultados.

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS MAPAS DE CAMBIO UTILIZANDO LOS DIFERENTES MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Para evaluar la exactitud del cambio de la cobertura boscosa, las clases de cambio a analizar son: bosque estable, no bosque estable, deforestación y regeneración; con el objetivo de calcular la exactitud de cada uno de los cambios referentes a las transiciones de bosque, el análisis permitirá evaluar y comparar la exactitud de los mapas de cambios de cobertura boscosa generados utilizando el método post-clasificación y el método de clasificación directa.

4.3 EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD

Se empleó un diseño aleatorio estratificado, con la finalidad de evaluar las transiciones de interés y asegurar la estimación de exactitud por estrato. El tamaño de la muestra por estrato es definido por la superficie de cada clase, el diseño además permite incrementar el tamaño de las muestras para las clases de cambio y permitir un tamaño de muestra más equitativo.

4.3.1 DISEÑO DE MUESTREO MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN

Utilizando la proporción mapeada del área de la clase, la desviación estándar por clases, el error estándar de la exactitud total y los valores recomendados de exactitud del usuario, se construyen las tablas utilizando la superficie obtenida de los mapas de cambio para los periodos de estudio para las 4 clases de cambios: deforestación, regeneración, bosque estable y no bosque estable. Utilizando las ecuaciones 1 y 2.

A continuación se muestran las tablas generadas para los mapas de los periodos 2001 - 2013 y 2013 - 2014 del método post-clasificación.

Tabla 27. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2001 – 2013 método de post-clasificación

ESTRATOS	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si
Bosque estable	114.944	0,739	0,95	0,218
No bosque estable	38.378	0,247	0,95	0,218
Deforestación	1.958	0,013	0,7	0,458
Regeneración	194	0,001	0,6	0,490

Tabla 28. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2013-2014 método de post-clasificación

ESTRATOS	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si
Bosque estable	113.668	0,731	0,95	0,218
No bosque estable	41.718	0,268	0,95	0,218
Deforestación	57	0,0004	0,7	0,458
Regeneración	30	0,0002	0,6	0,490

Una vez que se selecciona el tamaño de muestreo y la asignación por estratos se produce las estimaciones de exactitud y área. Se identifican cuatro diferentes aproximaciones de asignación de la muestra: proporcional, igual, óptima y asignación de potencia (Stehman & Wickham, 2011).

Se adoptó una aproximación simplificada de asignación del tamaño de la muestra de 50 a 100 para cada estrato, usando el estimador de varianza se determinó la exactitud del usuario, el tamaño de la muestra necesita lograr cierto error estándar para asumir la exactitud del usuario estimado para las clases. El tamaño de muestreo asignado a clases de cambio de los estratos será afectado por el tamaño total de la muestra disponible para asignación.

Para seleccionar el número de muestras por clases es necesario evaluar las diferentes aproximaciones de asignación de la muestra, las asignaciones iguales ofrecen pequeños errores estándar para la exactitud de usuario pero un alto error estándar en la estimación de área, al igual la asignación proporcional resulta en pequeños errores para las clases estables y altas para las clases de cambio; por lo que utilizando la recomendación de buenas prácticas se empleó un tamaño de 50 muestras para las clases de cambio y en las clases estables se asignó el número restante de puntos de forma proporcional.

Tabla 29. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si	Distribución
Bosque estable	114.944	0,739	0,95	0,218	292
No bosque estable	38.378	0,247	0,95	0,218	98
Deforestación	1.958	0,013	0,7	0,458	50
Regeneración	194	0,001	0,6	0,490	50
					490

Tabla 30. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si	Distribución
Bosque estable	113.668	0,731	0,95	0,218	275
No bosque estable	41.718	0,268	0,95	0,218	101
Deforestación	57	0,0004	0,7	0,458	50
Regeneración	30	0,0002	0,6	0,490	50
					476

Se distribuye las muestras para las 4 clases de forma aleatoria de acuerdo al diseño de muestreo, empleando puntos randómicos; posteriormente estos puntos fueron asignados a las clases a evaluarse.

Para la asignación visual las buenas prácticas recomiendan emplear imágenes de mejor resolución que las empleadas para la generación del mapa, pero esto generalmente no es posible debido a los costos que esto representa y a la disponibilidad de imágenes para las fechas a evaluar. Por esta razón se emplearon las imágenes satelitales Rapideye de los años 2012 y 2014, además de las imágenes Landsat para el periodo 2001 usadas para la generación de los mapas de cobertura de la tierra, que es una opción aceptada dentro de las buenas

prácticas (Olofsson, P. et al. 2013), con lo cual se estaría cumpliendo con el manual de buenas prácticas.

La unidad espacial que sirve de base para la comparación específica de la ubicación de la clasificación de referencia y la clasificación del mapa puede ser un píxel, un polígono (o segmento) o un bloque (Stehman & Wickham, 2011).

La unidad espacial de validación fue el píxel, sin embargo, cabe resaltar que en la práctica se evalúa no sólo el píxel que contiene el punto randómico, sino el grupo de píxeles cercanos, de acuerdo a la unidad mínima del mapa (1 hectárea). La validación como se menciona para los años 2012 y 2014 es en base a imágenes Rapideye (5 metros por 5 metros), para el año 2011 se lo realiza en base a una imagen Landsat (30 metros por 30 metros).

4.3.2 DISEÑO DE MUESTREO MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS

Utilizando la proporción mapeada del área de la clase, la desviación estándar por clases, el error estándar de la exactitud total y los valores recomendados de exactitud del usuario, se construyen las tablas utilizando la superficie obtenida de los mapas de cambio para los periodos de estudio para las 4 clases de cambios: deforestación, regeneración, bosque estable y no bosque estable. Utilizando las ecuaciones 1 y 2.

A continuación se muestran las tablas generadas para los mapas de los periodos 2001 - 2013 y 2013 - 2014 del método de clasificación directa.

Tabla 31. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2001 – 2013 método de clasificación directa

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si
Bosque estable	113.127	0,728	0,95	0,218
No bosque estable	39.322	0,253	0,95	0,218
Deforestación	2.422	0,016	0,7	0,458
Regeneración	602	0,004	0,6	0,490

Tabla 32. Información de superficie, proporción, exactitud de usuario y desviación estándar por estratos, para determinación del tamaño de muestreo, periodo 2013-2014 método de clasificación directa

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si
Bosque estable	112.424	0,723	0,95	0,218
No bosque estable	42.882	0,276	0,95	0,218
Deforestación	154	0,001	0,7	0,458
Regeneración	13	0,000	0,6	0,490

Una vez que se selecciona el tamaño de muestreo y la asignación por estratos se produce las estimaciones de exactitud y área. Se identifican cuatro diferentes aproximaciones de asignación de la muestra: proporcional, igual, óptima y asignación de potencia (Stehman, 2012).

Se adoptó una aproximación simplificada de asignación del tamaño de la muestra de 50 a 100 para cada estrato, usando el estimador de varianza se determinó la exactitud del usuario, el tamaño de la muestra necesita lograr cierto error estándar para asumir la exactitud del usuario estimado para las clases. El tamaño de muestreo asignado a clases de cambio de los estratos será afectado por el tamaño total de la muestra disponible para asignación.

Para seleccionar el número de muestras por clases es necesario evaluar las diferentes aproximaciones de asignación de la muestra, las asignaciones iguales ofrecen pequeños errores estándar para la exactitud de usuario pero un alto error estándar en la estimación de área, al igual la asignación proporcional resulta en pequeños errores para las clases estables y altas para las clases de cambio; por lo que utilizando la recomendación de buenas prácticas se empleó un tamaño de 50 muestras para las clases de cambio y en las clases estables se asignó el número restante de puntos de forma proporcional.

Tabla 33. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si	Distribución
Bosque estable	113.127	0,728	0,95	0,218	294
No bosque estable	39.322	0,253	0,95	0,218	102
Deforestación	2.422	0,016	0,7	0,458	50
Regeneración	602	0,004	0,6	0,490	50
					496

Tabla 34. Distribución del tamaño de muestreo de acuerdo a los estratos para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa

Estratos	Superficie (ha)	Wi	Ui	Si	Distribución
Bosque estable	112.424	0,723	0,95	0,218	272
No bosque estable	42.882	0,276	0,95	0,218	104
Deforestación	154	0,001	0,7	0,458	50
Regeneración	13	0,000	0,6	0,490	50
					476

Se distribuye las muestras para las 4 clases de forma aleatoria de acuerdo al diseño de muestreo, empleando puntos randómicos; posteriormente estos puntos fueron asignados a las clases a evaluarse.

4.3.3 DISEÑO DE RESPUESTA MÉTODO POST-CLASIFICACIÓN

Para realizar el diseño de respuesta es necesario generar la matriz de error de conteo de muestras, en esta matriz se representa los datos del mapa en la filas y los datos de referencia en las columnas; en la diagonal se encuentran las coincidencia entre los dos.

A continuación se muestran las matrices generadas con el conteo de muestras para las clases analizadas para los periodos 2001 - 2013 y 2013 - 2014 del método post-clasificación.

Tabla 35. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

		DATOS DE REFERENCIA 2001-2013				
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Total
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	247	39	3	3	292
	No bosque estable	1	96	1	0	98
	Deforestación	2	9	39	0	50
	Regeneración	6	12	3	29	50
	Total	256	156	46	32	490

Tabla 36. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

		DATOS DE REFERENCIA 2013-2014				
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Total
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	247	26	0	2	275
	No bosque estable	4	94	1	2	101
	Deforestación	2	8	40	0	50
	Regeneración	4	18	0	28	50
	Total	257	146	41	32	476

Tras obtener la matriz de confusión del conteo de muestras, se calcula la matriz de confusión de proporciones de área, para lo cual se emplea la siguiente fórmula:

$$P_{ij}^* = W_i \frac{n_{ij}}{n_j}$$

Ecuación 6

Donde:

P_{ij}^* = Proporción de área

W_i = Porcentaje del área de la clase con respecto al total

n_{ij} = conteo de muestras de la clasificación de los datos de referencia y la clase correspondiente del mapa.

n_j = conteo total de muestras para los datos del mapa en una clase determinada.

Tabla 37. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

		DATOS DE REFERENCIA 2001-2013					
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Área del mapa	Wi
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	0,6254	0,0987	0,0076	0,0076	114.944	0,7393
	No bosque estable	0,0025	0,2418	0,0025	0,0000	38.378	0,2468
	Deforestación	0,0005	0,0023	0,0098	0,0000	1.958	0,0126
	Regeneración	0,0001	0,0003	0,0001	0,0007	194	0,001
	Total	0,6286	0,3431	0,0200	0,0083	155.473	1,0000

Tabla 38. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2013-20014, método de post-clasificación

		DATOS DE REFERENCIA 2013-2014					
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Área del mapa	Wi
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	0,6567	0,0691	0,0000	0,0053	113.668	0,7311
	No bosque estable	0,0106	0,2497	0,0027	0,0053	41.718	0,2683
	Deforestación	0,0000	0,0001	0,0003	0,0000	57	0,0004
	Regeneración	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	30	0,0002
	Total	0,6673	0,3190	0,0029	0,0107	155.473	1,0000

Se pueden obtener las áreas ajustadas de cada una de las clases a partir de la matriz de confusión de proporciones de área, para lo cual se emplea la ecuación 7:

$$\hat{A}_j = A_{tot} \sum W_i \frac{n_{ij}}{n_i}$$

Ecuación 7

Donde:

\hat{A}_j = área ajustada de cada clase

A_{tot} = área total del mapa

Tabla 39. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2001-2013, método de post-clasificación

Área total del mapa =		155.473 Hectáreas
Clase	P_j	Área ajustada
Bosque estable	0,62538	97.723
No bosque estable	0,00252	53.345
Deforestación	0,00050	3.111
Regeneración	0,00015	1.293
Total	0,52245	155.473

Tabla 40. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2013-2014, método de post-clasificación

Área total del mapa =		155.473 Hectáreas
Clase	P_j	Área ajustada
Bosque estable	0,65667	103.752
No bosque estable	0,01063	49.593
Deforestación	0,00001	458
Regeneración	0,00002	1.670
Total	0,53992	155.473

Se obtiene el error estándar del área estimada por cada clase, con la ecuación 8:

$$S(\hat{A}_1) = A_{tot} \times S_{p_j} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

A_{tot} = área total del mapa

S_{p_j} = error estándar de la proporción de área.

$$S_{p_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^q W_i^2 \frac{n_i(n_i-1)}{n_i-1}} \quad \text{Ecuación 9}$$

A su vez, el error estándar del área estimada se calculó para un 95% de intervalo de confianza para cada clase, empleando la ecuación 10:

$$\hat{A}_1 \pm 2 \times S(\hat{A}_1) \quad \text{Ecuación 10}$$

En las tablas se muestra el error estándar para los dos periodos de análisis.

Tabla 41. Error estándar calculado para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

Clase	$S_{p\bar{j}}$	Error estándar	Error estándar al 95%
BOSQUE ESTABLE	0,0159	2.465	4.930
NO BOSQUE ESTABLE	0,0152	2.360	4.720
DEFORESTACIÓN	0,0051	793	1.586
REGENERACIÓN	0,0044	680	1.359

Tabla 42. Error estándar calculado para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

Clase	$S_{p\bar{j}}$	Error estándar	Error estándar al 95%
BOSQUE ESTABLE	0,0143	2.230	4.461
NO BOSQUE ESTABLE	0,0146	2.271	4.543
DEFORESTACIÓN	0,0027	413	826
REGENERACIÓN	0,0053	824	1.647

En las siguientes tablas se muestran las medidas de exactitud utilizando las ecuaciones 3,4 y 5 obtenidas para los dos periodos y los dos métodos.

Tabla 43. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

Exactitud total	87,77%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,85	0,99
No bosque estable	0,98	0,70
Deforestación	0,78	0,49
Regeneración	0,58	0,09

Tabla 44. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

Exactitud total	90,68%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,90	0,98
No bosque estable	0,93	0,78
Deforestación	0,80	0,10
Regeneración	0,56	0,01

4.3.4 DISEÑO DE RESPUESTA MÉTODO DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS

Para realizar el diseño de respuesta es necesario generar la matriz de error de conteo de muestras, en esta matriz se representa los datos del mapa en la filas y los datos de referencia en las columnas; en la diagonal se encuentran las coincidencia entre los dos.

A continuación se muestran las matrices generadas con el conteo de muestras para las clases analizadas para los periodos 2001 - 2013 y 2013 - 2014 del método de clasificación directa.

Tabla 45. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

		DATOS DE REFERENCIA 2001-2013				
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Total
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	275	17	2	0	294
	No bosque estable	1	99	2	0	102
	Deforestación	2	10	38	0	50
	Regeneración	1	26	0	23	50
	Total	279	152	42	23	496

Tabla 46. Matriz de confusión de conteo de muestras para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa

		DATOS DE REFERENCIA 2013-2014				
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Total
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	255	14	1	2	272
	No bosque estable	1	101	0	2	104
	Deforestación	1	11	38	0	50
	Regeneración	3	24	0	23	50
	Total	260	150	39	27	476

Tras obtener la matriz de confusión del conteo de muestras, se calcula la matriz de confusión de proporciones de área para lo cual se emplea la ecuación 6.

Tabla 47. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

		DATOS DE REFERENCIA 2001-2013					
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Área del mapa	Wi
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	0,6806	0,0421	0,0049	0,0000	113.127	0,7276
	No bosque estable	0,0025	0,2455	0,0050	0,0000	39.322	0,2529
	Deforestación	0,0006	0,0031	0,0118	0,0000	2.422	0,0156
	Regeneración	0,0001	0,0020	0,0000	0,0018	602	0,004
	Total	0,6838	0,2927	0,0217	0,0018	155.473	1,0000

Tabla 48. Matriz de confusión de proporciones de área para el periodo 2013-20014, método de clasificación directa

		DATOS DE REFERENCIA 2013-2014					
		Bosque estable	No bosque estable	Deforestación	Regeneración	Área del mapa	Wi
DATOS DEL MAPA	Bosque estable	0,6779	0,0372	0,0027	0,0053	112.424	0,7231
	No bosque estable	0,0027	0,2679	0,0000	0,0053	42.882	0,2758
	Deforestación	0,0000	0,0002	0,0008	0,0000	154	0,0010
	Regeneración	0,0000	0,0000	0,0000	0,00004	13	0,0001
	Total	0,6806	0,3053	0,0034	0,0107	155.473	1,0000

Se pueden obtener las áreas ajustadas de cada una de las clases a partir de la matriz de confusión de proporciones de área, para lo cual se emplea la ecuación 7.

Tabla 49. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2001-2013, método de clasificación directa

Área total del mapa =	155.473 Hectáreas	
Clase	P_j	Área ajustada
Bosque estable	0,68061	106.311
No bosque estable	0,00248	45.504
Deforestación	0,00062	3.381
Regeneración	0,00008	277
Total	0,56250	155.473

Tabla 50. Áreas ajustadas de cada clase del mapa de cambios 2013-2014, método de clasificación directa

Área total del mapa =	155.473 Hectáreas	
Clase	P_j	Área ajustada
Bosque estable	0,67792	105.814
No bosque estable	0,00265	47.472
Deforestación	0,00002	530
Regeneración	0,00001	1657
Total	0,54622	155.473

Se obtiene el error estándar del área estimada por cada clase, con la ecuación 8 y ecuación 9.

A su vez, el error estándar del área estimada se calculó para un 95% de intervalo de confianza para cada clase, empleando la ecuación 10.

En las tablas se muestra el error estándar para los dos periodos de análisis.

Tabla 51. Error estándar calculado para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

Clase	S_{p_j}	Error estándar	Error estándar al 95%
BOSQUE ESTABLE	0,0108	1.671	3.343
NO BOSQUE ESTABLE	0,0108	1.685	3.369
DEFORESTACIÓN	0,0050	782	1.564
REGENERACIÓN	0,0003	43	86

Tabla 52. Error estándar calculado para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa

Clase	S_{p_j}	Error estándar	Error estándar al 95%
BOSQUE ESTABLE	0,0110	1.704	3.408
NO BOSQUE ESTABLE	0,0107	1.666	3.333
DEFORESTACIÓN	0,0027	413	827
REGENERACIÓN	0,0053	823	1.646

Finalmente se calculan las siguientes medidas de exactitud para cada clase: exactitud total, exactitud de usuario y exactitud del productor.

En las siguientes tablas se muestran las medidas de exactitud obtenidas para los dos periodos y los dos métodos.

Tabla 53. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

Exactitud total	93,97%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,94	1,00
No bosque estable	0,97	0,84
Deforestación	0,76	0,54
Regeneración	0,46	1,00

Tabla 54. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa

Exactitud total	94,66%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,94	1,00
No bosque estable	0,97	0,88
Deforestación	0,76	0,22
Regeneración	0,46	0,004

4.3.5 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.5.1 Análisis de resultados periodo 2001-2013 post – clasificación y clasificación directa

La evaluación de la exactitud realizada muestra que el mapa de cambios para el periodo 2001-2013 utilizando el método de post-clasificación tiene una exactitud total de 87,77%, lo cual implica una alta exactitud. En el cálculo de la exactitud del usuario se obtuvieron valores de 85% para la clase de bosque estable y 98% para no bosque estable, es decir, que estas clases están correctamente representadas.

Evaluando las clases deforestación y regeneración se obtuvieron valores de 78% y 58% respectivamente (Tabla 55), estas medidas al estar relacionadas con el error de comisión indica que se está sobreestimando las áreas de deforestación y regeneración.

Tabla 55. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

Exactitud total	87,77%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,85	0,99
No bosque estable	0,98	0,70
Deforestación	0,78	0,49
Regeneración	0,58	0,09

Al analizar las áreas ajustadas y el intervalo de confianza al 95% se obtuvo que el área real de deforestación debería estar entre 1.525 ha y 4.697 ha (Tabla 56), el área calculada directamente del mapa es 1.958 ha, la cual se encuentra dentro del intervalo de confianza.

Tabla 56. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2001-2013, método de post-clasificación

Clases	Áreas ajustadas	Error estándar al 95%	Área original del mapa
Bosque estable	97.723	± 4.930	114.944
No bosque estable	53.345	± 4.720	38.378
Deforestación	3.111	± 1.586	1.958
Regeneración	1.293	± 1.359	194

La evaluación de la exactitud realizada muestra que el mapa de cambios para el periodo 2001-2013 utilizando el método de clasificación directa tiene una exactitud total de 93,97%, lo cual implica una alta exactitud. En el cálculo de la exactitud del usuario se obtuvieron valores de 94% para la clase de bosque estable y 97% para no bosque estable, es decir, que estas clases están correctamente representadas.

Evaluando las clases deforestación y regeneración se obtuvieron valores de 76% y 46% respectivamente (Tabla 57), estas medidas al estar relacionadas con el error de comisión indica que se está sobreestimando las áreas de deforestación y regeneración.

Tabla 57. Medidas de exactitud para el periodo 2001-2013, método de clasificación directa

Exactitud total	93,97%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,94	1,00
No bosque estable	0,97	0,84
Deforestación	0,76	0,54
Regeneración	0,46	1,00

Al analizar las áreas ajustadas y el intervalo de confianza al 95% se obtuvo que el área real de deforestación debería estar entre 1.818 ha y 4.945 ha (Tabla 56), el área calculada directamente del mapa es 2.422 ha, la cual se encuentra dentro del intervalo de confianza.

Tabla 58. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2001 - 2013, método de clasificación directa

Clases	Áreas ajustadas	Error estándar al 95%	Área original del mapa
Bosque estable	106.311	± 3.343	113.127
No bosque estable	45.504	± 3.369	39.322
Deforestación	3.381	± 1.564	2.422
Regeneración	277	± 86	602

En la metodología de cambios post-clasificación, como la misma consiste en realizar la segmentación de las imágenes satelitales independientes para definir zonas homogéneas representativas, previamente es necesaria una identificación visual para poder representar las clases que conforman la cobertura a nivel 1 de la leyenda del mapa de cobertura y uso de la tierra.

4.3.5.2 Análisis de resultados periodo 2013-2014 post – clasificación y clasificación directa

La evaluación de la exactitud realizada muestra que el mapa de cambios para el periodo 2013-2014 utilizando el método de post-clasificación tiene una exactitud total de 90,68%, lo cual implica una alta exactitud. En el cálculo de la exactitud del usuario se obtuvieron valores de 90% para las clases de bosque y de 93% para la clase de no bosque estable, es decir, que estas clases están correctamente representadas. Evaluando las clases deforestación y regeneración se obtuvieron valores de 80% y 56% respectivamente (Tabla 59), esta medida al estar relacionada con el error de comisión indica que se está sobreestimando las áreas de deforestación y regeneración.

Tabla 59. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

Exactitud total	90,68%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,90	0,98
No bosque estable	0,93	0,78
Deforestación	0,80	0,10
Regeneración	0,56	0,01

Al analizar las áreas ajustadas y el intervalo de confianza al 95% se obtuvo que el área real de deforestación debería estar entre -368 ha y 1.284 ha (Tabla 60), el área calculada directamente del mapa es 57, la cual se encuentra dentro del intervalo de confianza.

Tabla 60. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2013-2014, método de post-clasificación

Clases	Áreas ajustadas	Error estándar al 95%	Área original del mapa
Bosque estable	103.752	± 4.461	113.668
No bosque estable	49.593	± 4.543	41.718
Deforestación	458	± 826	57
Regeneración	1.670	± 1.647	30

La evaluación de la exactitud realizada muestra que el mapa de cambios para el periodo 2013-2014 utilizando el método de clasificación directa tiene una exactitud total de 94,66%, lo cual implica una alta exactitud. En el cálculo de la exactitud del usuario se obtuvieron valores de 94% para las clases de bosque y de 97% para la clase de no bosque estable, es decir, que estas clases están correctamente representadas.

Evaluando las clases deforestación y regeneración se obtuvieron valores de 76% y 46% respectivamente (Tabla 61), esta medida al estar relacionada con el error de comisión indica que se está sobreestimando las áreas de deforestación y regeneración.

Tabla 61. Medidas de exactitud para el periodo 2013-2014, método de clasificación directa

Exactitud total	94,66%	
Clases	Exactitud de usuario	Exactitud de productor
Bosque estable	0,94	1,00
No bosque estable	0,97	0,88
Deforestación	0,76	0,22
Regeneración	0,46	0,004

Al analizar las áreas ajustadas y el intervalo de confianza al 95% se obtuvo que el área real de deforestación debería estar entre -296 ha y 1.357 ha (Tabla 62), el área calculada directamente del mapa es 154 ha, la cual se encuentra dentro del intervalo de confianza.

Tabla 62. Áreas ajustadas e intervalos de confianza para el periodo 2013 - 2014, método de clasificación directa

Clases	Áreas ajustadas	Error estándar al 95%	Área original del mapa
Bosque estable	105.814	± 3.408	112.424
No bosque estable	47.472	± 3.333	42.882
Deforestación	530	± 827	154
Regeneración	1.657	± 1.646	13

4.4 IMPLICACIÓN DEL MONITOREO DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA

4.4.1 ANÁLISIS ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN Y REGENERACIÓN

En el anexo 3 se realizó un análisis de la deforestación a detalle en donde se concluye que con respecto al análisis espacial de la deforestación con respecto a la red vial, presentan concordancia entre las metodologías y los periodos de estudio y se determinó que entre el 50% de las áreas de deforestación se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías y la suma de estos polígonos corresponde al 50% del área deforestada, confirmando que los frentes de deforestación tienen una relación directa con las vías de acceso, ya que reducen los costos del transporte, ganan plusvalía los terrenos, facilitan la extracción de productos forestales, ganaderos y agrícolas y aumenta la población a lo largo de las carreteras (Wunder, 2000).

Para complementar el análisis se dividió a las áreas de deforestación en función de su tamaño, para el periodo 2001 – 2013 se presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad de áreas corresponde a áreas en el rango de 5 a 20 hectáreas, que representa entre el 41 - 46% del área total deforestada. Al analizar el periodo 2013 – 2014 el rango con mayor cantidad de áreas corresponde a áreas mayores a 3 hectáreas, que representa entre el 35 - 70% del área total deforestada.

Con este análisis se puede observar lo complejo que resulta el realizar un monitoreo de la deforestación, cuando la misma se genera en rangos variables y se distribuyen de forma aleatoria.

Con respecto al análisis espacial de regeneración con respecto a la red vial, presenta concordancia entre las metodologías y los periodos de estudio y se determinó que entre el 50% de las áreas de regeneración se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías y la suma de estos polígonos corresponde al 50% del área regenerada aproximadamente.

La regeneración, al igual que la deforestación, se mantiene en su mayoría cercana a las vías, por lo cual puede existir una relación con tierras que se encuentran en abandono.

El análisis de las áreas de regeneración en función de su tamaño, para el periodo 2001 – 2013 presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad corresponde a áreas mayores a 5 hectáreas, que representa entre el 45 - 51 del área total regenerada. Al analizar el periodo 2013 – 2014 áreas entre 0 a 2 hectáreas, representa el 71% del área total regenerada con la metodología de post-clasificación, para la detección directa de cambios el rango con mayor cantidad corresponde a las áreas mayor a 2 hectáreas, que representa el 69% del área total regenerada.

4.4.2 MONITOREO DE LAS DINÁMICAS DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA

El estudio generado permite demostrar la importancia que representan los ecosistemas montañosos para Ecuador y la falta de estudios relacionados con la temática debido a la complejidad que representa debido a las condiciones climáticas, topográficas y de insumos tecnológicos necesarios.

Dentro de los insumos importantes es necesario mencionar que las imágenes satelitales Landsat siguen siendo el insumo ideal para un monitoreo debido a que cuentan con una serie histórica robusta y una política de acceso gratuito a la información lo que permite tener análisis multitemporales que permitan conocer las dinámicas de la cobertura boscosa, como en el caso del estudio.

La metodología planteada por lo tanto permite optimizar el uso de sensores remotos de mediana resolución, aplicando dos técnicas ampliamente utilizadas con el propósito de generar mapas de cambios de cobertura boscosa, mediante una detección directa de cambios y una post-clasificación.

Dentro del contexto actual la discusión queda abierta a los nuevos insumos como son la constelación de satélites de Sentinel 1 y Sentinel 2 que permiten contar con datos de alta resolución con una periodicidad alta, además de utilizar datos SAR y ópticos respectivamente y que cuentan además con una política de libre acceso lo que permite utilizar estos insumos dentro de un monitoreo volviendo al mismo sostenible, al igual que el caso de Landsat. Pero que debido a que son imágenes de alta resolución deben ser utilizados en forma conjunta con sensores de mediana resolución, para complementar la cobertura con especial atención en áreas con nubosidad permanente como son las zonas de ecosistemas montañosos.

Para la generación de los mapas de detección de cambios directa es importante tener un conocimiento amplio de la zona de estudio que permita agrupar los cambios y poder validarlos utilizando las imágenes satelitales, este procedimiento debe ser riguroso considerando que existe una variabilidad importante de tonalidades de colores y formas del producto final que son detectados y que corresponden a los distintos cambios de cobertura de la tierra.

Actualmente es posible contar con imágenes satelitales que cuentan con diferentes niveles de pre-procesamiento en la nube, como corrección atmosférica, solar y topográfica. Que

permiten generar productos con una mayor robustez considerando las limitaciones existentes para ecosistemas montanos.

Además debido a la posibilidad de contar con plataformas computacionales fuertes para procesamiento de información de forma gratuita y a gran escala que se encuentran en la nube como es el caso de Google Earth Engine, permiten generar por ejemplo series temporales que asociadas con alertas de cambio de la cobertura permiten contar con otros resultados intermedios que permitan afinar o reemplazar la metodología propuesta, pero considerando siempre un análisis claro sobre evaluación de la exactitud, es una alternativa viable para mantener un monitoreo sostenible.

Considerando la variabilidad de metodologías y la accesibilidad a plataformas robustas para procesar imágenes satelitales con una política de acceso gratuita es importante considerar el resultado final que necesitamos conseguir como en el caso de estudio que es un monitoreo de la cobertura forestal, es posible realizar variaciones a la metodología considerando el tema de tiempo debido al demandante trabajo que implica el proceso de edición visual y la cantidad de zonas sin información que podría ser solventada utilizando mosaicos anuales o la incorporación de imágenes radar teniendo en consideración que nos encontramos trabajando en ecosistemas montanos y la complejidad que ello representa.

Existe una gama grande de algoritmos que permiten generar una detección directa de cambios, los mismos que pueden ayudar a complementar las metodologías convencionales que tienen resultados aceptables.

La incorporación de insumos adicionales que permitan generar nueva información relacionada con los bosques es por ejemplo el uso de herramientas como lidar o drones que permitan contar con nueva información sobre el estado de los bosques.

La posibilidad de trabajar con plataformas tecnológicas que permiten utilizar una gran cantidad de información y reducir el tiempo en base a automatizaciones, puede producir por ejemplo la generación de alertas tempranas de deforestación que puedan ser utilizadas con una herramienta complementaria dentro de un monitoreo de la cobertura forestal.

Un monitoreo en los ecosistemas de tierras bajas de la amazonia cambia totalmente cuando nos encontramos en zonas de ecosistemas montanos donde la complejidad inicia con una cobertura de nubes permanente, sumado a la variabilidad topográfica, variabilidad de usos a la cobertura de la tierra lo vuelve al monitoreo en un trabajo demasiado complejo.

Finalmente este estudio se convierte en una contribución al monitoreo de bosques de montaña sobre los cuales es necesaria mayor investigación debido a la importancia que estos representan y además debido a la vulnerabilidad en la que se encuentran.

5 CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio propuesto busca convertirse en la revisión de una propuesta metodológica que permita monitorear los ecosistemas frágiles como es el caso de los ecosistemas forestales andinos, utilizando imágenes satelitales de mediana resolución con políticas de libre acceso y una importante cobertura histórica que permita contar con un monitoreo sustentable.

El método de detección de cambios es un tópico muy activo se seleccionó la detección de cambios post-clasificación y la detección de cambios directo que fueron seleccionados para extraer información de las imágenes satelitales con el propósito de analizar y cuantificar las dinámicas del bosque de forma espacialmente explícita.

En un análisis de detección de cambios la selección del método de clasificación es importante en función del sistema de monitoreo que se desea implementar en base a los insumos, tiempos de procesamiento y resultados que se quiera obtener.

La corrección geométrica entre imágenes satelitales de diferente época permite que la identificación de cambios sea precisa y de esta forma evitar cambios por diferencias posicionales. Garantizando que los cambios de cobertura boscosa mapeados sean reales y no correspondan a un desplazamiento relativo en la posición de objetos comunes entre las dos imágenes.

La metodología analiza otra variable importante como es la normalización relativa que permite utilizar la información radiométrica de las imágenes satelitales de la zona de estudio, además estas correcciones son ampliamente utilizadas en estudios relacionados con detección de cambios de la cobertura boscosa.

La clasificación se realiza de forma visual, en este proceso es importante el conocimiento del intérprete sobre las dinámicas de cambio de cobertura boscosa del área de análisis. Los segmentos generados a partir de la imagen de cambio sirven como segmentos iniciales para generar un mapa de cambios, permitiendo tener mayor control sobre el resultado y énfasis en las áreas priorizadas.

La comparación de los resultados generados por los mapas independientes nos permite identificar los cambios generados a nivel general, además es posible la generación de matrices de transición para evaluar los diferentes tipos de cambios, algo que utilizando el método de detección de cambios directo no es posible.

El informe de análisis de la exactitud incluye los resultados relacionados con: exactitud total, exactitud del usuario (error comisión), exactitud del productor (error omisión), intervalo de confianza y área de cada clase, con la finalidad de demostrar transparencia en la información sobre las clases de transiciones de bosque: bosque estable, no bosque estable, deforestación y regeneración.

La exactitud total de los mapas de cambios para los diferentes periodos es superior al 85%, lo que significa que existe una alta probabilidad de que una muestra seleccionada al azar en los mapas esté correctamente clasificada. Esto se debe a que las clases bosque estable y no bosque estable, que son las que tienen mayor porcentaje con respecto al total tienen precisiones de usuario y productor elevados.

Al analizar las áreas ajustadas y el intervalo de confianza al 95% se obtuvo que el área calculada directamente del mapa para los distintos periodos y distintos métodos de clasificación se encuentre dentro del intervalo de confianza.

Los resultados del método de post-clasificación para las clases de deforestación y regeneración para los dos periodos de estudio, presenta una mayor exactitud de usuario comparando con los resultados de detección de cambio directa, para las dos clases más importantes relacionadas con las dinámicas del bosque.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. Singh, A (1989) Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989-1003.
2. Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G.A.B. y Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858.
3. Bradley, B.A. y Mustard, J.F. (2006). Characterizing the landscape dynamics of an invasive plant y risk of invasion using remote sensing. *Ecological Applications* 16:1132-1147.
4. Young, K. y Lipton, J. (2006). Adaptive governance and climate change in the tropical highlands of Western South American. *Climatic Change* 78:63-102.
5. Huang, J. Wan, Y. y Shen, S. (2009). An Object-Based Approach for Forest-Cover Change Detection using Multi-Temporal High-Resolution Remote Sensing Data, School of Remote Sensing and Information Engineering. Wuhan University, China.
6. Kessler, M., Herzog, S. K., Fjeldsa, J. y Bach, K. (2001). Species richness y endemism of plant y bird communities along two gradients of elevation, humidity and land use in the Bolivian Andes. *Diversity y Distributions* 7:61-77.
7. Gentry, A. H. (1995) Patterns of diversity and floristic composition in neotropical montane forests. Pp 103-126 in H. Churchill S. P. B., E. Forero y J. L. Luteyn (eds). *Neotropical Montane Forest Biodiversity and Conservation Symposium (1993, Bronx, N. Y., USA). Biodiversity and conservation of neotropical montane forests: Proceedings.* New York Botanical Garden, Bronx, New York, USA.
8. Ministerio del Ambiente, (2016). Análisis de la deforestación en el Ecuador Continental 1990 - 2014. Quito – Ecuador.
9. Ministerio del Ambiente del Ecuador, (2013). Metodología para la Representación Cartográfica de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.
10. Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. y Moran, E. (2003). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365-2401.
11. V. Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, N.Y., 1995. ISBN 0-387-94559-8.
12. L. Breiman. Random Forests. *Machine learning*, 45(1):5–32, 2001.
13. Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.01.011>
14. Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014>

15. Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr -- Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, In Press, <https://doi.org/DOI:10.1016/j.rse.2010.07.008>
16. Reiche, J.; Verhoeven, R.; Verbesselt, J.; Hamunyela, E.; Wielaard, N.; Herold, M. Characterizing Tropical Forest Cover Loss Using Dense Sentinel-1 Data and Active Fire Alerts. *Remote Sens.* 2018, *10*, 777.
17. Etter, A y Villa, A. (2000). Andean Forests and Farming Systems in part of the Eastern Cordillera (Colombia). *Mountain Research and Development*, 20(3):236-245.
18. Desclee, B., Defourny, P. y Patrick Bogaert, P. (2007). Identifying Forest Dynamics for Change Detection Using Multitemporal SPOT Imagery, Department of Environmental Sciences and Land Use Planning, Universite Catholique de Louvain, Belgium.
19. GAD Provincial de Pichincha, (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Pichincha 2025, AH Editorial, Quito.
20. Sabins, F. (1996) *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. 3rd Edition, W. H. Freeman and Company, New York, 494 p.
21. Thomas Lillesand Ralph W. KieferJonathan Chipman, February 13, (2015), *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7th Edition: Edition 7, Wiley Global Education
22. Elachi, C. Jakob, J. van Zyl, (2006), *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, 2da Edición, 584 páginas.
23. Chuvieco salinero, E. (2006): "Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio". 2da Edición, Barcelona.
24. Tucker, C. J., & Sellers, P. (1986). Satellite Remote Sensing of Primary Production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395-1416.
25. Robert A. Schowengerdt, (2006), *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Third Edition, Professor Emeritus Department of Electrical and Computer Engineering, College of Optical Sciences, and Office of Arid Lands Studies University of Arizona Tucson, Arizona.
26. Maussel, P., J. Kramber and J. Lee (1990), "Optimum band selection for supervised classification of multispectral data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, no. 1, pp. 55–60.
27. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. y Williams, R.J. (1986). Learning internal representations by error propagation. En: D.E. Rumelhart y J.L. McClelland (Eds.). *Parallel distributed processing* (pp. 318-362). Cambridge, MA: MIT Press
28. A.J. Smola, B. Scholkopf, and K-R. Muller. The connection between regularization operators and support vector kernels. *Neural Networks*, 11:637–649, 1998

29. Cutler, David & C Edwards, Thomas & Beard, Karen & Cutler, Adele & T Hess, Kyle & Gibson, Jacob & Lawler, Joshua. (2007). Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology*. 88. 2783-92. 10.1890/07-0539.1.
30. Asner, G. P., Knapp, D. E., Balaji, A., & Paez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033543.
31. Kellndorfer, J. M., Walker, W. S., LaPoint, E., Kirsch, K., Bishop, J., & Fiske, G. (2010). Statistical fusion of Lidar, InSAR, and optical remote sensing data for forest stand height characterization: A regional scale method based on LVIS, SRTM, Landsat ETM+, and ancillary data sets. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2).
32. Ryan, C. M., Hill, T., Woollen, E., Ghee, C., Mitchard, E., Cassells, G., Williams, M. (2012). Quantifying small-scale deforestation and forest degradation in African woodlands using radar imagery. *Global Change Biology*, 18(1), 243–257.
33. Townshend, J. R. G., Justice, C. O., Gurney, C., & McManus, J. (1992). The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 1054–1060.
34. Heileen Aguilar Arias, Rodolfo Mora Zamora, Christian Vargas Bolaños, (2014). Atmospheric correction methodology for Aster, RapidEye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI FLAASH module software.
35. Baatz, M., Schäpe, A. (2000). Multi-resolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale segmentation. In: Strobl, J., et al. (eds.), *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Beiträge zum AGIT Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag, 12-23.
36. TSO, B. Y MATHER, P. (2009): *Classification Methods for Remotely Sensed Data* CRC. Press Taylor & Francis Group
37. Huang, Xueqiao and John R. Jensen. "A Machine-Learning Approach to Automated Knowledge-Base Building for Remote Sensing Image Analysis with GIS Data." (1997).
38. Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V. and Woodcock, C. E. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129:122-131
39. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. 2014. Olofsson, P.; Foody, G.M.; Herold, M.; Stehman, S.V.; Woodcock, C.E.; Wulder, M.A. *Remote Sensing of Environment* 148: 42–57.
40. GFOI 2016, Integration of remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative, Edition 2.0, Food and Agriculture Organization, Rome.

41. GOCF-GOLD, 2016, A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOCF-GOLD Report version COP22-1, (GOCF-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands).
42. Aronoff, S. (1982) The map accuracy report: A user's view. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(8):1309–1312.
43. Congalton, R., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2nd ed.). Boca Raton: CRC/Taylor & Francis.
44. Foody, G. M. (1992). On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 1459–1460.
45. Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107, 606–616.
46. Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 4407–4429.
47. Stehman, S. V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 62, 77–89.
48. Strahler, A. H., Boschetti, L., Foody, G. M., Friedl, M.A., Hansen, M. C., Herold, M., et al. (2006). *Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps*. EUR 22156 EN — DG. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (48 pp.).
49. J Canty, Morton & Nielsen, Allan & Schmidt, Michael. (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 91. 441-451. 10.1016/j.rse.2003.10.024.
50. Nielsen, A. A., Conradsen, K., & Simpson, J. J. (1998). Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. *Remote Sensing of Environment*, 64, 1 – 19.
51. Nielsen, A. A. (2007). The regularized iteratively reweighted MAD method for change detection in multi- and hyperspectral data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(2), 463–478. Internet <http://www.imm.dtu.dk/pubdb/p.php?4695>
52. Robinson, D. J., Redding, N. J., and Crisp, D. J. (2002). Implementation of a fast algorithm for segmenting SAR imagery, Scientific and Technical Report, 01 January 2002. Australia: Defense Science and Technology Organization.
53. Stehman, S. V., & Wickham, J.D. (2011). Pixels, blocks of pixels, and polygons: Choosing a spatial unit for thematic accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 115,

3044–3055.

54. Wunder, S., (2000). *The economics of deforestation: the example of Ecuador*. London, UK: MacMillan and St.Martin's Press.

Referencia

National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>, 2018-06-25.

Naciones Unidas, Annex Principles relating to remote sensing of the Earth from Space, 1986-12-03.

Canadian Centre for Remote Sensing CCRS. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos>, 2018-10-16.

Instituto Geográfico Militar IGM. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>, Infraestructura de datos espaciales para IGM 2017, Quito, Ecuador.

Anexo 1

Sectores Biogeográficos del área de estudio

Sector Cordillera Occidental

Comprende los bosques siempreverdes y siempreverde estacionales, piemontanos a montano altos de la Cordillera Occidental desde el sur de Colombia limitando al sur con el río Jubones, comprendidos entre los 300 y 3400 m.s.n.m. aproximadamente. El clima presenta ombrotipos de húmedo a hiperhúmedo. En el piso piemontano es notoria la fuerte influencia del Chocó biogeográfico, con abundantes especies de tierras bajas, aquí la mayoría de especies y familias de árboles características de las tierras bajas desaparece (*e.g.* Bombacaceae s.s.) o encuentran el límite superior de su distribución (*e.g.* Myristicaceae); típicamente los fustes de los árboles están cubiertos por orquídeas, bromélias, helechos y aráceas (Sierra *et al.* 1999); las leñosas trepadoras también disminuyen, tanto en número de especies como de individuos, mientras que las epifitas se vuelven más abundantes (Sierra *et al.* 1999). En los bosques de neblina, los árboles están cargados de briofitas y presentan una altura del dosel entre 20 y 25 m, igualmente son muy importantes las epifitas vasculares. Sobre los 3100 m.s.n.m. se encuentran los bosques montanos altos, muy similares a los bosques de neblina pero se diferencian por la gran cantidad de briofitas que se encuentran en el suelo (Sierra *et al.*, 1999). En general los bosques de la cordillera occidental se caracterizan por un mayor índice de endemismo (Pitman *et al.* 2000; Pennington *et al.* 2004).

Ejemplo fotográfico del tipo de bosque del sector de la Cordillera Occidental.

Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental de los Andes



Sector Norte de la Cordillera Oriental

Incluye bosques siempreverdes de piemontanos a montano altos limitando al norte con Colombia y al sur con los ríos Sangay y Palora, con ombrotipos de húmedo a ultrahúmedo. Se extiende aproximadamente desde los 400 a los 3700 m.s.n.m.; en su distribución más baja la diversidad local de árboles se ubica entre las más altas del mundo porque la mayoría de las especies están representadas por un solo individuo en varias hectáreas (Mogollón *et al.* 2004); conforme aumenta la altitud esta diversidad arbórea disminuye, sin embargo estos ecosistemas reportan valores de diversidad excepcionales para otras formas de vida vegetales tales como hierbas, arbustos y epifitas (Hooghiemstra and Cleef 1995) debido en parte a la enorme heterogeneidad de hábitats producto de las fuertes gradientes ambientales

(Jørgensen and León-Yáñez 1999; Kessler 2002; Kessler *et al.* 2001). En términos florísticos los bosques que se encuentran hacia las vertientes externas de la cordillera oriental de los Andes son más diversos que los que se encuentran hacia las vertientes internas de la cordillera (Pitman *et al.* 2000; Pennington *et al.* 2004).

Ejemplo fotográfico del tipo de bosque del sector Norte de la Cordillera Oriental.

Bosque siempreverde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes



Sector Páramo

Se distribuye en un callejón casi ininterrumpido sobre la línea de bosque de las cordilleras oriental y occidental de los Andes (Hofstede *et al.* 1999) sobre los 3.700 y 3.400 m.s.n.m. respectivamente ubicándose originalmente en los pisos montano alto superior y subnival y excepcionalmente en el piso montano alto, es así que en el sur del país se encuentra desde los 2.800 m.s.n.m. (Acosta-Solis 1984, Smith y Cleef 1988). Se estima que los ecosistemas de este sector ocupan un área total de 14.876 km² (5.94 % del territorio nacional). En este sector predominan los ombrotipos húmedos a ultrahúmedos, termotipos orotropical y criotropical; y en base a la respuesta de flora se distinguen la vegetación zonal y azonal, esta última se encuentra relacionada a condiciones edáficas o microclimáticas locales como aquellas que se desarrollan en zonas anegadas (Rangel 1995). El número de especies y su cobertura decrece rápidamente con la altitud y pocas especies alcanzan la línea de nieve (4800-4900 m) como *Nototriche* spp., *Draba* spp., *Calcitium* sp. (Ramsay y Oxley 1996).

Ejemplo fotográfico del tipo de bosque del sector Páramo.

Herbazal del Páramo



Anexo 2

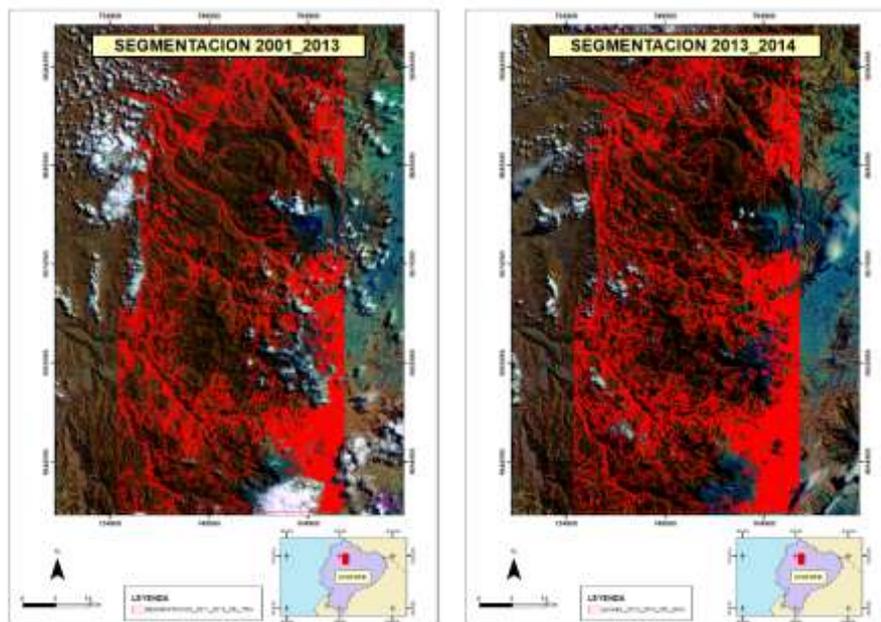
Resultados intermedios

Segmentación

En la tabla 1 se pueden revisar los parámetros utilizados para obtener la segmentación de dos fechas para los periodos 2001-2013 y 2013-2014 que fueron utilizados después de realizar varias pruebas, además en los mapas se puede evidenciar los resultados generados de la segmentación.

Tabla 1. Parámetros utilizados para la segmentación de cambios

Periodo	Escala	Merge
2001-2013	35	75
2013-2014	35	80



Mapa 1. Segmentación de imágenes de cambios

Áreas de muestreo

El método supervisado parte del conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con el área de interés permite al intérprete delimitar sobre la imagen áreas representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda, las cuales se denominarán áreas de entrenamiento. El término indica que tales áreas servirán para “entrenar” al programa de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas se caracterizan cada una de las clases, para asignar más tarde el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de la similitud de sus niveles digitales extraídos como referencia.

Evaluación de las áreas de entrenamiento

Una vez creadas las regiones de interés, se pueden borrar, renombrarlas o fusionarlas; pero antes se deben calcular las estadísticas elementales (Figura 5) de cada categoría: media, rango, desviación estándar, histogramas, separabilidad, entre otras, a partir de los ND de todos los píxeles incluidos en las áreas de entrenamientos de esa clase. Lógicamente este cálculo se aplica a todas las bandas que intervendrán en la clasificación. En definitiva, se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente esas clases. Es crucial su correcta selección, ya que de otro modo se estaría forzando al algoritmo a clasificar áreas heterogéneas.

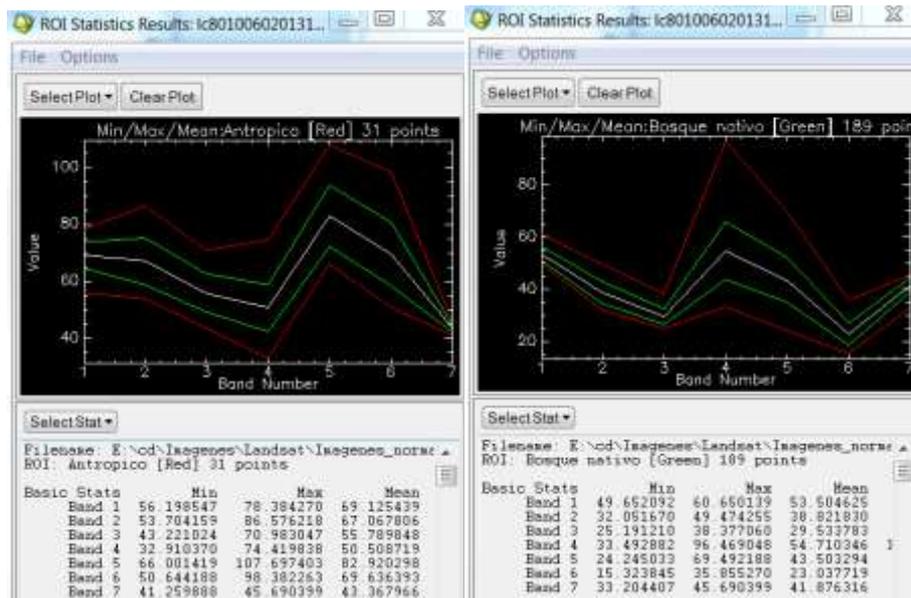


Figura 2. Ejemplo de la estadística elemental de las clases Bosque y Antrópico

Además de realizar un análisis de separabilidad; éste es con el afán de discriminar mejor las clases a ser definidas. Esta opción evalúa la separabilidad espectral entre pares de categorías seleccionadas, dando como resultado un reporte en donde se despliega el promedio de separabilidad.

Para este análisis se utiliza el software ENVI y el resultado es un archivo en el que se muestra la separabilidad de cada par de clases con valores que van de 0 a 2 (Figura 6). Los valores mayores a 1.9 significa que hay una buena separabilidad entre las clases, cuando los valores son menores a 1 se podría realizar una unión (merge ROIs) entre las clases para obtener una sola, y cuando los valores están entre 1 y 1.9 es necesario revisar estas muestras ya sea para reubicar la muestra, definir mejor la muestra o simplemente para eliminarla.

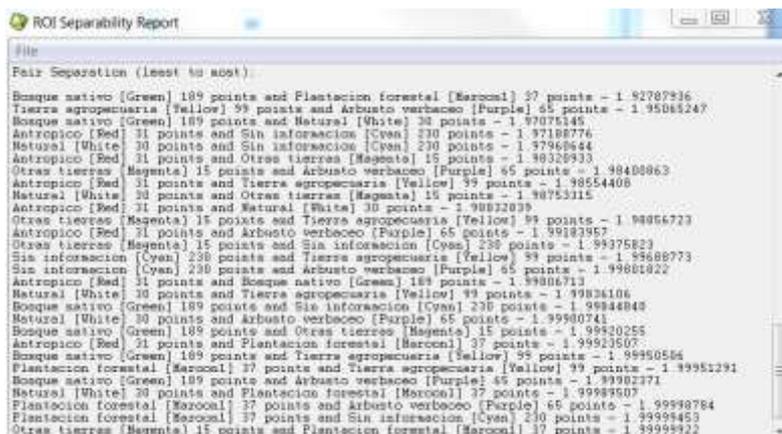


Figura 3. Reporte del análisis de separabilidad de las muestras.

En la tabla 2 se presentan el número de muestra utilizadas para cada una de las categorías pertenecientes a la leyenda temática utilizada, en donde se subdivide la categoría de sin información en sombras y nubes para facilitar los resultados de la clasificación.

Tabla 1. Número de muestras utilizadas por año de estudio.

Leyenda	Número de muestras por año		
	2001	2013	2014
Bosque	31	30	30
Plantación forestal	21	37	24
Tierra Agropecuaria	31	30	30
Vegetación Arbustiva y herbácea	30	26	25
Cuerpo de Agua	29	30	18
Zona antrópica	37	31	33
Otras tierras	20	15	15
Nubes	30	31	32
Sombras	32	30	33

Anexo 3

Análisis espacial de deforestación

Debido a que se trabajó con periodos de monitoreo diferentes el análisis se separa entre los diferentes periodos utilizando los resultados obtenidos con las dos metodologías utilizadas, para el periodo 2001 – 2013 el análisis espacial de la deforestación con respecto a la red vial, presentan concordancia entre las metodologías y se determinó que entre el 45 - 50% de las áreas de deforestación se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías, la suma de estos polígonos corresponde al rango entre 49 - 51% del área deforestada, confirmando que los frentes de deforestación tienen una relación directa con las vías de acceso, ya que reducen los costos del transporte, ganan plusvalía los terrenos, facilitan la extracción de productos forestales, ganaderos y agrícolas y aumenta la población a lo largo de las carreteras (Wunder, 2000).

Tabla 1. Número y porcentaje de áreas de deforestación en función de distancia a la vía para el periodo 2001 - 2013

Distancia a vías (km)	Método post-clasificación				Método detección directa de cambios			
	2001-2013				2001-2013			
	# áreas	%	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
<0,5	296	50	992	51	232	45	1196	49
0,5 – 1	104	18	326	17	97	19	408	17
>1	192	32	640	33	184	36	817	34

Para el periodo 2013 – 2014 el análisis espacial de la deforestación con respecto a la red vial, presenta concordancia entre las metodologías, se determinó que entre el 56 - 67% de las áreas de deforestación se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías, la suma de estos polígonos corresponde al rango entre 53 - 70% del área deforestada, confirmando que los frentes de deforestación tienen una relación directa con las vías de acceso.

Tabla 2. Número y porcentaje de áreas de deforestación en función de distancia a la vía para el periodo 2013 - 2014

Distancia a vías (km)	Método post-clasificación				Método detección directa de cambios			
	2013-2014				2013-2014			
	# áreas	%	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
<0,5	14	56	30	53	30	67	108	70
0,5 – 1	3	12	10	18	7	16	14	9
>1	8	32	17	30	8	18	32	21

Para complementar el análisis se dividió a las áreas de deforestación en función de su tamaño, para el periodo 2001 – 2013 se presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad de áreas corresponde a áreas en el rango de 5 a 20 hectáreas, que representa entre el 41 - 46% del área total deforestada.

Tabla 3. Rangos de tamaño de las áreas de deforestación para el periodo 2001 - 2013

Rango de área (Ha)	Método post-clasificación			Método detección directa de cambios			
	2001-2013			2001-2013			
	# áreas	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
0 – 5	492	734	37	379	74	771	32
5 – 20	88	810	41	117	23	1107	46
>20	12	414	21	17	3	543	22

Para el periodo 2013 – 2014 se presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad de áreas corresponde a áreas mayores a 3 hectáreas, que representa entre el 35 - 70% del área total deforestada.

Tabla 4. Rangos de tamaño de las áreas de deforestación para el periodo 2013 - 2014

Rango de área (Ha)	Método post-clasificación			Método detección directa de cambios			
	2013-2014			2013-2014			
	# áreas	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
0 – 2	13	18	32	19	42	27	18
2 – 3	8	19	33	8	18	19	12
>3	4	20	35	18	40	108	70

Con este análisis se puede observar lo complejo que resulta el realizar un monitoreo de la deforestación y la definición de las causas que promueven la deforestación, cuando la misma se genera en rangos variables y se distribuyen de forma aleatoria.

Análisis espacial de regeneración

Para el periodo 2001 – 2013 el análisis espacial de la regeneración con respecto a la red vial, presentan concordancia y se determinó que entre el 46 – 51% de las áreas de deforestación se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías, la suma de estos polígonos corresponde al rango entre 45 - 56% del área deforestada.

La regeneración, al igual que la deforestación, se mantiene en su mayoría cercana a las vías, por lo cual puede existir una relación con tierras que se encuentran en abandono.

Tabla 5. Número y porcentaje de áreas de regeneración en función de distancia a la vía para el periodo 2001 – 2013

Distancia a vías (km)	Método post-clasificación				Método detección directa de cambios			
	2001-2013				2001-2013			
	# áreas	%	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
<0,5	44	51	86	45	78	46	336	56
0,5 – 1	19	22	46	24	41	24	104	17
>1	23	27	61	32	51	30	162	27

Para el periodo 2013 – 2014 el análisis espacial de la regeneración con respecto a la red vial, presentan concordancia entre las metodologías y se determinó que entre el 50 – 70% de las áreas de regeneración se encuentran a una distancia menor a 500 metros de las vías, la suma de estos polígonos corresponde al rango entre 62 - 71% del área deforestada.

Tabla 6. Número y porcentaje de áreas de regeneración en función de distancia a la vía para el periodo 2013 – 2014

Distancia a vías (km)	Método post-clasificación				Método detección directa de cambios			
	2013-2014				2013-2014			
	# áreas	%	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
<0,5	14	70	22	71	3	50	8	62
0,5 – 1	3	15	5	16	1	17	1	8
>1	3	15	4	13	2	33	4	31

El análisis de las áreas de regeneración en función de su tamaño, para el periodo 2001 – 2013 presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad corresponde a áreas mayores a 5 hectáreas, que representa entre el 45 - 51 del área total deforestada.

Tabla 7. Rangos de tamaño de las áreas de regeneración para el periodo 2001 - 2013

Rango de área (Ha)	Método post-clasificación			Método detección directa de cambios			
	2001-2013			2001-2013			
	# áreas	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
0 – 2	52	44	23	75	44	88	15
2 – 5	21	62	32	63	37	208	35
>5	12	87	45	32	19	306	51

El análisis de las áreas de regeneración en función de su tamaño, para el periodo 2013 – 2014 no presenta concordancia entre las metodologías, el rango con mayor cantidad corresponde a áreas entre 1 a 2 hectáreas, que representa el 71% del área total regenerada con la

metodología de post-clasificación, para la detección directa de cambios el rango con mayor cantidad corresponde a las áreas mayor a 2 hectáreas, que representa el 69% del área total regenerada.

Tabla 8. Rangos de tamaño de las áreas de regeneración para el periodo 2013 - 2014

Rango de área (Ha)	Método post-clasificación			Método detección directa de cambios			
	2013-2014			2013-2014			
	# áreas	Área (ha)	% Área	# áreas	%	Área (ha)	% Área
0 – 2	17	22	71	3	50	4	31
>2	3	9	29	3	50	9	69

8 ACRÓNIMOS

CCB	Cambio de Cobertura Boscosa
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CRSS	Sociedad Canadiense para la teledetección.
CUT	Cobertura y uso de la tierra
DEM	Digital Elevation Model
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GCPs	Ground <i>Control</i> Points
GFW	Global Forest Watch
GOFC - GOLD	Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
IGM	Instituto Geográfico Militar
IAGS	Interamerican Geodetic Survey
IPCC	Grupo Intergubernamental de Cambio Climático
IPCC	Panel Intergubernamental de expertos sobre cambio climático
MAD	Detección de alteración multivariada
MAE	Ministerio de Ambiente
MAF	Factor de auto correlación máxima
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MIR	Mid-Infrared
NBI	Necesidades Básicas Insatisfechas
NIR	Near-Infrared
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
OLI	Operational Land Imager
PEA	Población Económicamente Activa
QA	Quality Assessment
REDD+	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques y la función de conservación de reservorios de carbono, manejo sostenible de bosques e incremento de contenidos de carbono de los bosques.
RMS	Error Medio Cuadrático
SIG	Sistema de Información Geográfica

SWIR	Shortwave Infrared
TIRS	Thermal Infra-Red Scanner
TM	Thematic Mapper
UPA	Unidad de Producción Agrícola
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS-84	World Geodetic System
WRI	World Resources Institute
WRS2	Worldwide Reference System