



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná**

**Diego Alejandro Patiño Rincón**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Manizales, Colombia

2018



# **Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná**

**Diego Alejandro Patiño Rincón**

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director (a):

Ph.D, Jorge Julián Vélez Upegui

Codirector (a):

Ph.D, Jeannette Zambrano Nájera

Grupo de Investigación:

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Manizales, Colombia

2018



*A mi mamá y hermana*



## Agradecimientos

Agradezco el apoyo brindado para la realización de esta tesis a los siguientes proyectos:

- “VACEA Vulnerability and Adaptation to Climate Extremes in the Americas – FASE 1”. Convenio entre la Universidad de Chile, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Universidad de Antioquia y Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
- “Implementación de indicadores de línea base ambiental y construcción de una bodega de datos para apoyar la generación y análisis de los mismos, como parte de la Fase II del proyecto de Estructuración de la Línea Base Ambiental del Departamento de Caldas”. Corpocaldas – Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
- “Análisis multitemporal de los cambios de uso y cobertura del suelo en la zona de influencia del Parque Nacional Natural Los Nevados una perspectiva social”. Convocatoria conjunta de investigación Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y Universidad de Caldas

Agradezco, muy especialmente:

- La dirección, orientación y el apoyo de la Dra. Jeannette Zambrano Nájera y el Dr. Jorge Julián Vélez Upegui
- La orientación de la Dra. Olga Lucia Ocampo y el Geodesta Sergio Humberto Camargo
- La colaboración y el apoyo de mi amiga y compañera de vida Sthefanía Grajales
- El respaldo y apoyo de los integrantes del Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
- Al Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) y a la Central Hidroeléctrica de Calda (CHEC), por suministrar los registros hidrometeorológicos





## Resumen

Desde el punto de vista antrópico, actividades como la agricultura, la minería, la producción maderera y la ganadería, son invasivos y modifican su estructura. El conocimiento de la dinámica del espacio-temporal de la tierra, y como ésta puede condicionar el comportamiento hidrológico de los ríos, podría ser una herramienta de planificación del territorio. El régimen hidrológico de las cuencas está determinado por la interrelación suelo-clima, la afectación de estos parámetros tiene consecuencias en la producción de caudal; el clima en la cuenca del río Chinchiná está influenciado por el fenómeno del ENSO, en el periodo 1981-2014 (Línea Base) la precipitación se incrementó en un 24% durante La Niña y se redujo 11% en el Niño, con relación al caudal el aumento es del 34% en los episodios fríos y la disminución fue del 22% en los cálidos. La caracterización del suelo de la cuenca se realiza por medio de la construcción de mapas de uso y cobertura a partir de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8, de los años 1987, 1999 y 2014, en estos periodos se presenta una disminución de la cobertura boscosa y aumento de pastos y áreas agrícolas, en 1987 representaban el 45% (Bosques) - 22% (Cultivos), y en 2014 pasaron a ocupar el 29% (Bosques) – 35% (Cultivos) de la superficie de la cuenca. Los cambios en las coberturas generaron una reducción en el caudal con respecto al obtenido en la línea base que fue de 35.8%, 5.4% y 1.7% para los tres años, la escorrentía directa presentó un incremento en el porcentaje de cambio respecto a la línea base de 1.0%, 5.5% y 26.3% para los años 1987, 1999 y 2014, de igual forma los procesos de evapotranspiración, infiltración y flujo base presentaron afectaciones. Los resultados y análisis basados en información satelital (o de sensores remotos), aportan los conocimientos necesarios para realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos y edáficos de las cuencas.

**Palabras clave:** Régimen hidrológico, Cambios de uso y cobertura de la tierra, Imágenes satelitales y Modelación hidrológica.

# Hydrological response to changes in land use and coverage in the Chinchiná river basin

## Abstract

From the anthropic point of view, activities such as agriculture, timber production and livestock are invasive and modify its structure. The knowledge of the space and time dynamics of the soil, and how the hydrological behavior of the rivers can be conditioned, could be a tool for territorial planning. The hydrological regime of the basins is determined by the interrelation of soil and climate, the affectation of these parameters has consequences in the flow production; the climate in the Chinchiná river basin is influenced by the ENSO, in the period 1981-2014 (Base line) precipitation increases by 24% during La Niña and is reduced by 11% in El Niño, in relation to the flow the increase is 34% in the cold episodes and the decrease is 22% in the warm ones. The soil characterization of the basin is made through the construction of maps of use and coverage of satellite images Landsat 5, 7 and 8, of the years 1987, 1999 and 2014, in these periods the decrease of forest cover is presented and increase in pastures and agricultural areas, in 1987 represented 45% (Forests) - 22% (Crops), and in 2014 they occupied 29% (Forests) - 35% (Crops) of the surface of the basin. The changes in coverage generated a reduction in the flow with respect to the base line of 35.8%, 5.4% and 1.7% for the three years, the direct runoff showed an increase in the percentage of change with respect to the base line of 1.0%, 5.5% and 26.3% for the years 1987, 1999 and 2014, in the same way the processes of evapotranspiration, infiltration and base flow offer affectations. The results and analysis in satellite information (or remote sensing), provide the necessary knowledge to carry out an adequate management of the water and soil resources of the basins.

**Keywords:** Hydrological regime, Land uses and land Cover changes, Satellite images and Hydrological modeling.

# Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Objetivos 22</b>	
2.1 Objetivo general .....	22
2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>3. Antecedentes.....</b>	<b>23</b>
<b>4. Estado del Arte .....</b>	<b>26</b>
4.1 Variabilidad climática.....	26
4.1.1 Precipitación en cuencas Andinas .....	26
4.1.2 Fenómeno del Niño (ENSO) .....	27
4.1.3 Efectos del fenómeno del Niño en Cuencas Andinas.....	28
4.2 Generación de mapas de uso y cobertura de la tierra a partir de imágenes satelitales.....	29
4.2.1 Resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes satelitales.....	30
4.2.2 Tipos de sensores satelitales.....	33
4.2.3 Selección del tipo de imagen .....	34
4.2.4 Corrección geométrica.....	35
4.2.5 Corrección radiométrica.....	35
4.2.6 Corrección atmosférica .....	36
4.2.7 Clasificación supervisada .....	37
4.2.8 Neighborhood (Efecto sal y pimienta) .....	38
4.2.9 Leyenda Nacional CORINE Land Cover .....	39
4.3 Interacción suelo-atmósfera .....	41
4.3.1 Procesos hidrológicos asociados a las coberturas.....	41
4.3.2 Simulación hidrológica .....	42
4.3.3 Conceptualización de las características de la tierra.....	43
<b>5. Metodología .....</b>	<b>45</b>
5.1 Área de estudio .....	46
5.2 Recolección de información hidroclimática .....	47
5.3 Caracterización del comportamiento hidrológico de la cuenca .....	49
5.4 Recolección de información satelital .....	50
5.5 Elaboración de mapas de uso y cobertura .....	53
5.6 Identificación de coberturas.....	53
5.7 Validación de las coberturas identificadas .....	54
5.7.1 Pastos .....	54
5.7.2 Áreas agrícolas heterogéneas .....	56
5.7.3 Bosques .....	58
5.7.4 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.....	60

5.7.5	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación .....	63
5.7.6	Aguas continentales .....	67
5.8	Modelación hidrológica .....	68
5.8.1	Obtención de los parámetros.....	71
5.8.2	Almacenamiento estático o agua disponible para las plantas (Hu) .....	71
5.8.3	Conductividad hidráulica saturada en la capa superior de la tierra (Ks).....	72
5.8.4	Influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca .....	73
<b>6.</b>	<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>75</b>
6.1	Comportamiento hidrológico de la cuenca .....	75
6.1.1	Efectos del fenómeno (ENSO) en la precipitación de la cuenca .....	78
6.1.2	Efectos del fenómeno (ENSO) en el caudal de la cuenca .....	80
6.2	Construcción de los Mapas de uso y cobertura de la cuenca.....	83
6.2.1	Selección del tipo de imagen.....	83
6.2.2	Filtrado espacial .....	83
6.2.3	Calibraciones .....	84
6.2.4	Análisis espectral .....	84
6.2.5	Clasificación supervisada .....	85
6.2.6	Neighborhood (Efecto sal y pimienta).....	85
6.2.7	Ajuste de la Leyenda de acuerdo a la Leyenda Nacional .....	86
6.2.8	Mapas de uso y cobertura para los años 1987, 1999 y 2014.....	86
6.2.9	Cambios de uso y cobertura en la cuenca.....	88
6.3	Influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca.....	89
6.3.1	Línea base o periodo de referencia (1981-2014).....	89
6.3.2	Almacenamiento estático (Hu).....	90
6.3.3	Conductividad hidráulica saturada (Ks) .....	92
6.3.4	Modelación hidrológica de los años 1987, 1999 y 2014.....	92
6.3.5	Efectos del ENSO en el balance hidrológico de la cuenca de los años 1987, 1999 y 2014 .....	94
6.3.6	Efectos de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca .....	95
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>99</b>
7.1	Conclusiones .....	99
7.2	Recomendaciones .....	102
7.3	Trabajos futuros.....	102
<b>8.</b>	<b>Anexos 103</b>	
<b>9.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>152</b>

## Lista de figuras

### Pág.

Figura 4-1 Serie histórica ONI 1950-2018 Fuente: (NOAA, 2018) .....	28
Figura 4-2 Esquema matricial de una imagen satelital Fuente: (Chuvienco, 1995).....	30
Figura 4-3 Representación resolución espacial de las imágenes satelitales Fuente: (Vittek et al., 2013) .....	31
Figura 4-4 Representación espectral del sensor Landsat Fuente: Adaptado de (Chuvienco, 1995).....	32
Figura 4-5 Esquema de funcionamiento sensores pasivos Fuente: Adaptado de (Chuvienco, 1995).....	33
Figura 4-6 Esquema de funcionamiento sensores activos Fuente: Adaptado de (Chuvienco, 1995).....	34
Figura 4-7 Esquema de corrección geométrica Fuente: Adaptado de (Ioannis & Meliadis, 2011).....	35
Figura 4-8 Comparación de imagen original (izquierda) vs imagen corregida (derecha) radiométricamente Fuente: Propia.....	36
Figura 4-9 Esquema corrección atmosférica Fuente: Adaptado de (Crespi & de Vendictis, 2009).....	37
Figura 4-10 Asignación de polígonos de entrenamiento para las principales coberturas Fuente: Propia.....	38
Figura 4-11 Ventanas de exploración Fuente: Propia.....	39
Figura 4-12 Leyenda nacional CORINE Land Cover Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2010) .....	40
Figura 5-1 Esquema metodológico Fuente: propia .....	46
Figura 5-2 Localización de la Cuenca del río Chinchiná Fuente: Propia .....	46
Figura 5-3 Municipios que componen la cuenca del río Chinchiná Fuente: Propia .....	47
Figura 5-4 Plataforma Global Visualization Viewer del USGS Fuente: USGS .....	50
Figura 5-5 Plataforma Global Forest Change Fuente: University of Maryland .....	50

Figura 5-6 Metodología construcción de mapas de uso y cobertura Fuente: Propia .....	53
Figura 5-7 Subclase Pastos parte media-alta de la cuenca, 1100 - 3000 m.s.n.m Fuente: Propia .....	55
Figura 5-8 Características de los pastos arbolados Fuente: (IDEAM, 2010) .....	56
Figura 5-9 Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales - cuenca alta, entre 1100 - 3000 m.s.n.m Fuente: Propia .....	57
Figura 5-10 Características de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales Fuente: (IDEAM, 2010) .....	58
Figura 5-11 Características del Bosque denso Fuente: (IDEAM, 2010) .....	59
Figura 5-12 Bosque denso - cuenca media-alta Fuente: Propia .....	60
Figura 5-13 Herbazal - cuenca alta, entre 3800 - 4200 m.s.n.m Fuente: Propia .....	61
Figura 5-14 Características del Herbazal denso Fuente: leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia .....	62
Figura 5-15 Vegetación típica de la cobertura herbácea - cuenca alta Fuente: Propia ...	62
Figura 5-16 Zonas arenosas naturales - cuenca alta, entre 3750 - 4000 m.s.n.m Fuente: Propia .....	63
Figura 5-17 Características de las Zonas arenosas naturales Fuente: (IDEAM, 2010) ...	64
Figura 5-18 Afloramientos rocosos – cuenca alta, entre 4,000 - 4,873 m.s.n.m Fuente: Propia .....	64
Figura 5-19 Características de afloramientos rocosos Fuente: (IDEAM, 2010) .....	65
Figura 5-20 Característica de Zonas glaciares y nivales Fuente: (IDEAM, 2010) .....	66
Figura 5-21 Glaciares y Zonas Nivales - cuenca alta .....	67
Figura 5-22 Características de lagunas, lagos, y ciénagas Fuente: (IDEAM, 2010) .....	67
Figura 5-23 Presencia de Lagunas y lagos, como cobertura en la parte alta de la cuenca .....	68
Figura 5-24 Esquema general del modelo de interacción suelo – atmosfera Fuente: (J. I. Vélez et al., 2002) .....	69
Figura 6-1 Precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2014 Fuente: (Patiño et al., 2014) .....	76
Figura 6-2 Precipitación media mensual multianual 1981-2010 según rango altitudinal Fuente: Propia .....	77

Figura 6-3 Variación en la estacionalidad de la precipitación anual provocada por la ocurrencia del fenómeno ENSO, en algunas estaciones de acuerdo al rango altitudinal de la cuenca Fuente: Propia.....	79
Figura 6-4 Efectos del ENSO en la precipitación media en las estaciones de la cuenca según su localización por altitud Fuente: Propia.....	80
Figura 6-5 Variación en la estacionalidad del caudal anual provocada por la ocurrencia del fenómeno ENSO, en las estaciones de aforo de la cuenca Fuente: Propia.....	82
Figura 6-6 Efectos del ENSO en el caudal medio en estaciones de la cuenca Fuente: Propia.....	82
Figura 6-7 Transiciones entre nube, sombra de nube y cobertura vegetal Fuente: Propia.....	83
Figura 6-8 Influencia de las sombras en el comportamiento espectral de la imagen Fuente: Propia.....	84
Figura 6-9 Análisis espectral de la cobertura de Hielo y Nube Fuente: Propia.....	85
Figura 6-10 Imagen codificada (Izquierda), Imagen procesada (Derecha) Fuente: Propia.....	86
Figura 6-11 Mapa de uso y cobertura de la cuenca del río Chinchiná para los años 1987, 1999 y 2014 Fuente: Propia.....	87
Figura 6-12 Área en porcentaje de los usos y cobertura de la tierra en la cuenca del río Chinchiná para los años 1987, 1999 y 2014 Fuente: Propia.....	88
Figura 6-13 Hidrograma de calibración modelo hidrológico de tanques, estación El Retiro (1981-2014).....	90
Figura 6-14 Hidrogramas de calibración de los modelos de los años 1987, 1999 y 2014.....	94
Figura 6-15 Influencia de la ocurrencia del fenómeno ENSO en el balance hidrológico de la cuenca del río Chinchiná Fuente: propia.....	95
Figura 6-16 Porcentaje de cambio entre los resultados de Caudal (Q m <sup>3</sup> /s), Interflujo (IF mm/año) y Flujo base (FB mm/año) del periodo línea base (LB) y los obtenidos para los años de análisis con las condiciones de uso y cobertura de la tierra de los años 1987, 1999 y 2014 Fuente: Propia.....	96
Figura 6-17 Porcentaje de cambio de evapotranspiración con respecto a la LB para los tres periodos de interés.....	97

Figura 6-18 Porcentaje de cambio de Escorrentía directa (ED mm/año) de los años de análisis de acuerdo a las condiciones de uso y cobertura de la tierra en los años 1987, 1999 y 2014 con respecto a la línea base (LB) ..... 98



## Lista de tablas

Tabla 4-1 Escala admisible de acuerdo al tipo de imagen usada Fuente: Propia .....	35
Tabla 5-1 Inventario de estaciones de precipitación (mm).....	48
Tabla 5-2 Inventario de estaciones de Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%) .....	48
Tabla 5-3 Inventario de estaciones de Brillo Solar (hr) .....	49
Tabla 5-4 Inventario de estaciones de Caudal (m <sup>3</sup> /s).....	49
Tabla 5-5 Inventario de escenas obtenidas de la plataforma GLOVIS (USGS) .....	51
Tabla 5-6 Inventario de escenas obtenidas en la plataforma Global forest Change (University of Maryland).....	52
Tabla 5-7 Coberturas identificadas en la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra Fuente: Propia.....	54
Tabla 5-8 Valores de Conductividad hidráulica saturada (Ks) para los usos y cobertura presentes en la cuenca Fuente: Adaptado de (Corpocaldas & UNAL, 2012).....	73
Tabla 6-1 Parámetros de calibración modelo hidrológico de tanques estación El Retiro (1981-2014).....	89
Tabla 6-2 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 1987 .....	90
Tabla 6-3 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 1999 .....	91
Tabla 6-4 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 2014 .....	91
Tabla 6-5 Cálculo de la Conductividad hidráulica Ks (mm/día) para los años 1987, 1999 y 2014 .....	92
Tabla 6-6 Conjunto de parámetros obtenidos por el modelo de balance de agua Fuente: Propia.....	92
Tabla 6-7 Comparación de los resultados obtenidos por el modelo conceptual de tanques para la línea base (1981-2014) y los obtenidos para los diferentes conjuntos de parámetros de los años 1987, 1999 y 2014.....	96



# 1.Introducción

El tierra se considera como fundamento de la vida, en él se desarrollan todas las actividades que condicionan la supervivencia del ser humano y de todas las especies; en especial actividades antrópicas como la agricultura, la minería, la producción maderera y la ganadería son altamente invasivos y modifican la estructura básica de la tierra, alteraciones que modifican su capacidad productiva y su rendimiento como recurso vital para la vida (Rudas, Marcelo, Armenteras, Rodriguez, & Morales, 2007). El conocimiento detallado de la dinámica de la tierra, y el entendimiento de cómo este puede condicionar el comportamiento hidrológico de los ríos, es básico al momento de tomar decisiones con respecto al uso y disposición del componente edáfico de las cuencas (Corpocaldas & IGAC, 2012).

En los Andes Colombianos, específicamente en la cuenca del río Chinchiná se da una particular interacción entre los factores geográficos locales, especialmente el suelo, y las condiciones atmosféricas influenciadas directamente por la ocurrencia del fenómeno del ENSO en sus dos fases, La Niña (frio) – El Niño (cálido), (Patiño, Ocampo, & Vélez, 2014; Poveda, Mesa, & Waylen, 2003).

La cobertura actualmente predominante en la cuenca es el bosque nativo, aunque éste es sobreexplotado de forma desmedida por los asentamientos poblacionales (Pabón, Rodríguez, Bernal, & Martinez, 2010). Los suelos de la cuenca están destinados principalmente al sector industrial, zonas residenciales, a cultivos y a ganadería; en el 2008 la superficie de la cuenca estaba distribuida en un 41% por cultivos y pastos, el 25% representaba rastrojos y un 34% correspondía a bosques naturales, de los cuales el 6.3% correspondían a territorios de reforestación protegidos. (Corpocaldas, 2008) (Corpocaldas & IGAC, 2012).

La caracterización y posterior distribución de las coberturas de la tierra se realiza mediante la construcción de mapas basados en información básica compuesta por fotografías

aéreas, imágenes satelitales, planchas cartográficas y documentos científicos que contenga información de los suelos (Bernardini, Malinverni, Zingaretti, & Mancini, 2008). Esta información es fundamental para cualquier análisis desde el punto de vista hidrológico y edáfico que se pretenda realizar, sin embargo, los mapas oficiales existentes actualmente son escasos, por lo que se deben recurrir a estimaciones y reconstrucciones de dichas coberturas.

Por lo tanto, es necesario la generación de mapas de uso y cobertura multi-temporales que contengan la cuenca del río Chinchiná; mediante el procesamiento de imágenes satelitales se realiza una clasificación de la tierra, el cual identifica tipos de cobertura en el rango de alcance; el número de coberturas a identificar varía de acuerdo a los intereses particulares de cada estudio, de la capacidad de cómputo y de la obtención de la información para realizar el análisis (RamaKrishnan, Manthira Moorthi, Prabu, & Swarnalatha, 2013), la caracterización de las coberturas identificadas está dada por un sistema de clasificación que describe las condiciones particulares de la zona de interés; para el caso de Colombia se adopta la metodología CORINE Land Cover desde 2007 (Corpocaldas & IGAC, 2012).

La información proveniente de la tecnología de teledetección se integra con los SIG para aportar información fiable sobre la cubierta vegetal y los usos de la tierra, de igual forma es útil para realizar diagnóstico del uso actual y realizar predicción de posibles cambios en las coberturas (Ioannis & Meliadis, 2011). Para estimar el comportamiento hidrológico de la cuenca, es necesario aplicar los modelos hidrológicos que permiten un enfoque sistemático con el objetivo de cerrar la brecha existente entre la teoría y las observaciones del sistema (Ocampo, 2013).

Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial, caracterizando la precipitación sobre la superficie de la tierra y la fracción de agua que es evapotranspirada, el escurrimiento hacia cuencas hídricas y la recarga a sistemas de acuíferos subterráneos. La humedad de la tierra y la escorrentía son procesos clave para una simulación precisa de la descarga con modelos hidrológicos (Ocampo, 2013; J. I. Vélez et al., 2002).

De esta manera, este trabajo tiene como objetivo evaluar cómo los cambios en las coberturas y usos de las tierras en la cuenca del río Chinchiná han impactado en la hidrología de la zona, a través de los años, utilizando las herramientas antes descritas.

La información generada se puede aplicar en los planes de desarrollo tanto urbanos como rurales, al igual que en las medidas de preservación de los recursos naturales y el medio ambiente (Ioannis & Meliadis, 2011; Mani, 2012; Torahi & Rai, 2011). En general sirven como base para la construcción de medidas de adaptación ante posibles variaciones en el régimen hidrológico de la cuenca (producto de los cambios de uso y cobertura de la tierra), lo que constituye una herramienta de planificación para los entes de control.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar la respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Relacionar el régimen hidrológico con los índices oceánicos que determinan la ocurrencia del fenómeno ENSO.
- Procesar información obtenida a partir de imágenes satelitales, mediante la metodología que más se ajuste.
- Determinar la influencia de los cambios de uso y cobertura en el régimen hidrológico de la cuenca.

### 3. Antecedentes

A escala global, los cambios de uso y coberturas más invasivos, son las altas tasas de deforestación tropical en países en desarrollo como en África Central y América de Sur, especialmente en la Amazonía, las modificaciones de los ecosistemas áridos y semiáridos con tendencia a la degradación y desertificación; la intensificación agrícola definida como altos niveles de cantidad y valor de productos cultivados o criados por unidad de área y tiempo; y la urbanización en forma de construcción o pavimentación de áreas para usos humanos (Pena, 2007).

Para el año 2000 la cobertura natural de países como Brasil, México y Costa Rica se había reducido en más de un 50% (Ruiz, 2013), en Colombia para el año 2016 se concedió un permiso de explotación maderera por 26 años en la selva del Darién, considerada la actividad más agresiva e invasiva con el suelo, se estima que a 10 años de haber hecho efectivo el permiso, la boca del caño de Tumaró habría duplicado su tamaño, lo cual es una pérdida considerable de suelo (Fonseca & Gomez, 2003).

En estudios alrededor del mundo la clasificación a partir de imágenes satelitales, es una herramienta que ha sido explotada en la última década para la construcción de mapas de uso y cobertura de la tierra (Ioannis & Meliadis, 2011; Mani, 2012), el atractivo de las imágenes radica en que ofrece la posibilidad de asignar un número indefinido de clases, por ejemplo, en estudios realizados al Este de Europa y al Este de Grecia se consideraron 9 clases, al sur de India fueron 14 clases y en Irán fueron 4 (Ioannis & Meliadis, 2011; Mani, 2012; Torahi & Rai, 2011).

El número de clases depende básicamente de los intereses particulares de cada estudio, de la capacidad de cómputo y de la obtención de la información para realizar el análisis, en el caso de Colombia el estándar de caracterización de las coberturas identificables en

las imágenes satelitales, está determinado por la metodología CORINE Land cover adaptada desde el año 2003 para la construcción de cartografía oficial (Ideam, 2010).

Históricamente la región de Caldas ha desarrollado una intensa actividad antrópica, desde épocas hispánicas se ha desatado una acelerada ocupación humana, que a su vez ha acelerado los cambios de uso de la tierra y han afectado los ecosistemas de los bosques andinos y secos. La cobertura actualmente predominante en la zona Andina es el bosque nativo, sobreexplotado de forma desmedida por los asentamientos poblacionales en las principales cuencas (Pabón et al., 2010).

En la cuenca del río Chinchiná, se realizó el estudio semi-detallado de suelos para los municipios de Villamaría, Palestina, Chinchiná, Neira y Manizales (Corpocaldas & IGAC, 2012), desarrollado de acuerdo con los lineamientos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi siguiendo la metodología estandarizada a nivel nacional. Según dicho estudio, los suelos de la cuenca del río Chinchiná están destinados principalmente al sector industrial, zonas residenciales, a cultivos y a ganadería, las coberturas vegetales que se encuentran son los bosques naturales que equivalen al 34% de la superficie de la cuenca (Corpocaldas, 2008); las zonas protegidas compuestas por territorio de reforestación cubren aproximadamente el 6.3% del área de estudio, por otro lado los rastrojos están distribuidos ampliamente, alternando con bosques, cultivos y pastos que equivalen a un 41% de la superficie de la cuenca (Corpocaldas & IGAC, 2012).

Mediante diferentes estudios del régimen hidrológico de cuencas Andinas como la del río Chinchiná, se determinó que la interrelación suelo-clima y la producción de escorrentía involucra la interacción de procesos físicos asociados con las características propias de cada cobertura de la tierra (Ocampo & Vélez, 2014), de igual forma están condicionadas por la escala espacio-temporal en la que ocurren los eventos climáticos; por esta razón es fundamental tener una perspectiva de cómo se comportan las coberturas a través del tiempo y el espacio, para ésto, los mapas de uso y cobertura constituyen un insumo de utilidad para tener en cuenta las consideraciones necesarias para realizar estudios de planificación del territorio.

La variabilidad climática en la cuenca del río Chinchiná está dada por interacción entre las condiciones atmosféricas influenciadas por la ocurrencia de diferentes fenómenos, tales como: el Chorro del Choco, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el fenómeno del Niño ENSO en sus dos fases (Corpocaldas, 2008; Patiño et al., 2014); en especial este



último que sumado al marcado gradiente altitudinal, que oscila entre los 5290 – 800 m.s.n.m, favorece le generación de una amplia gama de climas y micro-climas (Patiño et al., 2014; Poveda et al., 2003).

En la cuenca se registran lluvias con valores entre 1000 – 3000 mm/año influenciados por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual genera un marcado comportamiento bimodal con dos picos de caudal entre los meses de marzo a junio y septiembre a noviembre (Corpocaldas, 2008; Patiño et al., 2014). Dicho comportamiento aumenta o disminuye de acuerdo con la fase del ENSO en la que se encuentre.

Ante la importancia del comportamiento de la relación suelo-clima, y como esta influye en el régimen hidrológico de las cuencas, en diferentes zona del país se han adelantado estudios que permiten dar claridad de la magnitud del impacto de los cambios de la tierra en la producción de caudal por medio de modelación hidrológica, por ejemplo, en la cuenca de la quebrada Granadillo en Quetame Cundinamarca se realizó un análisis multi temporal de la respuesta hidrológica obtenida entre los años 1993 y 2009; mediante el uso de aerofotografías y la aplicación del modelo HEC-HMS, determinaron el impacto positivo que han tenido los trabajos de reforestación adelantados en la cuenca, ya que el incremento de cobertura boscosa es indicador de un correcto drenaje del escurrimiento superficial, lo que mejora la capacidad reguladora de la cuenca, disminuye los caudales picos y por ende los niveles de escorrentía superficial (Bernal & Prado, 2015).

Caso similar el de la cuenca del río Coello, localizado en la vertiente oriental de cordillera central, en el departamento del Tolima, su corriente principal nace en el Nevado del Tolima, el cual pertenece al Parque Nacional Natural Los Nevados, en este estudio se aplicó el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), el cual fue alimentado con información de precipitación media mensual para el periodo 1988-2007, y con mapas de uso y cobertura generados por la Corporación Autónoma Regional del Tolima, los cuales fueron construidos a partir de imágenes SPOT a una resolución de 1:25.000, para lo cual, fue posible la identificación de 4 clases y 22 subclases según la metodología CORINE Land Cover, en este caso, el comportamiento hidrológico de la cuenca se ve afectado principalmente por el aumento de zonas de producción ganadera y agrícola (Arroz y maíz) en la zona oriental, ya que esta variación en las coberturas ha disminuido la capacidad de regulación de la cuenca, lo que aumenta los caudales registrados (Castañeda, 2016).

## **4. Estado del Arte**

### **4.1 Variabilidad climática**

El clima en Colombia está determinado por diversos procesos de interacción tierra-atmósfera, sumado al marcado gradiente altitudinal producto de la presencia de los tres ramales de la cordillera de los Andes (Ocampo, 2013), estos factores forman las condiciones propicias para la formación de una amplia gama de climas y microclimas que condicionan el comportamiento hidrológico de las cuencas Andinas en las diferentes épocas estacionales (Ocampo, 2013; Patiño et al., 2014; Poveda & Mesa, 1996).

#### **4.1.1 Precipitación en cuencas Andinas**

Una de las características de la precipitación en cuencas Andinas es su alta variabilidad espacio-temporal en escalas pequeñas, la permanente influencia de la radiación solar y el marcado gradiente altitudinal propio de la Cordillera Andina las cuales forman las condiciones propicias para la generación de una amplia gama de climas y microclimas que definen el comportamiento espacial de la lluvia (Florenchie et al., 2004; Poveda et al., 2005)

La dinámica espacio temporal de la precipitación en la zona Andina está influenciada por la acción de los vientos Alisios procedentes del océano Atlántico y la elevada humedad Amazónica (Jaramillo, 2005; Ocampo, 2013) y los vientos del oeste que provienen de una corriente superficial llamada Chorro del Chocó (Florenchie et al., 2004; Poveda et al., 2005)

Según el (IDEAM, 2005), la pluviometría de la zona Andina es variada, se registran lluvias del orden de 2000 mm a 5000 mm en las cuencas altas del Magdalena y el Cauca, en tanto que la cordillera Oriental se presentan precipitaciones no superiores a 2000 mm.

La estacionalidad de la precipitación tiene un comportamiento bimodal producto del movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), esto genera dos periodos de precipitaciones máximas en los meses de abril - mayo y octubre – noviembre, y precipitaciones mínimas en enero-febrero y julio-agosto (Jaramillo, 2005).

La precipitación en la cuenca del río Chinchiná es alta, el promedio anual se sitúa entre los 2000 y 2200 mm, se registran valores que oscilan entre 1000 – 3000 mm/año (Jaramillo, 2005; Ocampo, 2013), la zona de menos lluvias es la parte alta de la cuenca hacia el sur, y el óptimo pluviométrico se localiza en zona centro de la misma (Patiño et al., 2014).

### **4.1.2 Fenómeno del Niño (ENSO)**

El Niño-Oscilación del Sur, es un fenómeno global de interacción océano – atmósfera, se origina principalmente por las oscilaciones en la temperatura superficial y la presión del aire del Pacífico, dichas variaciones generan episodios cálidos y fríos nombrados técnicamente como El Niño y La Niña respectivamente (NOAA, 2018; Ocampo, Vélez, & Londoño, 2012; PNUD, 2000).

El principal reflejo de la ocurrencia del fenómeno es un dramático cambio en el régimen de precipitaciones (Ocampo et al., 2012; Randall et al., 2007), estas variaciones alteran las condiciones climáticas en gran parte del planeta, su ocurrencia tiene una periodicidad promedio de 3 a 5 años (Dore, 2005).

La ocurrencia del fenómeno ENSO está determinada por variaciones en la radiación, temperatura, presión atmosférica y precipitación, la interacción entre éstas genera que cada evento tenga una características específicas (IDEAM, 2005; Ocampo et al., 2012), por tal motivo, The National Oceanic and Administration (NOAA) determina la ocurrencia de los eventos por medio del cálculo de índices que consideran variables que describen el comportamiento de las condiciones atmosféricas del océano, dentro de los más utilizados se tienen el Índice Oceánico El Niño (ONI), el Índice Multivariable Enso (MEI) y el Índice Oscilación del Sur (SOI) (NOAA, 2018), en el presente estudio se hará referencia al ONI ya que es el más utilizado en la literatura.

El ONI, se define como la media móvil de 3 meses consecutivos, de las anomalías de la temperatura superficial en la región central del Océano Pacífico, propiamente entre 5°N-5°S y 120°-170°W, para el periodo de referencia 1971-2000 (NOAA, 2018).

La NOAA reporta la ocurrencia de los eventos de acuerdo con la oscilación de la temperatura, un evento frío se reporta si la anomalía es inferior a  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y cálido si la variación es superior a  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (NOAA, 2018). El índice ONI es reportado de forma trimestral en la página web la NOAA (NOAA, 2018); en la siguiente Figura se observa el comportamiento histórico del ONI desde el año 1950 hasta el 2018.

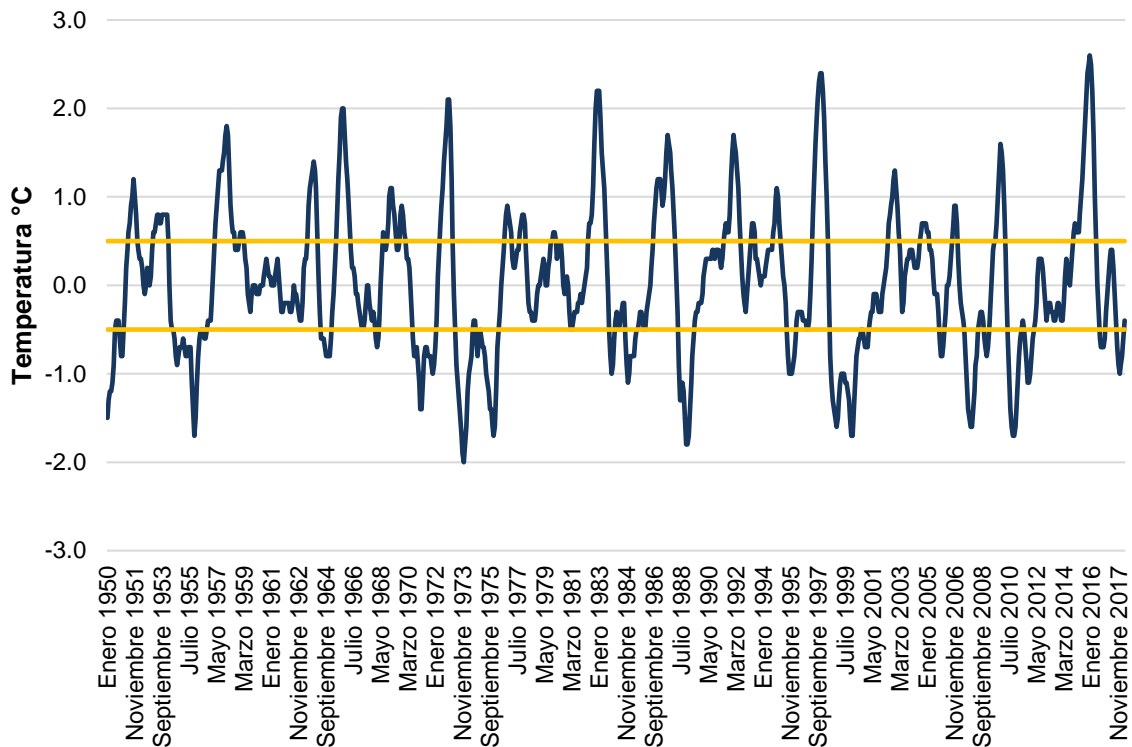


Figura 4-1 Serie histórica ONI 1950-2018 Fuente: (NOAA, 2018)

### 4.1.3 Efectos del fenómeno del Niño en Cuencas Andinas

El fenómeno del ENSO en Colombia afecta principalmente la región Andina (IDEAM, 2008; Ocampo, 2013; Velásquez & Rosales, 2002), los efectos se evidencian en el incremento de la temperatura durante el día, déficit en las precipitaciones, aumento de la radiación ultravioleta y la disminución del caudal en los principales ríos.

La vegetación y la tierra son otros de los actores que se ven afectados por la ocurrencia del ENSO; en la fase cálida, la constante exposición de la superficie a altas temperaturas favorece la pérdida de humedad de la tierra, lo que redistribuye la configuración de las partículas que lo componen, dicho fenómeno se evidencia en las partes altas de la cuenca,

donde la capacidad de retención hidráulica de los bosques alto andinos se ve disminuida, esto se traduce en la pérdida de la capacidad productiva de los cultivos permanentes localizados en zonas medias y bajas (Patiño et al., 2014); esta pérdida de humedad facilita los movimientos en masa cuando llega la temporadas de lluvias con la fase fría del ENSO (IDEAM, 2008; Velásquez & Rosales, 2002).

En las regiones de Colombia donde se siente con más fuerza tal influencia, son el Occidente y la zona Andina en los Departamentos de Antioquia, Chocó, la zona cafetera, Cauca, valle del Cauca, Santander, Tolima, Nariño y Cundinamarca (Poveda & Mesa, 1996). Las anomalías promedio registradas en las estaciones de aforo de la cuenca, son en promedio de 34% con c.v. 35% durante La Niña, mientras que en El Niño la reducción es del 22% con c.v. 48%, distribuida de forma bimodal por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Corpocaldas, 2008; Patiño et al., 2014).

## **4.2 Generación de mapas de uso y cobertura de la tierra a partir de imágenes satelitales**

La teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, se asume que entre la tierra y el sensor se encuentra una interacción energética causada por la reflexión de la energía solar, o por la presencia de un haz de energía artificial, dicha interacción es almacenada por el sensor, el cual codifica y almacena la información (Chuvieco, 1995)

La información almacenada y transmitida por los sensores se esquematiza por medio de una matriz de tres dimensiones como se presenta en la siguiente Figura, donde el eje X y Y representan las coordenadas geográficas de cada pixel que contiene la imagen, mientras que el eje Z contiene el valor de número digital que hace referencia a la información espectral propia de cada tipo de cobertura que se encuentre en la zona de interés.

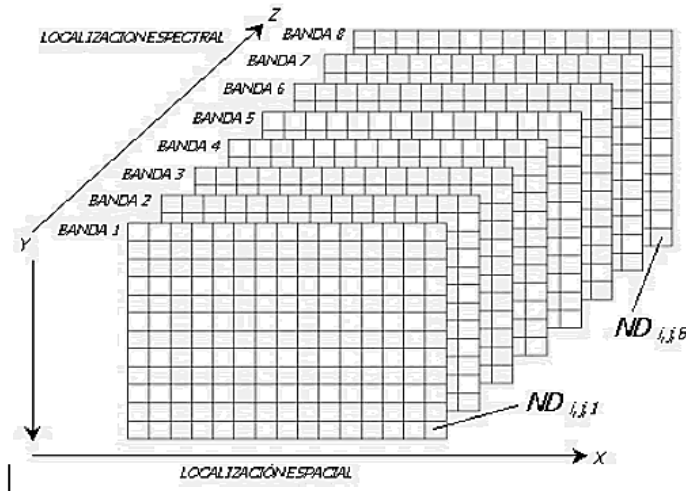


Figura 4-2 Esquema matricial de una imagen satelital Fuente: (Chuvieco, 1995)

La matriz codificada o imagen satelital se visualiza en un software de análisis de sensores remotos, en el cual, se realiza la correspondiente georreferenciación con base en un punto de coordenadas conocidas sobre el terreno, para de esta forma facilitar el proceso de identificación de coberturas.

Las imágenes satelitales son una herramienta indispensable para el estudio de las dinámicas espaciotemporales de los usos y cobertura de la tierra, éstas permiten identificar tipos de cobertura en el rango de alcance de interés; en la literatura se encuentran diversos métodos de clasificación, de ellos el más utilizado es la clasificación espectral, (RamaKrishnan et al., 2013), el nivel de detalle de la clasificación varía de acuerdo con el tipo de análisis a realizar y a la calidad de la información disponible.

#### 4.2.1 Resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes satelitales

Los sensores tienen características espaciales, espectrales y temporales, las cuales varían de acuerdo al tipo de análisis de interés. Para la construcción de mapas de uso y cobertura es importante considerar sensores con resolución espacial, espectral y temporal que permita identificar claramente una amplia gama de coberturas (Chuvieco, 1995).

La resolución espacial está dada por el tamaño del objeto más pequeño identificable sobre la imagen en la zona de interés, la medida se toma con respecto a la separación más pequeña a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la imagen (Ver siguiente

Figura). Se mide en unidades de longitud, técnicamente está determinada por la distancia focal de la cámara y la altura de órbita del sensor (Chuvieco, 1995; Vittek, Brink, Donnay, Simonetti, & Desclée, 2013).

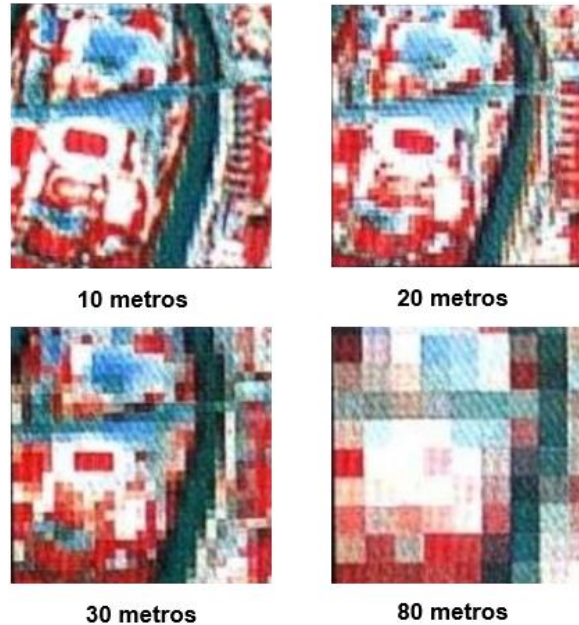


Figura 4-3 Representación resolución espacial de las imágenes satelitales

En general, la resolución espacial de los sensores de observación terrestre ofrecen una amplia gama de funcionamiento, en el caso de los sensores diseñados para adquirir información sobre áreas heterogéneas, suelen contar con resoluciones de detalladas que oscilan entre 10 x 10 m (Misión SPOT-HRV) y 120 x 120m (Misión Landsat-TM), otra gama de satélites dirigidos a enfoques globales, ofrecen tamaños de pixel entre 500 y 1100 m, y la última gama con funciones meteorológicas, cubren la superficie terrestre con pixels de hasta 5 kilómetros (Chuvieco, 1995; Vittek et al., 2013).

La resolución espectral está determinada por el número y anchura de las bandas espectrales que el sensor puede identificar, a mayor número de bandas captadas por el sensor, más idóneo es para ser usado en la identificación de coberturas, ya que absorbe mayor información y por ende permite discriminar en mayor detalle las superficies de interés (Chuvieco, 1995; Vittek et al., 2013).

Los sensores ópticos de plataforma satelital ofrecen un amplio rango de bandas captadas, la elección del número, anchura y localización de las bandas depende de la finalidad y objeto del estudio, por ejemplo, en funciones meteorológicas basta con obtener una sola

banda visible, ya que no existen diferencias cromáticas en las nubes; por otra parte los estudios que relacionan la salud de las coberturas vegetales, exigen sensores que capten las bandas infrarrojas, responsables de almacenar la información espectral de la clorofila presente en las plantas, como se puede apreciar la siguiente Figura (Chuvienco, 1995; Vittek et al., 2013).

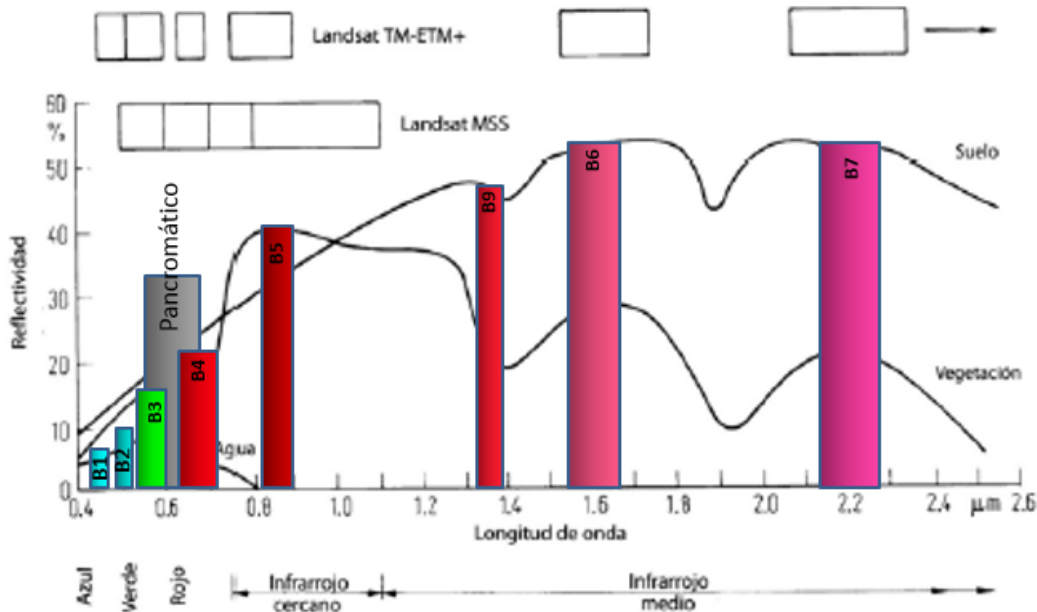


Figura 4-4 Representación espectral del sensor Landsat Fuente: Adaptado de (Chuvienco, 1995)

La resolución temporal está dada por la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir la periodicidad con la que capta la imagen en la misma sección de la superficie terrestre, el ciclo de barrido depende de características orbitales como, altura, velocidad e inclinación, adicionalmente tiene en cuenta ángulo de observación y de cobertura (Chuvienco, 1995; Vittek et al., 2013).

La temporalidad de los sistemas varía de acuerdo con las funciones propias el sensor, las plataformas meteorológicas ofrecen un monitoreo a fenómenos de gran dinamismo, por esta razón se proporcionan imágenes cada 30 minutos, los satélites de órbita polar de propiedad de la NOAA tienen una periodicidad de 12 horas y los sensores multipropósito de recursos naturales, realizan el recorrido cada 16 días (Chuvienco, 1995; Vittek et al., 2013).



### 4.2.2 Tipos de sensores satelitales

Para la construcción del mapa de uso y cobertura de mayor amplitud, es necesario el uso de imágenes generadas por sensores de amplio alcance, la forma más habitual de clasificar estos sensores, es con base al tipo de proceso usado para recibir la energía procedente de las coberturas de la superficie, de acuerdo con esto, se tienen los sensores pasivos y los sensores activos (Chuvieco, 1995).

Los sensores pasivos simplemente absorben la energía electro-magnética irradiada por las coberturas terrestres, como se observa en la siguiente Figura, la energía captada es la reflejada por los rayos solares que constantemente es emitida por la superficie, (Chuvieco, 1995; Lara, 2015). Los sistemas pasivos más conocidos son: los fotográficos, óptico-eléctricos y de antena.

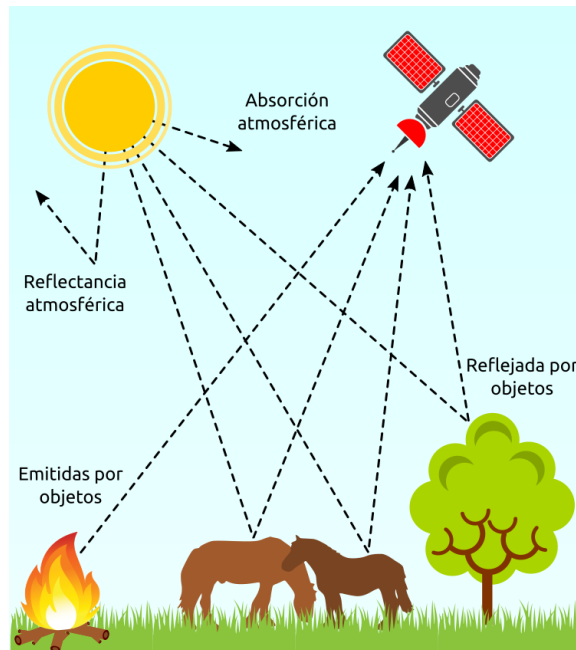


Figura 4-5 Esquema de funcionamiento sensores pasivos Fuente: Adaptado de (Chuvieco, 1995)

Los sensores fotográficos emplazados en plataformas aéreas son los más usados en la actualidad, la simpleza de su configuración ofrece una amplia gama de usos, la aplicación de películas fotosensibles de alta resolución permiten la clara identificación de objetos imperceptibles por otros sistemas (Lara, 2015). Los sensores de barrido o mejor conocido como óptico-eléctricos, tienen una configuración similar a los fotográficos, salvo la presencia de un sensor de detección electrónica, cuya función es eliminar la dependencia una superficie sólida, en esta clase se ubican los sensores pertenecientes a satélites como,

Landsat, IKONOS, Rapideye, Galileo y demás misiones que orbitan la tierra (Chuvieco, 1995).

Los sensores activos se caracterizan por que tienen la capacidad de emitir un haz energético, que posteriormente se recoge tras su reflexión sobre la superficie (Ver Figura 4-6) (Lara, 2015), de éstos, el más conocido es el radar radiométrico activo de micro-ondas, la mayor ventaja de estos sistemas es su flexibilidad, dado que tiene la capacidad de operar bajo cualquier condición atmosférica; en los últimos años el radar ha ganado protagonismo en la comunidad científica internacional, en especial, en zonas ecuatoriales, donde persiste la cobertura de nubes (Chuvieco, 1995).

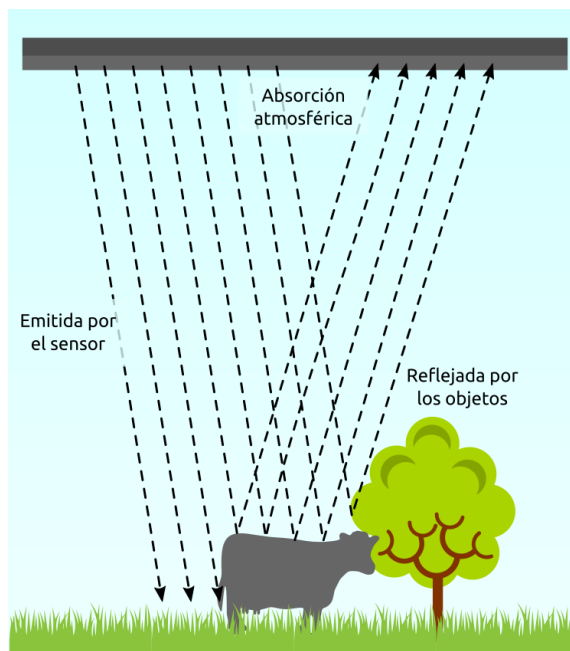


Figura 4-6 Esquema de funcionamiento sensores activos Fuente: Adaptado de (Chuvieco, 1995)

### 4.2.3 Selección del tipo de imagen

De forma general, el tipo de imagen adecuada para la construcción de mapas de uso y cobertura es el que ofrece las características necesarias de resolución espacial, espectral y temporal para captar el objeto de interés más pequeño en la zona de estudio (Chuvieco, 1995). En teledetección, el término se conoce como la unidad mínima cartografiar, su tamaño determina la escala de trabajo y por ende el tipo de sensor a utilizar, en la siguiente tabla se observa el tamaño de la escala admisible de acuerdo al tipo de imagen utilizada.

Tabla 4-1 Escala admisible de acuerdo al tipo de imagen usada Fuente: Propia

Tipo de imagen	Escala admisible
NOAA – AVHRR	1:2.000.000
Landsat – MSS	1:200.000
Landsat – TM	1:100.000
Spot – HRV	1:50.000
ASTER	1:25.000

#### 4.2.4 Corrección geométrica

Es la proyección de las coordenadas del archivo de imagen original, a un sistema de coordenadas con referencia y datum conocido con que se denota sistema de referencia (Ver Figura 4-7) (Ioannis & Meliadis, 2011; Muthusamy, Arunkumar, Naveem Raj, & Lakshumanan, 2011; Torahi & Raj, 2011). El sistema de coordenadas geográficas adoptado para la zona del departamento de Caladas, es el WGS84 región 18 Norte (Sánchez, 2004).

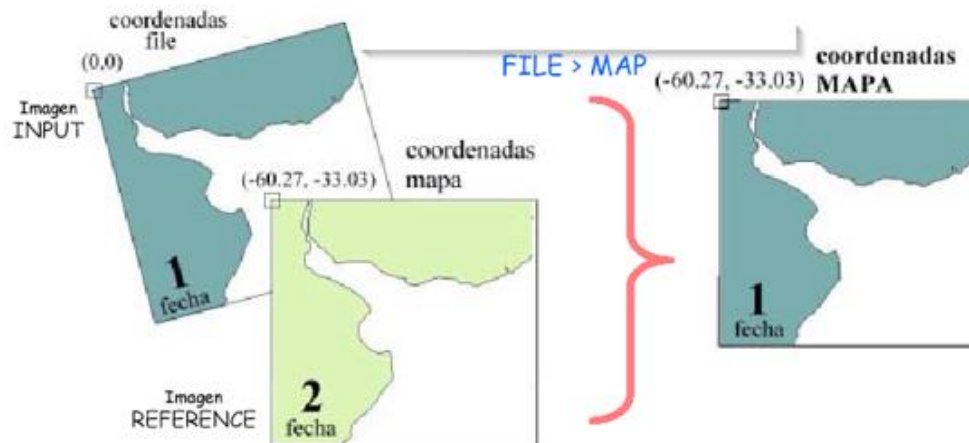


Figura 4-7 Esquema de corrección geométrica Fuente: Adaptado de (Ioannis &amp; Meliadis, 2011)

#### 4.2.5 Corrección radiométrica

La radiométrica, se entiende como la cantidad de suelo que capta la imagen (Crespi & de Vendictis, 2009); consiste en ejecutar 3 pasos: inicialmente se aplica la corrección por

ángulo del sol, posteriormente la corrección por distancia orbital y por último la corrección por iluminación del terreno (Symeonakisab, Caccetta, Wallace, & Koukoulas, 2006). En siguiente Figura se aprecia la imagen original y el resultado de la imagen corregida radiométricamente.



Figura 4-8 Comparación de imagen original (izquierda) vs imagen corregida (derecha) radiométricamente Fuente: Propia

En la margen izquierda se encuentra la imagen original en color verdadero, en la derecha la imagen corregida, como se observa los cambios son sustanciales; la verdadera diferencia radica, en que la imagen original contiene la información en número digitales (valores enteros) y la imagen corregida contiene valores de reflectancia (valores de longitud de onda) necesarios para el reconocimiento de la firma espectral de los píxeles presentes en la escena (Ioannis & Meliadis, 2011; Mani, 2012; Yuan, Sawaya, Loeffelholz, & Bauer, 2005).

#### 4.2.6 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se hace necesaria para ajustar la distorsión generada por el paso de haz a través de la atmosférica; se debe al ángulo de incidencia y la presencia de luz solar y nubes, que generan ruido y falta de nitidez al momento de capturar la imagen (Crespi & de Vendictis, 2009; RamaKrishnan et al., 2013). Para ejecutar la corrección es necesario conocer la fecha y hora en la que se tomó la imagen, así como la altura del sol

en grados, en la siguiente Figura se representa por medio de un esquema el proceso de corrección

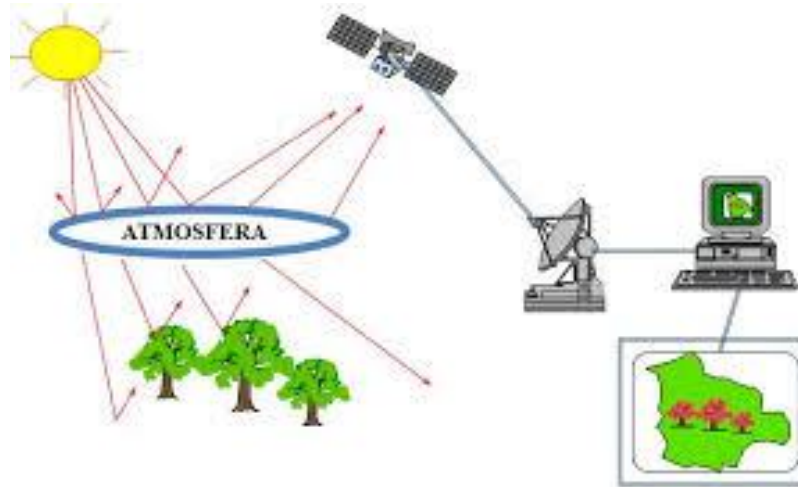


Figura 4-9 Esquema corrección atmosférica Fuente: Adaptado de (Crespi & de Vendictis, 2009)

### 4.2.7 Clasificación supervisada

A partir de cierto conocimiento de la zona es posible realizar una aproximación más acertada en la identificación de coberturas, el proceso permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto, las cuales se conocen como áreas de entrenamiento, las que se consideran lo suficientemente representativas para describir por completo todos los tipos de coberturas propuestos por la leyenda de interés (Chuvieco, 1995).

La mayoría de software de procesamiento de imágenes satelitales permite identificar las áreas de entrenamiento de forma interactiva sobre la imagen con ayuda de un digitalizador.

El proceso consiste en definir los polígonos a partir de las combinaciones de bandas que mejor resalten las coberturas de interés; con la ayuda de la herramienta editor de firmas se guardan los valores espectrales de la imagen correspondientes al polígono digitalizado, el que se va guardando en forma de inventario en un archivo con extensión .sig, el cual se debe agregar posteriormente al proceso de clasificación. En la siguiente Figura se observa la asignación de polígonos de entrenamiento para las coberturas de nubes, cuerpo de agua, nieve y suelo urbano.

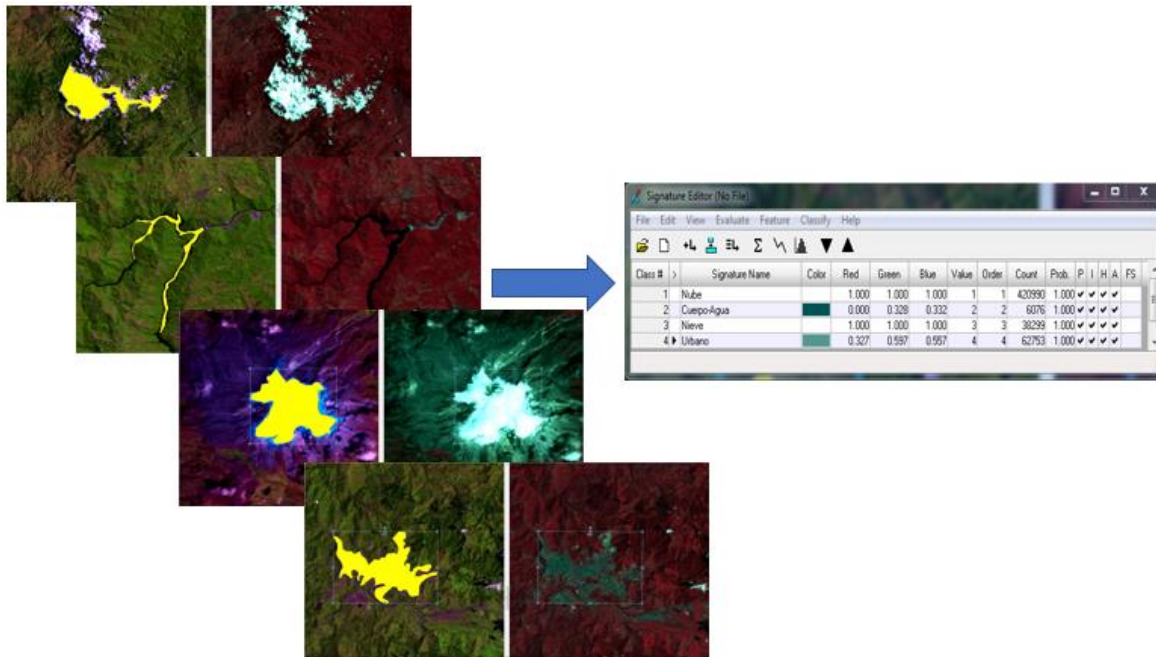


Figura 4-10 Asignación de polígonos de entrenamiento para las principales coberturas Fuente: Propia

Se debe asignar la mayor cantidad de polígonos de entrenamiento por cada clase de interés y distribuidos uniformemente por toda la imagen, entre más detallado el proceso de asignación de polígonos más preciso va a ser el mapa resultante.

#### 4.2.8 Neighborhood (Efecto sal y pimienta)

Es un proceso de interpolación matricial usado para realizar un análisis de las coberturas previamente identificadas, el método ofrece una variedad de funciones que permiten:

- Delimitar únicamente los límites entre las coberturas
- Resaltar las coberturas de mayor o menor influencia radiométrica
- Definir el contorno de las áreas identificadas- Identificar el número de clases con valor digital diferente dentro de la zona de interés

El algoritmo consiste en recalcular todos los píxeles de la imagen en función de los píxeles que lo rodean, la cantidad de píxeles se llaman ventanas de exploración, la que puede variar y es definida por el usuario (Ver Figura 4-11). La mayoría de softwares de procesamiento de imágenes satelitales permite definir el área de interés de la siguiente forma:

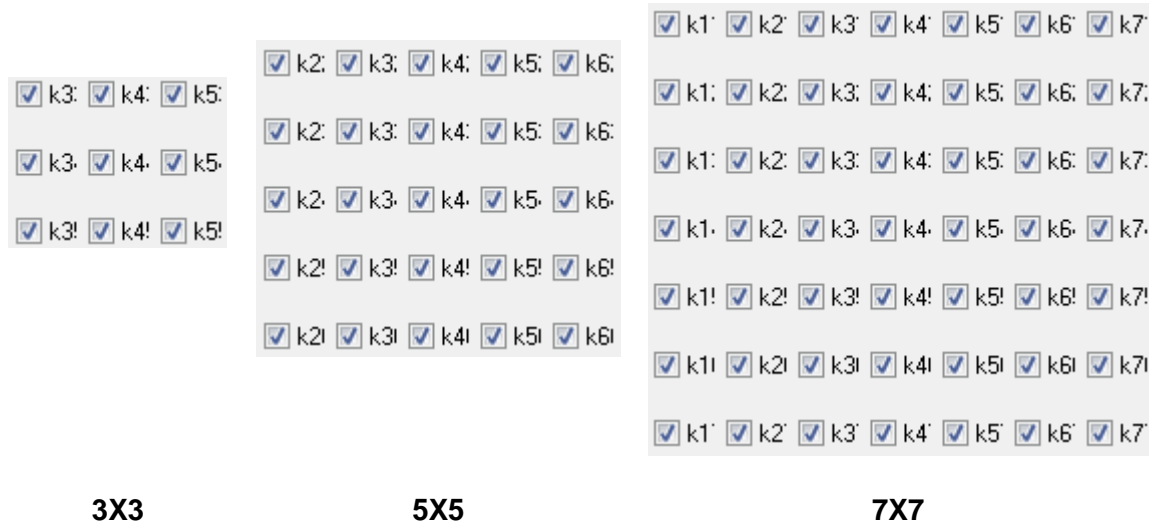


Figura 4-11 Ventanas de exploración Fuente: Propia

La ventana de exploración indica la cantidad de píxeles incluidos en la interpolación, lo que implica que a mayor número de píxeles la interpolación es más densa, y por ende redefine mejor los contornos de las coberturas identificadas, contrariamente si se aplica un filtro más pequeño se tendrá menor delimitación de las áreas.

### 4.2.9 Leyenda Nacional CORINE Land Cover

Para facilitar la construcción de los mapas de cobertura y usos de la tierra, desde el año 2004 se ha adaptado a nivel nacional la metodología europea CORINE Land Cover, estandarizando la metodología y la leyenda de coberturas terrestres a nivel nacional. Este proceso surge de la necesidad de unificar las diferentes leyendas y metodologías, para lograr un sistema de monitoreo con información actualizada y confiable. "La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a escala 1:100.000" (UNAL & Corpocaldas, 2016).

Siguiendo esta metodología el IDEAM en el año 2010 publica la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, adaptada para Colombia (CLCC) la cual fue ajustada y ampliada a otras clases presentes en el país. Este proceso de ajuste fue llevado a cabo por un equipo de profesionales expertos de los institutos IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH y la UAESPNN.



La leyenda brinda la directriz fundamental para la realización de mapas de coberturas de la tierra y se puede adaptar a escalas regionales. Presenta un catálogo de coberturas de tierra que es una herramienta básica que permite orientarse sobre las características fundamentales de las diferentes clases de coberturas que conforman la leyenda validada para Colombia.

El número de clases depende de los intereses particulares de cada estudio, de la capacidad de cómputo y de la obtención de la información para realizar el análisis, adicionalmente se debe considerar alguna metodología de clasificación de usos y cobertura de la tierra estandarizada; para el caso de Colombia se adopta la metodología CORINE Land Cover desde 2007 (Ver Figura 4-12) (Corpocaldas & IGAC, 2012).

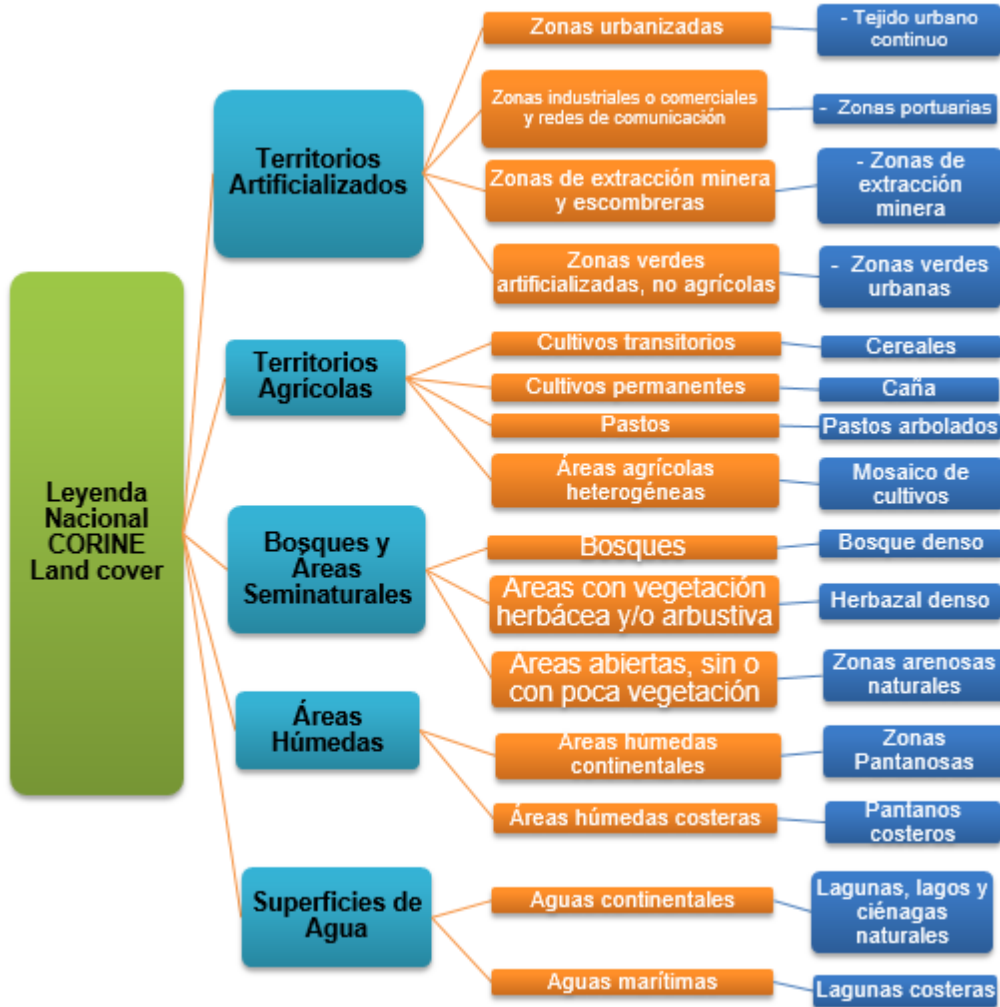


Figura 4-12 Leyenda nacional CORINE Land Cover Fuente: Adaptado de (Ideam, 2010)



### **4.3 Interacción suelo-atmósfera**

La cobertura vegetal de la tierra constituye el límite entre la atmósfera y la litosfera, (Pérez, Francesa, Zema, & Vente, 2009) en donde se desarrollan interacciones entre los procesos hidrológicos, la cobertura vegetal y las características físicas, químicas y biológicas de los suelos, estas interacciones permiten los intercambios de materia y energía que terminan controlando la respuesta hidrológica de las cuencas (Ali, Hadi, & Sulistyantara, 2016).

#### **4.3.1 Procesos hidrológicos asociados a las coberturas**

Dependiendo de los cambios de la cobertura tanto en área como en el tipo de vegetación pueden verse más acentuadas las alteraciones en los componentes del balance hidrológico como la interceptación, infiltración, evapotranspiración, y en especial la escorrentía superficial (Morán-Tejeda, Ceballos-Barbancho, & Llorente-Pinto, 2010)

En lo referente a la interceptación la densidad de la vegetación está estrechamente relacionada con la cantidad de agua precipitada que es retenida por las hojas, ramas y tallos que no alcanza a llegar al suelo en el proceso de interceptación. Este proceso además determina la superficie efectiva de contacto entre la precipitación y la cobertura la cual regula el nivel freático, debido a la cual se recargan los acuíferos y se produce el flujo base de los ríos. Este proceso de infiltración es posible gracias a la producción de una capa de hojarasca sobre el suelo mineral y a la disposición del sistema radicular de las coberturas boscosas y si se disminuye el proceso de interceptación también se ve reducido este (Villegas, 2004).

Cuando se habla de evapotranspiración se habla de dos procesos que en conjunto se desarrollan dentro del balance hidrológico y que permiten que el agua que se encuentra en la superficie retorne a la atmósfera a través de vapor de agua en un proceso de evaporación (Román, 2010). Por otra parte, las plantas sirven como elemento de transporte del agua de la tierra a la atmósfera en forma de vapor, mediante el mecanismo de transpiración en donde se realiza el intercambio gaseoso respondiendo a las diferencias de contenido de humedad entre la atmósfera y el interior de la planta; entre mayor sea el intercambio mayor será la necesidad de la planta en tomar el agua de la tierra, logrando a su vez, tomar los nutrientes que necesita para el proceso de fotosíntesis (Pérez et al., 2009).

El consumo de agua y la tasa de transpiración dependen de la especie vegetal y las propiedades físicas de los suelos, las cuales presentan diferencias significativas entre las coberturas boscosas y los pastos, ya que las primeras presentan un mayor contenido de materia orgánica lo que implica mayor fertilidad y calidad de los suelos, mientras que las segundas por lo general, son destinadas a uso pecuario, en donde la estructura y la textura al igual que la porosidad se ven afectados por el alto grado de compactación generado por el tránsito de animales pesados y adicionalmente, presentan un menor contenido de materia orgánica respecto a la cobertura boscosa (Pérez et al., 2009; Sahagún-sánchez & Reyes-hernández, 2018).

### **4.3.2 Simulación hidrológica**

En la literatura se presentan diversas metodologías que simulan los diferentes procesos que se presentan durante la ocurrencia de eventos en cuencas naturales, todos los modelos ofrecen una estimación confiable de las magnitudes de los caudales punta, hidrogramas y volúmenes de escorrentía producidos durante las crecientes, el nivel de precisión que se pretenda alcanzar esta dado por las características propias de cada modelo (J. J. Vélez & García, 2008).

En materia de simulación de fenómenos de lluvia-escorrentía durante las crecientes, los modelos conceptuales son considerados como una herramienta confiable, gracias a la simpleza de su estructura y a los pocos parámetros que requieren, son de fácil aplicación y recrean de forma acertada los diversos procesos del ciclo hidrológico.

Los modelos conceptuales con parámetros físicamente basados que simulan los principales componentes del ciclo hidrológico y que tratan de describir la interacción suelo-atmósfera vinculando los procesos hidroclimáticos con las coberturas vegetales y las características de la tierra (J. I. Vélez et al., 2002). Los modelos hidrológicos son capaces de representar correctamente los procesos hidrológicos a escala de la cuenca, pero consideran la vegetación como un parámetro estático. Con el fin de eliminar el componente estático de la vegetación se han integrado los modelos de superficie con los modelos de vegetación dinámica, sin embargo, requieren la determinación de una gran cantidad de valores de entrada por lo que su implementación es compleja.

Los modelos describen las características de los fenómenos físicos a través de parámetros que expresan el valor medido o estimado para cada unidad de análisis, y como alternativa intermedia para considerar el efecto de la vegetación sobre la respuesta hidrológica se ha planteado la modificación de los parámetros que se encargan de la interacción cobertura vegetal y suelo para poder incorporar el efecto del cambio de cobertura que se ha venido observando en los últimos años.

Los parámetros como la capacidad de almacenamiento hídrico, índice de cobertura vegetal, capacidad de infiltración, velocidad del flujo superficial, capacidad de percolación, velocidad del Inter flujo, capacidad de percolación profunda, velocidad del flujo base y la velocidad del flujo en canal son empleados por el modelo hidrológico basado en tanques en su versión agregada para representar la interacción biosfera-atmósfera (J. J. Vélez & García, 2008).

### **4.3.3 Conceptualización de las características de la tierra**

Al interior de la cuenca se llevan a cabo diferentes procesos de transporte de agua los que se representan mediante los modelos hidrológicos por medio de parámetros estimados a partir de mediciones que consideran las características propias de las coberturas presentes en la zona de estudio, así como de los suelos y la zona en sí.

El almacenamiento estático o agua disponible para las plantas es un parámetro que representa el volumen de agua precipitada que es almacenada por los procesos de interceptación, estancamiento en charcos y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares.

En los modelos hidrológicos basados en tanques es representado como la cantidad de agua (en mm) que se encuentra al interior de la cuenca y que sale a través del proceso de evapotranspiración, su magnitud simboliza el agua que se acumula en el tanque estático (Ali et al., 2016).

La conductividad hidráulica saturada superficial, es una propiedad física de la tierra que interviene en los procesos relacionados con el movimiento del agua a través del mismo (Donado & Colmenares, 2004). Este parámetro controla la infiltración y la escorrentía superficial y es fundamental en la interacción agua superficial- agua subterránea, siendo un insumo de entrada necesario en los modelos hidráulicos e hidrológicos que predicen el

comportamiento del agua a través de la tierra (Gómez-Tagle Ch et al., 2008) y en aquellos derivados, como los correspondientes a procesos erosivos y de transporte de masa en general. Adicionalmente, se utiliza en estudios de calidad y contaminación de aguas subterráneas, almacenamiento de residuos y descontaminación de acuíferos.

Existen diversos métodos para estimar los valores de conductividad hidráulica en suelos a partir de su medición in situ o en laboratorio, sin embargo, debido a la variabilidad de resultados, la dificultad en la realización de las pruebas y el nivel de incertidumbre que conllevan las suposiciones de los modelos elegidos (Donado & Colmenares, 2004), a menudo se estiman los valores a partir de características de la tierra menos variables y más simples de medir (Polo, Lafuente, & Giráldez, 2003), o se adoptan valores promediados ponderados a partir de la extensión de las coberturas presentes en la zona de estudio.

## 5. Metodología

En el presente estudio se evaluará el uso de imágenes satelitales como herramienta de soporte para determinar el impacto de los cambios de uso y cobertura en la producción hídrica de la cuenca del río Chinchiná. Estos cambios son la manifestación de la ocupación por parte de quienes habitan el territorio, principalmente dada por poblaciones en expansión con dinámicas de desarrollo que demandan bienes y servicios, que añaden mayores presiones sobre el recurso suelo (Posada, 2011).

Para ello es necesario comprender el comportamiento espacial y temporal del área de estudio (Haines-Young, 2009), y las imágenes satelitales son la principal herramienta, porque ofrecen una amplia perspectiva del territorio.

La metodología empleada para el análisis de los cambios de uso y cobertura en el comportamiento hidrológico de la cuenca, se presenta en la siguiente Figura.

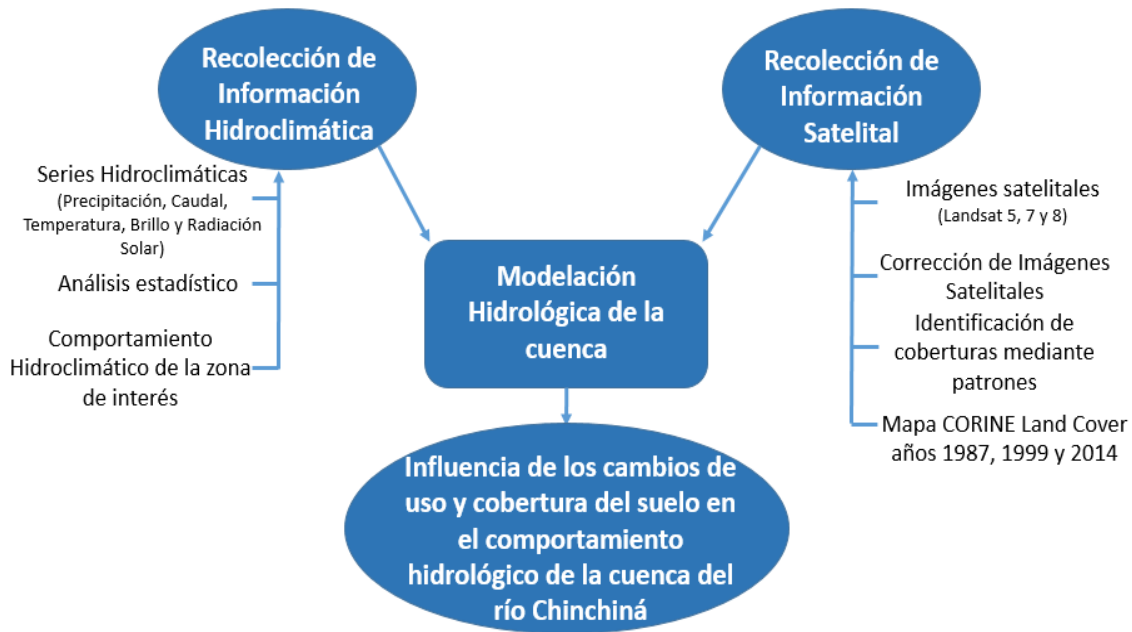


Figura 5-1 Esquema metodológico Fuente: propia

### 5.1 Área de estudio

La cuenca del río Chinchiná está localizada en la región Centro Sur del departamento de Caldas como se muestra en la siguiente figura; comprende una extensión de 1052 km<sup>2</sup>.

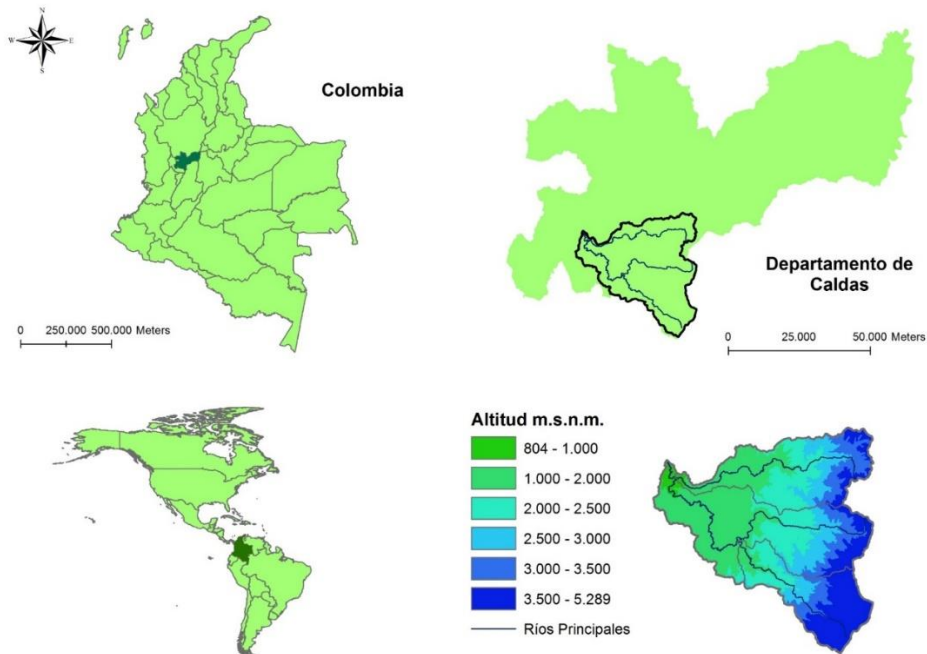


Figura 5-2 Localización de la Cuenca del río Chinchiná Fuente: Propia

En esta cuenca se tienen todos los pisos térmicos dado su gradiente altitudinal que oscila entre 5300 a 800 m.s.n.m. Adicionalmente, es de gran importancia dado que concentra el 55% de la población del departamento; abarcando cinco municipios: Manizales, Chinchiná, Villamaría, Palestina y Neira (Ocampo et al., 2014) (Ver siguiente Figura).

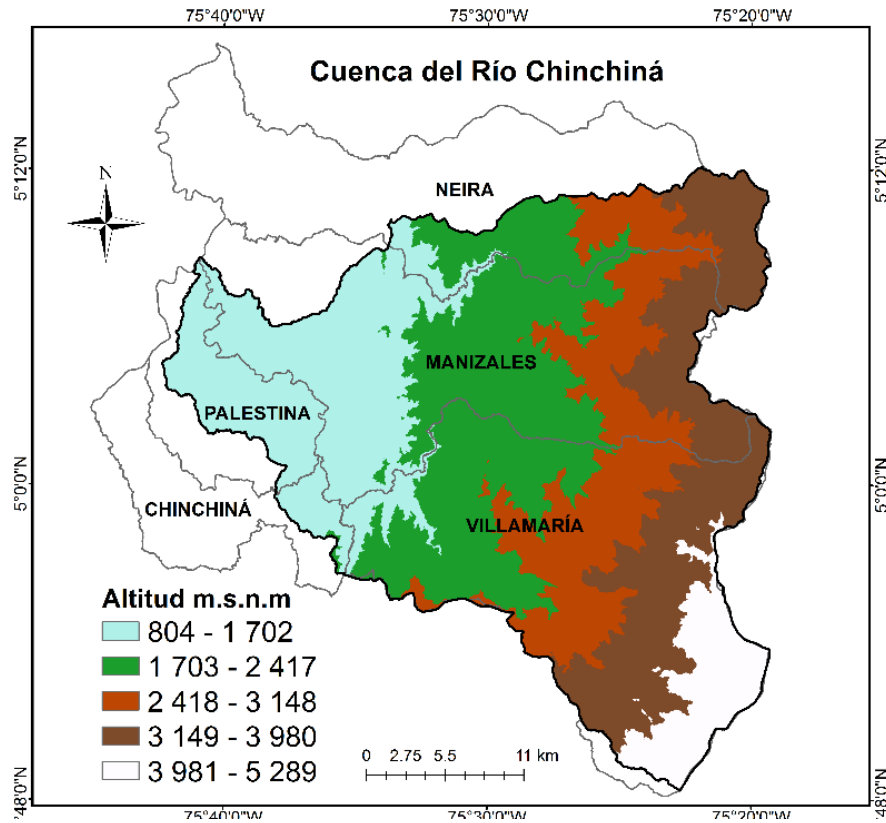


Figura 5-3 Municipios que componen la cuenca del río Chinchiná Fuente: Propia

## 5.2 Recolección de información hidroclimática

La información hidroclimática está comprendida por registros históricos de precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa y caudal a escala diaria con valores de medición de más de 30 años en el periodo 1981-2010 (Ver de la Tabla 5-1 a la Tabla 5-4), de la información suministrada por entidades como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM, la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, el Centro Nacional de Investigaciones del café, CENICAFE y la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC. Se procesaron las siguientes estaciones:

Tabla 5-1 Inventario de estaciones de precipitación (mm)

<b>Estación</b>	<b>Entidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	<b>Años de registro</b>
<b>Las Brisas</b>	IDEAM	Villamaría	Principal	4150	31
<b>La Esperanza</b>	IDEAM	Chinchiná	Pluviométrica	3280	42
<b>Montenegro</b>	CHEC	Villamaría	Pluviométrica	2600	19
<b>La Cristalina</b>	IDEAM	Neira	Pluviométrica	2290	42
<b>Papayal</b>	IDEAM	Villamaría	Pluviométrica	2220	42
<b>Agronomía</b>	Cenicafé	Manizales	Principal	2088	58
<b>Neira IDEAM</b>	IDEAM	Neira	Pluviométrica	2080	42
<b>Aeropuerto La Nubia</b>	IDEAM	Manizales	Principal	2058	44
<b>Alta Suiza</b>	CHEC	Manizales	Pluviométrica	2055	37
<b>Neira CHEC</b>	CHEC	Neira	Pluviométrica	2053	37
<b>Marmato</b>	CHEC	Marmato	Pluviométrica	2000	45
<b>Planta Sancancio</b>	CHEC	Manizales	Pluviométrica	1850	52
<b>La Uribe</b>	CHEC	Manizales	Pluviométrica	1842	37
<b>Java</b>	Cenicafé	Manizales	Pluviométrica	1778	33
<b>Campo Alegre</b>	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1500	52
<b>El Recreo</b>	Cenicafé	Palestina	Pluviométrica	1430	43
<b>Montevideo</b>	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1370	52
<b>La Selva</b>	Cenicafé	Manizales	Pluviométrica	1312	28
<b>Cenicafé</b>	Cenicafé	Chinchiná	Principal	1310	71
<b>Ínsula</b>	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1225	52
<b>Granja Luker</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1031	52
<b>Santagueda</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1026	49
<b>Arauca</b>	IDEAM	Palestina	Pluviométrica	890	50

Tabla 5-2 Inventario de estaciones de Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%)

<b>Estación</b>	<b>Entidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	<b>Años de registro</b>
<b>Las Brisas</b>	IDEAM	Villamaría	Principal	4150	31
<b>Agronomía</b>	Cenicafé	Manizales	Principal	2088	58
<b>Aeropuerto La Nubia</b>	IDEAM	Manizales	Principal	2058	44
<b>Cenicafé</b>	Cenicafé	Chinchiná	Principal	1310	71
<b>Granja Luker</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1031	52



<b>Santagueda</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1026	49
-------------------	----------	-----------	-----------	------	----

Tabla 5-3 Inventario de estaciones de Brillo Solar (hr)

<b>Estación</b>	<b>Entidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	<b>Años de registro</b>
<b>Agronomía</b>	Cenicafé	Manizales	Principal	2088	58
<b>Cenicafé</b>	Cenicafé	Chinchiná	Principal	1310	71
<b>Granja Luker</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1031	52
<b>Santagueda</b>	Cenicafé	Palestina	Principal	1026	49

Tabla 5-4 Inventario de estaciones de Caudal (m3/s)

<b>Estación</b>	<b>Entidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	<b>Años de registro</b>
<b>Chupaderos</b>	IDEAM	Manizales	Limnigráfica	1998	22
<b>El Retiro</b>	IDEAM	Palestina	Limnigráfica	838	35
<b>Sancancio</b>	CHEC	Manizales	LM-Aforo	1940	33
<b>Montevideo</b>	CHEC	Chinchiná	LM-Aforo	1400	52

### 5.3 Caracterización del comportamiento hidrológico de la cuenca

El análisis de los registros históricos permite comprender la variabilidad climática natural y los efectos de los episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña), que marcan diferentes condiciones hidrológicas en las cuencas (NOAA, 2018; PNUD, 2000). La caracterización consiste en el uso del índice Oceánico El Niño para la clasificación de las series históricas y la identificación de las anomalías en las variables climáticas (NOAA, 2018).

Por medio de la caracterización del comportamiento hidrológico de la cuenca (precipitación y caudal) a lo largo de un periodo determinado de tiempo, se puede determinar como éste se puede ver afectado por los cambios en la cobertura de la tierra, así como la posible influencia del efecto del fenómeno de Oscilación del sur ENSO, en la cuenca.

## 5.4 Recolección de información satelital

La información satelital está compuesta por imágenes pertenecientes a los sensores ópticos eléctricos de resolución media Landsat 5, 7 y 8 perteneciente al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), la información se obtuvo por medio de las plataformas Global Visualization Viewer del USGS y a la Global Forest Change University of Maryland, como se observa en la Figura 5-4 y Figura 5-5 respectivamente.

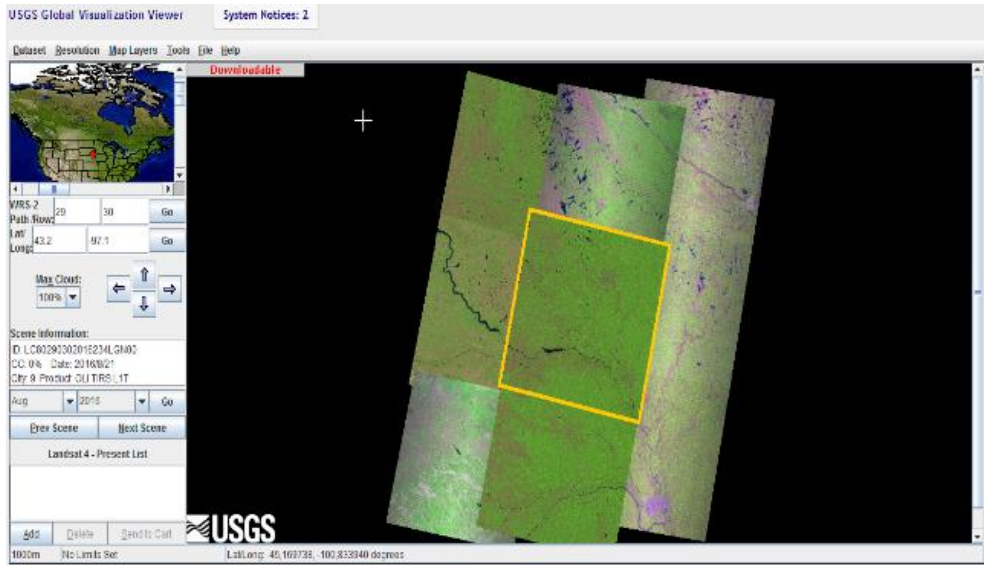


Figura 5-4 Plataforma Global Visualization Viewer del USGS Fuente: USGS

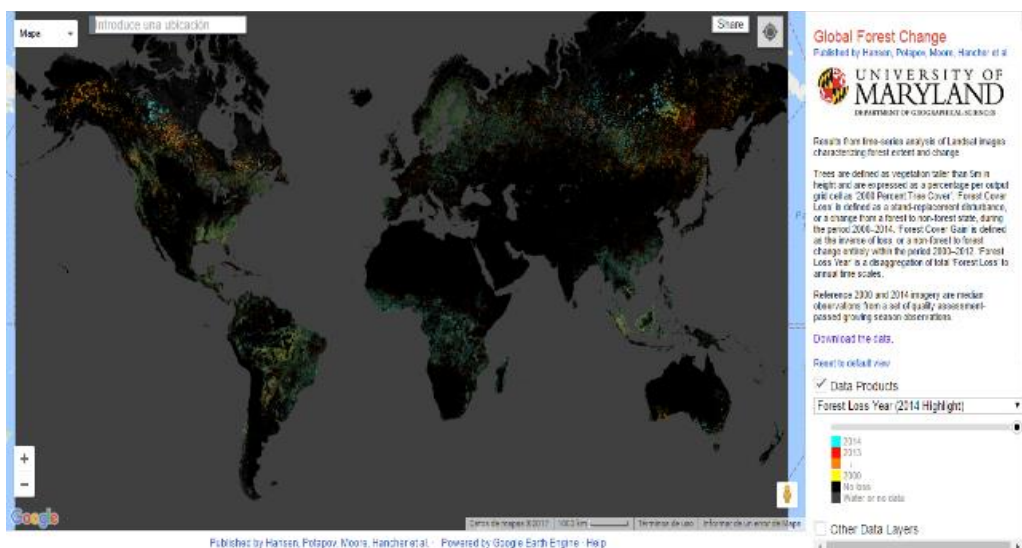


Figura 5-5 Plataforma Global Forest Change Fuente: University of Maryland

La recolección de la información se realizó a partir de los valores históricos ofrecidos por las plataformas antes mencionadas, y de acuerdo a estos se procede con una depuración de las imágenes obtenidas, ya que la zona de la cuenca del río Chinchiná se caracteriza por tener nubosidad constante en el tiempo y en el espacio, en la Tabla 5-5 y Tabla 5-6 se relacionan la información histórica obtenida de la escena número 9-57, la cual es la perteneciente a la cuenca de estudio.

Tabla 5-5 Inventario de escenas obtenidas de la plataforma GLOVIS (USGS)

<b>Escena (Path/Row)</b>	<b>Año</b>	<b>Nombre Escena</b>
<b>9--57</b>	1984	LT50090571984246AAA03
<b>9--57</b>	1985	LT50090571985072AAA04
<b>9--57</b>	1986	LT50090571986251XXX02
<b>9--57</b>	1987	LT50090571987014XXX03
<b>9--57</b>	1988	LT40090571988297XXX03
<b>9--57</b>	1989	LT40090571989219XXX05
<b>9--57</b>	1990	LT40090571990206XXX03
<b>9--57</b>	1991	LT50090571991089XXX03
<b>9--57</b>	1991	LT50090571991345XXX02
<b>9--57</b>	1996	LT50090571996215XXX01
<b>9--57</b>	1997	LT50090571997233XXX02
<b>9--57</b>	1997	LT50090571997249XXX03
<b>9--57</b>	1998	LT50090571998140XXX02
<b>9--57</b>	1999	LE70090571999199EDC00
<b>9--57</b>	1999	LT50090571999191XXX06
<b>9--57</b>	2000	LE70090572000234EDC00
<b>9--57</b>	2001	LE70090572001012EDC00
<b>9--57</b>	2001	LE70090572001236EDC00
<b>9--57</b>	2002	LE70090572002015EDC00
<b>9--57</b>	2002	LE70090572002207EDC00

9--57	2003	LE70090572003002EDC00
9--57	2004	LE70090572004037EDC01
9--57	2005	LE70090572005167ASN00
9--57	2006	LE70090572006026EDC00
9--57	2007	LE70090572007029EDC00
9--57	2007	LE70090572007061ASN00
9--57	2008	LE70090572008032EDC00
9--57	2008	LE70090572008256EDC00
9--57	2009	LE70090572009146ASN00
9--57	2010	LE70090572010005EDC00
9--57	2011	LE70090572011248ASN00
9--57	2012	LE70090572012171ASN00
9--57	2013	LC80090572013197LGN00
9--57	2013	LC80090572013245LGN00
9--57	2014	LC80090572014088LGN00
9--57	2014	LC80090572014184LGN00
9--57	2015	LC80090572015011LGN00
9--57	2015	LC80090572015075LGN00

Tabla 5-6 Inventario de escenas obtenidas en la plataforma Global forest Change (University of Maryland)

<b>Escena (Path/Row)</b>	<b>Año</b>	<b>Nombre Escena</b>
9--57	1999	LT50090561987286XXX01
9--57	2014	LC80090562014360LGN00

## 5.5 Elaboración de mapas de uso y cobertura

Los mapas de uso y cobertura de la cuenca del río Chinchiná se construyeron siguiendo la metodología que se observa en la siguiente Figura, a partir de la información secundaria obtenida, la cual consta de un completo registro de imágenes satelitales para los años comprendidos entre 1984 y 2015.

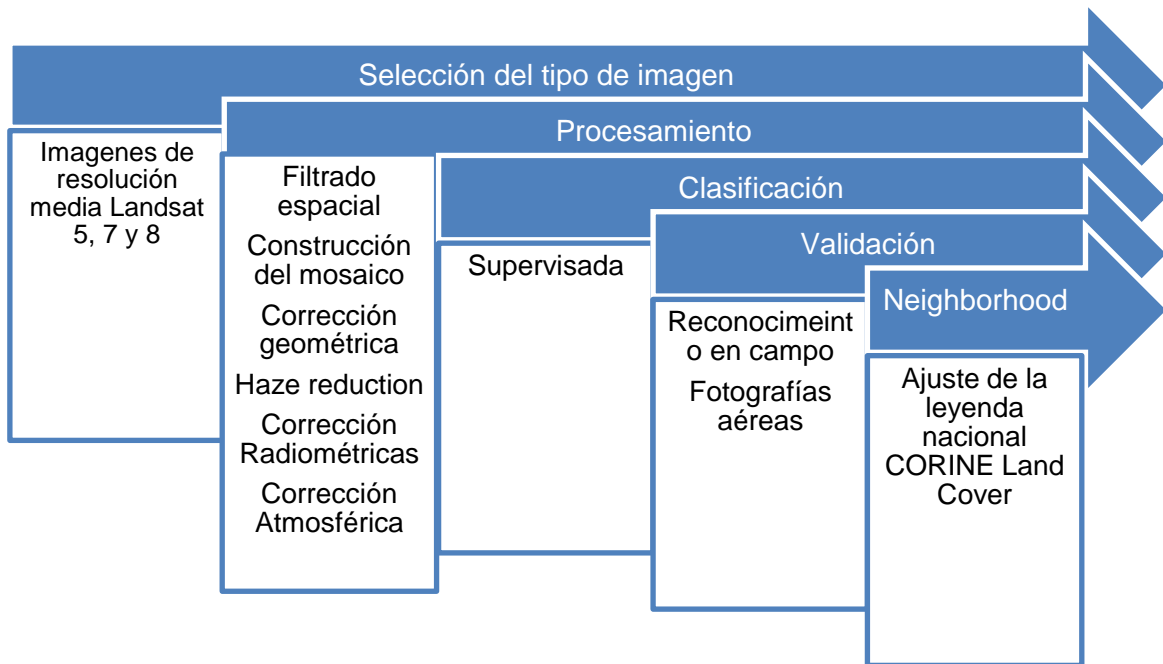


Figura 5-6 Metodología construcción de mapas de uso y cobertura Fuente: Propia

## 5.6 Identificación de coberturas

Con base a la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia y la calidad de imágenes disponibles, se pretende identificar en el primer nivel de clasificación, 4 clases correspondientes a, Territorios agrícolas, Bosques y Áreas Semi-Naturales y superficies de agua; en el segundo nivel un total de 6 subclases, representadas en, pastos, áreas agrícolas heterogéneas, bosques, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, áreas abiertas, sin o con poca vegetación y aguas continentales, en la Tabla 5-7 se muestra la posición altitudinal de cada cobertura a identificar

Tabla 5-7 Coberturas identificadas en la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra  
Fuente: Propia

<b>COBERTURA</b>	<b>ALTURA MÍNIMA (m.s.n.m)</b>	<b>ALTURA MÁXIMA (m.s.n.m)</b>
Pastos arbolados	1,100	3,000
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	1,100	3,800
bosque denso	1,800	3,000
Herbazal	3,800	4,200
Zonas arenosas naturales	3,750	4,000
Afloramientos rocosos	4,000	4,873
Zonas glaciares y nivales	4,873	5,300
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	--	--

## 5.7 Validación de las coberturas identificadas

Se realizaron dos visitas de campo en la parte media-alta y alta de la cuenca, esto con el objeto de realizar un proceso de validación de las coberturas identificadas en el mapa propuesto para el año 2014, asumiendo que no se han presentado cambios significativos durante los 4 años transcurridos.

A continuación se presenta una descripción detallada de las coberturas identificadas, así como el nivel de subclase al que pertenece, y si es pertinente definir un mayor grado de clasificación, con base a las observaciones realizadas en campo, y a la resolución espacial de las imágenes usadas para la elaboración del mapa.

### 5.7.1 Pastos

Esta subclase pertenece a la clase de **territorios agrícolas** y se caracteriza por áreas cubiertas por hierba densa donde la familia Poaceae domina generalmente como composición florística principal. Un alto porcentaje de su presencia se debe especialmente a su plantación e introducción de especies no nativas principalmente para ser dedicadas al pastoreo permanente por periodos de dos o más años atribuidos a la acción antrópica. Dentro de esta subclase se tienen las siguientes unidades de cobertura de pastos para su clasificación:

- Pastos limpios
- Pastos arbolados
- Pastos enmalezados

En las visitas realizadas se determinó la presencia de pastos arbolados en la zona que comprende la parte media-alta y alta de la cuenca (Ver Figura 5-7), por esta razón se realiza énfasis en esta cobertura.



Figura 5-7 Subclase Pastos parte media-alta de la cuenca, 1100 - 3000 m.s.n.m Fuente: Propia

- **Pastos arbolados**

Comprende las tierras con pastos, combinadas con la presencia de árboles de tamaño considerable a partir de 5 metros de altura, dispersos y sin organización alguna sobre el territorio, no obstante, la cobertura de árboles debe ser superior al 30% e inferior al 50% unidad total de pastos (Ver Figura 5-8).

### Incluye

- Pastos arbolados con área mayor a 25 ha
- Pastos arbolados bordeados con setos
- Pastos arbolados con zonas inundables o pantanosas con área menor a 25 ha
- Infraestructuras asociadas con los pastos arbolados con área menor a 25 ha, tales como corrales o establos

### No incluye

- Pastos arbolados con área menor a 25 ha, deben asociarse con otras coberturas
- Pastos limpios bordeados con setos
- Pastos arbolados con densidad de árboles mayor a 50%
- Campos de golf
- parques urbanos y parques cementerios
- Pastos con árboles frutales cultivos agroforestales

Figura 5-8 Características de los pastos arbolados Fuente: (Ideam, 2010)

## 5.7.2 Áreas agrícolas heterogéneas

Esta subclase pertenece a la clase de **territorios agrícolas**, se encarga de describir dos o más coberturas agrícolas y naturales como una sola unidad, ya que no es posible su separación por coberturas individuales, puesto que, forman un mosaico geométrico con un patrón intrínseco; depende de las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo y tenencia de la tierra. Dentro de esta subclase se definen las siguientes coberturas:

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

Este proyecto dentro de su análisis logró determinar la presencia de Mosaicos de cultivo, pastos y espacios naturales dentro de la zona de influencia de la cuenca del río Chinchiná, por lo que se realiza un énfasis más detallado de esta cobertura.

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

Como su nombre lo indica comprende las áreas de terreno con la presencia de cultivos y pastos entre el 30% y el 70% del total del área de la unidad en combinación con espacios naturales que ocupan el área restante (Ver Figura 5-9).





Figura 5-9 Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales - cuenca alta, entre 1100 - 3000 m.s.n.m Fuente: Propia

Se definen como las áreas que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural, como relictos de bosque natural, arbustales, bosques de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas (Ver Figura 5-10).

### Incluye

- Mezcla de parcelas y cultivos con intercalaciones de espacios naturales, con área mayores a 25 ha.
- Parcelas agrícolas de cultivos anuales o transitorios con área menor a 25 ha
- Zonas pantanosas con área menor a 25 ha
- Pequeños cuerpos de agua naturales con área menor a 25 ha
- Relictos de bosques con área menor a 25 ha
- Bosques de galería o riparios y arbustales con área menor a 25 ha
- Parcelas de cultivos confinados y frutales con área menor a 25 ha
- Infraestructuras asociadas con los pastos manejados (viviendas rurales, setos, vías)

### No incluye

- Áreas donde los espacios naturales constituyen más de 70% del área del mosaico, por lo tanto, se deben clasificar como coberturas de bosques y área seminaturales

Figura 5-10 Características de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales Fuente: (Ideam, 2010)

Es de resaltar que por pertenecer a la subclase de áreas agrícolas heterogéneas las coberturas no pueden enmarcarse en un patrón de distribución de cobertura individual como parcelas con tamaño mayor 25 hectáreas.

### 5.7.3 Bosques

Esta subclase pertenece a la clase de **Bosques y áreas Semi-Naturales**, y se define por la presencia de elementos arbóreos de especies nativas o exóticas, considerados como plantas leñosas perennes con un solo tronco principal y una copa o varias definidas (arboles) y deben superar una altura superior de 5 metros, en esta categoría también se incluyen las palmas y la guadua considerando las características propias del territorio colombiano.

Los bosques se clasifican en densos y abiertos dependiendo de la densidad de la cobertura arbórea, que se define como el porcentaje de cobertura de la copa. También se clasifican según la altura del dosel en altos (altura superior a 15 metros) intermedios (arboles con alturas entre 8 y 15 metros) y bajos (arboles con altura menor a 8 metros) y finalmente dependiendo de la condición de inundabilidad del terreno en de tierra firme e inundables.

- **Bosque denso**

La densidad se define a partir del porcentaje de cobertura de la copa, que a su vez se define como el porcentaje de la tierra ocupado en conjunto por la proyección perpendicular de la vegetación, una cobertura densa corresponde a una cobertura arbórea mayor al 70% de la unidad total, en donde las copas se tocan, creando un estrato de copas más o menos continuo con poca intervención o intervención selectiva que no ha alterado la estructura original y las características funcionales; comprende las áreas de terreno superficial que se encuentran dominadas por elementos típicamente arbóreos con una altura del dosel superior a 5 metros (Ver Figura 5-11).

#### Incluye

- Áreas con una cobertura densa de palmas naturales, cuando la formación vegetal presenta la altura mínima y el área es superior a 25 ha. (En Colombia, se pueden presentar asociaciones vegetales con predominio de palmas como el nadizal y el morichal)
- Áreas con una cobertura densa de guadua, cuando la formación vegetal presenta la altura mínima y el área es superior a 25 ha (guadales)
- Formaciones arbóreas secundarias regeneradas de manera natural que han alcanzado la densidad y altura de bosque natural
- Afloramientos rocosos incluidos dentro del bosque natural con área menor a 25 ha

#### No incluye

- Plantaciones forestales de coníferas o latifoliadas
- Cultivos permanentes arbóreos
- Zonas quemadas con área mayor o igual a 25 ha localizadas en el interior de coberturas de bosque natural denso
- Vegetación de arbustos
- Zonas verdes urbanas con área mayor o igual a 5 ha

Figura 5-11 Características del Bosque denso Fuente: (Ideam, 2010)

Bosque denso se puede dividir hasta el sexto nivel de clasificación, no obstante la resolución de las imágenes usadas no permitió realizar una clasificación con un mayor detalle, lo que limita el alcance de la clasificación hasta el tercer nivel.



Figura 5-12 Bosque denso - cuenca media-alta Fuente: Propia

#### 5.7.4 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva

Esta subclase pertenece a la clase de **Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva**, como su nombre lo indica, se refiere a las áreas naturales constituidas principalmente por elementos vegetales cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo. En esta sección también se incluyen áreas cubiertas por vegetación arbustiva con dosel irregular y presencia de arbustos, palmas, enredaderas, y vegetación de bajo porte, debido a la adaptación de la leyenda CORINE Land Cover a Colombia; teniendo en cuenta que en las visitas de campo realizadas se evidenció una alta presencia de cobertura Herbazal, a continuación, se realiza énfasis en dicha cobertura.

- **Herbazal**

Un elemento herbáceo es una planta que carece de tallo duro y tiene consistencia blanda en todos sus órganos, tanto subterráneos como epigeos, esta es la característica principal que identifica los elementos de este tipo de cobertura; se parte de que estas formaciones vegetales se desarrollan de manera natural y no han sido intervenidas o cuentan con una intervención selectiva que modifique su estructura inicial. (Ver Figura 5-13).





Figura 5-13 Herbazal - cuenca alta, entre 3800 - 4200 m.s.n.m Fuente: Propia

Los herbazales se clasifican según su cobertura herbácea en densa (mayor al 70%) o abierta (entre el 30% y 70%). También se pueden clasificar en inundables o de tierra firme dependiendo de las condiciones de drenaje; y de acuerdo a la condición de arbolados y no arbolados por la presencia de árboles y arbustos.

Una cobertura Herbazal densa corresponde a una cobertura mayor al 70% de la unidad total constituida por la comunidad vegetal de elementos herbáceos, estos crecen de forma natural en diferentes sustratos y que carecen de ser plantas lignificadas, en algunos casos cuentan con un pequeño grado de lignificación y no han sido alteradas.

**Incluye**

- Otras coberturas incluídas con área inferior al área mínima cartografiada de acuerdo con la escala de trabajo y que representen menos de 30% del total de la unidad
- Coberturas de herbazales naturales
- Coberturas naturales de herbáceas de páramo y subpáramo
- Coberturas de herbazales quemados

**No incluye**

- Coberturas incluídas que tengan una extensión superior al área mínima cartografiada de acuerdo con al escala de trabajo
- Pastos limpios
- Pastos enmalezados

Figura 5-14 Características del Herbazal denso Fuente: leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia

Adicionalmente se pueden clasificar en arbolados o no arbolados de acuerdo a la presencia de elementos arbóreos y/o arbustivos dispersos, aunque dicha diferencia se puede apreciar a medida que se recorre el cobertura en la parte alta de la cuenca, no es posible realizar su distinción en los mapas realizados en este trabajo puesto excede el alcance del mismo, en la siguiente figura se puede apreciar la vegetación típica de la cobertura Herbácea (Ver Figura 5-15).



Figura 5-15 Vegetación típica de la cobertura herbácea - cuenca alta Fuente: Propia



### **5.7.5 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación**

Esta subclase pertenece a la clase de **Bosques y Áreas Semi-Naturales** y se refiere a los territorios que carecen de vegetación o es escasa, donde dominan los suelos desnudos, con coberturas arenosas y afloramientos rocosos que pueden estar acompañados o cubiertos de hielo y/o nieve.

Esta subclase abarca 3 de las 7 coberturas identificables en el estudio, Zonas arenosas naturales, Afloramientos rocosos, Zonas glaciares y nivales, por lo cual se explican de forma detallada las características de cada una de estas.

- **Zonas arenosas naturales**

Comprenden los suelos arenosos y pedregosos, sin o con poca vegetación generalmente de tipo arbustal ralo y bajo, e incluye las superficies conformadas por terrenos cubiertos por arenas, limos o guijarros, como es el caso de las características de esta cobertura en la cuenca alta del río Chinchiná, a pesar de que esta cobertura está asociada generalmente a la actividad de los ríos, mar o el viento y a sus playas litorales y, abanicos de inundación (Ver Figura 5-16).

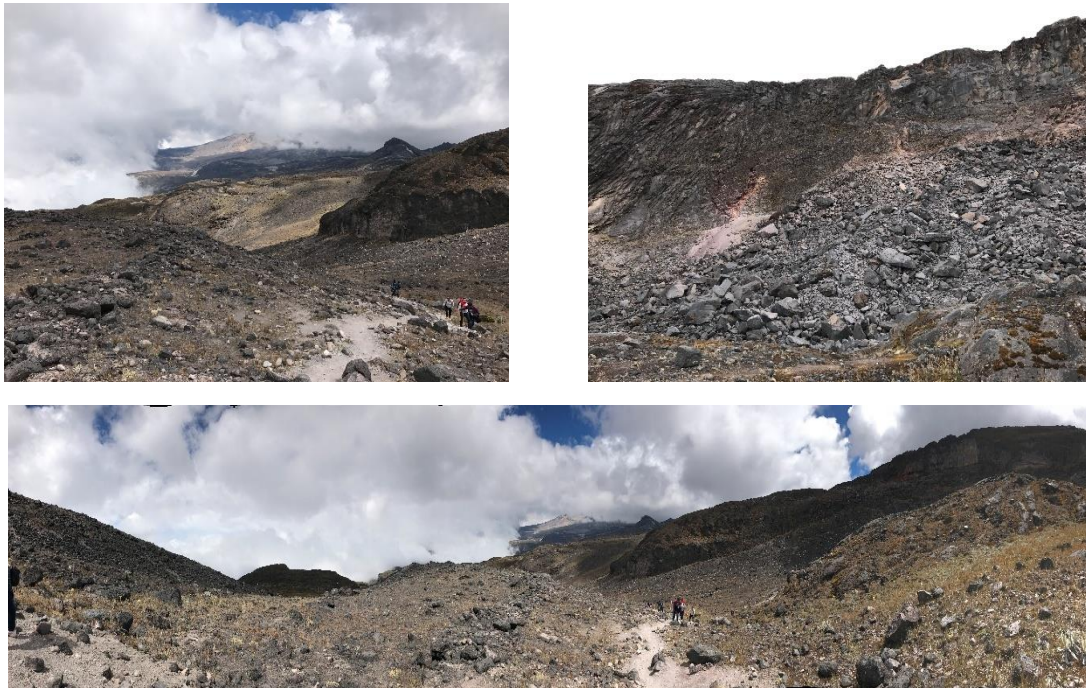


Figura 5-16 Zonas arenosas naturales - cuenca alta, entre 3750 - 4000 m.s.n.m Fuente: Propia

A continuación se enumeran las características necesarias a tener en cuenta para su correcta identificación (Ver Figura 5-17).

**Incluye**

- Zonas cubiertas por playas, arenales y campos de dunas con área superior a 25 ha
- Arenales, dunas y campos de dunas de ambientes lacustres
- Dunas móviles sin vegetación

**No incluye**

- Zonas de playas, arenales y dunas con área inferior a 25 ha; se deben asociar a otras coberturas
- Dunas estabilizadas cubiertas por vegetación herbácea y/o por arbustales
- Islas de ríos, lagos y ciénagas cubiertas por vegetación o cultivos con área superior a 25 ha

Figura 5-17 Características de las Zonas arenosas naturales Fuente: (Ideam, 2010)

- **Afloramientos Rocosos**

Comprende las áreas de la superficie constituida por rocas expuestas sin vegetación, se caracteriza por sustratos de rocas duras y resistentes, por áreas de fuerte pendiente y asociadas con fallas y deformaciones geológicas, laderas abruptas, escarpes y acantilados (Ver Figura 5-18).



Figura 5-18 Afloramientos rocosos – cuenca alta, entre 4,000 - 4,873 m.s.n.m Fuente: Propia



Esta cobertura se presenta en la parte alta de la cuenca, como zonas de rocas desnudas y depósitos de sedimentos finos y gruesos de bloques o de cenizas que están estrechamente relacionados con la actividad volcánica y de glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Nevado Santa Isabel y del Volcán Nevado del Tolima los cuales se encuentran presentes en la zona de estudio (Ver Figura 5-19).

### Incluye

- Zonas de afloramientos rocosos con área superior a 25 ha
- Áreas rocosas con cobertura vegetal rala y escasa que representa menos de 30% del afloramiento rocoso
- Zonas cubiertas por productos de actividad volcánica reciente como ceniza volcánica, lapilli y bloques, así como los campos estériles formados sobre flujos de lava

### No incluye

- Zonas de afloramientos rocosos con área inferior a 25 ha; se deben asociar a otras coberturas
- Zonas de rocas desnudas con arbustos dispersos que cubren más del 30% del afloramiento rocoso

Figura 5-19 Características de afloramientos rocosos Fuente: (Ideam, 2010)

- **Zonas glaciares y nivales**

Constituye las áreas del terreno cubiertas por hielo y nieve.

**Zonas glaciares:** Se constituyen cuando el hielo cubre el suelo de carácter permanente, y se presenta a partir de la cota de nivel de 4.900 m.s.n.m en la cima y laderas de algunas montañas de los Andes Colombianos. Sin embargo, debido al calentamiento de la atmósfera por el calentamiento climático presenta una tendencia a la contracción de su área con el paso del tiempo. También existe el riesgo a la pérdida de grandes masas glaciares al momento de erupciones volcánicas como es el caso de la zona de estudio

**Zonas nivales:** Se constituyen cuando se encuentra cubierto el suelo por nieve es de carácter ocasional, y puede presentarse a partir de la cota de nivel 4.200 m.s.n.m como resultado de precipitaciones en forma sólida (nevadas) en temporada invernal, la nevada puede envolver grandes áreas de montaña, aunque solo en un tiempo corto a escala de días (Ver Figura 5-20).

### Incluye

- Zonas cubiertas por hielo y nieve con área mayor a 25 ha
- Pequeñas zonas de rocas desnudas que afloran dentro de las masas glaciares, con área menor a 25 ha y que no representan más de 30% del área total de la unidad

### No incluye

- Zonas cubiertas por hielo y nieve con área menor a 25 ha; deben asociarse con otras unidades
- Afloramientos de rocas desnudas en escarpes y acantilados con área superior a 25 ha
- Áreas cubiertas por afloramientos rocosos y masas de hielo donde las rocas desnudas comprenden más de 70% del área total de la unidad

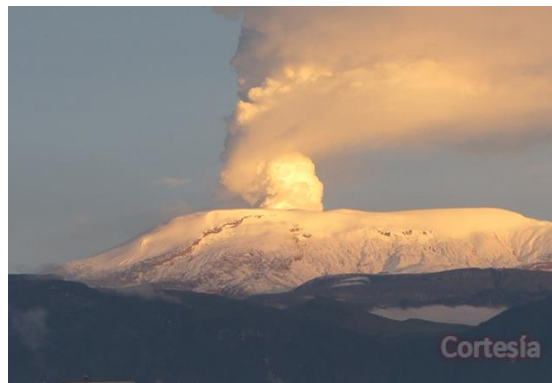
Figura 5-20 Característica de Zonas glaciares y nivales Fuente: (Ideam, 2010)

Esta cobertura, aunque parece fácilmente identificable por sus marcadas características, su localización presenta un alto grado de nubosidad, lo que la hace difícil de reconocer, debido a que el comportamiento espectral de la nube es similar al de la cobertura de Zonas de Glaciares y Nieve, en este caso fue necesario realizar un exhaustivo proceso de entrenamiento de los polígonos para garantizar su correcta identificación.

Las zonas Glaciales y Nivales se encuentran cubriendo la cima y laderas de las montañas de la parte alta de la cuenca, se encuentran entre los 4,873 y los 5,300 m.s.n.m esperando encontrarse los glaciares cerca de las cimas y la nieve en las laderas alrededor del límite de altura dependiendo de la condición hidrológica y el ciclo anual característico de la zona (Ver Figura 5-21).



Volcán Nevado del Ruiz – fuente: Propia



Volcán Nevado del Ruiz – fuente: Cortesía de un ciudadano al servicio geológico colombiano



Volcán Nevado Santa Isabel – fuente: Propia

Volcán Nevado Santa Isabel – fuente: Propia

Figura 5-21 Glaciares y Zonas Nivales - cuenca alta

### 5.7.6 Aguas continentales

Esta subclase pertenece a la clase de **Superficies de Agua** y se hallan discretizados todos los cuerpos de agua que se encuentran dentro del continente, ya sea los que se encuentran en continuo movimiento, tales como ríos y canales; o los cuerpos de agua lenticos, como depósitos o estanques naturales de agua dulce, lagos, lagunas, ciénagas y embalses; adicionalmente es necesario considerar su permanencia en el tiempo, ya sea intermitente y/o estacionaria.

- **Lagunas, lagos y ciénagas naturales**

Ecosistemas loticos caracterizados por depósitos o superficies naturales de agua que puede ser abastecidos por precipitación sobre el espejo del agua y/o conectados por ríos, aguas freáticas o el mar por lo que sus aguas pueden ser dulce o salobre (Ver Figura 5-22).

#### Incluye

- Lagunas, ciénagas u otros cuerpos agua naturales con área mayor o igual a 25 ha
- Cobertura de vegetación acuática flotante con área menor a 25 ha y que no represente más de 30% del área del cuerpo de agua
- Deltas interiores de lodos y arenas con una superficie menor a 25 ha y que el cuerpo del delta no represente más de 30% de la superficie total del cuerpo de agua

#### No incluye

- Cuerpos de aguas artificiales utilizados para la cría de especies acuícolas
- Superficies con vegetación acuática flotante con área mayor a 25 ha

Figura 5-22 Características de lagunas, lagos, y ciénagas Fuente: (Ideam, 2010)

Para la zona de estudio no aplican las ciénagas como coberturas, debido a que son propias de grandes ríos costeros; al ser una cuenca Andina los cuerpos de agua predominantes son los ríos, lagunas y los lagos (Ver Figura 5-23).



Laguna Negra - Nevado del Ruiz Fuente: Propia



Laguna Negra - Nevado del Ruiz Fuente: Propia



Laguna - Nevado Santa Isabel Fuente: Propia



Cuerpo de agua - Nevado Santa Isabel Fuente:  
Propia

Figura 5-23 Presencia de Lagunas y lagos, como cobertura en la parte alta de la cuenca

## 5.8 Modelación hidrológica

En el presente trabajo se utilizó el modelo hidrológico conceptual basado en tanques en su versión agregada, el cual ha sido probado satisfactoriamente en diversos climas con una amplia gama de áreas en cuencas de España, Francia, Italia y Colombia (J. J. Vélez & García, 2008).

El modelo simula sobre el área de la cuenca el fenómeno lluvia-escorrentía, este proceso se realiza con cuatro tanques verticales, donde cada tanque representa el almacenamiento de agua en una columna extendida de la tierra que recrea las características atmosféricas,



superficiales, gravitacionales y de acuífero (Francés, Vélez, & Vélez, 2007; I. Vélez, 2001; J. J. Vélez & García, 2008).

Los distintos tanques se relacionan entre sí por medio de parámetros que describen las características de la tierra tales como capacidad de campo y conductividades hidráulicas saturadas de la tierra y subsuelo. Estas características se estiman con base a mediciones edafológicas, litológicas, geomorfológicas y de usos y coberturas de la tierra (Francés et al., 2007; I. Vélez, 2001; J. J. Vélez & García, 2008). Las relaciones entre los diferentes tanques permiten representar el proceso de escorrentía superficial, y como este influye en el caudal de salida de la cuenca hidrográfica.

En la siguiente figura se puede observar el esquema del modelo hidrológico basado en tanques, en esta se presentan los parámetros que influyen en el funcionamiento del modelo;  $X_1$  es la variable que representa la precipitación en cada intervalo de tiempo; valor que es distribuido a los diferentes tanques o niveles de almacenamiento, donde en función del volumen almacenado  $H_i$  se determina la escorrentía  $Y_i$ .

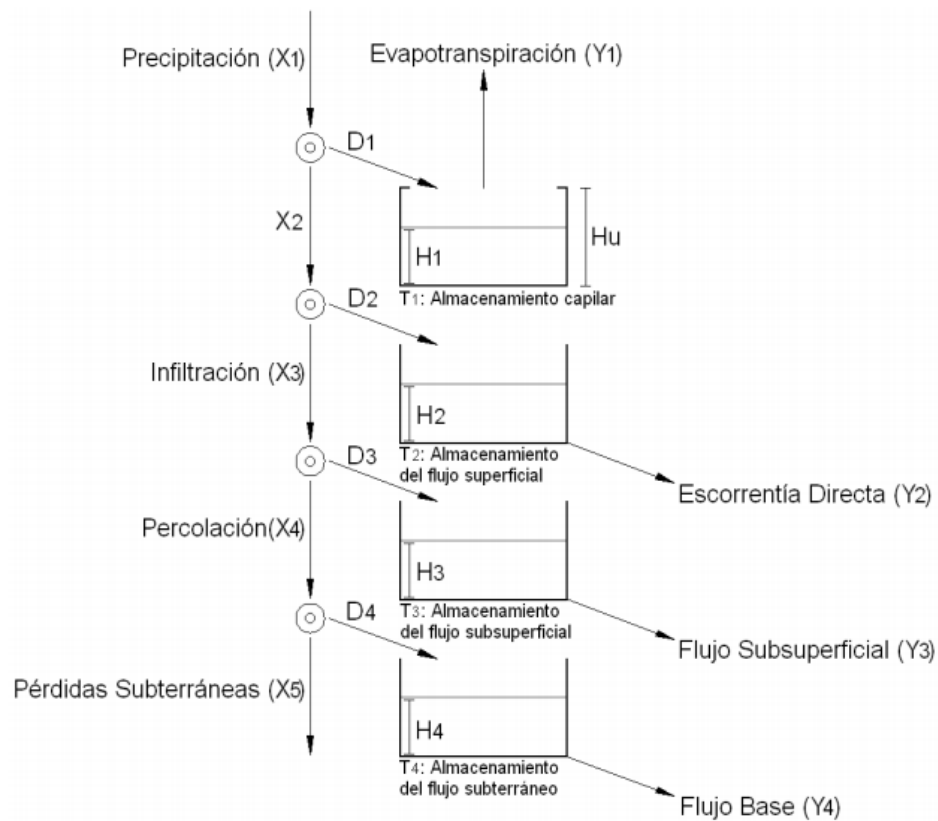


Figura 5-24 Esquema general del modelo de interacción suelo – atmosfera Fuente: (J. I. Vélez et al., 2002)

La precipitación  $X_1$  se estima teniendo en cuenta los registros diarios de precipitación de algunas estaciones dentro de la cuenca hidrográfica, las cuales se ponderan y se calcula una lámina promedio de precipitación (Francés et al., 2007; J. I. Vélez et al., 2002), para el caso de estudio la información pluviométrica corresponde a los registros diarios de 23 estaciones con 30 años de registro, las cuales hacen parte de la red meteorológica del departamento de Caldas, dicha información fue recolectada en marco de la ejecución del trabajo de investigación "EFECTOS DE LA OSCILACION DEL SUR EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ, COLOMBIA" (Patiño et al., 2014).

La descarga  $Y_i$  en cada uno de los tanques está en función del volumen almacenado y de las características de la cuenca que se pueden asociar con el tiempo de permanencia del agua en un elemento de almacenamiento temporal (Francés et al., 2007; J. I. Vélez et al., 2002), como se describe a continuación.

- **Tanque 1 (T1): Tanque de almacenamiento estático (Hu)**

Este tanque representa la intercepción de las plantas, la detención del agua en los charcos y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares. De este tanque solo sale agua producto de la evapotranspiración y no contribuye a la escorrentía superficial.

- **Tanque 2 (T2): Almacenamiento del flujo superficial (Ks)**

En este almacenamiento se representa el agua que fluye por la ladera o escorrentía directa. Supone que la capa superior de la tierra tiene una conductividad hidráulica  $K_s$  representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionando la cobertura vegetal, el uso y el manejo de la tierra.

- **Tanque 3 (T3): Almacenamiento del flujo subsuperficial**

Este almacenamiento representa el agua acumulada en la capa superior de la tierra mientras fluye lentamente hacia la red de drenaje, se desarrolla inicialmente sobre una capa delgada que fluye lateralmente hacia abajo por el interior de esta capa hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

- **Tanque 4 (T4): Almacenamiento del flujo subterráneo**

Se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior de la tierra hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y donde sale a formar el flujo base.

Se conoce que los resultados de los modelos hidrológicos dependen en gran medida de las condiciones previas de humedad, dado que los procesos de infiltración, escorrentía evapotranspiración y encharcamiento son afectados por la cantidad inicial de agua presente en los poros de la superficie de la tierra (J. J. Vélez & García, 2008), las condiciones iniciales de humedad están definidas por las características de las coberturas presentes en la cuenca, por ello en el presente estudio se obtuvieron los parámetros necesarios para aplicar el modelo, teniendo en cuenta su variación espacio temporal, a partir de los mapas de uso y cobertura de la tierra construidos previamente.

### **5.8.1 Obtención de los parámetros**

El modelo posee un conjunto de parámetros agregados que simulan cada uno de los procesos físicos de transporte al interior de la cuenca, para la evaluación de la posible influencia de los cambios de cobertura de la tierra en la producción de caudal, se consideraron depreciables los parámetros inherentes al comportamiento superficial de la tierra, es decir que para los modelos de los años 1987, 1999 y 2014, los valores de calibración correspondientes a Conductividad hidráulica saturada de la capa del subsuelo ( $K_{inf}$ ), Flujo base (BF), Tiempos de residencia y Pérdidas, se adoptaron de las modelaciones hidrológicas realizadas durante la aplicación del Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca del río Chinchiná (CORPOCALDAS & Universidad Nacional de Colombia, 2013), fueron constantes para los tres periodos.

Los valores de Almacenamiento estático (Hu) y de Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) describen el comportamiento de la tierra a nivel superficial, se determinaron por medio de los mapas de uso y cobertura para los años 1987, 1999 y 2014, tal y como se describe a continuación.

### **5.8.2 Almacenamiento estático o agua disponible para las plantas (Hu)**

El almacenamiento estático se conoce como la cantidad de agua en (mm) que transita por la superficie y sólo se evacua por medio de evapotranspiración, si bien no aporta directamente al flujo de escorrentía, su magnitud es fundamental en el balance hidrológico (Pasquato, 2011), su comportamiento se describe por medio de los coeficientes propuestos por (Burman & Pochop, 1994) (Ver siguiente Figura).

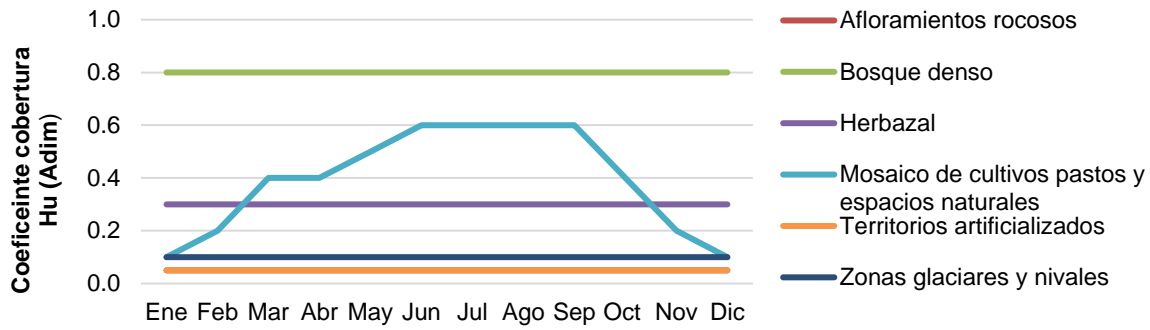


Figura 5-1 Variación temporal de los coeficientes de almacenamiento estático (Hu) para cada cobertura Fuente: Adaptado de (Burman & Pochop, 1994)

El valor del almacenamiento estático se calculó a partir de los coeficientes de almacenamiento (Hu), dicho coeficiente se multiplica por el valor de la Evapotranspiración potencial para cada año (ETP), dando como resultado el aporte en almacenamiento estático para cada cobertura, ver la ecuación ( 5-1). El valor de Hu de toda la cuenca para cada año (1987, 1999 y 2014), se obtiene por medio de un promedio ponderado en función del aporte de Almacenamiento (Hu) de cada cobertura y su respectiva área, ver la ecuación ( 5-2), la cual fue obtenida de los mapas de uso y cobertura de cada año, tal y como se describe a continuación.

$$Hu_{cobertura\ n} (mm)_{año\ n} = ETP_{año\ n} * Coeficiente_{cobertura\ n} \quad (5-1)$$

$$Hu_{cuenca} (mm)_{año\ n} = \frac{\sum(Hu_{cobertura\ n} (mm)_{año\ n} * Área_{cobertura\ n}_{año\ n})}{Área\ total\ de\ la\ cuenca} \quad (5-2)$$

### 5.8.3 Conductividad hidráulica saturada en la capa superior de la tierra (Ks)

El valor de conductividad hidráulica saturada Ks de la cuenca, se determinó con base a los parámetros de conductividad hidráulica saturada reportados en (Corpocaldas & UNAL, 2012), en el cual se aplicó el software SPAW Hidrology del United States Department of Agriculture (USDA), el cual fue alimentado con los porcentajes de arenas, limos, arcillas, materia orgánica y pH presentes en cada tipo de uso y cobertura presente en las cuencas de Caldas. En la siguiente tabla se aprecian los valores de Ks reportados para los tipos de uso y coberturas identificados en los mapas de los años 1987, 1999 y 2014.



Tabla 5-8 Valores de Conductividad hidráulica saturada (Ks) para los usos y cobertura presentes en la cuenca Fuente: Adaptado de (Corpocaldas & UNAL, 2012)

Usos y coberturas	Ks (mm/día)
Afloramientos rocosos	6.50
Bosque denso	3.00
Herbazal	6.00
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	3.00
Pastos arbolados	5.00
Territorios artificializados	4.00
Zonas glaciares y nivales	4.50

El valor de Ks de toda la cuenca para los años 1987, 1999 y 2014, se obtiene por medio de un promedio ponderado en función del área de cada cobertura identificada y su respectivo valor de Ks (mm/día).

$$Ks \text{ cuenca (mm/día)}_{año n} = \frac{\sum (Ks \text{ cobertura } n \text{ (mm/día)}_{año n} * \text{Área cobertura } n_{año n})}{\text{Área total de la cuenca}} \quad (5-3)$$

#### 5.8.4 Influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca

El proceso de análisis de la influencia de los cambios de usos y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca, se realiza con base en los resultados del balance hidrológico producto de la modelación realizada para un periodo de tiempo parametrizado y calibrado, esto con el objeto de que recrear las condiciones de la cuenca durante un periodo de análisis, estos resultados se acogieron como referencia o línea base.

Del periodo de análisis se seleccionaron tres años de interés, donde cada uno obedece a la ocurrencia de eventos de la fase fría, cálida y normal del fenómeno ENSO; para cada uno se realiza el proceso de modelación, variando los parámetros de Almacenamiento estático (Hu) y Conductividad hidráulica superficial (Ks) obtenidos para cada año a partir de los mapas de uso y cobertura construidos previamente, eso es con el objetivo de recrear las condiciones de uso y cobertura propias de cada año.

Por último se procedió a comparar los resultados obtenidos en el balance hidrológico realizado para el periodo de referencia o línea base con los arrojados por los modelos de

los tres años en los que se variaron las condiciones de la tierra, en el siguiente esquema se describe el proceso a desarrollar.

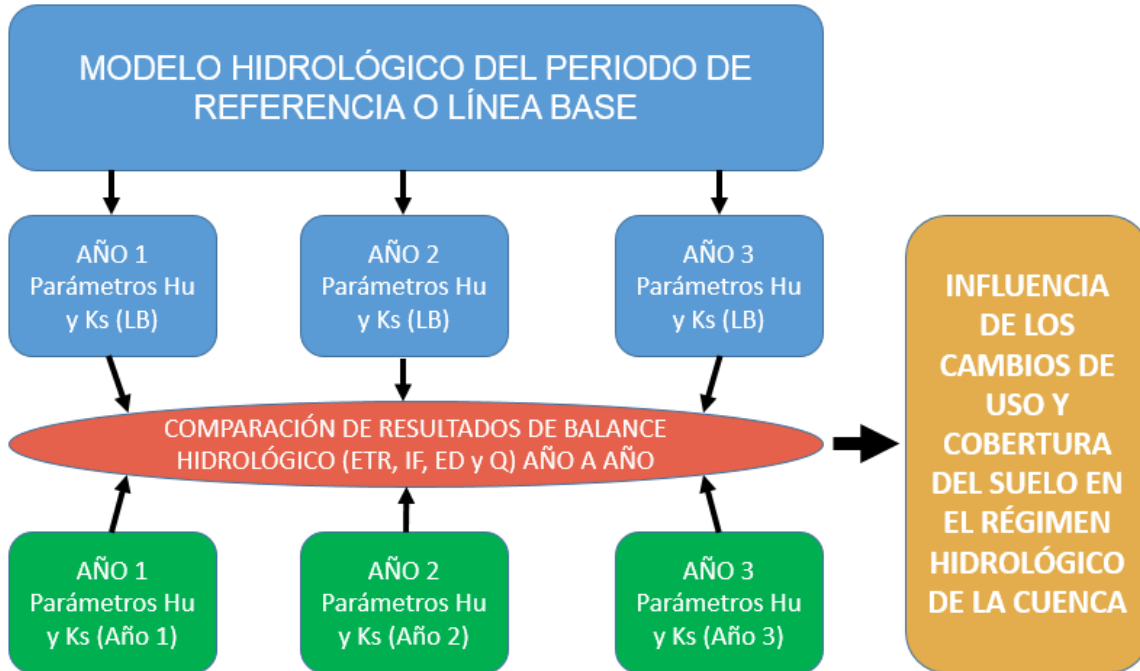


Figura 5-2 Metodología de análisis de la influencia de los cambios de uso y cobertura en el régimen hidrológico de la cuenca Fuente: Propia

## **6.Resultados y discusión**

### **6.1 Comportamiento hidrológico de la cuenca**

El análisis de la precipitación consistió en la evaluación de los registros diarios de 23 estaciones que tienen más de 30 años de registro, las cuales hacen parte de la red meteorológica del departamento de Caldas. Según la regionalización climática (IDEAM, 2014) la precipitación es abundante en la parte alta y media de la cuenca; mientras que la zona baja se caracteriza por ser muy abundante.

A través del método de interpolación con Kriging ordinario se obtuvo la precipitación promedio anual para el período 1981-2014 y se presenta en el mapa de la Figura 6-1.

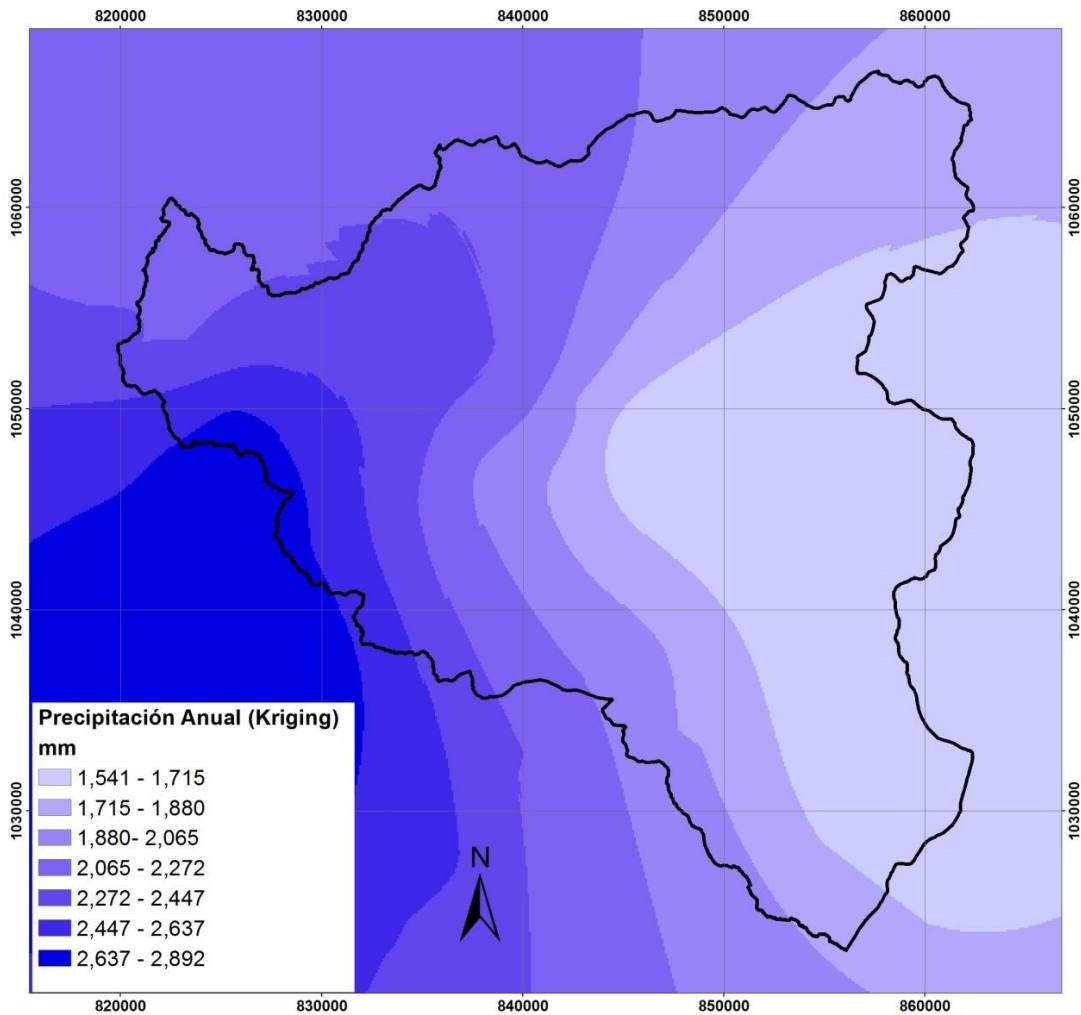


Figura 6-1 Precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2014 Fuente: (Patiño et al., 2014)

En la cuenca del río Chinchiná se evidencia un régimen bimodal en la precipitación, típico de cuencas Andinas, por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical; las mayores precipitaciones se presentan en el rango altitudinal entre 2000 a 2500 m.s.n.m. En la siguiente figura se presentan algunas de las estaciones evaluadas según rango altitudinal de la precipitación promedio mensual multianual.

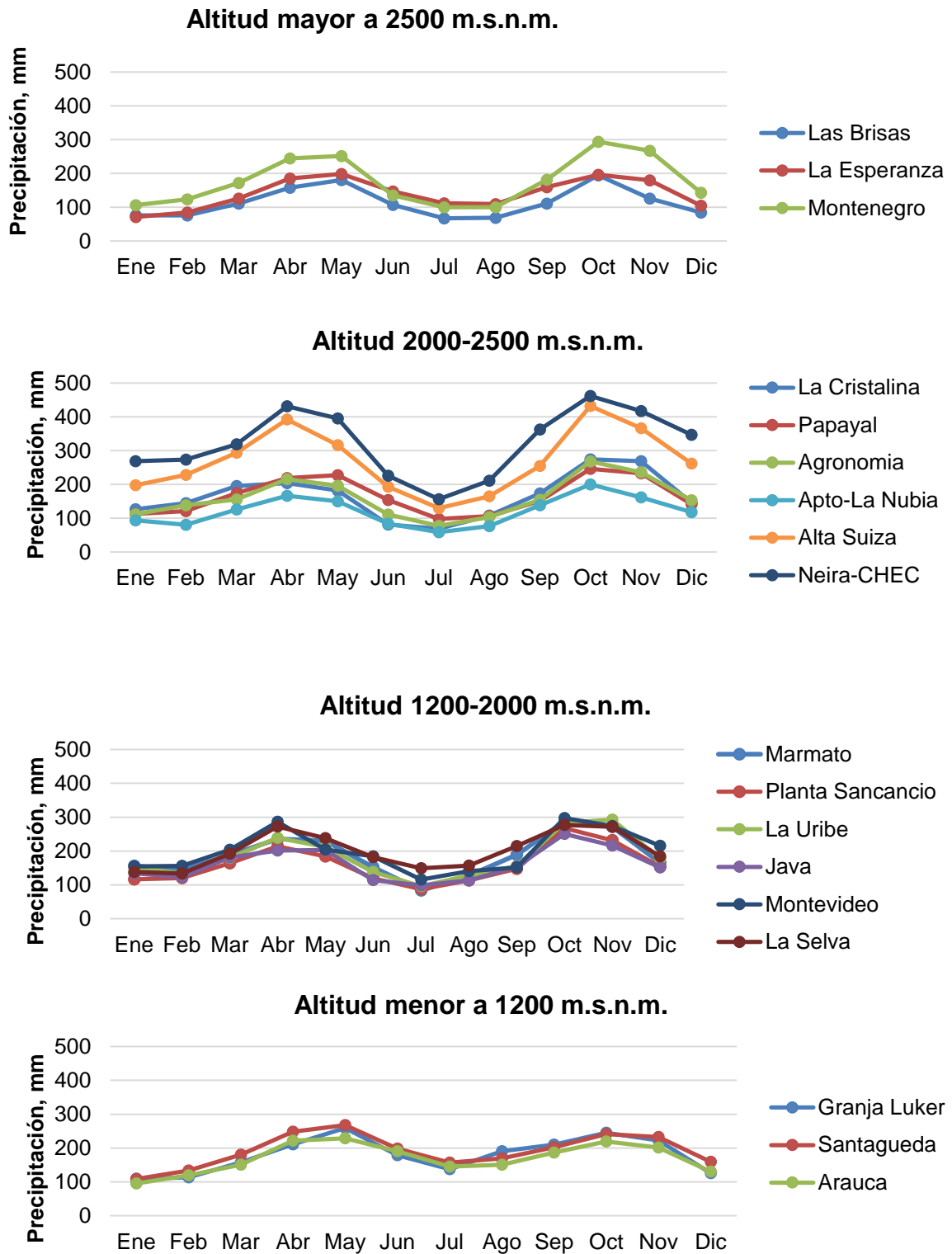
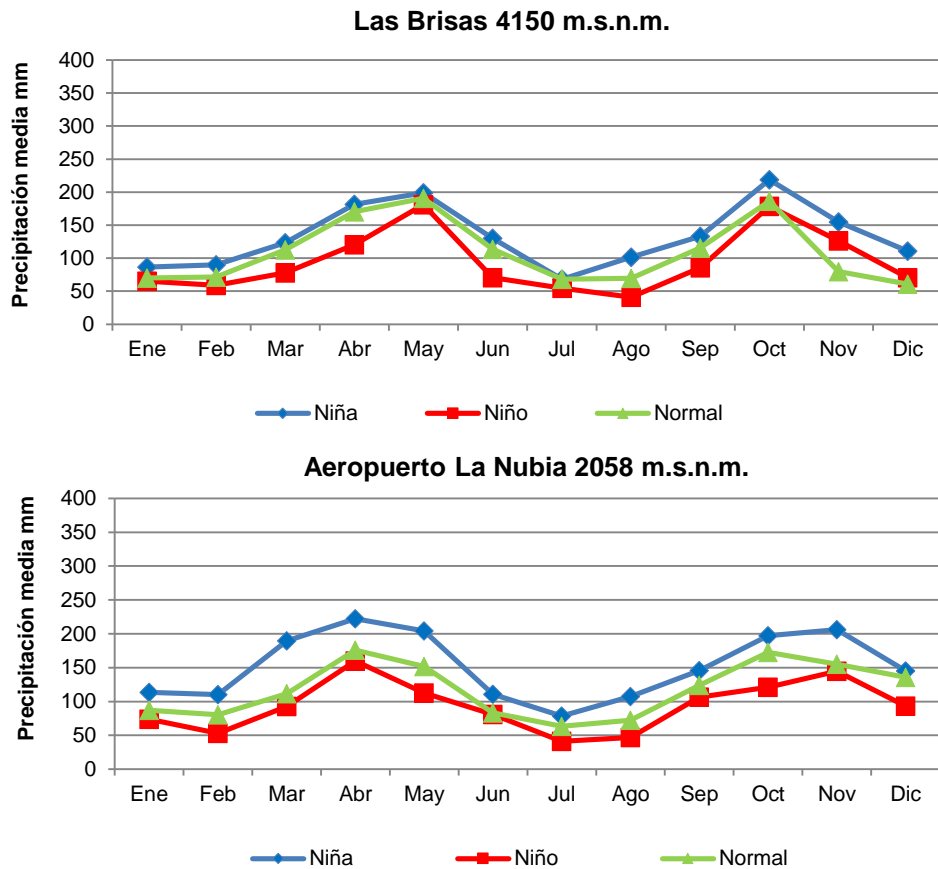


Figura 6-2 Precipitación media mensual multianual 1981-2010 según rango altitudinal Fuente: Propia

### 6.1.1 Efectos del fenómeno (ENSO) en la precipitación de la cuenca

En relación a los períodos normales que corresponden a la ausencia del evento ENSO; los episodios fríos de La Niña traen como efecto incrementos en la precipitación, mientras que, durante el fenómeno cálido del Niño, por el contrario, se presenta una reducción. Logrando así evaluar los efectos del fenómeno ENSO por condición hidrológica. Los resultados se presentan en la siguiente figura para algunas estaciones de la cuenca ubicadas en diferentes rangos altitudinales.



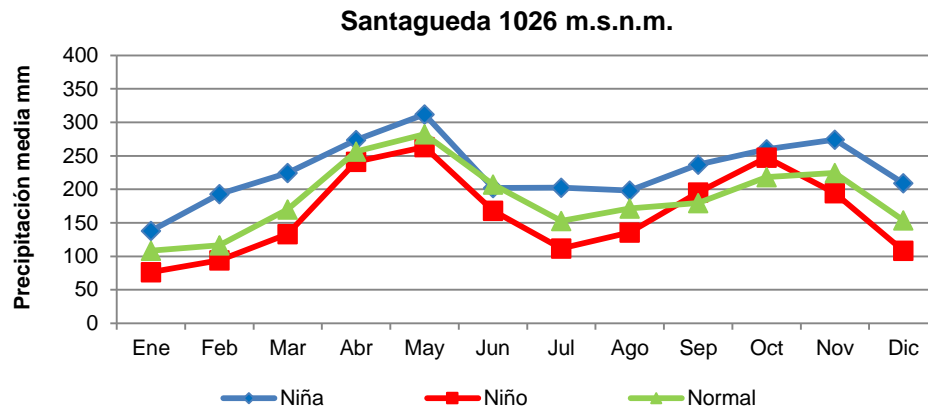


Figura 6-3 Variación en la estacionalidad de la precipitación anual provocada por la ocurrencia del fenómeno ENSO, en algunas estaciones de acuerdo al rango altitudinal de la cuenca Fuente: Propia

Para la estación más alta, Las Brisas, localizada a 4150 metros, el aumento en la precipitación para los eventos La Niña fue de 28%; mientras que la reducción por el Niño alcanzó en promedio un 12%.

Para una estación intermedia, Aeropuerto La Nubia, por ejemplo, la precipitación se incrementa en un 30% en promedio en los episodios de La Niña y se reduce en un 20% durante el fenómeno del Niño, con relación a los períodos normales.

Por otra parte, en una de las estaciones más bajas ubicada a 1026 m.s.n.m., Santagueda, los eventos fríos elevan la precipitación en un 25%; durante los cálidos se reduce en un 14%, con respecto a los períodos normales.

En la siguiente figura se presenta de acuerdo a la localización altitudinal de las diferentes estaciones, una síntesis de las anomalías promedio en la precipitación.

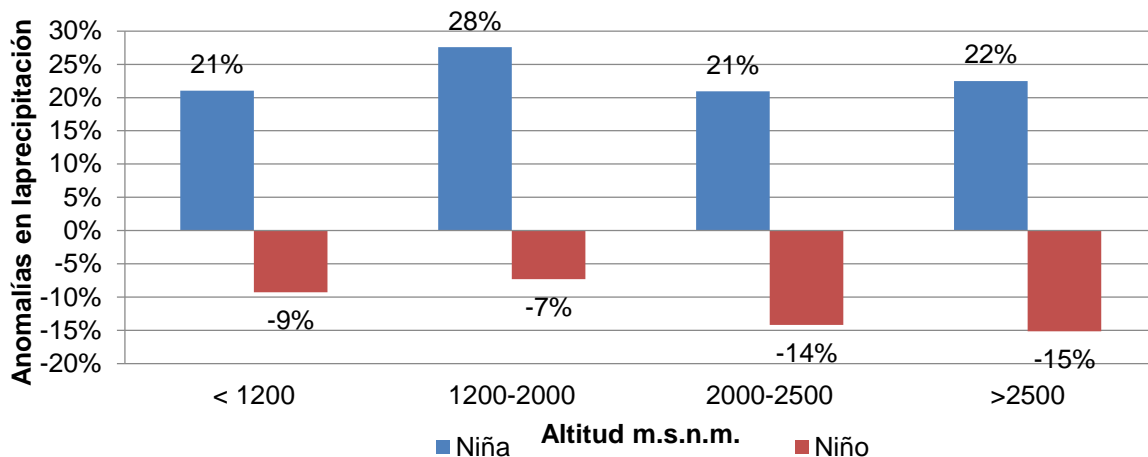


Figura 6-4 Efectos del ENSO en la precipitación media en las estaciones de la cuenca según su localización por altitud Fuente: Propia

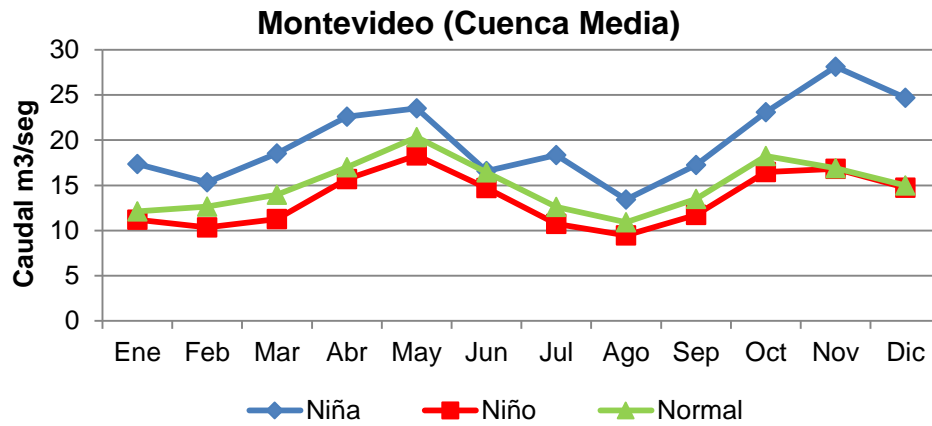
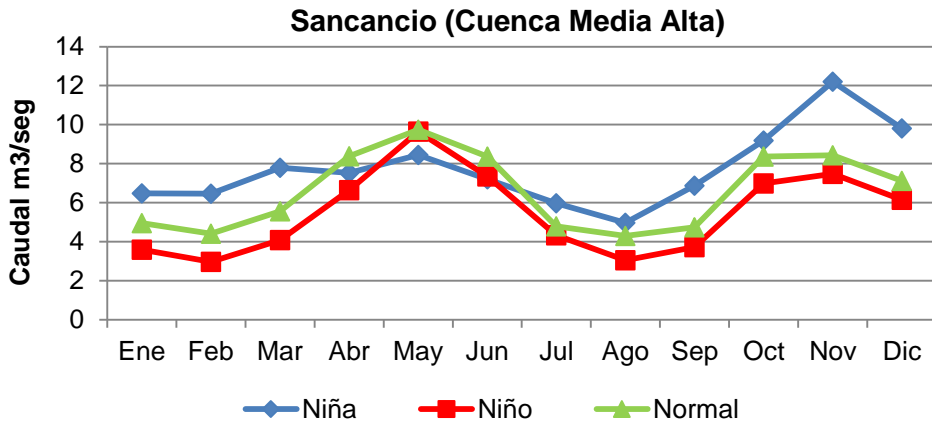
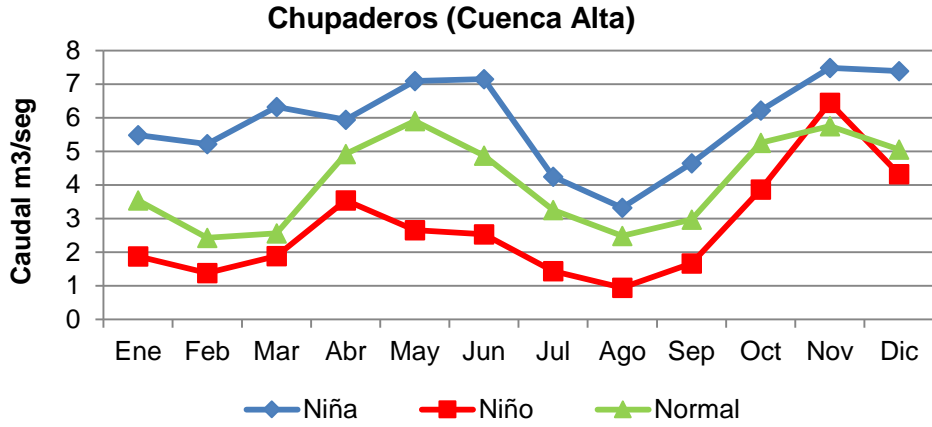
En promedio la Niña incrementa la precipitación con relación a los períodos normales en un 24%, con un coeficiente de variación del 30%; sus efectos son más marcados entre 1200 a 2000 m.s.n.m.; mientras que la mayor variabilidad por este fenómeno se presenta en las estaciones localizadas por debajo de 1200 m.s.n.m.

Con relación al Niño, la reducción en la precipitación es en promedio del 11% con un coeficiente de variación relativamente alto del 71%. Sus impactos son mayores en las estaciones por encima de 2000 m.s.n.m.; se evidencia alta variabilidad en las estaciones entre 1200 a 2000 m.s.n.m.

### 6.1.2 Efectos del fenómeno (ENSO) en el caudal de la cuenca

El régimen hidrológico presenta un comportamiento típico bimodal porque está influenciado por la dinámica de la ZCIT; en la siguiente figura se observa la variación estacional por condición hidrológica considerando los períodos húmedos de El Niño y Cálidos de La Niña para las diferentes estaciones de aforo de la cuenca.





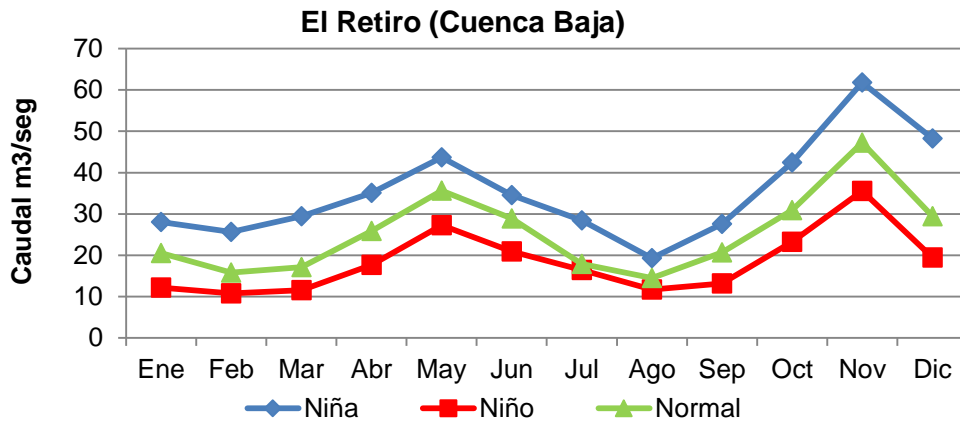


Figura 6-5 Variación en la estacionalidad del caudal anual provocada por la ocurrencia del fenómeno ENSO, en las estaciones de aforo de la cuenca Fuente: Propia

Al analizar las estaciones de caudal localizadas en la cuenca se encontró que, en promedio, durante la Niña se produce un incremento en los caudales del 34% con un coeficiente de variación del 35%; mientras que en El Niño la reducción es del 22% con un coeficiente de variación del 48%. La siguiente figura se muestra los efectos generados por los episodios cálidos y fríos, del El Niño y La Niña, para las diferentes estaciones de Caudal localizadas en la cuenca.

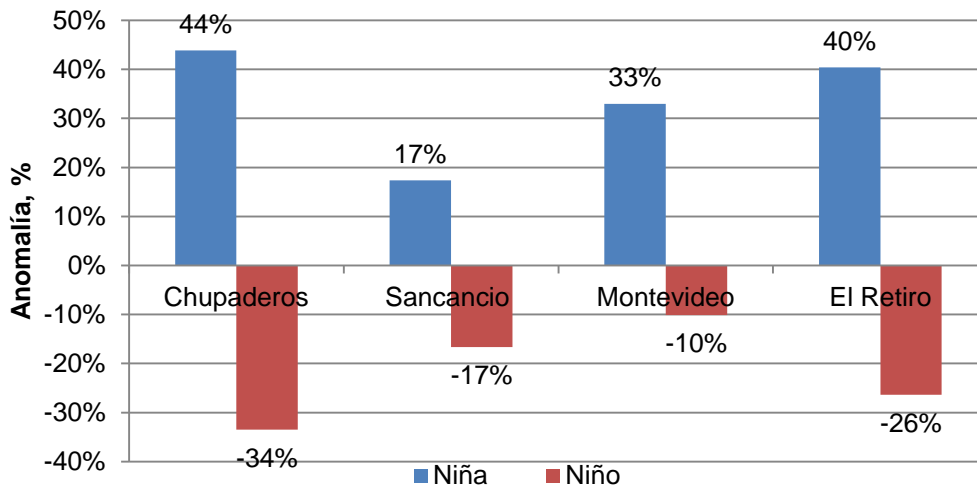


Figura 6-6 Efectos del ENSO en el caudal medio en estaciones de la cuenca Fuente: Propia

La estación El Retiro, permite considerar el caudal a la salida de la cuenca, por lo que se tiene que el ENSO afecta el régimen de caudales con una reducción del 26% con un

coeficiente de variación del 48% en El Niño y mientras que durante La Niña se genera un incremento del 40% con un coeficiente de variación del 35%.

## 6.2 Construcción de los Mapas de uso y cobertura de la cuenca

### 6.2.1 Selección del tipo de imagen

De acuerdo al nivel de detalle que demanda la construcción de un mapa piloto de uso y cobertura de suelo, las condiciones topográficas y ubicación geográfica de la zona de estudio, se concluye que para el departamento de Caldas el sensor adecuado es el sensor pasivo óptico-eléctrico de resolución media Landsat Thematic Mapper (TM) y Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) del U.S Geological Survey (USGS), con resolución espacial de 30 m, temporal de 16 días, radiométrica de 8 bandas, incluye 255 niveles digitales y posee una banda térmica que permite detectar condiciones de temperatura en la superficie (Chuvieco, 1995).

### 6.2.2 Filtrado espacial

Se aplicó el proceso de filtrado con el objetivo de mejorar la identificación de las coberturas vegetales presentes en la zona de interés, lo que acentuó las transiciones presentes entre coberturas, como por ejemplo el cambio entre nube, sombra de nube y cobertura vegetal. En la siguiente figura, se aprecian claramente las transiciones entre dichas coberturas.

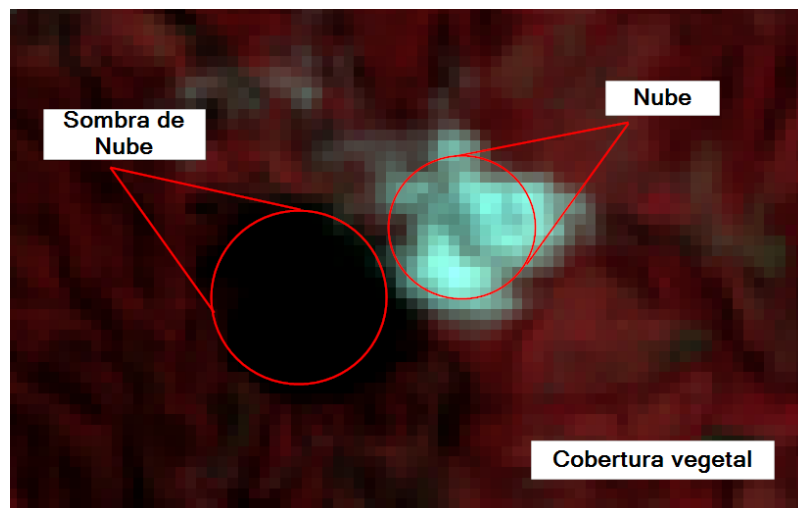


Figura 6-7 Transiciones entre nube, sombra de nube y cobertura vegetal Fuente: Propia

### 6.2.3 Calibraciones

Para la construcción de los mapas de uso y cobertura, se aplicó específicamente la calibración geométrica a partir de un modelo de elevación digital (MED) de resolución 30m X 30m con el objetivo de corregir distorsiones provocadas por las condiciones topográficas accidentadas de la cuenca del río Chinchiná. Como se aprecia en la siguiente figura, la imagen de la izquierda corresponde a una primera aproximación en la identificación de coberturas, en ella se señalan suelos que espectralmente son diferentes, pero que en la imagen de la derecha corresponden al mismo.

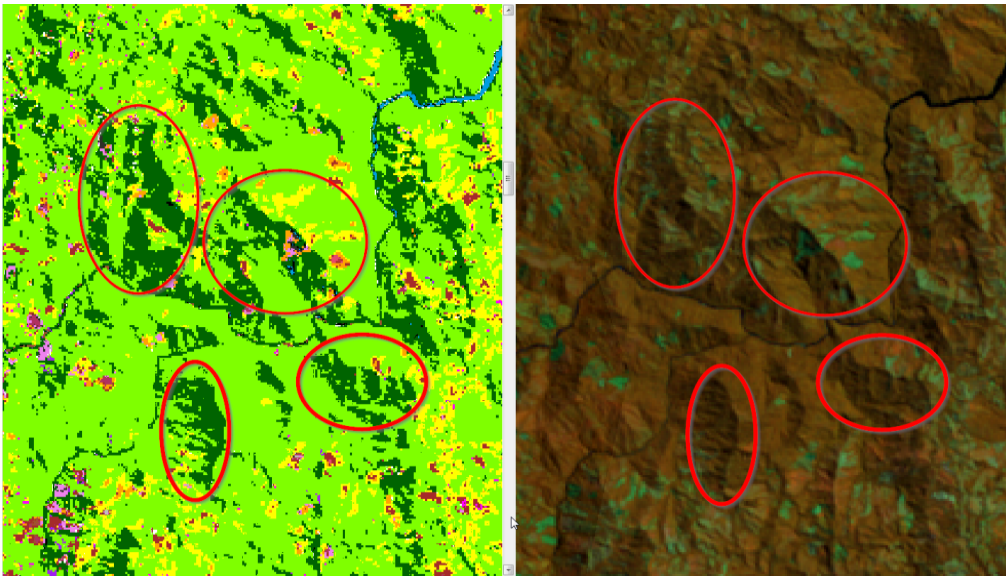


Figura 6-8 Influencia de las sombras en el comportamiento espectral de la imagen Fuente: Propia

### 6.2.4 Análisis espectral

A partir del comportamiento espectral, se identificaron diferencias entre coberturas que visualmente tienen un comportamiento similar, como lo es el caso de nube y hielo. Como se observa en la siguiente figura dichas coberturas tienen un comportamiento espectral diferente a partir de la banda número 4 lo que implica diferencias significativas que favorecen su identificación.

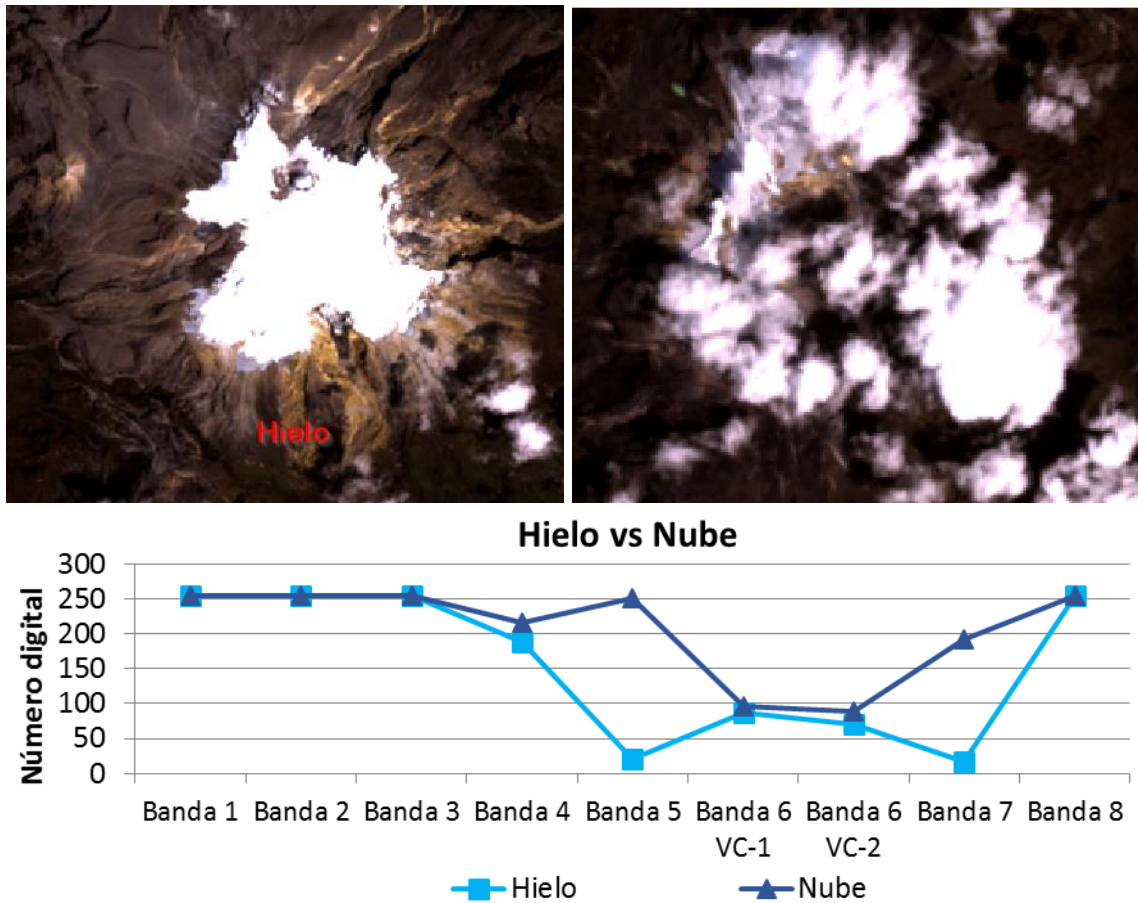


Figura 6-9 Análisis espectral de la cobertura de Hielo y Nube Fuente: Propia

### 6.2.5 Clasificación supervisada

Para la clasificación supervisada del mapa se identificaron un total de 480 polígonos correspondientes a 7 diferentes tipos de coberturas. En la siguiente figura se observa el mapa resultante de la primera aproximación de la clasificación supervisada, el método ofrece una aproximación más ajustada en cuanto a la definición de coberturas obtenida por medio de la clasificación no-supervisada.

### 6.2.6 Neighborhood (Efecto sal y pimienta)

El mapa recodificado arrojó una alta dispersión en la definición de los contornos de las coberturas, para ello se aplicó un filtro Neighborhood con la función Majority, la cual arroja el valor de número digital de las clases que representan mayoría en la ventana de exploración. Se usó para eliminar el efecto de sal y pimienta con una ventana de

exploración de 7X7. En la siguiente figura se observa la imagen recodificada (izquierda) y la imagen corregida con la función Majority (derecha), donde se aprecia el efecto de la interpolación, traducido en formas más definidas, lo que facilita el proceso de construcción de los polígonos en formato shape.

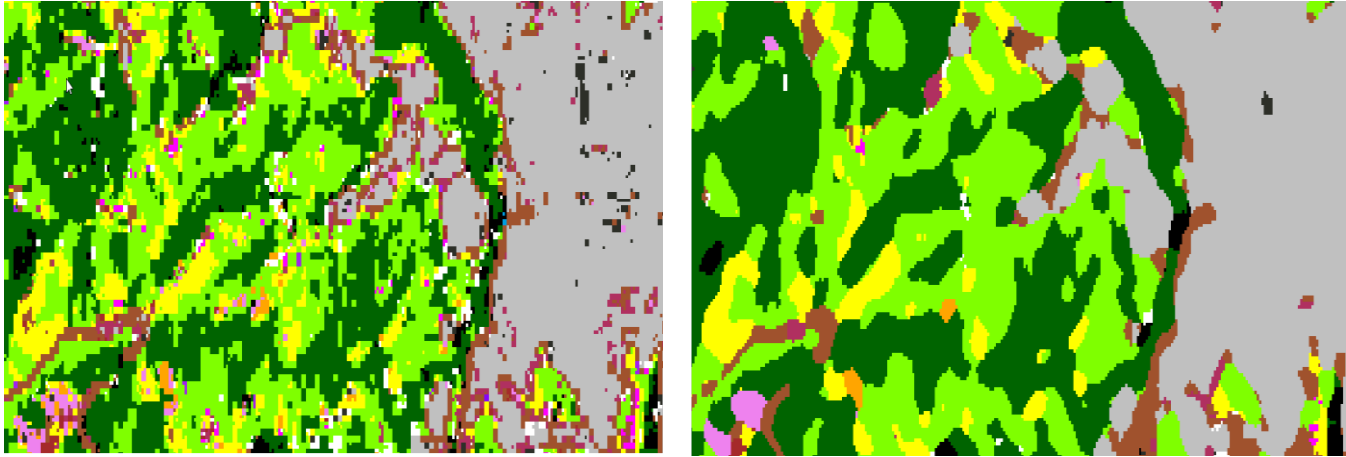


Figura 6-10 Imagen codificada (Izquierda), Imagen procesada (Derecha) Fuente: Propia

### 6.2.7 Ajuste de la Leyenda de acuerdo a la Leyenda Nacional

Después del reconocimiento de los diferentes tipos de coberturas, las coberturas que obedecen al mismo color son agrupadas para generar unidades. Para el caso de los mapas de uso y cobertura de la cuenca, se adopta la Leyenda Nacional CORINE Land Cover estandarizada desde el año 2004 como la metodología y la leyenda nacional de coberturas para Colombia, su objetivo es el de unificar las diferentes leyendas y metodologías, para lograr un sistema de monitoreo con información actualizada y confiable, ofrece la posibilidad de caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra de forma eficiente.

### 6.2.8 Mapas de uso y cobertura para los años 1987, 1999 y 2014

Se procedió a realizar la selección de las imágenes que mejor describieran el comportamiento natural de la cuenca desde el punto de vista hidrológico y de dinámicas espacio temporales de las coberturas de la tierra, de acuerdo a esto se incluyó la ocurrencia del fenómeno ENSO como criterio de selección; los años seleccionados fueron 1987, 1999 y 2014, dado que en el año 1987 se presentó un evento fuerte de fase fría del ENSO, en el año 1999 fue fase cálida y el año 2014 fue sin evento (NOAA, 2018).

De acuerdo a los resultados expuestos se obtuvieron los mapas de uso y cobertura, en los cuales se permitió identificar un total de 4 Clases, 8 Subclases y 8 Coberturas. Pertenecientes a la leyenda nacional CORINE Land Cover (Ver siguiente Figura).

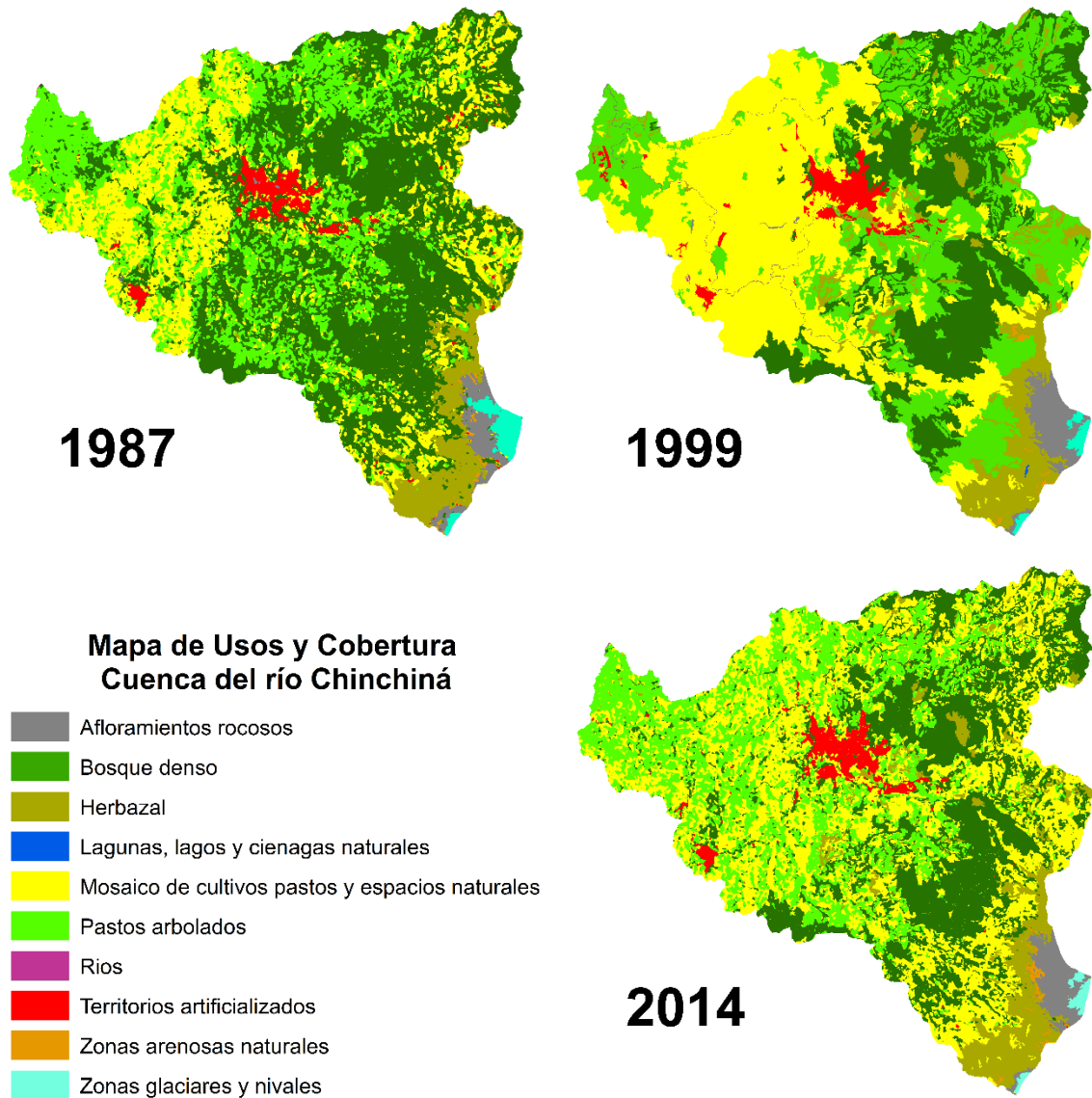


Figura 6-11 Mapa de uso y cobertura de la cuenca del río Chinchiná para los años 1987, 1999 y 2014 Fuente: Propia



### 6.2.9 Cambios de uso y cobertura en la cuenca

Conocer la disposición de las coberturas a lo largo de la zona de estudio, es un parámetro fundamental para estimar el comportamiento de los usos de las tierras, para ello se realiza el cálculo de los porcentajes de áreas que ocupan las principales coberturas en la cuenca del río Chinchiná.

Como se observa en la siguiente figura, en el año 1987 la cobertura predominante en la cuenca es el Bosque denso con 44 %, y en los años 1999 y 2014 es Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 36% y 35% respectivamente y la cobertura con menor influencia en la zona es Afloramientos rocosos con 2% para los tres años.

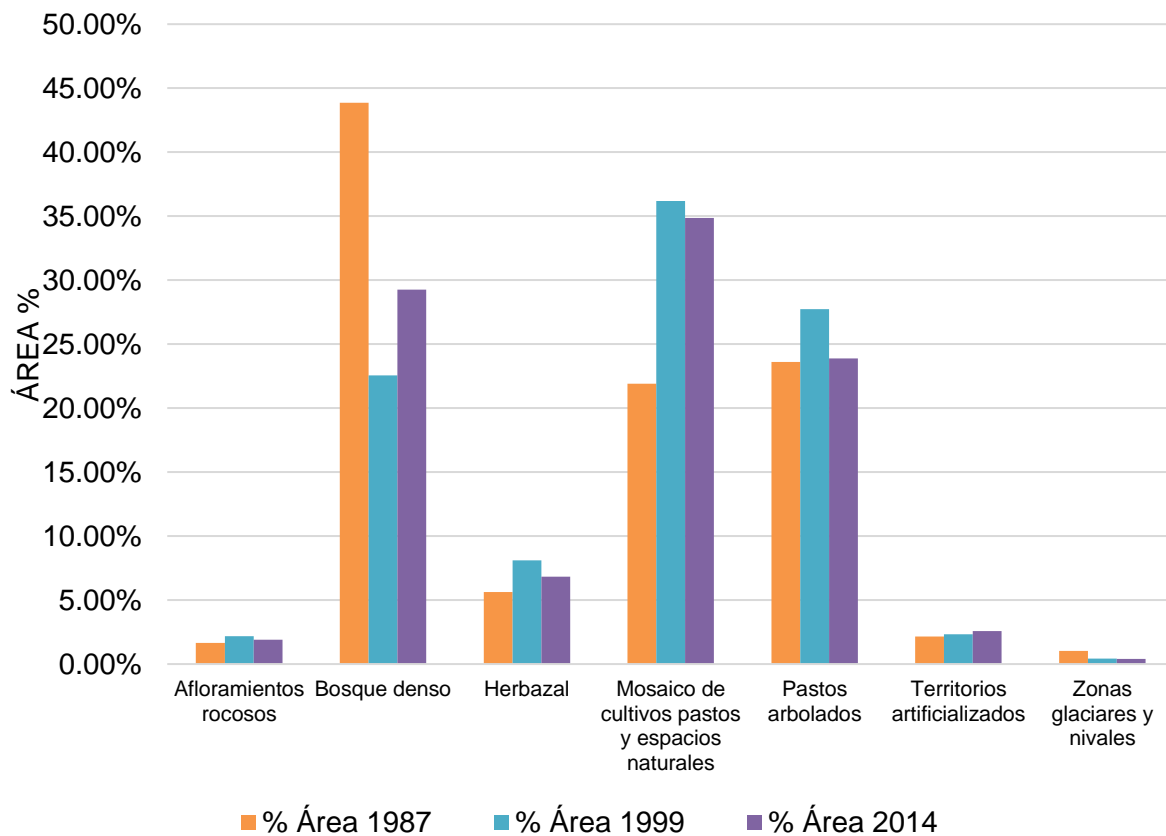


Figura 6-12 Área en porcentaje de los usos y cobertura de la tierra en la cuenca del río Chinchiná para los años 1987,1999 y 2014 Fuente: Propia

Para el caso de las Zonas glaciares y nivales se observa una disminución de 0,5% en los tres años, en este caso en particular, la ocurrencia del Fenómeno de oscilación del sur el Niño, no afectó la extensión de la capa glaciaria a nivel de la cuenca, dado que para el año



1987 según el Índice oceánico reportado por la NOAA se registró un periodo de Niño fuerte, y caso contrario el año 1999 se registró un año Niña.

### **6.3 Influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca**

La influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen de caudal de la cuenca, se determinaron por medio de la comparación entre los resultados producto de la aplicación del modelo hidrológico de tanques para el periodo 1981 – 2014 (Línea base o periodo de referencia), y los obtenidos en los balances realizados para los años 1987 (fase cálida del ENSO La Niño), 1999 (fase fría del ENSO La Niña) y 2014 (sin evento).

#### **6.3.1 Línea base o periodo de referencia (1981-2014)**

La línea base o periodo de referencia está compuesta por los resultados obtenidos en la modelación hidrológica de tanques realizada para el periodo 1981-2014; el proceso de modelación se realizó para la estación El Retiro, ubicada a la salida de la cuenca.

La Calibración se realizó teniendo en cuenta los rangos establecidos para cada parámetro, de acuerdo a su sentido físico y a la salida cada tanque, de esta forma se representa la respuesta el posible de la cuenca, y como varía el almacenamiento de cada uno de los tanques, en la siguiente tabla se aprecian los parámetros de calibración obtenidos para la línea base.

Tabla 6-1 Parámetros de calibración modelo hidrológico de tanques estación El Retiro (1981-2014)

<b>Parámetros Línea base</b>	
<b>Almacenamiento Máximo Capilar</b>	350.16
<b>Conductividad Capa Sup (mm/día)</b>	5.30
<b>Conductividad Capa Inf (mm/día)</b>	0.82
<b>Perdidas Subterráneas (mm)</b>	0.00
<b>Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)</b>	3.79
<b>Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)</b>	8.28
<b>Tiempo de Residencia Flujo Base (días)</b>	192.58

En la siguiente figura se observa el hidrograma de calibración para el periodo 1981-2014, en esta se aprecia el ajuste del caudal simulado con respecto al observado, lo que representa que el proceso de calibración fue satisfactorio.

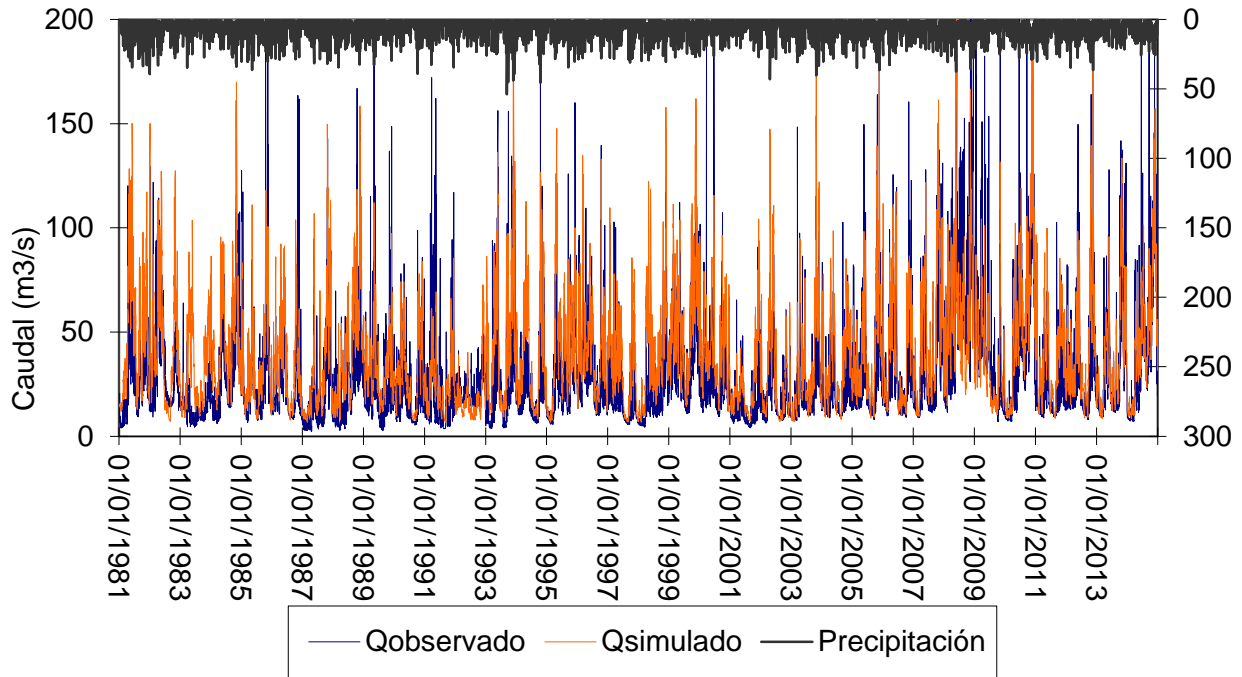


Figura 6-13 Hidrograma de calibración modelo hidrológico de tanques, estación El Retiro (1981-2014)

### 6.3.2 Almacenamiento estático (Hu)

Los valores de almacenamiento estático (Hu) de la cuenca para los años de interés, se calcularon a partir del promedio ponderado entre los coeficientes propuestos por (Burman & Pochop, 1994) para cada cobertura y su respectiva área, la cual fue obtenida de los mapas de uso y cobertura construidos previamente, en la siguiente tabla se observan los valores de Hu para los años 1987, 1999 y 2014.

Tabla 6-2 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 1987

Usos y coberturas 1987	ETP (mm/año) 1987	994.9	
	(1987) Área Km2	Coficiente Cobertura (Adim)	Alm Est Hu (mm)
Afloramientos rocosos	17.46	0.05	49.75
Bosque denso	461.72	0.80	795.92

<b>Herbazal</b>	59.25	0.30	298.47
<b>Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales</b>	230.46	0.60	596.94
<b>Pastos arbolados</b>	248.57	0.70	696.43
<b>Territorios artificializados</b>	22.56	0.05	49.75
<b>Zonas glaciares y nivales</b>	10.78	0.10	99.49
<b>Área total cuenca</b>	1052.26	<b>Hu (mm) cuenca 1987</b>	<b>664.00</b>

Tabla 6-3 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 1999

<b>Usos y coberturas 1999</b>	<b>ETP (mm/año) 1999</b>	893	
	<b>(1999) Área Km2</b>	<b>Coefficiente Cobertura (Adim)</b>	<b>Alm Est Hu (mm)</b>
<b>Afloramientos rocosos</b>	23.04	0.05	44.65
<b>Bosque denso</b>	237.45	0.80	714.40
<b>Herbazal</b>	85.14	0.30	267.90
<b>Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales</b>	380.60	0.60	535.80
<b>Pastos arbolados</b>	291.71	0.70	625.10
<b>Territorios artificializados</b>	24.55	0.05	44.65
<b>Zonas glaciares y nivales</b>	4.53	0.10	89.30
<b>Área total cuenca</b>	1052.26	<b>Hu (mm) cuenca 1999</b>	<b>552.00</b>

Tabla 6-4 Cálculo del Almacenamiento estático Hu (mm) para el año 2014

<b>Usos y coberturas 2014</b>	<b>ETP (mm/año) 2014</b>	932	
	<b>(2014) Área Km2</b>	<b>Coefficiente Cobertura (Adim)</b>	<b>Alm Est Hu (mm)</b>
<b>Afloramientos rocosos</b>	20.05	0.05	46.60
<b>Bosque denso</b>	307.84	0.80	745.60
<b>Herbazal</b>	71.78	0.30	279.60
<b>Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales</b>	366.86	0.60	559.20
<b>Pastos arbolados</b>	251.32	0.70	652.40
<b>Territorios artificializados</b>	27.19	0.05	46.60
<b>Zonas glaciares y nivales</b>	4.28	0.10	93.20
<b>Área total cuenca</b>	1052.26	<b>Hu (mm) cuenca 2014</b>	<b>590.00</b>

### 6.3.3 Conductividad hidráulica saturada (Ks)

El parámetro correspondiente a la Conductividad hidráulica saturada (Ks), se calculó para cada año de análisis (1987, 1999 y 2014) a partir del promedio ponderado entre los valores de Ks reportados en el informe del proyecto Aplicación de la modelación hidrológica distribuida del tipo conceptual en el departamento de Caldas (Corpocaldas & UNAL, 2012) y su respectiva área, la cual fue obtenida de los mapas de uso y cobertura construidos previamente (Ver siguiente Tabla).

Tabla 6-5 Cálculo de la Conductividad hidráulica Ks (mm/día) para los años 1987, 1999 y 2014

Usos y coberturas	(1987) Área Km <sup>2</sup>	Ks (mm/día)	(1999) Área Km <sup>2</sup>	Ks (mm/día)	(2014) Área Km <sup>2</sup>	Ks (mm/día)
<b>Afloramientos rocosos</b>	17.46	6.50	23.037	6.50	20.05	6.50
<b>Bosque denso</b>	461.72	3.00	237.44	3.00	307.84	3.00
<b>Herbazal</b>	59.25	6.00	85.14	6.00	71.78	6.00
<b>Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales</b>	230.46	3.00	380.60	3.00	366.86	3.00
<b>Pastos arbolados</b>	248.56	5.00	291.71	5.00	251.32	5.00
<b>Territorios artificializados</b>	22.56	4.00	24.55	4.00	27.19	4.00
<b>Zonas glaciares y nivales</b>	10.78	4.50	4.53	4.50	4.27	4.50
<b>Área total cuenca (Km<sup>2</sup>)</b>	1052.26		1052.26		1052.26	
<b>Ks (mm/día) cuenca</b>	4.10		5.00		4.00	

### 6.3.4 Modelación hidrológica de los años 1987, 1999 y 2014

La modelación hidrológica de los años 1987, 1999 y 2014 se realizó con base a los parámetros de Almacenamiento estático (Hu) y Conductividad hidráulica (Ks) obtenidos previamente; de igual forma el proceso de calibración para los tres periodos se realizó para la estación El Retiro, ubicada a la salida de la cuenca.

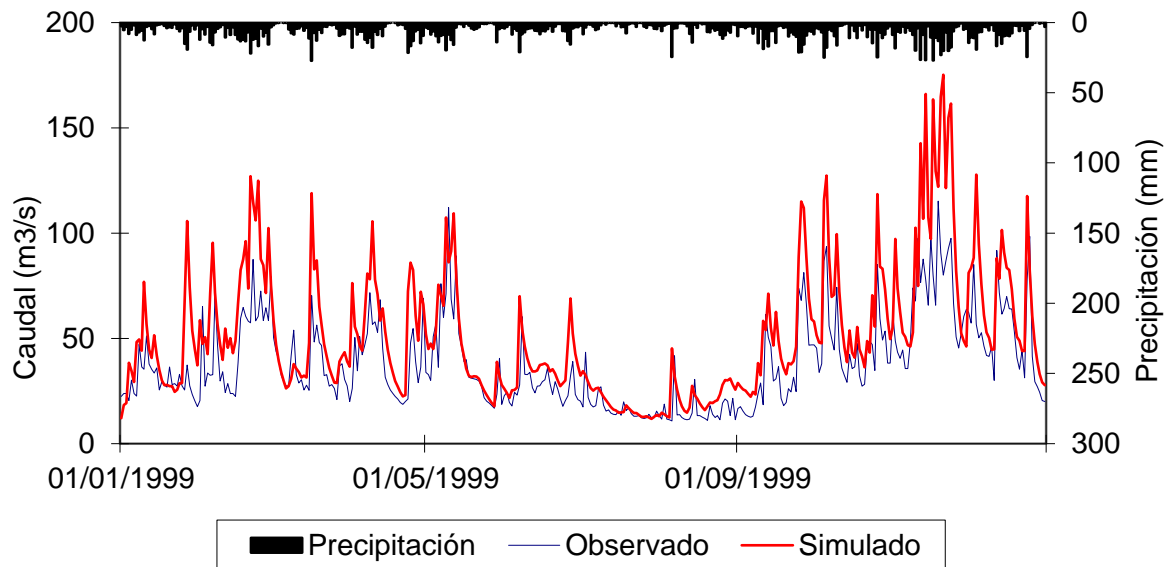
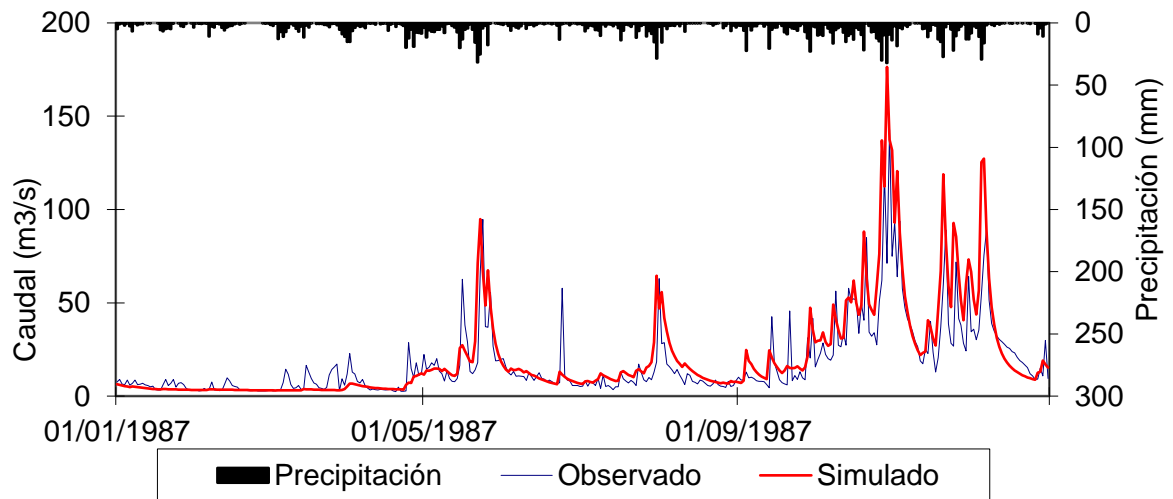
En la siguiente tabla se pueden apreciar los diferentes conjuntos de parámetros usados para realizar los balances hidrológicos puntuales de los años 1987, 1999 y 2014.

Tabla 6-6 Conjunto de parámetros obtenidos por el modelo de balance de agua

Parámetro	1987	1999	2014
Almacenamiento Máximo Capilar (Hu)	664	552	590
Conductividad Hidráulica Sup (Ks) (mm/día)	4.1	5	4

Conductividad Capa Inf (mm/día)	0.82	0.82	0.82
Perdidas Subterráneas (mm)	0	0	0
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	2.5	2.5	2.5
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	8.28	8.28	8.28
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	192.58	192.58	192.58

En la siguiente figura se presentan los hidrogramas de calibración para los tres periodos, en esta observa el ajuste realizado del caudal observado con respecto al caudal simulado, se puede apreciar que los parámetros obtenidos a partir de los mapas de uso y cobertura son adecuados, puesto que se representa el comportamiento de la cuenca de forma satisfactoria para cada año.



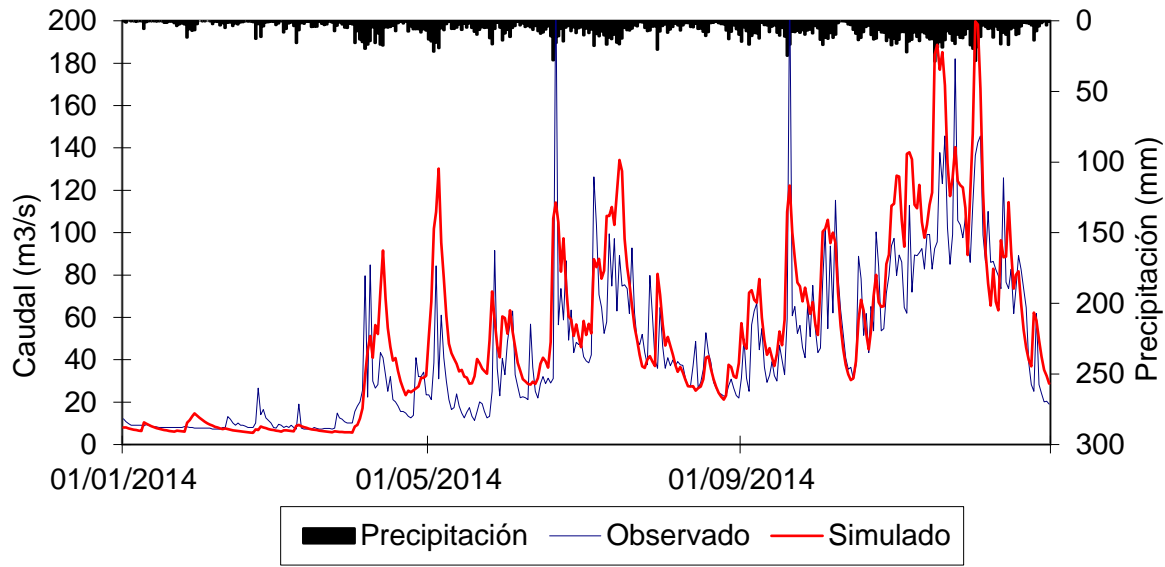


Figura 6-14 Hidrogramas de calibración de los modelos de los años 1987, 1999 y 2014

El nivel de ajuste del hidrograma del caudal observado con respecto al caudal simulado de los años 1987, 1999 y 2014, está representado por valores de índice de Nash de 0.47, 0.39 y 0.58 respectivamente, lo que indica un ajuste satisfactorio para los tres periodos de interés.

### 6.3.5 Efectos del ENSO en el balance hidrológico de la cuenca de los años 1987, 1999 y 2014

En la siguiente figura se puede apreciar el efecto causado por la presencia del fenómeno ENSO, en el año 1987 se registró una reducción de 24.2% del flujo promedio en la cuenca, con respecto al valor obtenido para el período de línea base (1981-2014), esto se debe a la ocurrencia de un periodo seco impulsado por la fase cálida El Niño. En 1999 y 2014 se presentaron incrementos de 34.6% y 32.6% respectivamente, en comparación con los valores medios del periodo de línea base, en estos casos se debió a la ocurrencia de la fase fría La Niña (1999) y un periodo normal (2014).

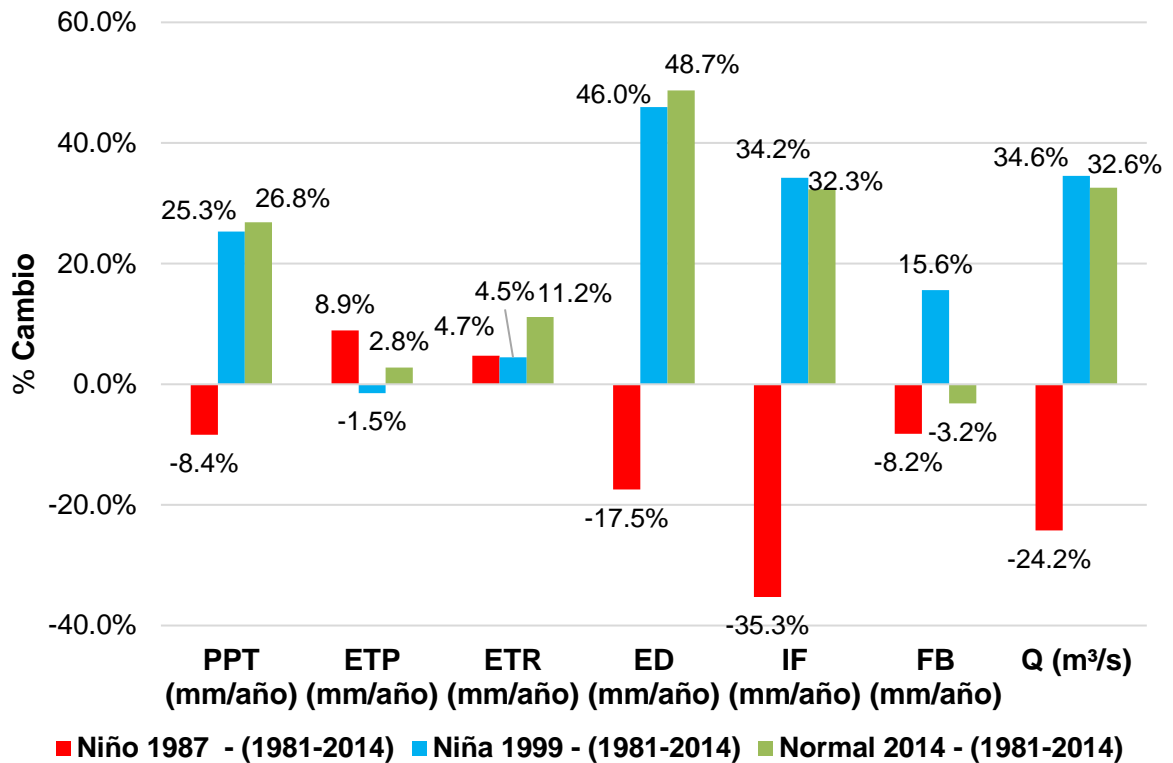


Figura 6-15 Influencia de la ocurrencia del fenómeno ENSO en el balance hidrológico de la cuenca del río Chinchiná Fuente: propia

En la figura anterior se puede apreciar que unos de los procesos del ciclo hidrológico que más se ve afectado por la ocurrencia del ENSO es la Escorrentía directa, la fase cálida (El Niño) disminuyó un 17% el flujo superficial; la fase fría y la normal registran un comportamiento similar de un incremento de 46% y 49%, con respecto al periodo de referencia 1981-2014.

### 6.3.6 Efectos de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca

Como se describió previamente, el modelo hídrico de referencia fue el balance obtenido por el esquema conceptual de tanques para el periodo 1981-2014, en la siguiente tabla se puede apreciar la comparación realizada entre los resultados del periodo de línea base y los obtenidos en los correspondientes balances de los años 1987, 1999 y 2014.

Tabla 6-7 Comparación de los resultados obtenidos por el modelo conceptual de tanques para la línea base (1981-2014) y los obtenidos para los diferentes conjuntos de parámetros de los años 1987, 1999 y 2014

PERIODO	CONJUNTO DE PARÁMETROS	PPT (mm/año)	ETP (mm/año)	ETR (mm/año)	ED (mm/año)	IF (mm/año)	FB (mm/año)	Q (m³/s)	%BIAS
LB: 1981-2014	1981-2014	1818	906	753	253	587	224.0	35.5	39.1
1987	1981-2014	1677.2	994.9	790.5	215.4	434	207.0	28.6	64.1
1999	1981-2014	2435.1	893	788.1	468.3	892.4	265.4	54.3	38.3
2014	1981-2014	2485.1	932	847.5	493.4	867.4	217.1	52.6	51.9
<b>Niño 1987 - (1981-2014)</b>		-8.4%	8.9%	4.7%	-17.5%	-35.3%	-8.2%	-24.2%	
<b>Niña 1999 - (1981-2014)</b>		25.3%	-1.5%	4.5%	46.0%	34.2%	15.6%	34.6%	
<b>Normal 2014 - (1981-2014)</b>		26.8%	2.8%	11.2%	48.7%	32.3%	-3.2%	32.6%	
1987	1987	1677.2	994.9	936.1	217.5	277.5	135.8	21.0	49.2
1999	1999	2435.1	893.1	873.9	495.4	844.5	203.4	51.5	34.5
2014	2014	2485	932	903.7	669.3	680.7	201.1	51.8	49.9
<b>% Cambio 1987 LB - (1987)</b>		0.0	0.0	15.6%	1.0%	-56.4%	-52.4%	-35.8%	-30.3
<b>% Cambio 1999 LB - (1999)</b>		0.0	0.0	9.5%	5.5%	-5.7%	-30.5%	-5.4%	-11.0
<b>% Cambio 2014 LB - (2014)</b>		0.0	0.0	12.5%	26.3%	-27.4%	-8.0%	-1.7%	-4.0

(PPT: Precipitación; ETP: Evapotranspiración potencial; ETR: Evapotranspiración real; ED: Escorrentía directa; IF: Interflujo; FB: Flujo base; Q: Caudal)

Para evaluar la influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra en el régimen hidrológico de la cuenca, se procedió a modificar los conjuntos de parámetros para cada año de interés de acuerdo a los mapas construidos anteriormente, y se compararon con respecto al conjunto de parámetros del periodo línea base, en la siguiente Figura se observan los porcentajes de cambio obtenidos.

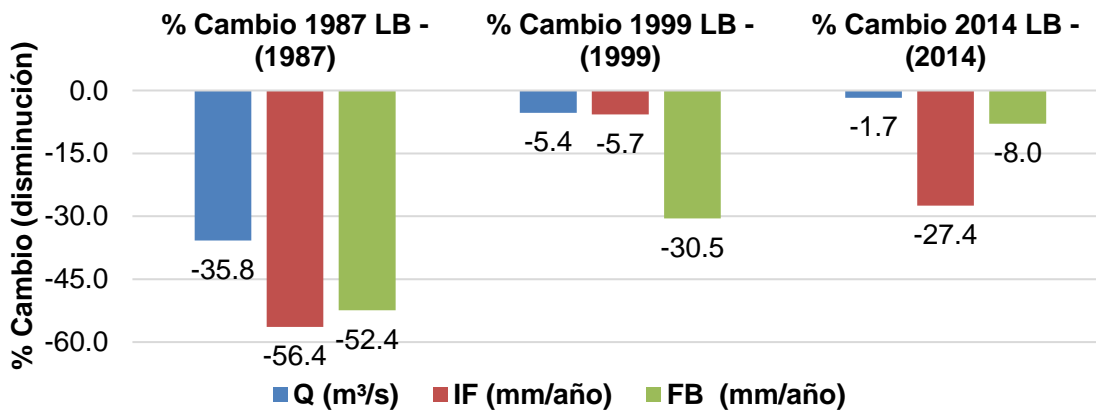


Figura 6-16 Porcentaje de cambio entre los resultados de Caudal (Q m3/s), Interflujo (IF mm/año) y Flujo base (FB mm/año) del periodo línea base (LB) y los obtenidos para los años de análisis con las condiciones de uso y cobertura de la tierra de los años 1987, 1999 y 2014 Fuente: Propia



En materia de producción hídrica, se obtiene una reducción en el caudal de salida con respecto al obtenido en el periodo línea base de 35.8%, 5.4% y 1.7% para los años 1987, 1999 y 2014 respectivamente (Ver Figura 6-16). El mayor impacto en la reducción de agua se presentó durante el periodo 1987 ( $Q_{1987\text{ LB}} = 28.8\text{m}^3/\text{s}$  --  $Q_{1987} = 21.1\text{m}^3/\text{s}$ ), esto se debe al efecto que produce la pérdida de la vegetación sobre la disminución de la evapotranspiración, interceptación, interflujo y flujo base, aunque este fenómeno se presenta en los tres años estudiados.

El proceso de evapotranspiración se encuentra relacionado con la cobertura vegetal, debido a la capacidad de la planta de absorber el agua presente en suelo durante el proceso de fotosíntesis, y de transformarla en vapor de agua devolviéndolo a la atmósfera, este fenómeno se ve representado en los resultados obtenidos por los balances realizados; en el caso del año 1987, se presentó el mayor porcentaje de cambio de evapotranspiración (+15.6% con respecto al valor de referencia), el cual está ligado a una cobertura boscosa de 44% con respecto al área total de la cuenca, para el 1999 se dio una reducción de 9.5% de la ETR que estuvo asociada a una pérdida de 23% en los bosques, por otro lado el 2014 registró un incremento de la ETR de 12.5% debido a la recuperación de la cobertura de bosques en 29%, esto es producto de las campañas de reforestación y generación de zona protegidas, que se han llevado a cabo los últimos años por parte de las entidades encargadas de la preservación y la planificación de los recursos naturales presentes en la cuenca. En la siguiente figura se presenta la relación entre la evapotranspiración y el área de cobertura boscosa para cada año de interés.

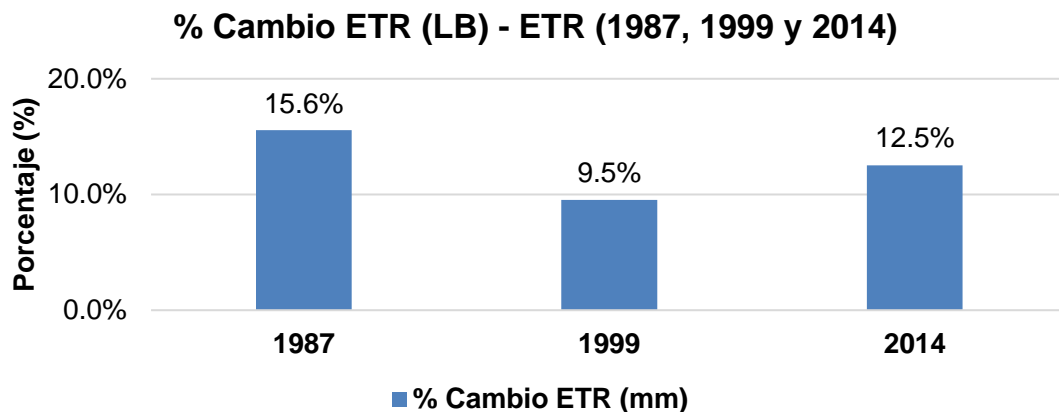


Figura 6-17 Porcentaje de cambio de evapotranspiración con respecto a la LB para los tres periodos de interés

La escorrentía directa fue otro proceso que evidenció un impacto producto de los cambios de uso y cobertura de suelo en el periodo de estudio, en la siguiente figura se aprecia un notable incremento en el porcentaje de escorrentía en los años de interés con respecto al valor del periodo línea base, con valores de 1.0%, 5.5% y 26.3% para los años 1987, 1999 y 2014 respectivamente (Ver Figura 6-18).

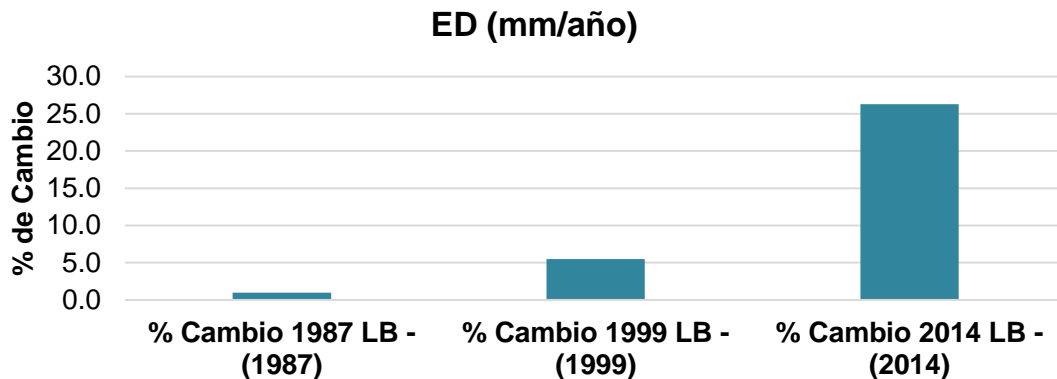


Figura 6-18 Porcentaje de cambio de Escorrentía directa (ED mm/año) de los años de análisis de acuerdo a las condiciones de uso y cobertura de la tierra en los años 1987, 1999 y 2014 con respecto a la línea base (LB)

El incremento en la Escorrentía Directa representa una disminución considerable en la capacidad de regulación hídrica de la cuenca, la cual está asociada al cambio de cobertura de Bosque denso a Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, dado que en 1987 representaban el 45% (Bosques) - 22% (Cultivos), y pasaron a ocupar en 2014 el 29% (Bosques) – 35% (Cultivos) de la superficie de la cuenca.

Los resultados obtenidos de los balances hidrológicos, representan que la influencia de los cambios de uso y cobertura de la tierra afectan el régimen, esto se traduce en las variaciones de las tasas de evaporación, modificaciones en la estructura de las raíces y aumento o disminución en el agua disponible para las plantas, lo que finalmente afecta la conductividad hidráulica saturada de la tierra y la escorrentía directa; dichos factores se pudieron percibir por medio de los mapas construidos para los años 1987, 1999 y 2014, lo que constituye a las herramientas de análisis basadas en sistemas de teledetección como coherentes en cuanto a la percepción de los resultados.

# 7. Conclusiones y recomendaciones

## 7.1 Conclusiones

El régimen hidrológico presenta un comportamiento típico bimodal influenciado por la dinámica de la Zona de confluencia intertropical (ZCI); la variación estacional por condición hidrológica se incrementa o disminuye en magnitud de acuerdo a la ocurrencia de los periodos húmedos del ENSO (La Niña) y Cálidos de (El Niño).

Los efectos del ENSO son notables en la cuenca del río Chinchiná; en promedio, la precipitación se incrementa en un 24% durante La Niña y se reduce en 11% en el Niño; con relación al caudal el aumento es del 34% en los episodios fríos y la disminución es del 22% en los cálidos. Sin embargo, se presentan variaciones con el gradiente altitudinal. Estos resultados permiten una mayor comprensión de la variabilidad climática y de la importancia de los factores locales que determinan el clima en la cuenca.

Se realizó la construcción de los mapas uso y cobertura de la tierra para la cuenca del río Chinchiná en los años 1987, 1999 y 2014, los cuales fueron validados con base al mapa oficial de usos y coberturas de Corpocaldas del año 2010, siguiendo la Leyenda adoptada por el Ministerio de Medio Ambiente y con visitas de campo realizadas en la parte alta y media de la cuenca.

Los mapas de uso y cobertura para los años 1987, 1999 y 2014, fueron construidos a partir de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 de resolución media (30 x 30 metros), las cuales no permitieron un nivel de detalle adecuado que permitiera identificar todos los niveles de clasificación que contiene la metodología Nacional CORINE Land Cover pudiendo identificar solo el primer nivel correspondiente a clase y algunas subclases del segundo nivel.

Para la identificación de las clases correspondientes al segundo nivel (subclase) y tercer nivel de clasificación (cobertura) fue necesario realizar visitas de campo en puntos variados de la cuenca, los cuales fueron apoyados mediante el uso de imágenes áreas y satelitales de mayor resolución.

Los mapas de uso y cobertura de la tierra, corresponden a un insumo fundamental para el cálculo de indicadores que permitan asociar directamente los cambios de uso y cobertura como un factor que afecta el régimen hidrológico de las cuencas. Para esto importante contar con insumos actualizados que permitan realizar la continua retroalimentación de la información de las coberturas de forma rápida y eficiente.

Las variaciones en las áreas de uso y cobertura de la tierra, son evidencia de un aumento en las presiones ejercidas sobre el recurso hídrico. Por ejemplo, la disminución de la cobertura boscosa, relacionada con el aumento de los pastos y las áreas agrícolas, modifica la superficie y disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, lo que incrementa los volúmenes de escorrentía.

Se realizó el análisis multitemporal realizado en 1987, 1998 y 2014 sobre los cambios en el uso de la tierra y los mapas de cobertura en la cuenca del río Chinchiná, y su impacto en la producción de agua. Todos los períodos de tiempo mostraron una disminución en la producción de agua, la cual se detectó a través de la disminución del interflujo y el flujo base, donde la escorrentía directa aumenta, como se esperaba, los cambios de uso y cobertura que más se destacan durante el periodo de análisis fueron: reducción de bosques y aumento del territorio agrícola.

Durante el análisis realizado para los tres periodos, se evidenció una relación entre la cobertura vegetal boscosa y la Evapotranspiración (ETR), ya que el proceso está definido por el transporte de agua a la atmósfera a través de la planta, de lo cual se determinó que el porcentaje de área de bosque es proporcional al porcentaje de Evapotranspiración.

De los resultados obtenidos se encontró que el efecto de la deforestación no se puede revertir fácilmente, si bien en el año 2014 se presentó una recuperación de la cobertura tipo bosque con respecto al área del año 1999 (sin alcanzar los valores del año 1987), no evitó que la ED aumentara durante el periodo de estudio, lo que quiere decir que las

actividades de reforestación adelantadas por las diferentes entidades no han sido suficientes o deben darse en diferentes sitios de la cuenca.

Durante el periodo 1987-2014 la producción hídrica de la cuenca se vio afectada, los caudales de los años 1987, 1999 y 2014 presentaron una disminución con respecto al obtenido en el periodo línea base de 35.8%, 5.4% y 1.7% respectivamente. Los mayores impactos se ven reflejados en el periodo 1987 – 1999 ( $Q = 21.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), esto se debe al efecto que produce la pérdida de la vegetación sobre la disminución de la evapotranspiración, interceptación, interflujo y flujo base; adicionalmente se presentó la ocurrencia de un evento fuerte de la fase cálida del Niño.

En la cuenca en las últimas tres décadas se han modificado los hábitos de la población, y en consecuencia la cobertura y el uso que se le ha dado a la tierra, siendo el cambio más marcado el aumento de las de las actividades agrícolas que ha generado un aumento en la escorrentía superficial por la disminución de la capacidad de infiltración de los suelos, acentuado por el efecto que produce la pérdida de la vegetación boscosa sobre la evaporación, interceptación y redistribución de la precipitación.

Las alteraciones espacio temporales de las coberturas vegetales (Bosque denso y Pastos arbolados) afectan directamente el comportamiento del balance hidrológico, la estimación de dicha afectación juega un papel importante en la planificación y manejo de las cuencas, ya que permiten administrar de forma eficiente la disponibilidad de agua superficial

Este análisis sirve como una herramienta para los responsables de la toma de decisiones en la planificación de los recursos hídricos y la gestión de la tierra en sus aspectos edáficos y sociales, basándose en la información del sensor remoto de libre acceso.

## 7.2 Recomendaciones

Es importante que las firmas espectrales usadas para la identificación de las diferentes coberturas sean estandarizadas y de dominio público, esto para facilitar y agilizar el proceso de construcción de posteriores mapas de uso y cobertura. Se debe continuar con la definición de las firmas espectrales para los diferentes tipos de coberturas hasta llegar al nivel de detalle más alto de la leyenda CORINE Land Cover.

Actualmente, el país atraviesa por procesos de cambios, como el de restitución de tierras, que pueden afectar considerablemente los usos y coberturas, y por tal razón es muy importante para las instituciones de control contar con mapas confiables y actualizados. Para conseguir esto es fundamental aplicar una metodología que permita definir el mapa de Uso y Cobertura más frecuentemente pero reduciendo costos.

## 7.3 Trabajos futuros

La variabilidad climática presente en las cuencas Andinas particularmente la del río Chinchiná, ofrece una variedad de factores adicionales a tener en cuenta en la línea de investigación que enmarca el presente trabajo de grado, por ende se considera que los resultados obtenidos constituyen como un insumo para determinar en qué magnitud se afecta el régimen hidrológico, por los cambios de uso y cobertura de la tierra, y por la ocurrencia del fenómeno del Niño ENSO.

## **8. Anexos**

### **A. Anexo: Evaluación de la influencia de los cambios de uso y cobertura del suelo en la degradación utilizando imágenes satelitales**

XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica

26 al 30 de septiembre de 2016. Lima, Perú





## Evaluación de la influencia de los cambios de uso y cobertura del suelo en la degradación utilizando imágenes satelitales

Diego A. Patiño<sup>1</sup>, Diana M. Rey<sup>1</sup>, Jeannette Zambrano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Instituto de Estudios Ambientales IDEA

dapatinor@unal.edu.co; dimreyva@unal.edu.co; jjzambanona@unal.edu.co





### Resumen

El análisis del suelo en Caldas, ha demostrado que el comportamiento espacio temporal de los cambios de uso y cobertura son de gran importancia para determinar los impactos en su degradación. La metodología FPEIR describe dichas condiciones mediante la relación entre las fuerzas, las presiones, los impactos y las respuestas. Los indicadores de presión son los más relevantes, dado que determinan la pérdida de capacidad productiva del suelo. La telerdetección espacial es una técnica para el seguimiento de los problemas causados por los cambios del suelo, ya que permiten determinar el estado actual y cómo varía en el tiempo.

### Introducción

Los cambios de uso y cobertura están relacionados con el nivel de degradación del suelo; a nivel mundial la degradación es un tema de importancia para cuantificar la calidad del recurso (Kairis et al., 2013). En Colombia, el Ministerio de medio Ambiente, Desarrollo y Territorio, establece que los indicadores se construirán de acuerdo a la metodología de Fuerzas Motrices-Presiones-Estado-Impacto-Respuesta (FPEIR) (FAO, 2014); dicha Metodología evalúa: las fuerzas motrices (indirectas socioeconómicas), las presiones (fuerzas que ponen en riesgo el recurso suelo), el estado (condición actual), los impactos (efectos de la degradación) y las respuestas (acciones que toma la sociedad). Por ello los mapas de uso y cobertura de suelo, son la principal herramienta para determinar las presiones que pueden ocasionar la degradación.



Figura 1.- Mapa de localización Departamento de Caldas.

### Caso de Estudio

El departamento de Caldas se localiza en el occidente de la región andina, entre los 05°46'51" y los 04°48'20" de latitud norte, y los 74°38'01" y 75°55'45" de longitud oeste (Figura 1). Su superficie consta de 7.436 km<sup>2</sup> que corresponde al 0.7% de la superficie total del país y se le atribuyen una variedad de pisos térmicos. Caldas posee un marcado gradiente altitudinal que varía desde 123 hasta los 5.289 m.s.n.m. lo que favorecen la formación de suelos con diferentes características (Corpocaldas & IGAC, 2012).

### Resultados

Los mapas construidos para determinar las tendencias en los usos y coberturas del departamento, fueron de los años 2000 y 2014; adicionalmente, se contaba con el mapa 2010 oficial de Caldas, el cual ya había sido construido con la metodología CORINE Land Cover (Corpocaldas 2010) (Figura 3).

### Metodología



Figura 2.- Metodología de Construcción de mapas de uso y Cobertura.

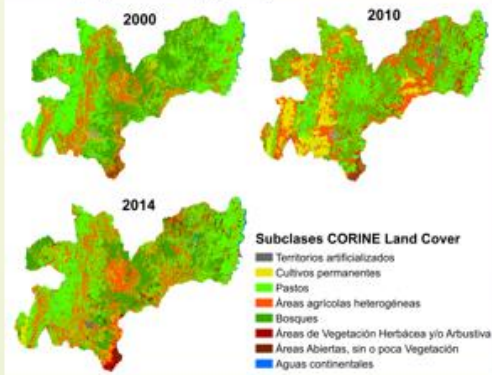


Figura 3.- Mapas de uso y cobertura año 2000, 2010 y 2014.

### Conclusiones

El incremento de las nuevas áreas en los usos y coberturas de Caldas, son procesos dinámicos, ligados a las características espacio-temporales y sociales de la zona de estudio; en el periodo 2000-2010 la subclase con mayor variación fue cultivos permanentes, lo que está ligado a la rotación de los cultivos presentes, para el caso de 2010 - 2014 fueron los pastos destinados a la actividad ganadera.

Los bosques son los tipos de cobertura más amenazados, dado que la disminución de su área se localiza en municipios con vocación de áreas boscosas y selvas tropicales andinas, los que adicionalmente se sitúan en las partes altas de las cuencas que abastecen de agua a la mayoría de los municipios del departamento de Caldas.

La disminución de la extensión de bosques y el aumento de las áreas agrícolas heterogéneas y pastos, representa un aumento de la presión ejercida sobre el suelo, lo que evidencia un proceso de degradación producto del aumento de la actividad ganadera.



Figura 4.- Área en Hectáreas de las principales Coberturas del Departamento de Caldas.

### Agradecimientos

Los Autores expresan los agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, al Instituto de Estudios Ambientales- IDEA, a la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS)

### Referencias

Kairis, O., Kosmas, C., Karavitis, C., Ritsema, C., Salvati, L., Acikalin, S., ... Ziegas, A. (2013). Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management. *Environmental Management*, 1-12. <http://doi.org/10.1007/s00267-013-0510-0>

FAO. (2014). Metodología FPEIR. Iguaa 2014, [1], 1-5. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7-2>

Corpocaldas, & IGAC. (2010). Mapa de uso y cobertura del Departamento de Caldas a escala 1:25000. Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

Corpocaldas, & IGAC. (2012). Estudio Semidetallado de Suelos de los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina, Neira y Villamaria. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 190-210.

Para el periodo 2000-2014 las coberturas tuvieron el siguiente comportamiento:


- Cultivos permanentes mostraron una tendencia a la pérdida de extensión en Km<sup>2</sup>, relacionado con el aumento de áreas agrícolas heterogéneas.
- Los pastos aumentaron su extensión, debido a un cambio de vocación del suelo destinado a la ganadería.
- Los bosques disminuyeron su área, por el aumento del territorio en las coberturas agrícolas
- El territorio artificializado mostró tendencia al aumento. Indica expansión urbana de las cabeceras municipales y un incremento en coberturas como carreteras y fincas.




## **B. Anexo: Cambios de uso y cobertura del suelo en la zona de influencia del parque Nacional Natural Los Nevados**

XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica

26 al 30 de septiembre de 2016. Lima, Perú








## CAMBIO DE USO Y COBERTURA DEL SUELO EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL PARQUE NACIONAL NATURAL LOS NEVADOS

Patiño Rincón, D.A 1<sup>er.</sup>, Camargo Vargas, S.A 2<sup>do.</sup>,  
Tobasura Acuña, I. 3<sup>er.</sup>, Vélez, J.J 4<sup>to.</sup>, Ceballos, J.L 5<sup>to.</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia-sede Manizales, Colombia  
<sup>2</sup> Universidad de Caldas, Centro de Estudios Rurales, Colombia y Universidad de Cundinamarca Tecnología en Cartografía  
<sup>3</sup> Universidad de Caldas, Colombia  
<sup>4</sup> Universidad Nacional de Colombia-sede Manizales, Colombia  
<sup>5</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, Colombia









### Contenido

1. Introducción
2. Metodología
3. Resultados
4. Conclusiones




Parque Nacional Natural Los Nevados  
Fuente: [www.colombia.travel](http://www.colombia.travel)




## Introducción


- Colombia cuenta con 6 nevados (4 se encuentran sobre la cordillera central) y son monitoreados constantemente por el IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), siendo estos glaciares de especial interés por pertenecer a una cadena de volcanes activos lo que ha dificultado en alguna forma la adquisición de información.
- Las condiciones climáticas añaden bastante incertidumbre en los valores de espesor de la capa glaciar.



Localización nevados de Colombia  
Fuente: Elaboración propia

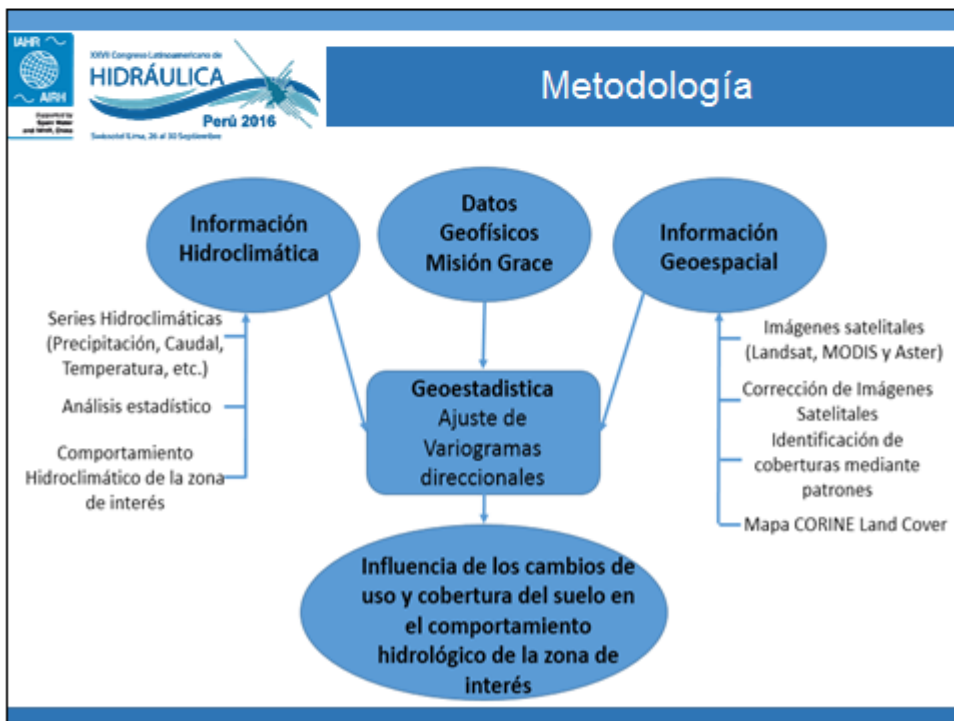
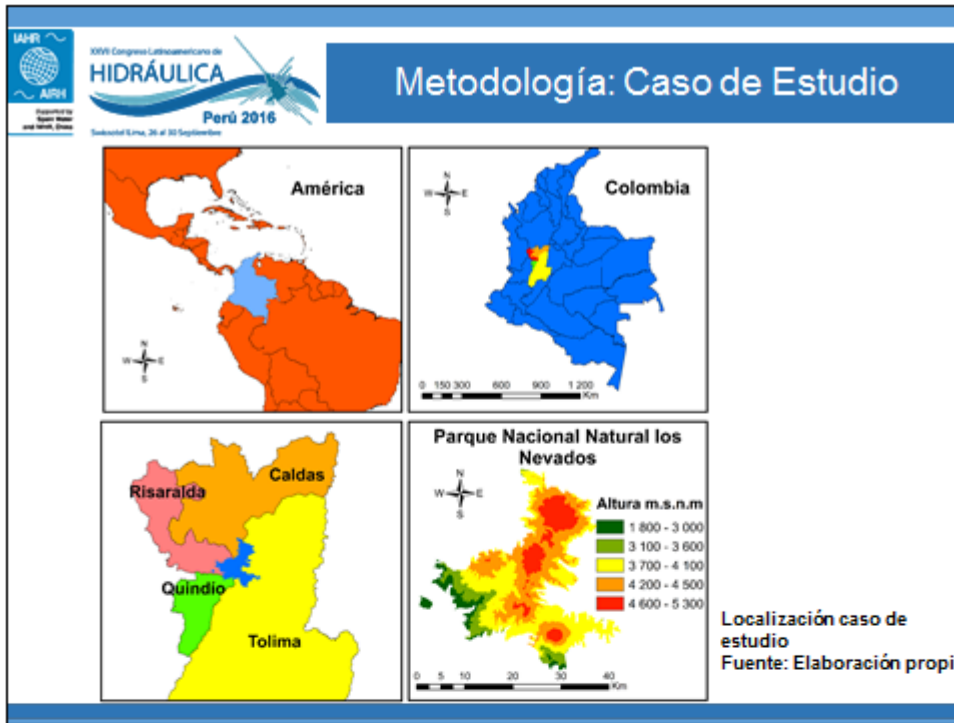



## Introducción




**Nevado del Ruiz**  
Fuente: LA PATRIA

- Los primeros estudios que se realizaron en zonas de glaciares en Colombia se dieron por parte del geofísico y geólogo Van der Hammen y Krauss (1934) donde implementaron **sísmica de refracción** para evaluar la **estructura interna de los glaciares** asociados a volcanes y sus momentos.
- Para 1986 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IAGC) mediante el uso de **fotointerpretación** dio inicio a una serie de estudios que buscaban determinar cambios en superficie para zonas glaciares.





**Metodología: Información Hidroclimática**

**Estaciones en la Zona de influencia del PNNN**



- **Escala:** Diaria
- **IDEAM:** Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
- **CHEC:** Central Hidroeléctrica de Caldas
- **Universidad Nacional de Colombia** sede Manizales.

**Localización estaciones hidroclimáticas**  
**Fuente:** Elaboración propia


**Metodología: Información Geoespacial**

**Selección del tipo de imagen satelital**

**Imágenes Landsat.**

**Procesamiento**

- Filtrado espacial.
- Corrección geométrica.
- Haze reduction.
- Corrección radiométrica.
- Corrección atmosférica.

**Clasificación**

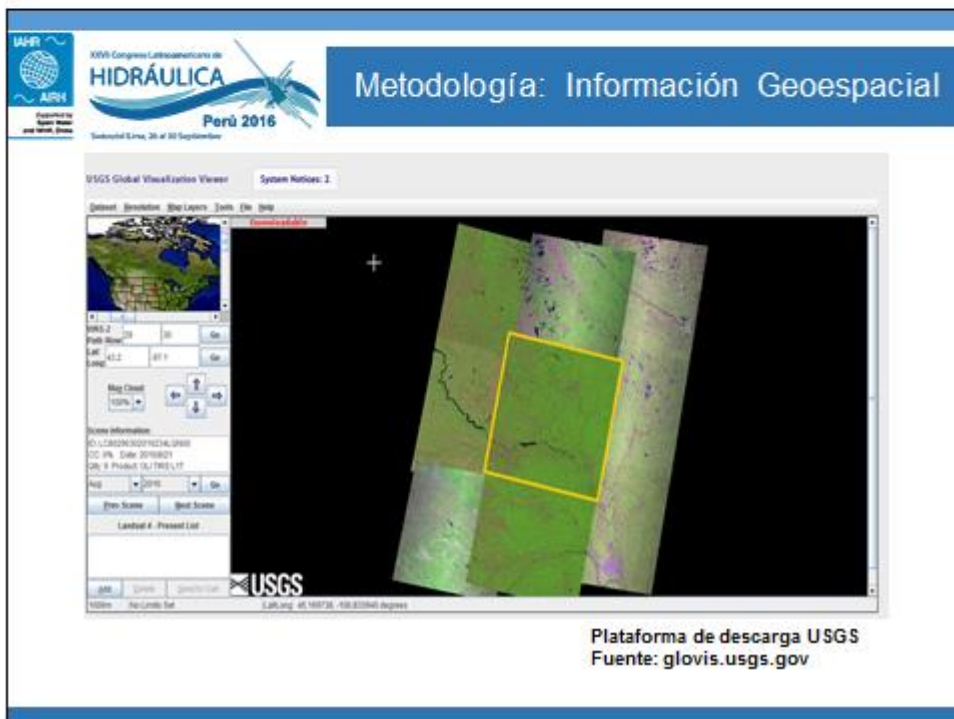
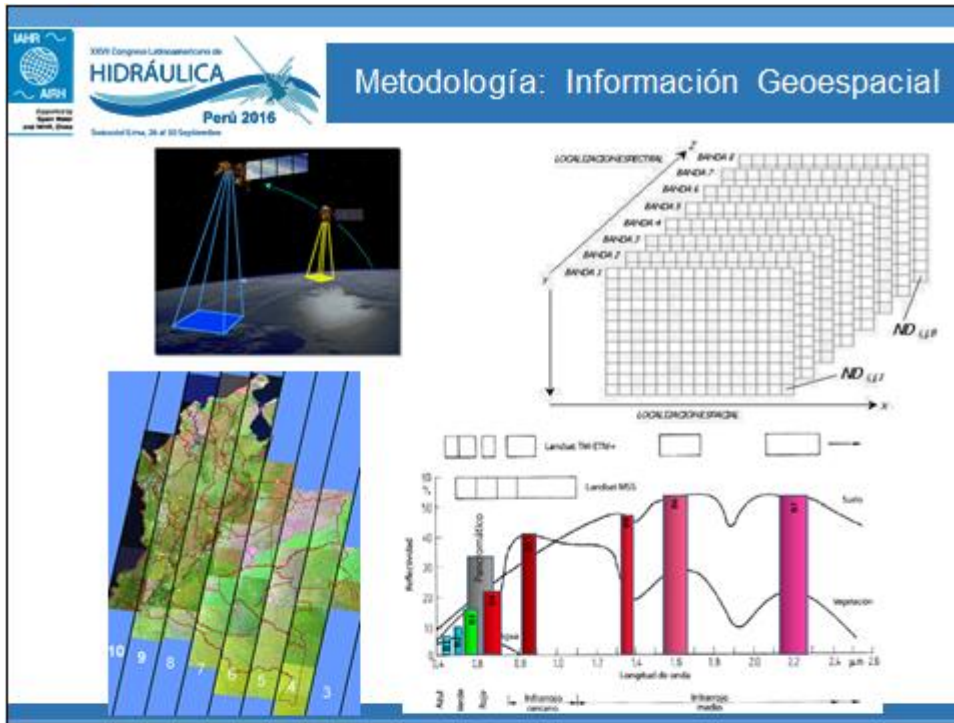
- No-Supervisada
- Supervisada.

**Validación**

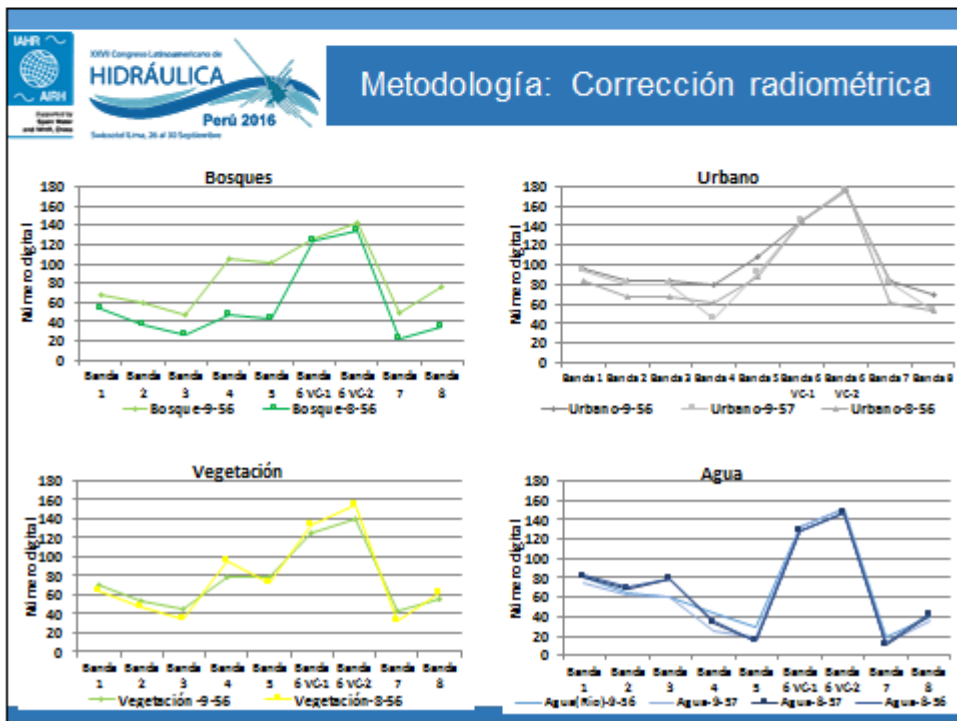
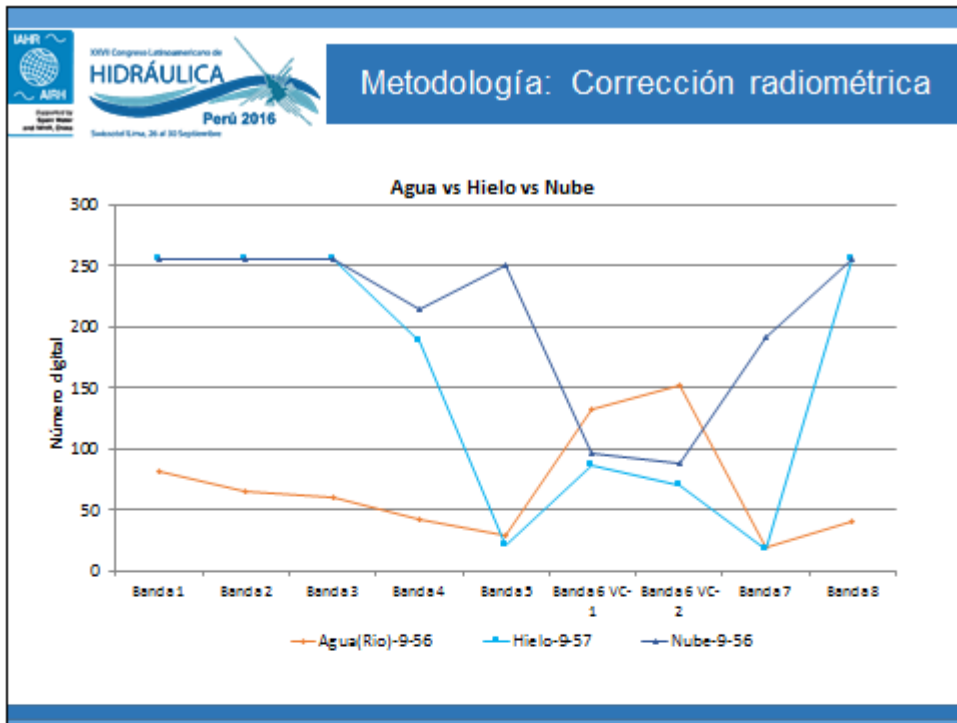
- Reconocimiento en campo.
- Fotografías aéreas.

**Neighborhood**

- Ajuste de la leyenda nacional CORINE Land Cover.

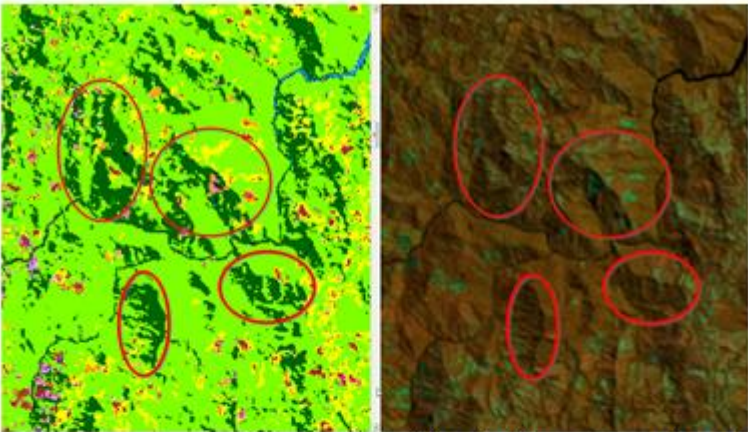






IAHR  
APHA  
XXXV Congreso Latinoamericano de  
**HIDRÁULICA**  
Perú 2016  
September 28-30 at 20 September

### Metodología: Corrección Geométrica

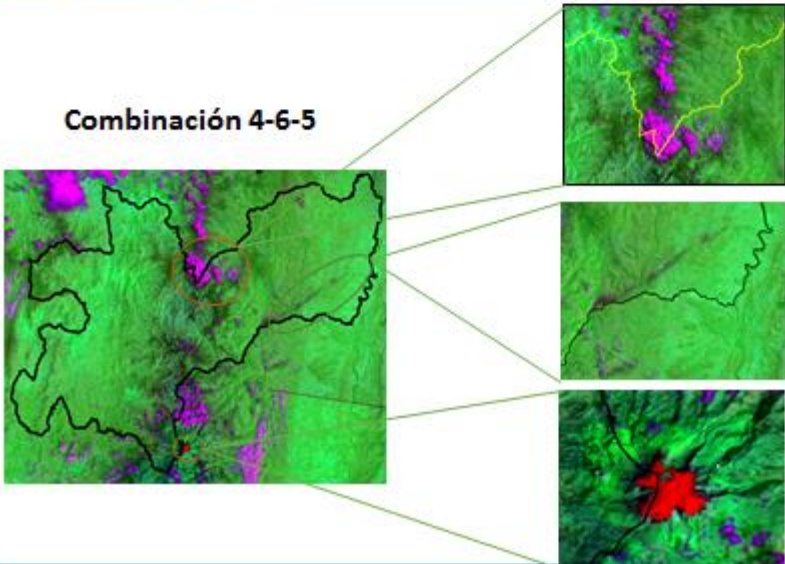


Influencia de las sombras en las montañas  
Fuente: Elaboración propia

IAHR  
APHA  
XXXV Congreso Latinoamericano de  
**HIDRÁULICA**  
Perú 2016  
September 28-30 at 20 September

### Metodología: Identificación de Coberturas

**Combinación 4-6-5**




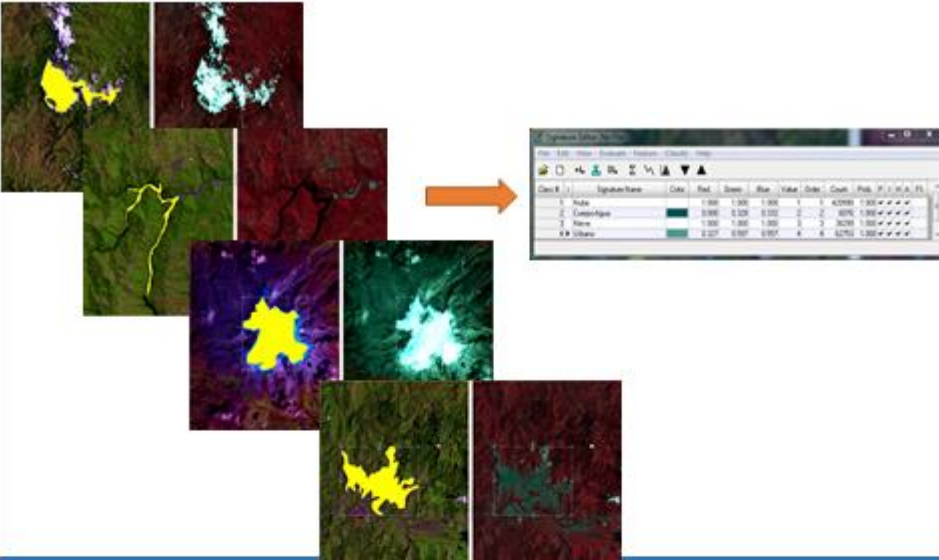
Nubes

Vapor de agua


Nieve



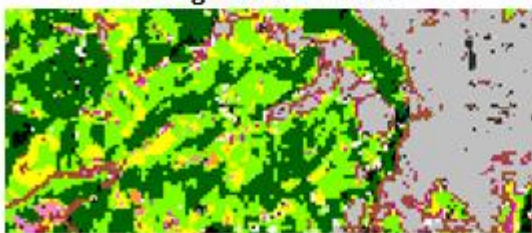

**Metodología: Clasificación de Coberturas**



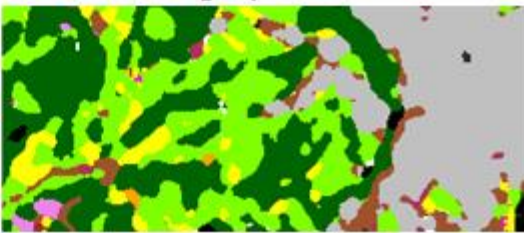
Clasificación	Superficie	Clas.	Ext.	Superf.	Porcentaje	Clas.	Pop.	P.L.	P.C.	P.T.
1	Agua	1.000	1.000	1.000	1	42000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	Cultivos	0.000	0.000	0.000	2	8000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	Monte	1.000	1.000	1.000	3	4000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	Urbanos	0.000	0.000	0.000	4	12000	1.000	1.000	1.000	1.000

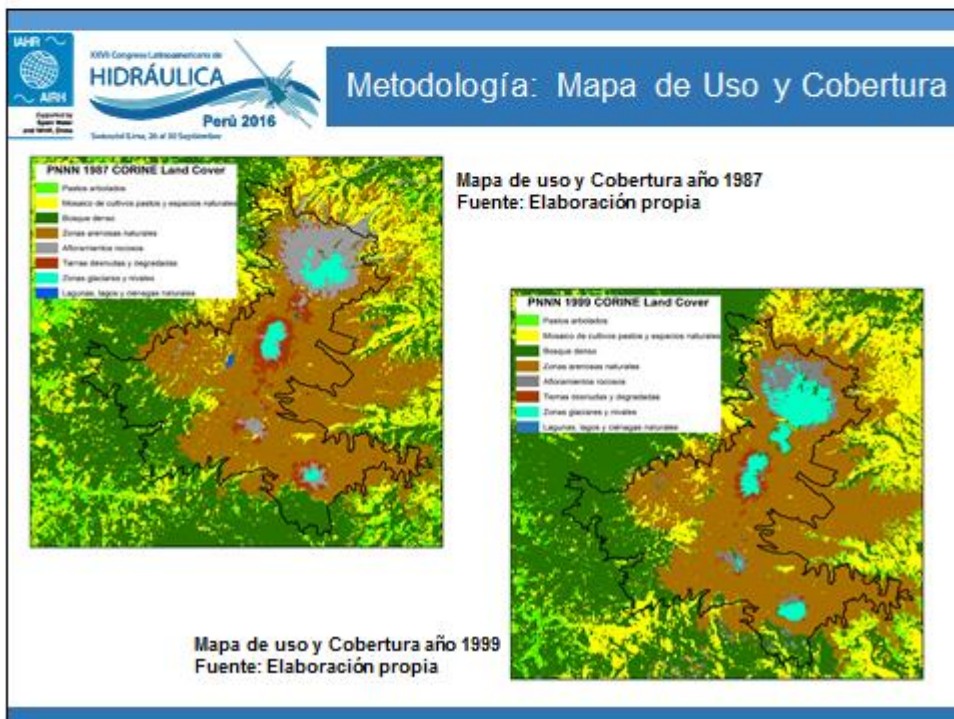
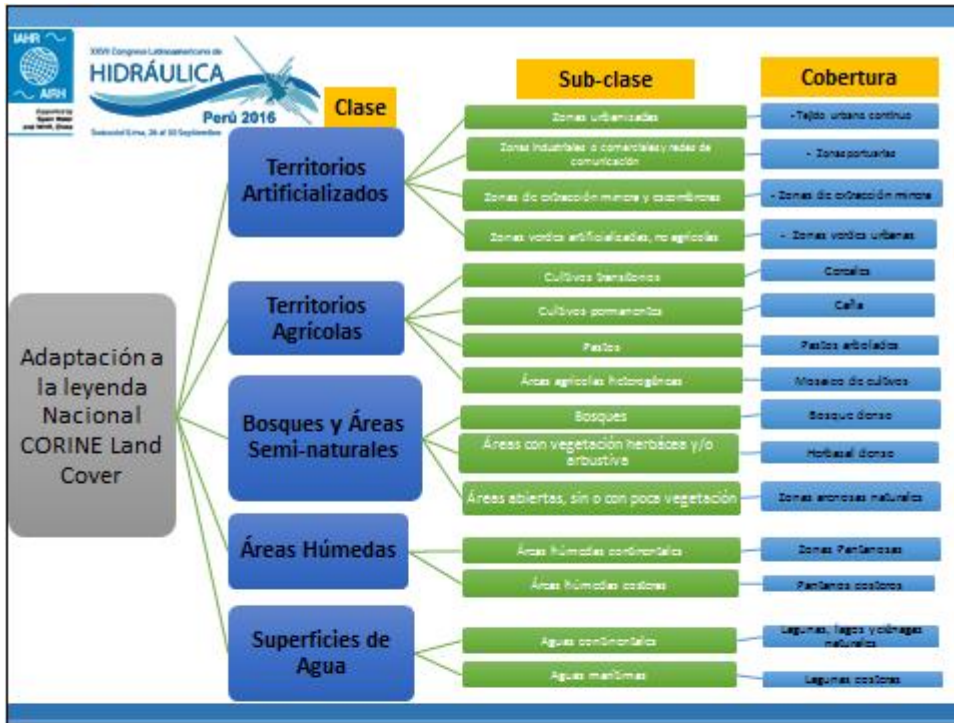

**Metodología: Neighborhood**

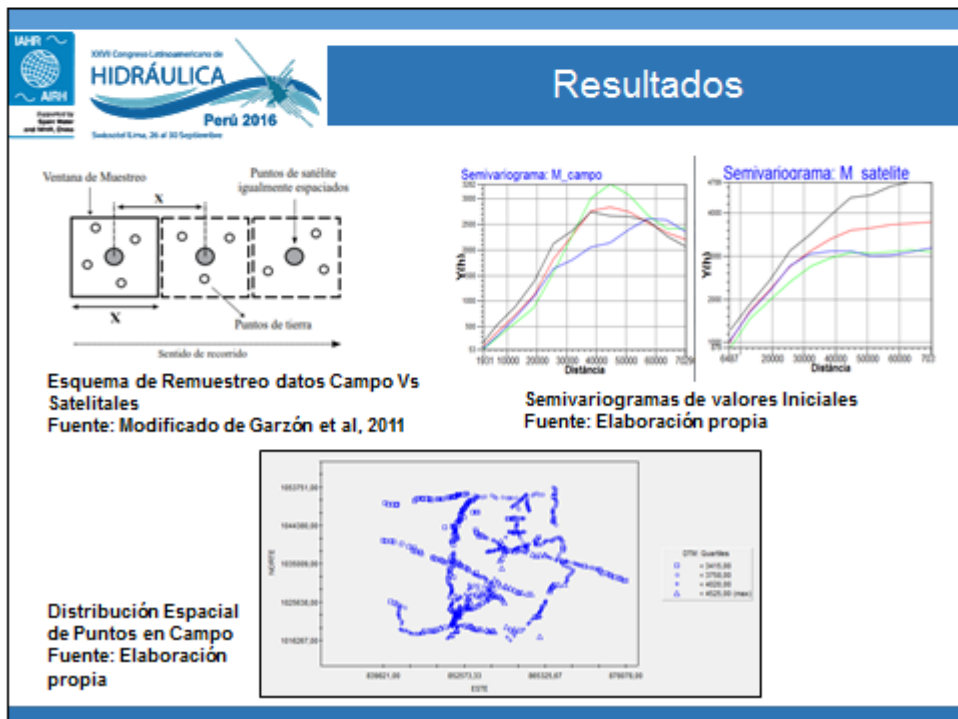
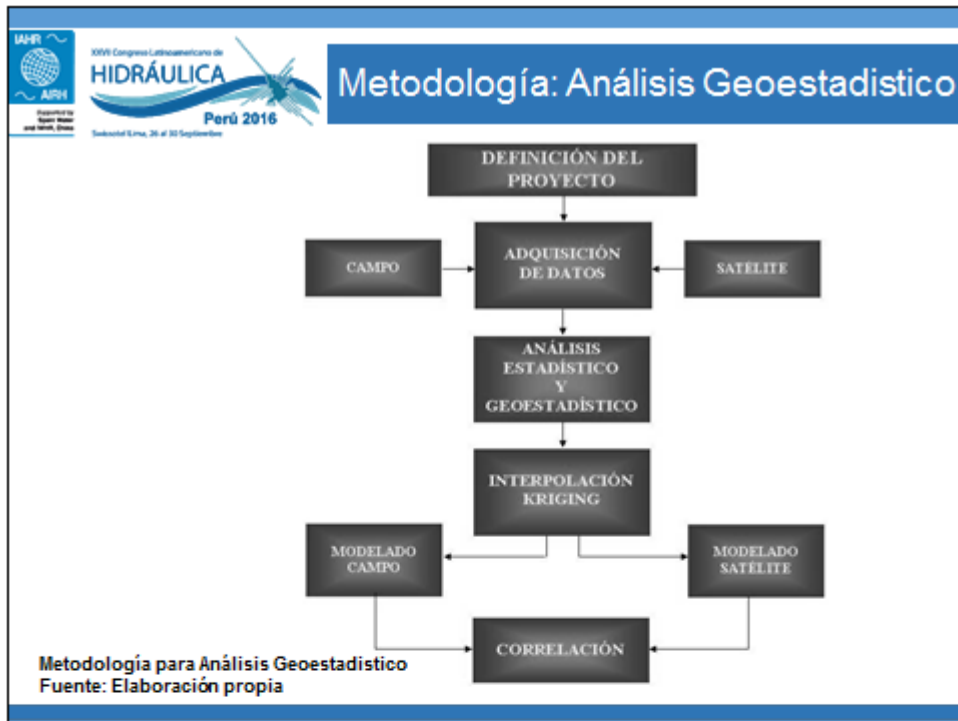
**Imagen recodificada**

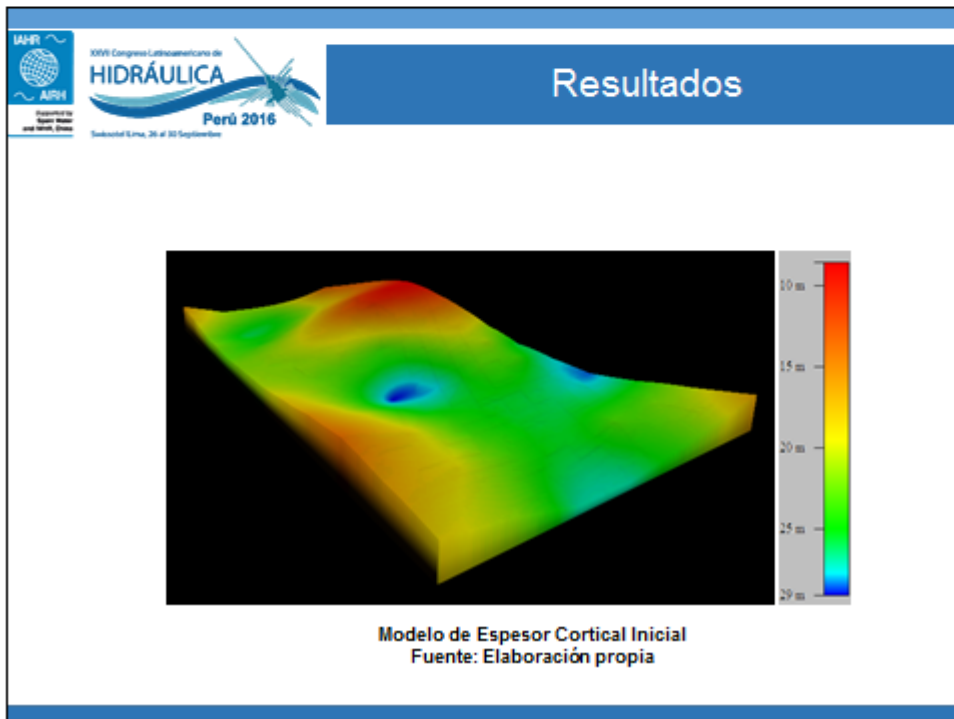
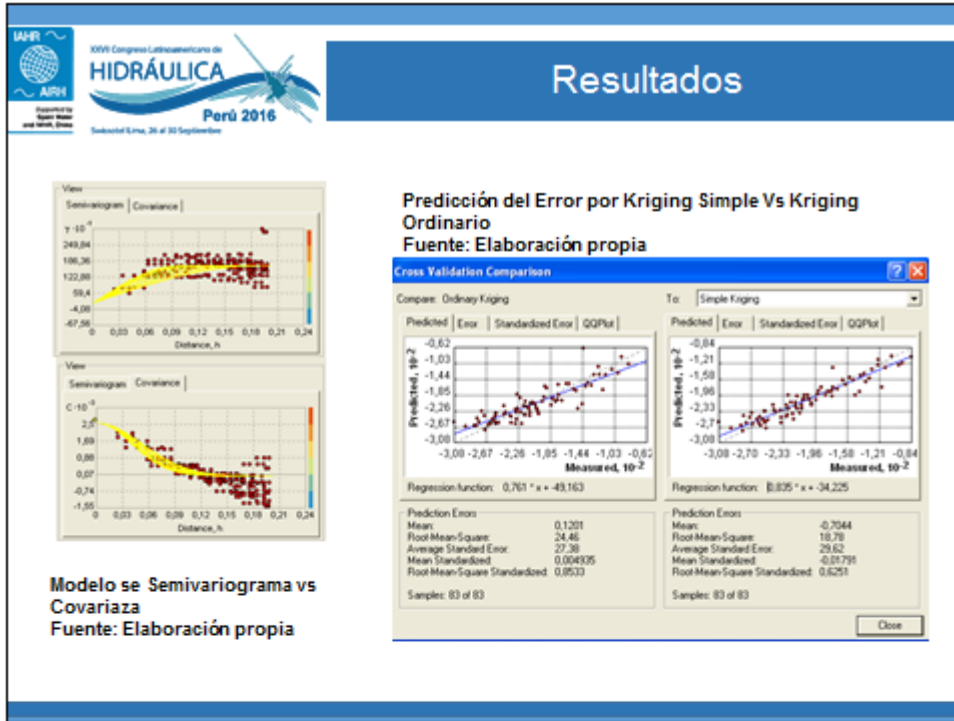



**Imagen procesada**











XXVI Congreso Latinoamericano de  
**HIDRÁULICA**

Perú 2016

Subsedeal Lima, 26 al 30 Septiembre

## Conclusiones

- Del análisis multitemporal se destaca la gran influencia de la ocurrencia del fenómeno del Niño en ambas fases, en la retracción de los glaciares del Ruiz y Santa Isabel
- La disminución de bosque y aumento pastos y áreas agrícolas heterogéneas, debido a cambio de vocación del suelo producto de factores sociales.
- Mediante el uso de gravimetría es posible identificar zonas de valor positivo que están asociados a cuerpos de baja densidad como la capa Glaciar.



XXVI Congreso Latinoamericano de  
**HIDRÁULICA**

Perú 2016

Subsedeal Lima, 26 al 30 Septiembre

## Agradecimientos

- IDEA, IDEAM, CORPOCALDAS y CHEC por suministrar los registros hidrometeorológicos.
- Al Proyecto VACEA “Vulnerability and Adaptation to Climate Extremes in the Americas.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES



IDEAM

INSTITUTO DE HOROLOGIA,  
METEOROLOGIA Y  
ESTUDIOS AMBIENTALES



UNIVERSIDAD DE CALDAS

LEMIN A SPARGO

## **C. Anexo: WATER PRODUCTION UNDER CHANGES IN LAND USE AND LAND COVER MAPS IN THE CHINCHINÁ RIVER BASIN (COLOMBIA)**

Artículo sometido a revisión

Revista: Agriculture, Ecosystems and Environment

Número de radicado: AGEE-S-17-02204



1 **WATER PRODUCTION UNDER CHANGES IN LAND USE AND LAND**  
2 **COVER MAPS IN THE CHINCHINÁ RIVER BASIN (COLOMBIA)**

3 Patiño Rincón, D.A<sup>1</sup>, Vélez, J.J.<sup>2</sup>, Camargo Vargas, S.A<sup>3</sup>, Casas Cruz, C<sup>4</sup> Tobasura Acuña, I.<sup>5</sup>

4 <sup>1</sup> *Universidad Nacional de Colombia-sede Manizales, Colombia M.Sc. Water Resources Research,*  
5 *[dapatri@unal.edu.co](mailto:dapatri@unal.edu.co)*

6 <sup>2</sup> *Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Colombia [jvelez@unal.edu.co](mailto:jvelez@unal.edu.co)*

7 <sup>3</sup> *Universidad de Caldas, Centro de Estudios Rurales, Colombia y Universidad de Cundinamarca Tecnología en*  
8 *Cartografía [sergio.camargo@ucaldas.edu.co](mailto:sergio.camargo@ucaldas.edu.co)*

9 <sup>4</sup> *Universidad de Caldas, Colombia [cyanolyca@gmail.com](mailto:cyanolyca@gmail.com)*

10 <sup>5</sup> *Universidad de Caldas, Colombia [isatas.tobasura@ucaldas.edu.co](mailto:isatas.tobasura@ucaldas.edu.co)*

11

12 **ABSTRACT**

13 The Chinchiná River Basin and its glaciers, El Ruiz and Santa Isabel, have been affected by  
14 various changes during past few decades, due to land use and cover changes, climate  
15 change, and occurrence of extreme events. For these reasons, it has become a priority to  
16 understand their impacts on water production, so that these effects may be counteracted or  
17 delayed. This paper focuses on the current state of glaciers, moorlands, pastures, and  
18 tropical forests and changes which have occurred in the Chinchiná River Basin during the  
19 past few decades, owing to different land use and cover maps. This investigation uses remote  
20 sensing (LANDSAT images) to obtain land use and cover change information, as well as their  
21 implications for water production in three distinct moments. The evaluation carried out based  
22 on the analysis of satellite images, which show a notorious retreat of the glacial layer, in  
23 addition to a reduction of moorlands in favor of livestock and potato production with their  
24 respective social and environmental impacts. All of these changes, in general, affect water  
25 production, and have affected its natural dynamics increasing the direct runoff and reducing  
26 the interflow and base flow. This analysis serves as a tool for decision makers in the water  
27 resource planning and land management spheres, insofar as their hydric and social aspects,  
28 based on information with free access, such as remote sensor images.

29 **KEYWORDS:** Land use changes, soil cover changes, remote sensing and water production.

## 30 **1 INTRODUCTION**

31 The Chinchiná River Basin, located in the Central Colombian Andes, has been affected by a  
32 number of changes during recent decades, such as land use and cover changes, climate  
33 change, and the occurrence of extreme events. The present basin analysis includes certain  
34 social and agricultural alterations, among many others, in order to understand the temporal  
35 evolution of these changes, through use of remote sensors (Landsat imagery) and its  
36 relationship with water production. This investigation focuses on the present state of glaciers,  
37 moorlands, and tropical forests, and changes which have occurred in the Chinchiná River  
38 basin during recent decades. It has been demonstrated by some researchers that tropical  
39 Andean glaciers are retreating (Poveda and Pineda, 2006; Marulanda et al. 2016), the  
40 analysis was performed using satellite images, and its total disappearance has been  
41 estimated for the year 2030, approximately.

42 The first studies carried out in glacial zones in Colombia were performed by Friedlader (1926-  
43 1927) and Kruger (1918), from the flora and fauna point of view. From a geophysical-  
44 geological perspective, Van der Hammen and Krauss (1934) utilized seismic refraction in  
45 order to evaluate the internal structure of glaciers associated with volcanoes. The Agustín  
46 Codazzi Geographical Institute (IGAC in Spanish), through use of photointerpretation, initiated  
47 a series of studies which sought to determine surface changes in glacial zones (Flórez, 1992).  
48 INGEOMINAS (1984) performed a description of glaciers in Colombia. IDEAM (1997) also  
49 carried out a quantification of surface changes in Colombian glaciers. One of the most current  
50 studies performed by Euscátegui (2002) and Ceballos and Euscátegui (1999, 2012) shows  
51 the effect of climate change on glaciers near the equator, evidenced by a clear change in  
52 glacier dynamics. The Chinchiná River Basin presents the same typology as glaciers studied  
53 by Baranowski (1977), who defined these according to their geography, temperature, and



54 water content, as they are Colombian glaciers characterized by the presence of humidity in  
55 ablation zones caused by the atmospheric interaction which brings about the melting of ice.

56 Several land uses analysis have been performed in tropical areas. Peña et al. (2016) studied  
57 upper soil hydraulic properties in the Combeima River Basin, using the TETIS model to  
58 identify flood quantiles. Mendoza and Etter (2002) combined black and white aerial  
59 photographs with fieldwork and GIS to monitor land cover changes over a period of 56 years  
60 (1940–1996), in parts of Bogota, Colombia. Etter et al. (2006) obtained an understanding of  
61 the forest conversion spatial patterns for agricultural land use in Colombia. Relationships  
62 between climate change and land use dynamics in the Colombian Andes were performed by  
63 Rodriguez-Eraza et al. (2010); Legesse et al. (2003) studied the impact of climate change on  
64 land use in tropical Africa, and Fonseca (2003) studied the change in land use in the National  
65 Natural Park Los Katios. Siquiera et al. (2017) investigated in southeastern Brazil, but water  
66 production was not included in this analysis.

67 Shalaby and Teteichi (2007) provided a perspective for land cover types and land cover  
68 changes which took place between 1987-2001, to integrate visual interpretation and  
69 supervised classification, using GIS, and also to examine the capabilities of integrating  
70 remote sensors and GIS in the study of the spatial distribution of different land cover changes  
71 in Egypt. Lambin et al. (2003) explored the complexity of land-use/cover change in tropical  
72 regions, based on resource scarcity, which led to an increase in the pressure of production on  
73 resources, changing opportunities created by markets, outside policy intervention, loss of  
74 adaptive capacity, and changes in social organization and attitudes.

75 In a general conceptualization, Foley et al (2005) highlight that land use changes have  
76 historically been considered a local environmental issue. However, this is becoming a force of  
77 global importance. Global croplands, pastures, plantations, and urban areas have expanded

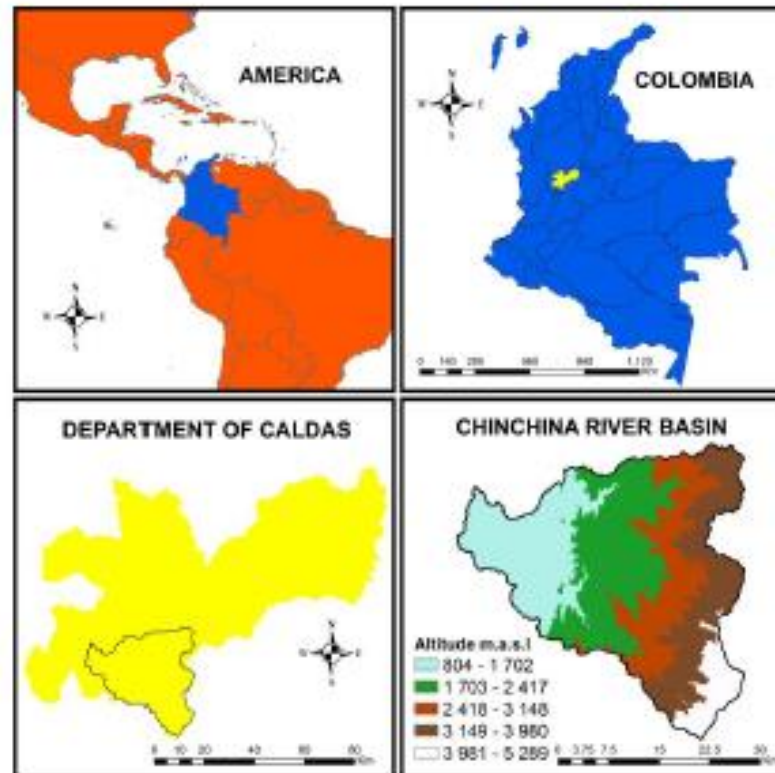
78 in recent decades, accompanied by large increases in energy, water, and fertilizer  
79 consumption, along with a considerable loss of biodiversity.

80 An interesting article describing the causes of land use and land cover change highlights that  
81 neither population nor poverty alone constitute the underlying cause of land-cover change  
82 worldwide. Where public policies and markets create new land uses, people's responses to  
83 economic opportunities, as mediated by institutional factors, drive land-cover changes,  
84 according to Lambin et al. (2001).

## 85 **2 MATERIALS AND METHODS**

### 86 **2.1 Case study**

87 The Chinchiná River Basin is located on the western flank of the Central Colombian Andes,  
88 covering a surface area of 1052 km<sup>2</sup>, as shown in Figure 1. The climate is normally tropical,  
89 and it is characterized by small fluctuations in inter-annual temperatures, and large daily  
90 temperature fluctuations (Jaramillo, 2005; Ocampo, 2012; CORPOCALDAS-Unal, 2015).



91

92

Figure 1. Location of Chinchiná River Basin.

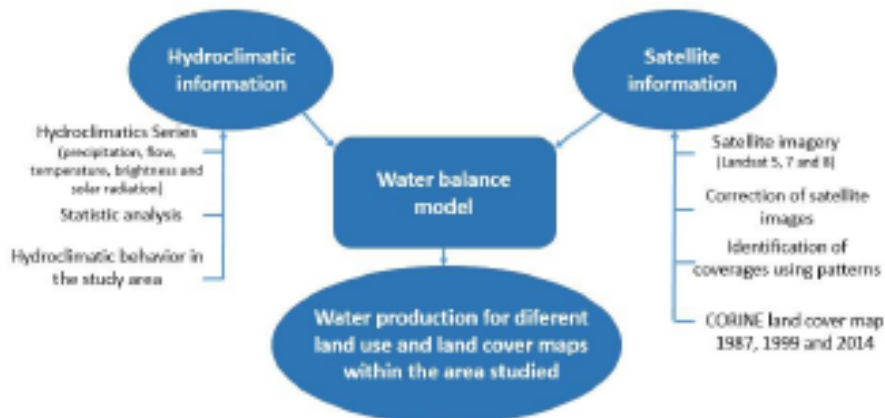
93 The basin, in the upper part of the region, is part of Los Nevados National Natural Park  
 94 (NNNP), which is important because it has special environmental protection management.

95 This basin is also responsible for 80% of the GDP in the department of Caldas (Colombia),  
 96 which justifies the importance of land use and cover change studies (CORPOCALDAS-Unal,  
 97 2015).

98 The soils are mainly volcanic, and the El Ruiz and Santa Isabel glaciers are part of the Ruiz-  
 99 Tolima volcanic complex, which has been defined as massif igneous-metamorphic, in the  
 100 center of the Central Colombian Andes, as modeled by Plio-Pleistocene volcanic deposits  
 101 (Ceballos and Tobón, 2007).

## 102 2.2 Methodology

103 This study estimates land use and land cover changes, and the retreat of the El Ruiz glacier,  
104 located in the Chinchiná River Basin. These changes affect the water supply in certain  
105 municipalities within the area of influence. The process consists of relating spatial information  
106 to the different hydroclimatic variables, using hydrological modelling to estimate water  
107 production in the 1987, 1999, and 2014 years. Figure 2 shows an outline of the methodology  
108 applied in order to relate spatial data from satellites and hydroclimatic information through  
109 hydrological water balance models.



110

111 *Figure 2. Methodology of analysis for the influence of changes in land use and coverage of the hydrological*  
112 *behavior in the area of interest*

### 113 2.2.1 Hydroclimatic data

114 The hydroclimatic information consists of historical precipitation, temperature, solar  
115 brightness, relative humidity, and flow records, on a daily scale, with measured values of over  
116 30 years, during the 1981-2014 period. This information was provided by entities such as the  
117 IDEAM, the National University of Colombia at Manizales' IDEA, the National Coffee  
118 Research Center CENICAFÉ, and the Caldas Hydroelectric Center, CHEC.

119 Hydroclimatic data were processed, analyzed, and validated in order to be used as inputs in  
120 the water balance model. The consistency and homogeneity tests were carried out for the  
121 temporal series, so as to guarantee high data quality.

#### 122 2.2.2 Hydrological water balance model

123 Various water balance models were analyzed for the Chinchiná watersheds by Ocampo and  
124 Vélez (2014), who reported the best performance for a lumped conceptual tank model, in  
125 which parameters can be estimated easily, and have a physical meaning. This model is  
126 based on the tank model proposed by Vélez (2001), which is an aggregated version of the  
127 model described in Francés et al. (2007) and Vélez et al. (2009).

128 The station that covers the largest proportion of the Chinchiná River Basin is El Retiro station,  
129 where it is possible to estimate a water balance, in each of the years selected, for changes in  
130 land use. Thus, it is possible to analyze their effect on water production. The analysis is  
131 proposed for the calibrated reference period (1981-2014) and carry out a new calibration for  
132 each year (1987, 1999, 2014) and from there make the comparison, i.e., comparing the year  
133 1987 with the parameters of the reference period (1981-2014) and the year 1987 with new  
134 parameters, but only for a few parameters that affect the change of land use and cover,  
135 through the manual calibration. So, it is possible to estimate the water production effect of the  
136 change in land use and cover, with respect to other land use and cover states in the same  
137 region.

#### 138 2.2.3 Socio-territorial information

139 The following social and territorial themes were analyzed from secondary sources:

- 140 • Plan for environmental management of the Chinchiná River Basin (Corpocaldas-Unal,  
141 2015)



- 142 • National Agricultural Census.
- 143 • Management plans and socioeconomic aspects of Los Nevados National Natural Park.
- 144 • The agrarian structure which permits understanding of access conditions, forms of
- 145 tenure and land ownership in the Chinchiná River Basin, and which allows for analysis
- 146 of the conflicts generated by various land uses, therefore explaining the social causes
- 147 of changes in land use covers maps.
- 148 • Land-use planning schemes and plans for municipal land use with jurisdiction in the
- 149 Chinchiná River Basin

150 This information was used to highlight protection zones, detect areas of inadequate land use,  
151 and identify areas of conflict within the Chinchiná River Basin where land use analysis must  
152 be performed.

#### 153 2.2.4 Satellite Information

154 Satellite information was composed of images belonging to the LANDSAT 5, 7, and 8 medium  
155 optical electrical sensors, belonging to the United States Geological Survey (USGS). Said  
156 information was obtained through the USGS Global Visualization Viewer, and the University  
157 of Maryland's Global Forest Change (Maryland U, 2016).

158 It was necessary to perform different corrections to the downloaded images, in order to  
159 provide confidence in the images, the proposed corrections are described below:

- 160 1. Spatial filtering
- 161 2. Radiometric correction
- 162 3. Conversion of radiance to reflectance
- 163 4. Atmospheric correction

164 5. Geometric correction

165 6. Supervised classification

166 7. Neighborhood (salt and pepper effect)

167 8. Adjustment of the cover legend according to the National Legend issued by IDEAM  
168 (2010)

169 Once all this process was completed, the updated soil cover and land use map were obtained  
170 from remote sensor data.

### 171 3 RESULTS AND DISCUSSION

172 Results show changes in land use and cover maps through use of estimation and a remote  
173 sensor in three different years: 1987, 1999 and 2014. The water balance models allow for  
174 estimation of water production during those years, for comparison of their effects on water  
175 resources. The occurrence of the El Niño South Oscillation (ENSO) phenomenon was a  
176 selection criterion for those years. One selected year, 1987, was associated with a strong  
177 ENSO cold phase event. In 1999, the ENSO warm phase was shown, and 2014 was a normal  
178 year.

179 The main results can be described as follows:

#### 180 3.1 Land use and cover maps for the Chinchiná River Basin

181 The selection of the LANDSAT images was tricky because tropical areas are usually covered  
182 with clouds, and so it was difficult to find clear images without clouds that allowed for an  
183 adequate analysis. However, it was possible to join and aggregate various images from same  
184 period of time, in order to obtain best possible images for description of the basin's natural  
185 behavior, from the hydrological point of view, as well as the spatial-temporal dynamics of land

186 use and soil covers. According to the methodology of map construction, land use and cover  
187 maps were obtained for the following years: 1987, 1999, and 2014. It was possible to identify  
188 a total of four classes, eight subclasses, and eight coverages belonging to the CORINE  
189 national legend for land cover.

190 The correction process performed on the images are described below:

#### 191 3.1.1 Spatial filtering

192 For the case study, spatial filtering was applied from a 3 x 3 inspection mask, whose function  
193 was to contain image components of low spatial frequency (Aldalur & Santamaria, 2002). It  
194 was used to improve the contrast between vegetation cover and exposed soil present in the  
195 Chinchiná River Basin.

#### 196 3.1.2 Radiometric Correction

197 The radiometric correction factor was applied as a function of the wavelength values captured  
198 by the Landsat sensor, which favored cover identification. This was performed for each band,  
199 separately, as shown below (Chander e al., 2009):

$$200 \quad L = a_1 + a_0 \cdot DN \quad (1)$$

201 Where L is the radiance that reaches the instrument,  $a_0$  is the slope or gain number of counts  
202 per radiance change unit,  $a_1$  is a constant, offset, or bias, and DN is the Digital Counting,  
203 counting values corresponding to the instrument response when radiance is zero.

#### 204 3.1.3 Conversion of radiance to reflectance

205 To convert radiance to reflectance, the following equation was used:

$$206 \quad \rho(\lambda) = \frac{L \cdot \pi \cdot d^2}{E_i(\lambda) \cdot \cos(\theta)}$$

207 (2)



208 Where,  $\rho(\lambda)$  is the reflectance at the top of the atmosphere,  $L$  is the radiance,  $d$  is the ground-  
 209 sun distance,  $E_i(\lambda)$  is solar irradiance, and  $\theta$  is the solar zenith angle. The values used to  
 210 convert digital numbers to radiance and reflectance of the ETM sensor of the Landsat satellite  
 211 is shown in Table 1.

212 *Table 1. Conversion factors for radiometric correction (Chander et al., 2000)*

Band	Bias	Gain	Irradiance [W/m <sup>2</sup> *μm]
1	-6.2	0.7757	1969.0
2	-6.4	0.7957	1840.0
3	-5.0	0.6192	1551.0
4	-5.1	0.9655	1044.0
5	-1.0	0.1257	225.7
7	-0.35	0.043	1368.0

213

214

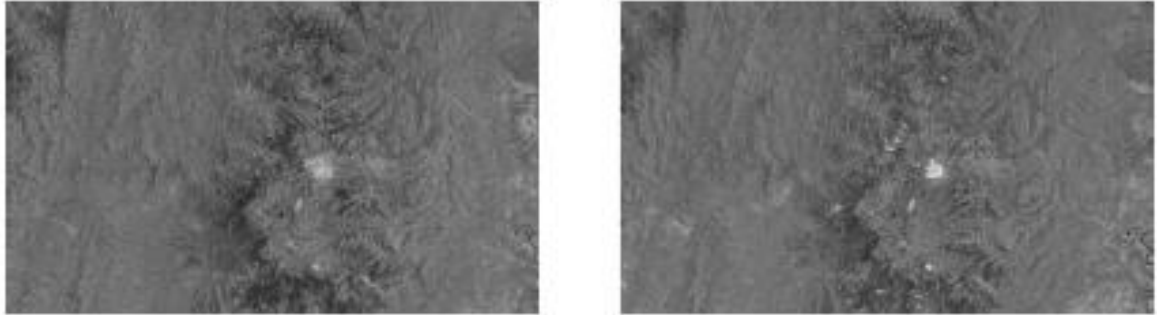
#### 215 3.1.4 Atmospheric Correction

216 Atmospheric distortions are characterized by spatial and temporal variations; dispersions are  
 217 not constant throughout the image, but certain zones may be more affected than others  
 218 (Chuvieco, 1995, 2005). For this purpose, the FLAASH model was applied in satellite imagery  
 219 analysis software, using parameters such as orbit height, the geographic coordinates of the  
 220 image center, type of study area (rural or urban), and date and time of the picture.

#### 221 3.1.5 Geometric Correction

222 This corrects any change in position that the pixels occupy in the physical space that  
 223 encompasses the image, and modifies only the geographical coordinates of each pixel  
 224 (RamaKrishnan et al, 2013 and Hasan et al, 2011). Figure 3 shows the corrected images for

225 1999 and 2014, where the location of the glacier and the retreat which occurred in the period  
226 of interest is clearly observed.



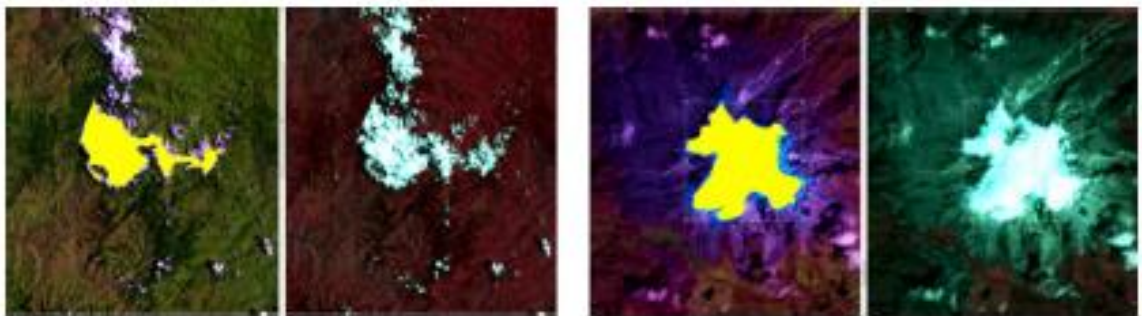
227

228 *Figure 3. Corrected images for 1999 (upper) and 2014 (lower) RGB combination: 543*

### 229 3.1.6 Supervised Classification

230 This process consists of defining polygons from the combinations of bands which best  
231 highlight the coverage area of interest, save image spectral values which correspond to the  
232 digitized polygon, and then the classification process can be carried out for all polygons.

233 Figure 4 shows the allocation of training polygons for cloud cover and glacier cover.

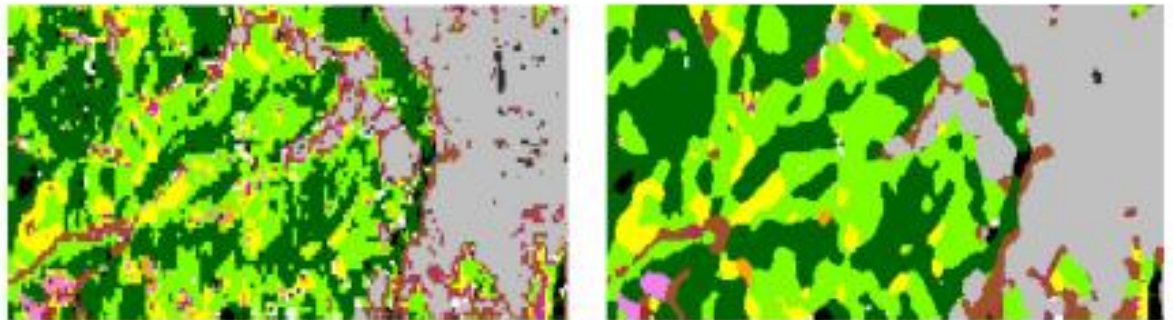


234

235 *Figure 4. Assignment of polygons for cloud cover (left) and glacier cover (right).*

236 3.1.7 Neighborhood correction (salt and pepper effect)

237 This is a matrix interpolation process which allows for redefinition of the contours of previously  
238 identified covers. Figure 5 shows a reduction of the salt and pepper effect in a portion of the  
239 image.



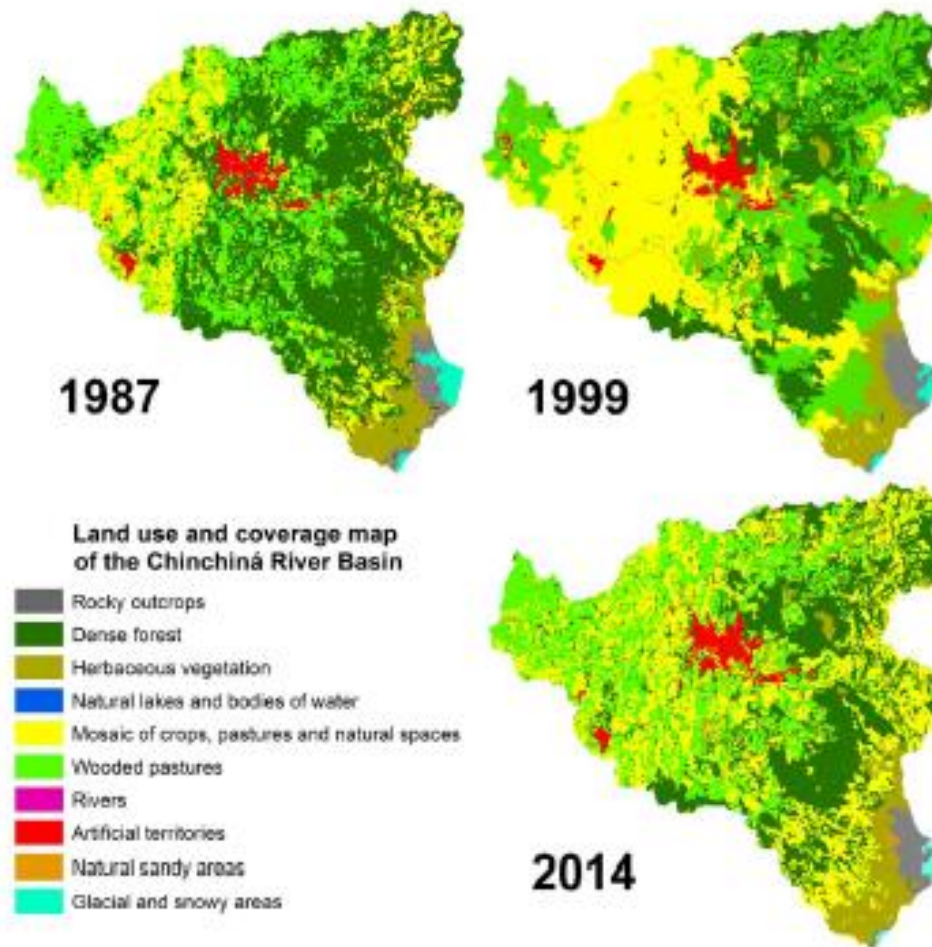
240

241 *Figure 5. Image assigned (left), processed image neighborhood (right) once the salt and pepper effect has been*  
242 *removed*

243 3.1.8 Adjustment of the legend according to the CORINE Land Cover National Legend

244 The land covers identified in the Chinchiná River Basin must be adjusted to standardized  
245 cartographic units, according to the CORINE Land Cover National Legend methodology. The  
246 standard suggested by IDEAM (2010) proposes three levels of classification, composed of  
247 five classes, 15 subclasses, and 57 covers. The classification level reached, according to the  
248 Landsat images used and the area of interest, was four types of covers for class and eight for  
249 the subclass (see Figure 6).





250

251

Figure 6. Land use and coverage map of the Chinchiná River Basin in 1987, 1999, and 2014.

252

As shown in Figure 7 , in 1987, predominant coverage in the basin was 44% dense forest,

253

and in 1999 and 2014, it was a mosaic of crops, pastures and natural areas covering 36%

254

and 35% respectively. The coverage with the least influence in the area was rocky outcrops

255

covering 2% for the three years of analysis.

256

In the case of glacial and snowy zones, a decrease of 0.62% was observed in the area

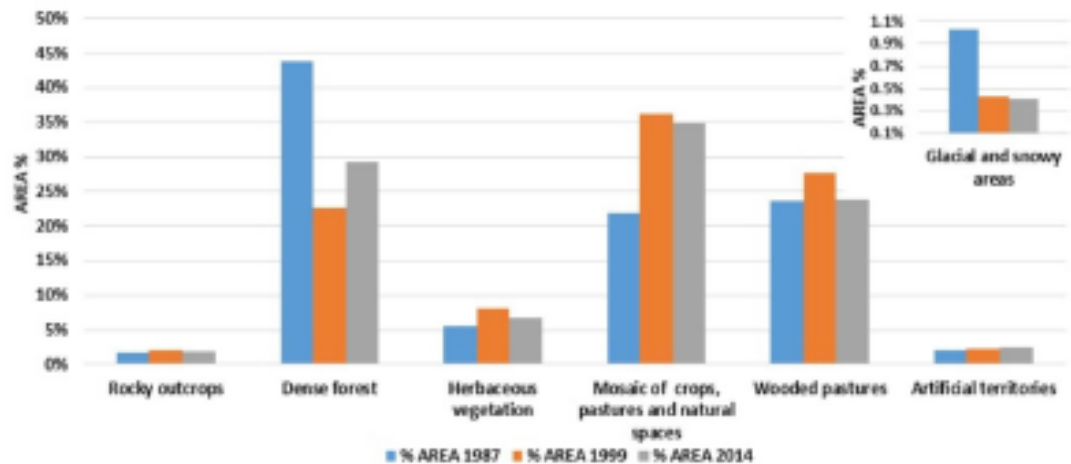
257

studied between 1987 and 2014. In this case in particular, the occurrence of the ENSO

258

phenomenon in its El Niño phase did not affect the extension of the glacial layer in the basin,

259 since in 1987, according to the ONI oceanic index reported by NOAA, there was a strong  
 260 period of El Niño, and otherwise, 1999 registered the phenomenon in its La Niña phase.



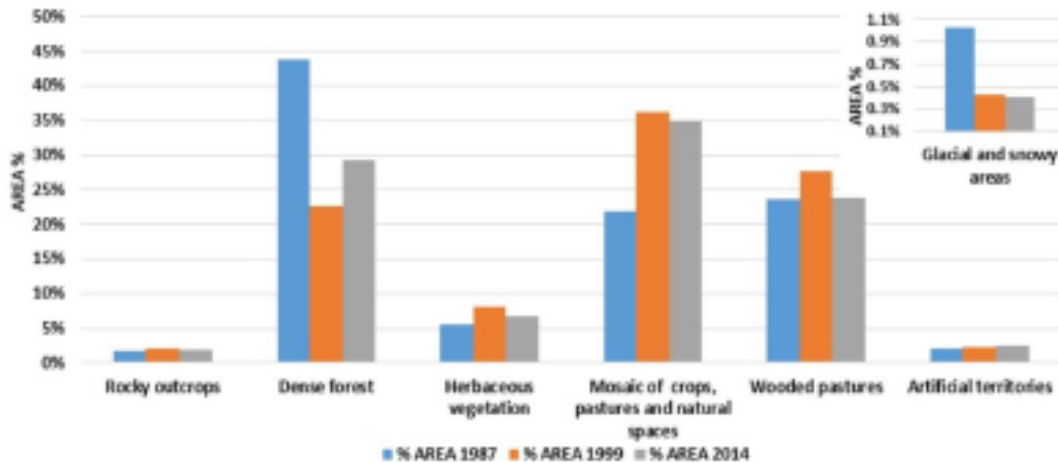
261

262 *Figure 7. Area corresponding to percentage of land use and coverage in the Chinchiná River Basin in 1987,*  
 263 *1999, and 2014.*

264 Different land use maps were obtained and compared, according to the methodology in the  
 265 CORINE Land Cover National Legend, indicating the relevance of land use changes in the  
 266 Chinchiná River Basin since 1987.

267 The multi-temporal analysis performed in 1987, 1999, and 2014 for land use and soil cover  
 268 changes in the Chinchiná River Basin was satisfactorily obtained. From this analysis, a  
 269 reduction of the forest and an increase in agricultural territory was detected. It also showed  
 270 the retraction of the El Ruiz and Santa Isabel glaciers. The reduction of moorlands in favor of  
 271 livestock and potato production had an impact on social and environmental aspects, such as  
 272 reduction of the hydrologic response and an increase in pollution and erosion.

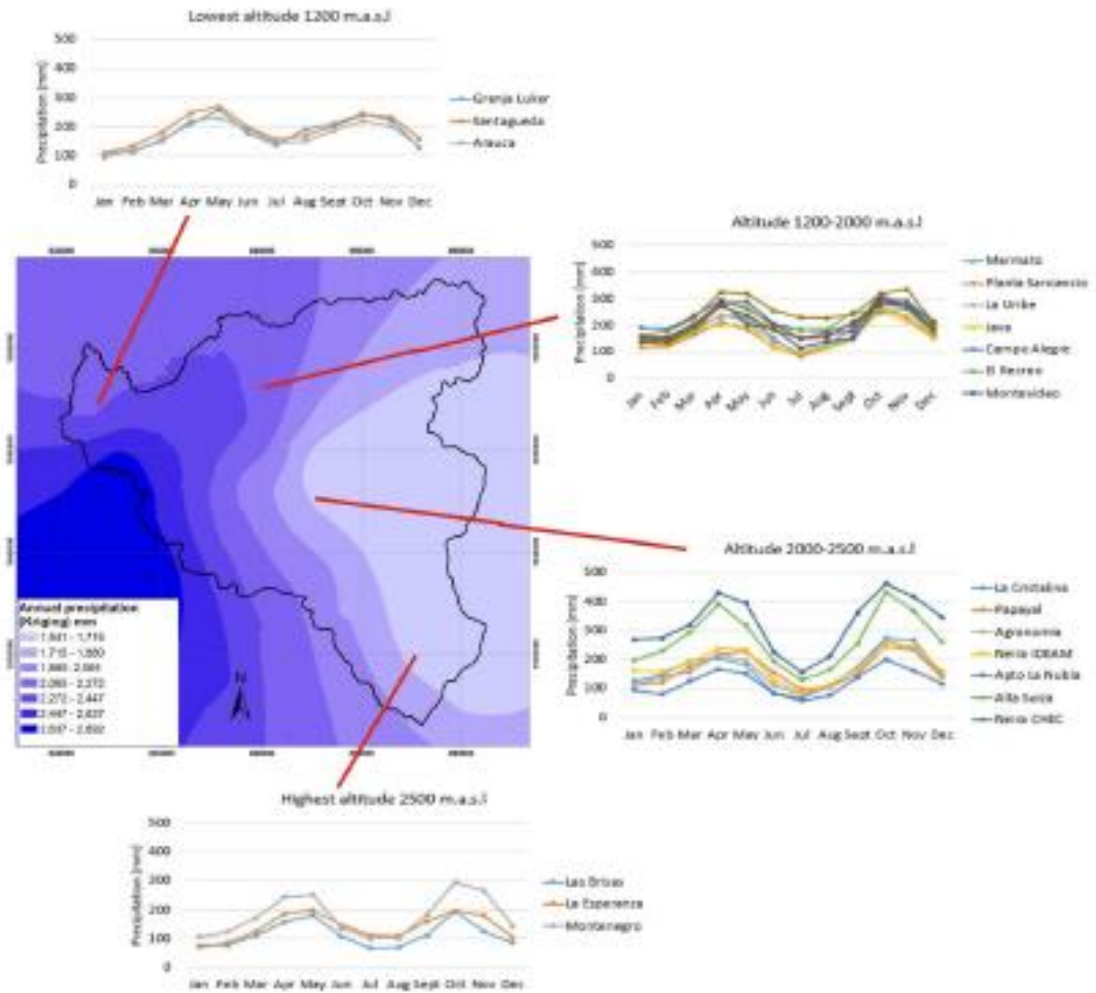
259 since in 1987, according to the ONI oceanic index reported by NOAA, there was a strong  
260 period of El Niño, and otherwise, 1999 registered the phenomenon in its La Niña phase.



261  
262 *Figure 7. Area corresponding to percentage of land use and coverage in the Chinchiná River Basin in 1987,*  
263 *1999, and 2014.*

264 Different land use maps were obtained and compared, according to the methodology in the  
265 CORINE Land Cover National Legend, indicating the relevance of land use changes in the  
266 Chinchiná River Basin since 1987.

267 The multi-temporal analysis performed in 1987, 1999, and 2014 for land use and soil cover  
268 changes in the Chinchiná River Basin was satisfactorily obtained. From this analysis, a  
269 reduction of the forest and an increase in agricultural territory was detected. It also showed  
270 the retraction of the El Ruiz and Santa Isabel glaciers. The reduction of moorlands in favor of  
271 livestock and potato production had an impact on social and environmental aspects, such as  
272 reduction of the hydrologic response and an increase in pollution and erosion.



286

287 *Figure 8. Annual precipitation in the Chinchiná River Basin from 1981-2010. Source: VACEA 2014*

288 In the Chinchiná River Basin, a bimodal precipitation regime, typical of Andean basins,  
 289 associated with the Intertropical Confluence Zone ZCIT, is shown (Poveda, 2004). The  
 290 highest rainfall occurs in the altitudinal range between 2000 and 2500 m.a.s.l., decreasing at  
 291 higher elevations, as reported by Witte (1995). Figure 8 presents some of the stations  
 292 evaluated, according to the altitudinal range of the average monthly precipitation.



## 293 3.2.2 Water balance for different land use maps

294 As for the water balance, through the application of a simple balance model, it was possible to  
295 find a set of aggregated parameters which allowed calibration of the Chinchiná River Basin in  
296 the best daily model for each of these years where changes in land use and cover have been  
297 identified. El Retiro station was used to estimate the water balance, using an aggregated  
298 version of the tank model (Vélez, 2001).

299 The different parameter sets used for water balance are indicated in Table 2, where the 1981-  
300 2014 period is the baseline or reference period selected from previous studies, where  
301 automatic calibration was performed (Corpocaldas-Unal, 2015). The parameter sets for 1987,  
302 1999, and 2014 were estimated using manual calibration for the respective year, modifying  
303 just the soil properties involved during land use, and land cover changes, which were:  
304 available water for plants ( $A_w$ ), hydraulic saturated conductivity in the upper soil layer ( $K_{sup}$ ),  
305 and Direct runoff residence time (DR time). Other soil properties were not modified for this  
306 study (hydraulic saturated conductivity of subsoil layer,  $K_{inf}$ , the interflow and baseflow, times  
307 of residence, and losses).

308 *Table 2. Parameter sets selected for water balance model*

Parameter set	$A_w$ (mm)	$K_{sup}$ (mm/day)	$K_{inf}$ (mm/day)	Losses (mm)	DR time (days)	IF time (days)	BF time (days)
1981-2014	350.2	5.3	0.82	0	3.79	8.28	192.58
1987	450	4.1	0.82	0	2.5	8.28	192.58
1999	600	5	0.82	0	2.1	8.28	192.58
2014	270	4	0.82	0	2.6	8.28	192.58

310 Table 3 show the results of the water balance model in different periods, the initial period  
311 used was the 1981-2014 reference period, and each of the three selected periods were



312 compared to the reference period (1981-2014), indicating that 1987 was a dry period because  
 313 the mean flow for 1987 was reduced 24.2%, with regard to the mean value of entire period  
 314 (1981-2014). In 1999 and 2014, there were wet periods, with an increase of 34.6% and  
 315 32.6%, compared to mean values from the reference period. Changes in land use and cover  
 316 were studied by modifying the parameter set and comparing each year with the reference  
 317 period parameters for the year. Manual calibration was been performed for each year. The  
 318 results for water production indicate a reduction in water production of 35.8%, 5.4%, and 1.7  
 319 % for 1987, 1999, and 2014, respectively. Lower water production changes were notorious,  
 320 occurring during wet periods, and higher reduction was obtained during the dry period (1987).  
 321 Interflow and base flow also showed decreasing patterns for the three years studied, direct  
 322 runoff increased. Therefore, the obtained results were as expected for land use and cover  
 323 changes, indicating coherence and reliability.

324 Table 3. Results for different sets of parameters for the water balance using the conceptual lumped tank model  
 325 during different periods (PPT: precipitation; PET: potential evapotranspiration; RET: real evapotranspiration; DR:  
 326 direct runoff; IF: Interflow; BF: base flow; Q: discharge)

PERIOD	Parameter set	PPT (mm/yr)	PET (mm/yr)	RET (mm/yr)	DR (mm/yr)	IF (mm/yr)	BF (mm/yr)	Q (m <sup>3</sup> /s)	% BIAS
1981-2014	1981-2014	1818	906	753	253	587	224	35.5	39.1
1987	1981-2014	1677.2	994.9	790.5	215.4	434	207	28.6	64.1
1999	1981-2014	2435.1	893	788.1	468.3	892.4	265.4	54.3	38.3
2014	1981-2014	2485.1	932	847.5	493.4	867.4	217.1	52.6	51.9
% change 1987 (1981-2014)		-8.4	8.9	4.7	-17.5	-35.3	-8.2	-24.2	
% change 1999 (1981-2014)		25.3	-1.5	4.5	46.0	34.2	15.6	34.6	
% change 2014 (1981-2014)		26.8	2.8	11.2	48.7	32.3	-3.2	32.6	
1987	1987	1677.2	994.9	936.1	217.5	277.5	135.8	21.0	49.2
1999	1999	2435.1	893.1	873.9	495.4	844.5	203.4	51.5	34.5
2014	2014	2485	932	903.7	669.3	680.7	201.1	51.8	49.9
% change 1987 (1987)		0.0	0.0	15.6	1.0	-56.4	-52.4	-35.8	-30.3
% change 1999 (1999)		0.0	0.0	9.8	5.5	-5.7	-30.5	-5.4	-11.0
% change 2014 (2014)		0.0	0.0	6.2	26.3	-27.4	-8.0	-1.7	-4.0

327

328 The change of use in the soil indicates that evaporation rates are modified, the structure of  
329 the roots and water available for plants is also coupled with a change in the use of the soil,  
330 and finally, the saturated hydraulic conductivity of the soil is affected. These changes are  
331 estimated for each year using a calibration of the tank model, which indicates that for each  
332 period, there is a set of parameters for the model.

#### 333 4 CONCLUSIONS

334 The multitemporal analysis carried out for 1987, 1998, and 2014 concerning changes in land  
335 use and coverage maps in the Chinchiná River Basin, and their impact on water production,  
336 was obtained. All time periods showed decreased water production, detected through the  
337 decreased interflow and base flow, where direct runoff increases, as expected, during land  
338 use and cover changes. The following stand out: retraction of the El Ruiz and Santa Isabel  
339 glaciers, forest reduction, and the increase in agricultural territory.

340 Cultural practices in the Colombian Andean zone show poor agricultural practices, coupled  
341 with steep slopes and climatic variability conditions, intensify the erosive processes. On the  
342 other hand, the reduction of forest cover reduces the flow regulation capacity of the river  
343 basin, stimulating runoff, and therefore, erosive processes as well.

344 These variations in land use areas and coverage are evidence of an increase in the pressures  
345 exerted on water resources. For example, the reduction of forest cover, related to the  
346 increase of exposed soil, modifies the surface and reduces its water storage capacity, which  
347 in turn increases the volume of runoff.

348 This analysis serves as a tool for decision makers in water resource and land management  
349 planning in their hydric, soil, and social aspects, based on freely accessed remote sensor  
350 information .

351       **Acknowledgements**

352       The authors would like to thank the University of Caldas and Universidad Nacional de  
353       Colombia Joint Project: "Multitemporal analysis of change of land use and land cover in the  
354       area of influence of the Los Nevados National Natural Park, a social perspective", for the  
355       support to develop this investigation, and also thank the Institute of Hydrology, Meteorology  
356       and Environmental Studies of Colombia (IDEAM) and CORPOCALDAS for supplying  
357       information.

358       **5 REFERENCES**

- 359       Aldalur, B., & Santamaria, M. 2002. Realce de imágenes : filtrado espacial. *Revista de Teledetección*,  
360       17, 31–42.
- 361       Baranowski, S. 1977. The subpolar glaciers of Spitsbergen seen against the climate of this region.  
362       Acta University Wratisl.
- 363       Ceballos J. & Euscátegui C. 1999. El Cambio Climático sobre los Glaciares Colombianos. V Congreso  
364       de Meteorología. Bogotá.
- 365       Ceballos, J. & Euscátegui, C. 2002. Clima y deglaciación en el Nevado de Santa Isabel. Bogota,  
366       IDEAM, 10 p.
- 367       Ceballos, J.L and Tobón, E. 2007. Glaciares colombianos: evolución reciente y estado actual. *Boletín*  
368       *de Gerología*. 29 (2): 143-151.
- 369       Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. 2009. Summary of current radiometric calibration  
370       coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*,  
371       113(5), 893–903. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- 372       Chuvieco, E. 1995. *Fundamentos De Teledeteccion Espacial (Segunda)*. Madrid: EDICIONES RIALP,  
373       SA.

- 374 Chuvieco, E. 2005 Teledetección ambiental citado por CASTILLO, Martha y Pinta, Juan..Análisis  
375 multitemporal del cambio de uso del suelo con relación a la cobertura vegetal protectora. Trabajo  
376 de grado (Geógrafo). Página 34, 35.
- 377 CORPOCALDAS-Unal (2015) Plan for management and environmental management of the Chinchiná  
378 River Basin, Chapter 4. Technical report. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 55p.  
379 (In Spanish).
- 380 Euscategui, C. 2002. Incidencias de las variaciones del Brillo Solar en la Dinámica Glaciar del Volcán  
381 Nevado de Santa Isabel, Revista Meteorología Colombiana.
- 382 Etter, A., McAlpine, C. Wilson, K., Phinn, S. and Possingham, H. 2006. Regional patterns of  
383 agricultural land use and deforestation in Colombia. Agriculture, Ecosystems & Environment. 14,(2-  
384 4), 2006: 369-386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- 385 Fonseca, J. J. 2003. Análisis Multitemporal Mediante Imágenes Landsat Caso De Estudio: Cambio De  
386 Área Laderas De La Ciénaga De Tumaradó Parque Natural Los Katíos. Universidad Militar Nueva  
387 Granada.
- 388 Flórez, A., 1992. Los Nevados de Colombia, Glaciales y Glaciaciones. Análisis Geográficos. Vol. 22.  
389 Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia. 95 pp.
- 390 Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, Chapin, S.f., Coe, M.T., Daily,  
391 G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H. Holloway, T. Howard, E.A. Kucharik, C.J., Mondfreda, C. Patz,  
392 J.A. Prentice, I.C., Ramankutty, N. Snyder P.K. 2005. Science 309 (5734):570-574. DOI:  
393 10.1126/science.1111772.
- 394 Francés F, Vélez J.I & Vélez J.J. 2007. Split parameter structure for the automatic calibration of  
395 distributed hydrological models. Journal of Hydrology, 332, 226-240.  
396 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>.
- 397 Hasan, K. F. Ali, M.S. and Rahman, M.S. 2011. A Digital Approach of Satellite Image Processing for  
398 Retrieving Surface Parameters. International Journal of Engineering Research and Applications,  
399 1(3), 1242-1246.
- 400 IDEAM. 1997. Los Glaciares Colombianos, expresión del cambio climático. Bogota.



- 401 IDEAM. 2010. Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover  
402 adaptada para Colombia, escala 1:100.000. Area, TH-62-04-1(257), 16.
- 403 INGEOMINAS. 1984. Compilación sobre glaciares en Colombia. Bogotá, Oficina de Planeación,  
404 Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. INGEOMINAS.
- 405 Jaramillo A. 2005. Clima andino y café en Colombia [Andean climate and coffee in Colombia].  
406 Cenicafé Chinchiná Caldas 2005.
- 407 Lambin, E.F., Turner B.L., Geist, H.J. Agbola, S.B., Angelsen, A., Burce, J.W. Coomes, O.T. Dirzo, R.,  
408 Fischer, G. Folke K., George P.S. Homewood, K. Imbernon, J., Leemans, R. Li, X. Moran, E.F.,  
409 Mortimore, M., Ramakrishnan P.S., Richards, J. Skanes, H., Steffen, W. Stone, G.D. Soedin U.,  
410 Veldkamp, T.A. Vogel C., Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving  
411 beyond the myths. *Global environment change* 11: 261-269.
- 412 Lambin, E.F., Geist, H.J. and Lepers, E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in  
413 tropical regions. *Annual Reviews of Environment and Resources*, 28 205-241.  
414 <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>.
- 415 Legesse, D., Vallet-Coulomb, C. and Gasse, F. 2003. Hydrological response of a catchment to climate  
416 and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*  
417 275:67-85 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00019-2)
- 418 Marulanda A., Fonseca O.A., Vélez J.,J., and Cardona, O.D. 2016. Hydrological study of the potential  
419 effects of the melting of Nevado del Ruiz glacier on urban growth zones in Manizales, Colombia.  
420 *Hydrological Sciences Journal* Vol. 61 , Iss. 12,
- 421 Maryland, U. (2016). GLOBAL FOREST CHANGE. Recuperado de  
422 <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>
- 423 Mendoza, J.E. and Etter, R. 2002. Multitemporal analysis (1940–1996) of land cover changes in the  
424 southwestern Bogota highplain (Colombia). *Landscape and Urban Planning*, 59 (3) (2002), pp. 147-  
425 158.

## **D. Anexo: Assessment of pressures on soil resources using DPSIR methodology in the Department of Caldas, Colombia**

Artículo sometido a revisión

Revista: Science of the Total Environment

Número de radicado: STOTEN-S-17-12837

1                   **Assessment of pressures on soil resources using DPSIR methodology in the**  
2                   **Department of Caldas, Colombia**

3                   *Rey Valencia, D.M.<sup>a</sup>, Patiño Rincón, D.A.<sup>a</sup>, Zambrano Nájera J.<sup>b</sup>*

4                   \* *Water Resources Engineering Master, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia* [rlmreyva@unal.edu.co](mailto:rlmreyva@unal.edu.co), [dapatinor@unal.edu.co](mailto:dapatinor@unal.edu.co)

5                   \* *Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia*

6  
7                   **ABSTRACT**

8                   Soil is one of the main natural resources since it provides the physical, biological, and chemical structure necessary for the  
9                   development of humans' productive activities. Therefore, loss of productivity due to soil degradation has become a major  
10                  global problem. Methodologies and protocols have been developed to monitor and assess soil state, such as the DPSIR  
11                  model (FPEIR in Spanish), which has proven to be a valuable tool. This model requires a large amount of information that  
12                  is not currently available in the Department of Caldas, Colombia. Land use and coverage maps have been constructed in  
13                  Colombia since 2010 with the CORINE Land Cover methodology, which allows defining a large part of the indicators  
14                  proposed in the DPSIR framework. Previous methodology was complemented by the construction of flow indicators called  
15                  Land Accounts, which evaluates pressures on soil resources, defines changes over time, measures the speed of those  
16                  changes, and therefore predicts what changes have caused or could cause soil degradation and productivity loss.

17                 **KEYWORDS:** environmental indicators, DPSIR methodology, soil degradation

18  
19                 **1 INTRODUCTION**

20                 Soil is one of the main natural resources and the environment where climate, topography, living organisms, and human activities  
21                 interact. These interactions contribute to the reduced productive capacity of the soil, which is also known as soil degradation,  
22                 which is a major problem worldwide; it is a natural process or human activity that causes partial or total loss of productivity or  
23                 ecological functions and affects the physical, chemical, and biological properties of soils (Ideam & Minambiente, 2012).

24                 When soil is degraded, its functions and services are altered, so it is required to monitor the current status and behavior over  
25                 time and everything that could trigger processes associated with degradation. Behavior analysis is done by analyzing  
26                 spatiotemporal structure (physical, chemical, and biological) and activities that are carried out on the ground. Thus, it  
27                 distinguishes between land use and land cover. Land use refers to a type of coverage useful to humans, and coverage refers to  
28                 natural hedging (Figure 1).

29                 In Colombia, the Sustainable Development and Environmental Ministry (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible;  
30                 MADS), through IDEAM, is developing the *Integrated Soil Resources Management Proposal: Protocol for Soil Degradation*  
31                 (Ideam & Minambiente, 2012), a program to identify soil degradation. This document is preliminary and is in revision. The  
32                 program based on DPSIR framework proposes to monitor soil degradation (Blum, 2004), using a list of sustainable-development  
33                 indicators for monitoring management activities.

34

35 *Figure 1. Soil structure (Osorio Zuluaga & Duque Méndez, 2014)*

36

37 The DPSIR framework considers the following: Driving Forces (D) are the social, demographic, and economic developments in  
38 societies led by human activities; Pressures (P) are forces that threaten soil resources and are caused by drivers; State (S) is  
39 the condition of the abiotic and biotic components of the ecosystem in a certain area; Impacts (I) are effects of degradation and  
40 soil loss on the welfare or well-being of humans through the provision of ecosystem services; and Responses (R) are actions  
41 taken by groups and individuals to compensate or adapt to changes in the state of the environment (Figure 2). This framework  
42 can be defined as a cycle where Drivers exert Pressures that may lead to unintentional or intentional changes in the State of  
43 ecosystems, which have an Impact on the welfare of humans, and this is why humans must have a Response to mitigate or  
44 prevent soil degradation.

45

46 *Figure 2. DPSIR framework applied to soil erosion. Adapted from (Ideam & Minambiente, 2012)*

47 This methodology allows to monitor degradation processes and soil erosion in particular, which is regarded as one of the major  
48 and most widespread forms of degradation (Gobin et al., 2004). Driving forces are grouped according to human activities and  
49 physical phenomena, and in turn the resulting pressures can be advised. Human activities that exert pressures are land use  
50 changes, resource consumption, release of substances, and physical damage through direct contact uses; land use change is  
51 the major pressure indicator for soil erosion. Pressure indicators are evaluated through land cover and use maps (LC maps),  
52 which must be parameterized in order to be compared. For that reason, LC maps are a major tool for creating effective indicators.  
53 Since 2004, Colombia has used CORINE Land Cover methodology as a support for map generation, because this methodology  
54 standardizes national terrestrial coverage legends. Caldas has constructed just one standardized LC map (2010).

55 The present research proposes a methodology for constructing land cover and use maps from remote sensing, which has  
56 become an essential technique for studying and monitoring the main problems of soil degradation (Pérez & García, 2013). Soil  
57 land cover and use maps are generated using medium-resolution satellite images (Landsat 7) (Patiffo Rincón, Rey Valencia, &  
58 J.C., 2016), and this research uses a methodology of indicators that rate soil changes and detect erosion in the Department of  
59 Caldas.

## 60 **2 MATERIALS AND METHODS**

### 61 **2.1 METHODOLOGICAL DESCRIPTION**

#### 62 **2.1.1 Soil Land Cover and Use Map Generation**

63 The main input for analyzing the driving forces and pressures is the soil land cover and use map. The Department of Caldas,  
64 Colombia, has built a map with the legend CORINE Land Cover. "The Corine Land Cover Colombia (CLC) database allows to  
65 describe, characterize, classify and compare land cover characteristics, interpreted from the use of satellite images of medium  
66 resolution (Landsat), which were used for the construction of maps at a scale of 1:100,000" (MINAMBIENTE, 2015).



67 The CORINE Land Cover legend is constituted hierarchically: hedging units are established by the physio gnostic criteria of  
68 height and density and are clearly determined and applicable to all coverage units within the coverage groups of the same type.  
69 This guarantees the possibility of including new units or new levels of units when other units are presented in the study area or  
70 a more detailed study is desired. In Colombia, this was adopted up to the third classification level, with a total of 5 types of  
71 coverage per class, 15 types per subclass, and 57 types in coverage (IGAC, 2010). The Department of Caldas has an official  
72 map of the year 2010, which was built following the CORINE Land Cover methodology (Figure 6).

73 We currently have only the 2010 LCU map, it became necessary to construct a LCU map for different years to compare and  
74 perform trend analysis (flows) on the changes of land use and coverages. This way, it is possible to determine the main causes  
75 of soil degradation. For the development of the new map, images were acquired for free from the Global Forest Change platform  
76 (University of Maryland, Department of Geographical Sciences). These correspond to the 2003 and 2014 Landsat 7 satellite  
77 images of the zone of influence of the department.

78 *Figure 3. Methodology for constructing LCU maps*

79 Subsequently, spatial filtering was performed to improve the image's visual quality, radiometric correction to improve reception  
80 when removing cloudiness, steam, and aerosols; atmospheric correction using the FLAASH model; and geometric correction to  
81 eliminate unwanted shadows. After corrections, classification was performed thus so the values obtained in the map would  
82 correlate with coverage type, process that allows to removed the salt-and-pepper effect, redefined the contours of each identified  
83 cover, and adjusted the national legend (Patiño Rincón, et al., 2016).

#### 84 2.1.2 Indicators Definition

85 In Colombia, the level of soil degradation has been defined by a direct review of soils with the help of experts in the area,  
86 identifying affected areas and the level of degradation. However, such evaluations are costly and time consuming. For this  
87 reason, it is required the development of mechanisms to predict the level of potential degradation with an adequate level of  
88 certainty. To do this it is important to know in detail the causes of degradation.

89 Soil degradation encompasses physical, biological, and chemical deterioration, with physical deterioration causing the worst  
90 consequences. Physical deterioration is one of the major types of soil degradation (Osman, 2014), and it is caused mainly by  
91 water erosion. Erosion is the natural process of detachment of soil particles, which are then transported to and deposited in  
92 other places. Erosion is a natural, normal process, and its rate is low and can be naturally compensated. But human activities  
93 such as deforestation, overgrazing, overfertilizing, and shifting cultivation have accelerated soil erosion beyond tolerance limits;  
94 these human actions are known as driving forces in the DPSIR framework. For this reason, water erosion monitoring is a major  
95 objective of analysis for degradation assessment.

96 The DPSIR framework provides a basis for monitoring problems arising from the competition between concurrent uses, both  
97 ecological and socio-economic. It allows identifying possible driving forces grouped according to human activities in the area of  
98 study and the physical phenomena that results in pressures on soil. Human activities can be monitored through LCU maps,

299 where activities such as population dynamics, agriculture, transport, and cattle raising are driving forces (human activities) that  
300 may change land cover, the major pressure indicator for soil erosion.

301 Within the DPSIR framework, land use (driving forces or human activities) and land cover (pressures) are analyzed  
302 independently, although they are heavily intertwined and have to be understood according to natural and geographical traits.  
303 The interaction between land use and land cover at multiple scales allows understanding how the first influences and modifies  
304 the second.

305 For that reason, the European Environment Agency has developed an asset account for land to provide information for  
306 determining the state of and changes in land use and land cover and their interconnections. This methodology is called land  
307 accounts (Afferl, Clarke, Havinga, & Weber, 2011) and describes an area of land (stocks) and its changes during an accounting  
308 period (flows). When a land cover type stock is lost, then it is considered consumed; when the land is transformed and generates  
309 a new land cover type, then that type is considered formed (Figure 4) (Haines-Young, Weber, & Pama, 2006).

310 *Figure 4. Consumption and formation definition. Adapted from (DG-JRC, IES, & EEA, 2006)*

### 311 3 APPLICATION

#### 312 3.1 Study Area

313 The Department of Caldas is located between 05°46'51" and 04°48'20" N latitude and between 74°38'01" and 75°55'45" W  
314 longitude in the central region of Colombia. The Department of Caldas has an area of 7.436 km<sup>2</sup>, corresponding to 0.7% of the  
315 country's total surface. The department has a strong altitudinal gradient ranging from 123 to 5.289 m.a.s.l., because it has a  
316 variety of thermal floors and, consequently, soils with very different characteristics (Figure 5).

317 The department's landscape is characterized by mountains, hills, and valleys, and these determine land use because they add  
318 factors such as slope, drainage, and climate and constrain temporal space applications of soil use and land cover. In Caldas,  
319 the major uses and coverage are agriculture and livestock combined (28%), soil conservation (27%), forestry (23%), agriculture  
320 (20%), and livestock (2%) (Corpocaldas & Igac, 2012).

321

322

323

324

325

#### Land Cover Maps

326 Major land cover types were identified from satellite image pre-processing and spectral analysis. The 2000 and 2014 LCU maps  
327 were generated, identifying four land cover types per class and eight per subclass (Figures 6 and 8), making them comparable  
328 with the 2010 official map (Figure 7).

329 *Figure 1. Land use and cover map for the Department of Caldas, 2000 (Landsat 4) and 2014 (Landsat 8)*

330 *Figure 2. Land use and cover map for the Department of Caldas, 2010 (Corpocaldas & Igac, 2012)*

131 **4 RESULTS**

132 **4.1 Stock of Land Cover for the Department of Caldas**

133 Caldas is covered largely by pastures and forests (51% of the total area). The annual land cover change rate has an increasing  
 134 tendency. The main drivers of change in both periods considered (2000–2010 and 2010–2014) were the uptake of forests and  
 135 semi-natural land by agriculture and agricultural land uptake by other coverage. Pasture use decreased in 2000–2010 and then  
 136 increased in 2010–2014, as seen in Figure 8. In addition, agricultural land (heterogeneous agricultural areas and permanent  
 137 crops) increased by 10.3% in 2000–2010 and decreased by 1.7% in 2010–2014. Forest coverage decreased by 9% in 2000–  
 138 2010 and 3.1% in 2010–2014.

139 *Figure 8. Percentages of land use and land cover for the years 2000, 2010, and 2014*

140 Flows considered important for analysis were categorized by Feranec et al. (2000) as follows:

- 141 • **Intensification of agriculture:** The changing of permanent agriculture into heterogeneous agriculture areas.
- 142 • **Extensification of agriculture:** The changing of agricultural land to pasture or grassland. This is related to intensified  
 143 cattle raising; cattle threaten the soil because they armor it, increasing surface runoff and thus erosion.
- 144 • **Urbanization:** The changing of mainly agricultural and forest land into urbanized areas.
- 145 • **Afforestation:** New forest lands created by humans (meadows, arable land, or pastures). This flow is not analyzed in  
 146 this paper because of a lack of information.
- 147 • **Deforestation:** The felling or devastation of forests induced by anthropogenic activities or natural disasters. Eliminating  
 148 forests diminishes water infiltration in soil and thus increases surface runoff, which in turn increases water erosion.

149 **4.2 Overview of Land Cover Change for 2000–2010 and 2010–2014**

150 In Caldas, the net formation was  $-4.74 \text{ km}^2$  and  $-5.52 \text{ km}^2$  in the 2000–2010 and 2010–2014 periods, respectively. From this net  
 151 formation we can observe (Table 1) that the subclasses with the highest consumption were pastures, forests, and heterogeneous  
 152 agricultural areas in the period 2000–2010, while in 2010–2014 the consumption of forests fell considerably and pastures and  
 153 heterogeneous agricultural areas stayed the same. The formation of new areas in 2000–2010 was much higher for  
 154 heterogeneous agricultural areas compared with the other subclasses, whereas in the 2010–2014 period the formation of  
 155 pastures and heterogeneous agricultural areas was outstanding.

156 **TABLE 1. SUMMARY BALANCE 2000–2010 AND 2010–2014**

157  
 158  
 159

160 In addition, there was a change in net formation trends for the subclasses permanent crops and areas with herbaceous  
 161 vegetation (in the 2000–2010 period, they presented formation, while in the 2010–2014 period they had consumption or loss of  
 162 area); in pastures, the opposite happened (Figure 9, left). On the other hand, observing the net changes per year, it is observed  
 163 that the permanent crops presented very high consumption per year in the period 2010–2014, followed with a much lower rate

164 by forests and areas with herbaceous vegetation (Figure 9, right), while pastures and agricultural areas showed high change  
165 rates in the same period. It is important to note that in both periods deforestation continues to be persistent, and although the  
166 deforestation rate decreased, that rate is very low compared to the increased rates for pastures and agricultural areas (Figure  
167 9, right).

168 *Figure 3. Net change in land cover and soil uses for the 2000–2010 and 2010–2014 periods for the Department of Caldas*

#### 169 4.2.1 Intensification of Agriculture

170 From the analysis of heterogeneous agricultural areas and permanent crops it is concluded that in the 2000–2010 period there  
171 was a great intensification of agricultural activities, increasing the agricultural frontier from 1,835.55 km<sup>2</sup> to 2,593.38 km<sup>2</sup>.  
172 However, in the 2010–2014 period, there was a slight decrease in the area cultivated (from 2,593.38 km<sup>2</sup> to 2,473.48 km<sup>2</sup>),  
173 showing a very strong change in the dynamics presented. Permanent crops showed the greatest change, since in the 2000–  
174 2010 period a large percentage of the new crop area formed came from pastures and heterogeneous agricultural areas, whereas  
175 in the 2010–2014 period the dynamics were completely the opposite: the permanent crop area was consumed to form the two  
176 previous subclasses (Figure 11, left). In other words, there is a great dynamic of changes from pastures to crops and vice versa.  
177 Thus, the permanent crops and heterogeneous agricultural areas were formed at a rate of 43.64 km<sup>2</sup>/year and 33.62 km<sup>2</sup>/year,  
178 respectively, in the 2000–2010 period. In the 2010–2014 period, however, the permanent crops lost area at a rate of 51.68  
179 km<sup>2</sup>/year, while new heterogeneous agricultural areas were formed at a rate of 97.30 km<sup>2</sup>/year in the same period. This shows  
180 great rotation of crop types, losing permanent crops to others types and rotating agricultural areas with pasture areas.

181 *Figure 4. Consumption and formation balance of (left) permanent crops and (right) agricultural areas*

182 In addition, from the analysis of spatial information, it can be observed that in the 2000–2010 period the heterogeneous  
183 agricultural areas were formed mainly in the eastern part of the Department of Caldas, where municipalities have traditionally  
184 based their economic activity on horticulture and potato cultivation (Figure 11). In the 2010–2014 period, there is a similar  
185 situation in the center of the department (Figure 12).

186 *Figure 5. Formation of heterogeneous agricultural areas in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

187 *Figure 6. Consumption of heterogeneous agricultural areas in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*



188 **4.2.2 Extensification of Agriculture**

189 Pasture coverage is related to cattle raising, and this use increased in both periods analyzed. The balance shows that the  
190 formation of new pasture areas occurred mainly in heterogeneous agricultural areas, principally in the second period analyzed,  
191 as well as consumption and permanent crops (Figure 13), which confirms the wide rotation between crops and pastures.

*Figure 7. Consumption and formation balance for a) 2000–2010 and b) 2010–2014*

192

193 The spatial analysis of these flows shows that in the 2000–2010 period, formations were presented mainly in the central-north  
194 zone municipalities (Figure 14, left), while in the 2010–2014 period they were located in the north-west zone (Figure 14, right).  
195 On the other hand, consumption occurred mainly in the first period in the western zone, and in the second period, in the central  
196 zone of the department (Figure 15).

*Figure 8. Formation of pastures in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

197

*Figure 9. Consumption of pastures in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

198

199 The rotation of crops to livestock represents increased pressures exerted due to overgrazing; soil surface and the depth of  
200 organic matter is reduced, preventing plant growth, reducing natural infiltration capacity of soil, and increasing soil loss through  
201 water erosion.

202 **4.2.3 Deforestation**

203 Forest coverages require large expanses of land and time for their development, which is why they are very vulnerable compared  
204 with other classes of coverages. This is evidenced in the balance shown in Figure 16, which shows the prevalence of forest area  
205 loss in both periods (consumption) in favor of heterogeneous agricultural areas and permanent crops. However, in 2010–2014  
206 there was a decrease in the deforestation rate from 62.65 km<sup>2</sup>/year to 58.35 km<sup>2</sup>/year due to the acquisition of 11,674 hectares  
207 of land for protection by an ISAGEN enterprise in the sector where the La Miel hydroelectric reservoir is located (ISAGEN S.A.  
208 E.S.P., 2015). Forest formation is mainly in the eastern zones (2000–2010) and in the northeastern zone (2010–2014) of the  
209 Department of Caldas (Figure 17).

*Figure 10. Consumption and formation balance for forests in a) 2000–2010 and b) 2010–2014*

210

*Figure 11. Formation of forests in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

211

212 The loss of forest area in both periods occurred in the central and northern areas of the department, and the most marked impact  
213 is in the north-east zone, the location of the most important forest reserve in the Department of Caldas (Florence Forest) (Figure  
214 18).

*Figure 12. Consumption of forests in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

215

#### 216 4.2.4 Urbanization

217 The artificial cover in Caldas tends to increase because in both analyzed periods, a net formation of 5.65 and 1.52 km<sup>2</sup>,  
218 respectively, was presented, mainly from heterogeneous agricultural areas and grasslands (Figure 19). The artificial territory  
219 represented 0.6% of the total area of Caldas in 2014, and the growth was mainly in the capital of the department, as shown in  
220 Figure 20 and Figure 21. The main growth for the period 2000–2010 was in the north-west and center zone of the city of  
221 Manizales, and in the 2010–2014 period in the south-central and south-east of the city.

*Figure 13. Consumption and formation balance for artificial lands in a) 2000–2010 and b) 2010–2014*

222

*Figure 14. Formation of artificial areas in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

223

*Figure 15. Consumption of artificial areas in the 2000–2010 and 2010–2014 periods in the Department of Caldas*

224

225 Urban sprawl in the Department of Caldas for the 2000–2010 and 2010–2014 periods was presented mainly in municipal  
226 headers. It causes soil degradation because of the increased pressures exerted on the resource and because urban areas have  
227 larger portions of impermeable surfaces.

#### 228 6 CONCLUSIONS

229 The coverages with the highest annual changes were forests (-61.42 km<sup>2</sup>/year), heterogeneous agricultural areas (+49.12  
230 km<sup>2</sup>/year), and areas with herbaceous or shrub vegetation (-11.46 km<sup>2</sup>/year).

231 Consumption and formation are dynamic processes and are associated with the spatial and temporal characteristics of the area  
232 of interest. For example, in the 2010–2014 period, the Department of Caldas presented greater change in the pastures subclass  
233 than in the 2000–2010 period, which was related directly to an increase in cattle activity in the last five years. This phenomenon  
234 could also be due to the loss of coffee production.

235 The unbalance (consumption vs. formation) is remarkable in the subclasses with the greatest extension in Caldas. This  
236 represents an increase in the pressures exerted on the resource, and it means that the productive capacity could be directly  
237 affected—in other words, it is defined as a soil with a certain level of degradation.

238 Forest was the most threatened subclass, both by spatial distribution and by the degree of annual net change, since the zones  
 239 of high consumption in the 2000–2010 and 2010–2014 periods were located in areas that have been characterized as having  
 240 large areas of rainforests and other forests. In addition, those areas are located in basins that supply water for most of the  
 241 aqueducts of the Department of Caldas.

242 In terms of degradation, deforestation flow in the 2000–2010 and 2010–2014 periods represented an increase in the pressures  
 243 exerted on soil. This results in the loss of the water supply for the area, affecting the hydrological cycle of the main basins of the  
 244 Department of Caldas.

245 The urban sprawl flow showed a tendency towards increase; in the 2000–2014 period there was an annual growth of 1.17% in  
 246 the coverage of artificial areas, which was concentrated in the municipal head of the department.

247 The land use and cover flows indicator could be a major tool in soil management, since balances (consumption and formation)  
 248 of each subclass demonstrated the imbalances presented, and this in turn allows evaluating soil degradation. Through these  
 249 indicators, decision-makers can take action to improve soil conditions.

## 250 8 REFERENCES

- 251 Afferi, A., Clarke, D., Havinga, I., & Weber, J. L. (2011). *Note on Land Cover and Use Classifications*. Paper presented at the  
 252 Expert Meeting on Ecosystem Accounting.
- 253 Blum, W. (2004). *Soil Indicators for decision making - sharing knowledge between science, stake holders and politics*. Paper  
 254 presented at the ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation Conference.
- 255 CORPOCALDAS, & IGAC. (2012). *Estudio Semidetallado de Suelos de los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina,  
 256 Neira y Villamaría*. Bogotá, Colombia.
- 257 DG-JRC, IES, & EEA. (2005). *IMAGE2000 and CLC2000 products and methods. CORINE Land cover updating for the year  
 258 2000*. Italia: European Commission-Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European  
 259 Environment Agency.
- 260 Feranec, J., Šurl, M., Otáhel, J., Cebecauer, T., Kolář, J., Goukup, T., et al. (2000). Inventory of major landscape changes in  
 261 the Czech Republic, Hungary, Romania and Slovak Republic 1970s–1990s. *International Journal of Applied Earth  
 262 Observation and Geoinformation*, 2(2), 129–139.
- 263 Gobin, A., Jones, R., Kirkby, M., Campbell, P., Govers, G., Kosmas, C., et al. (2004). Indicators for pan-European assessment  
 264 and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science & Policy*, 7(1), 25–38.
- 265 Haines-Young, R., Weber, J., & Parra, F. (2005). *Land accounts for Europe 1990–2000. Land accounts for Europe 1990–  
 266 2000*.
- 267 IDEAM, & MINAMBIENTE. (2012). *Propuesta del Programa Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la degradación de suelos  
 268 y tierras en Colombia: Diseño Estructura y Estrategias para su Implementación*.
- 269 IGAC. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover. Adaptada para Colombia.  
 270 Escala 1:100.000*.
- 271 ISAGEN S.A. E.S.P. (2015). *Informe de gestión ambiental*. Medellín, Colombia.
- 272 MINAMBIENTE. Sistema de Información ambiental de Colombia - SIAC. 2015, from <http://www.ideam.gov.co/web/siac/suelo>.
- 273 Osman, K. T. (2014). *Soil degradation, conservation and remediation*. New York: Springer.
- 274 Osorio Zuluaga, G. A., & Duque Méndez, N. D. (2014). *Definición de los indicadores de la Línea Base Ambiental de Caldas.  
 275 Manizales*.
- 276 Patiño Rincón, D. A., Rey Valencia, D. M., & J.c, Z. N. (2016). *Evaluación de la influencia de los cambios de uso y cobertura  
 277 del suelo en la degradación utilizando imágenes satelitales*. Paper presented at the XXVII Congreso Latinoamericano de  
 278 Hidráulica.
- 279 Pérez, M. E., & García, M. P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de La Asociación de  
 280 Geógrafos Españoles*, 61.
- 281 University of Maryland -Department of Geographical Sciences. *Global Forest Change 2000-2014*. 2015, from  
 282 <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>



## 9. Bibliografía

- Ali, M., Hadi, S., & Sulistyantara, B. (2016). Study on Land Cover Change of Ciliwung Downstream Watershed with Spatial Dynamic Approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 227(November 2015), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.042>
- Bernal, S. M., & Prado, C. A. (2015). Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería*, 29.
- Bernardini, A., Malinverni, E. S., Zingaretti, P., & Mancini, A. (2008). Automatic Classification Methods of High-Resolution Satellite Images : the Principal Component Analysis Applied To the Sample Training Set. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 701–706.
- Burman, R. D., & Pochop, L. (1994). *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Elsevier, 1994.
- Castañeda, Y. (2016). Modelación del efecto de cambio de uso del suelo en la cuenca del río Coello, escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (soil and water assessment tool). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Del Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 111.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledetección Espacial (Segunda)*. Madrid: EDICIONES RIALP, SA.
- Corpocaldas. (2008). *Definición de los indicadores de la línea base ambiental de caldas*. Manizales Colombia: Corpocaldas.
- Corpocaldas, & IGAC. (2012). Estudio Semidetallado de Suelos de los municipios de Manizales, Chinchina, Palestina, Neira y Villamaría. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, 190–210.
- Corpocaldas, & UNAL. (2012). *Aplicación de la modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual en el departamento de Caldas para eventos extremos*. Manizales Colombia.
- CORPOCALDAS, & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná departamento de Caldas –POMCA Chinchiná*. Manizales Colombia.

- Crespi, M., & de Vendictis, L. (2009). A procedure for high resolution satellite imagery quality assessment. *Sensors*, *9*, 3289–3313. <https://doi.org/10.3390/s90503289>
- Donado, L., & Colmenares, J. (2004). Modelo de conductividad hidráulica en suelos. *Tesis de Magíster En Ingeniería - Recursos Hidráulicos Universidad Nacional Sede Bogota*, 180.
- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, *31*(8), 1167–1181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Florenchie, P., Reason, C. J. C., Lutjeharms, J. R. E., Rouault, M., Roy, C., & Masson, S. (2004). Evolution of interannual warm and cold events in the Southeast Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, *17*(12), 2318–2334. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2318:EOIWAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2318:EOIWAC>2.0.CO;2)
- Fonseca, J. J., & Gomez, S. M. (2003). Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat caso de estudio: cambio de área laderas de la ciénaga de Tumaradó parque Natural Los Katíos. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, *332*(1–2), 226–240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Gómez-Tagle Ch, A., Gómez-Tagle R, A. F., Batlle-sales, J., Zepeda, H., Santamaría, M. G., Maldonado, S., & Emmanuel, L. J. (2008). Field Saturated Hydraulic Conductivity : Use of a Portable Constant-Head and Single-Ring Infiltrometer. *Terra Latinoamericana*, *26*(4), 287–297.
- Haines-Young, R. (2009). Land use and biodiversity relationships. *Land Use Policy*, *26*(SUPPL. 1), 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.009>
- Ideam. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. *Area*, *TH-62-04-1*(257), 16.
- IDEAM. (2005). Atlas climatológico de Colombia. *Ideam, Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo*, 219.
- IDEAM. (2008). *Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia*.
- IDEAM. (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través Análisis de Componentes Principales (ACP) . *Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático*, 1–55.
- Ioannis, M., & Meliadis, M. (2011). Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover / use in the Prefecture of Thessaloiniki , Greece. *Ecology*, *1*(1), 15–25.
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná.
- Lara, B. (2015). Facultad de Agronomía Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires mediante imágenes LANDSAT Alumno : Prof . Bruno Lara. *Universidad Nacional Centro de La*

*Provincia de Buenos Aires, (June).*

- Mani, K. (2012). Land use and land cover changes detection using multi temporal satellite data Devikulam Taluk, Idukki district, Kerala. *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES*, 3(1), 1420–1429.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., & Llorente-Pinto, J. M. (2010). Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountains of Duero River basin (Central Spain). *Global and Planetary Change*, 72(1–2), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.03.003>
- Muthusamy, Arunkumar, R., Naveem Raj, T., & Lakshumanan, C. (2011). Land Use and Land Cover Changes Detection Using Multitemporal Satellite Data, Cuddalore Coastal Zone, Se-Coast of India. *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES*, 1(3), 669–677.
- NOAA. (2018). National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Ocampo, O. (2013). Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas. *Universidad NACIONAL DE COLOMBIA*.
- Ocampo, O., Vélez, J., & Londoño, A. (2012). Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*.
- Ocampo, O., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña : caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43–58.
- Pabón, J. D., Rodríguez, N., Bernal, R., & Martínez, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2010.
- Pasquato, M. (2011). *Modelación dinámica y distribuida de la vegetación en climas semiáridos, aplicación de la cuenca de Valdifierno*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Patiño, D. A., Ocampo, O., & Vélez, J. J. (2014). *Efectos de la oscilacion del sur en el régimen hidrológico de la cuenca del río Chinchiná, Colombia. XXI SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*.
- Pena, J. (2007). Efectos ecológicos.
- Pérez, P., Francesa, M., Zema, D., & Vente, J. (2009). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). *Chungará*, 39(1), 1–13. <https://doi.org/10.4067/S0717->
- PNUD. (2000). Panorama del impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe, 55.
- Polo, M. J., Lafuente, P., & Giráldez, J. V. (2003). Variabilidad espacial de la conductividad

- hidráulica saturada en suelos de olivar y su influencia en el balance hidrológico global. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, 6(January), 209–213.
- Posada, L. E. (2011). Efecto del cambio de las coberturas del suelo sobre la geomorfología contera en las cuencas de los ríos Acandí y Turbo del Golfo de Urabá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (EL Niño y la Niña) y su influencia sobre la Hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica En México*, XI, 31–37.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. a., Moreno, H. a., Vieira, S. C., ... Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133, 228–240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Poveda, G., Mesa, O., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. *Climate and Water*. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15)
- RamaKrishnan, R., Manthira Moorthi, S., Prabu, S., & Swarnalatha, P. (2013). Comparative analysis of various methods for preprocessing of satellite imagery. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(1), 431–437.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichfet, T., Fyve, J., ... Taylor, K. E. (2007). Climate Models and Their Evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 591–662. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.06.045>
- Román, S. (2010). Evapotranspiración Real y Potencial. ET de referencia. *Departamento de Geología Universidad Salamanca*, 1–10.
- Rudas, G., Marcelo, D., Armenteras, D., Rodriguez, N., & Morales, M. (2007). Biodiversidad Y Actividad Humana : Relaciones En. *Intituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*.
- Ruiz, V. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Mirafior Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. *Ecosistemas, Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 22(3), 117–123.
- Sahagún-sánchez, F., & Reyes-hernández, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental , México Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental , Mexico. *Biología y Química*, 12(2), 6–21.
- Sánchez, L. (2004). Tipos De Coordenadas Manejados En Colombia, 17.
- Symeonakisab, E., Caccetta, P. A., Wallace, J. F., & Koukoulas, S. (2006). Multi-temporal land use/cover change detection in the spanish mediterranean coast. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.
- Torahi, A. A., & Rai, S. C. (2011). Land Cover Classification and Forest Change Analysis , Using Satellite Imagery - A Case Study in Dehdez Area of Zagros Mountain in Iran. *Journal of*

- Geographic Information System*, 3(January), 1–11. <https://doi.org/10.436/jgis.2011.31001>
- UNAL, & Corpocaldas. (2016). *Índicadores ambientales de Caldas*.
- Velásquez, A., & Rosales, C. (2002). Los pasos del Niño en Colombia 1980-2001. *Universidad Del Valle*.
- Vélez, I. (2001). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. *Tesis Doctoral Univesdad Politécnica de Valencia*, 296.
- Vélez, J. I., Poveda, G., Mesa, O., Hoyos, C. D., Salazar, L. F., & Mejía, J. F. (2002). Modelo de interacción suelo-atmósfera para la estimación de caudales medios mensuales en colombia, 81–89.
- Vélez, J. J., & García, F. F. (2008). Calibración automática de las condiciones iniciales de humedad para mejorar la predicción de eventos de crecida Resumen. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 0(18), 25–36.
- Villegas, J. C. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el departamento de antioquia. *Revista EIA*, 1(1794–1237), 73–79.
- Vittek, M., Brink, A., Donnay, F., Simonetti, D., & Desclée, B. (2013). Land cover change monitoring using landsat MSS/TM satellite image data over west Africa between 1975 and 1990. *Remote Sensing*, 6(1), 658–676. <https://doi.org/10.3390/rs6010658>
- Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>