

**ANÁLISIS HÍDRICO DEL PÁRAMO DE PISBA POR VARIACIÓN
MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL**

LUIS FERNANDO QUINTERO VARGAS

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

TUNJA

2016

**ANÁLISIS HÍDRICO DEL PÁRAMO DE PISBA POR VARIACIÓN
MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL**

LUIS FERNANDO QUINTERO VARGAS

**Proyecto de grado en modalidad “Tesis” presentado como requisito para
obtener el título de Ingeniero Civil.**

Directora de Tesis

Ingeniera Laura Natalia Garavito Rincón

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA

2016

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Tunja, __ de _____ de 2016

AGRADEMIENTOS

Agradecimiento a la ingeniera Laura Natalia Garavito Rincón, directora de tesis, cuyo empeño y dedicación han propiciado la culminación de este proyecto, así como mi crecimiento profesional y humano.

A mi familia por su constante apoyo y colaboración en el desarrollo de actividades relacionadas a este proyecto, así como la culminación del proceso académico

Dedicado a mi familia por su constante apoyo, consejos y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
ABSTRACT	11
1. PROBLEMA DE INVESTIGACION.....	14
1.1. Preguntas de Investigación.....	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	22
3.1. OBJETIVO GENERAL	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4. ESTADO DEL ARTE	23
5. MARCO TEORIO	28
5.1. Páramo	28
5.1.1. Normativa.....	29
5.2. Teledetección.....	30
5.2.1. Clasificación de la Teledetección	31
5.2.2. Imágenes Landsat:.....	32
5.2.3. Clasificación de las imágenes LandSat.....	33
5.3. Procesamiento de las imágenes Landsat:	35
5.3.1. Corrección Geométrica	35
5.3.2. Corrección Radiométrica.....	36
5.4. Modelamiento Hidrológico	36

5.4.1.	Software de Modelación Hidrológica	38
5.4.2.	Modelación y Calibración del modelo hidrológico.....	39
6.	METODOLOGIA.....	40
6.1.	Método de Investigación	40
6.2.	Materiales y Herramientas	40
6.2.1.	Computador:.....	40
6.2.2.	Libros y publicaciones:	41
6.2.3.	Software Arcgis, Swat y Swat-Cup.....	41
6.2.4.	Excel	41
6.2.5.	Word.....	41
6.2.6.	Imágenes Satelitales tipo Landsat.....	42
6.3.	Metodología de la investigación.....	42
6.3.1.	Análisis multitemporal de la cobertura vegetal – suelo.....	42
6.3.2.	Análisis lluvia-escorrentía.....	46
7.	RESULTADOS	53
7.1.	Delimitación del área de estudio	53
7.2.	Climatología.....	55
7.2.1.	Economía:	56
7.2.2.	Descripción de la zona de estudio:.....	58
7.3.	Análisis Multitemporal de la cobertura del suelo	58
7.3.1.	Procesamiento de imágenes satelitales	58
7.3.2.	Corrección Geométrica	59
7.3.3.	Corrección Radiométrica.....	60
7.4.	Generación de mapas de cobertura vegetal y geología.....	64

7.4.1.	Clasificación no supervisada	64
7.4.2.	Clasificación y generación de mapas de cobertura vegetal.....	66
7.5.	Análisis Multitemporal 1985-2015	70
7.6.	Modelamiento Hidrológico	75
7.6.1.	Mapa Geológico	77
7.6.2.	Modelamiento.....	78
7.6.3.	Calibración	79
7.7.	Cambios presentados	81
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
9.	GLOSARIO.....	87
10.	BIBLIOGRAFÍA	90
11.	APÉNDICES Y ANEXOS	103
11.1.	Anexos mapas cobertura de suelo	103
11.2.	Anexos Calibración.....	110

TABLA DE MAPAS

Pág.

Mapa 1	Localización de la zona de estudio	54
Mapa 2	Actividad minera en la zona de estudio	57
Mapa 3	Clasificación de coberturas vegetales año 2007	69
Mapa 4	Definición de la zona de estudio, SWAT	76
Mapa 5	Clasificación geológica FAO-UNESCO para la zona de estudio	77

LISTADO DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Bandas espectrales según el tipo de satélite.....	33
Tabla 2. Combinaciones de bandas espectrales empleadas en teledetección ...	34
Tabla 3. Modelos hidrológicos e hidrogeológicos	38
Tabla 4. Constantes de calibración para sensores TM y ETM+	61
Tabla 5. Parámetros para la clasificación de la cobertura vegetal.....	67
Tabla 6. Cobertura vegetal clasificada en los años seleccionados del periodo 1985-2015.....	70
Tabla 7. Cambio de la cobertura vegetal	74
Tabla 8. Resultados Calibración periodo 1985-2015 Estación Capitanejo	80

Tabla de Figuras

	PAG.
Figura 1 Recursos explotados en la zona de estudio.....	16
Figura 2 Mapa de procesos Primera fase.....	46
Figura 3 Mapa de procesos Segunda Fase.....	52
.....	52
Figura 4 Resultados modelación año 1997 Observados, Simulados con registros del IDEAM y Simulados con registros del CMIP3	55
Figura 5 Funcionamiento de la herramienta Extract By Mask	59
Figura 6 Proceso Extract By Mask, Año 2007, Bandas 4,5,3	60
Figura 7 Pasos en la corrección radiométrica año 2001, Bandas 3, 2, 1.....	62
Figura 8 Comparación imagen corregida y sin corregir, año 2003, Bandas 4,5,3 63	63
Figura 9 Imagen Landsat 7 SLC Off, antes y después del GapFill	63
Figura 10 Clasificación no supervisada. Año 2007, Bandas 4,5,3.....	65
Figura 11 Shape de clasificación no supervisada, año 2007.....	66
.....	66
Figura 12 Variación del nevado del Cocuy Año 1986 5.....	72
Figura 13 Cobertura vegetal registrada para el periodo 1985-2016 en los años analizados 73	73
Figura 14 Tasa de Cambio Anual – TAC (%)	74
Figura 15 Perdida y Ganancia - Páramo de Pisba	75
Figura 16 Comportamiento del caudal simulado y observado sin calibrar, año 2007 78	78
Figura 17 Simulación con tormenta de diseño mensual para las distintas coberturas analizadas en el periodo 1985-2015	82

RESUMEN

Los páramos como ecosistemas representan un bien estratégico de importancia nacional y regional, debido a su papel como regulador hídrico absorbiendo humedad en periodos húmedos y liberándola en tiempos de sequía, es por esto que se hace imperiosa su protección y cuidado frente a factores naturales como la erosión e incendios naturales así como frente a actividades humanas invasivas como la minería, la agricultura, la ganadería, entre otras, y los comportamientos irresponsables que pueden conllevar a incendios forestales provocando la degradación de la cobertura vegetal, compuesta principalmente por frailejones, responsables de la función del ecosistema como regulador hídrico.

Es por esto que el presente proyecto busca analizar los efectos generados sobre el páramo de Pisba, a través del análisis y modelamiento hídrico de las subcuencas pertenecientes al mismo para el periodo 1985-2015, empleando para tal fin imágenes satelitales tipo Landsat que cumplan con características de calidad que permitan el correcto análisis de las mismas, y cuyo porcentaje de nubosidad sea inferior al 5% en la zona a modelar, posteriormente se genera el mapa geológico con ayuda del atlas geológico Colombiano y el atlas geológico mundial de la FAO-UNESCO, para finalmente, empleando datos climatológicos proporcionados por el IDEAM, generar el modelo hidrológico para su posterior calibración empleando Swat-Cup por medio del modelo matemático Sufi2, esto permitirá analizar el comportamiento de la respuesta hídrica frente a los diferentes periodos y cambios de cobertura vegetal, así determinando el grado de afectación sobre las corrientes hídricas en la zona de estudio.

ABSTRACT

The Paramo as an ecosystem represents regional and national importance strategic good due to its paper as hydric regulator, absorbing humidity in dry times and releasing it at wet ones, it's because of that that its protection and care becomes imperious against natural factors as erosion, and wildfire, also against human invasive activities as the mining, agriculture, farming, etc. And the irresponsible behaviors that could produce wildfires and the land cover degradation, mainly composed of frailejones, responsables from the ecosystem's water regulation function.

Its due that that the present project its locking for the generated effects against the Pisba's Paramo, due to the analysis and hydric modeling of the subbasins for the 1985-2015 period, using for that some Landsat type satellite images, whose quality characteristics allow the right analysis from themselves, and their cloudiness be minimum to generate adequate land cover maps; later the geological maps gets generated with the help of Colombia's geological atlas, and World's FAO-UNESCO geological survey atlas, to finally, employing IDEAM's climate data, generate the hydrological model for its calibration in every year using SWAT and Swat-Cup with Sufi's2 math model.

INTRODUCCION

Los páramos son un ecosistema tropical de montaña de gran importancia debido a su capacidad de interceptar, almacenar y regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos a su vez que son el origen de numerosos ríos que alimentan la industria, la generación de energía, la agricultura y las necesidades básicas de las poblaciones del país a las cuales surte (Ambiente, 2002), funciones las cuales dependen directamente del tipo y uso de la cobertura vegetal.

Los páramos se encuentran principalmente en el continente americano entre las latitudes 11°N y 8°S sobre la cordillera de los Andes, presentándose en mayor cantidad en Venezuela, Colombia y Ecuador, seguidos de Costa Rica, Panamá y el norte de Perú donde son menos frecuentes (Luteyn, 1999). Entre las amenazas a este ecosistema se encuentran el calentamiento global, la agricultura, la minería, los incendios forestales entre otros, factores que afectan la cobertura vegetal del ecosistema y por lo tanto su capacidad como regulador del recurso hídrico. En el contexto nacional, Colombia gracias a su ubicación, y condiciones geográficas alberga numerosos paramos que ocupan aproximadamente 1'141.748 km² de la superficie del país, equivalente al 2.58%. (Banco de Occidente, 2001). El páramo de Pisba está ubicado entre los departamentos de Boyacá y Casanare, Esta región paramuna al pertenecer a la cordillera oriental, presenta un relieve muy variado, identificándose laderas suaves escarpadas, lomas, colinas, crestas y depresiones. La zona también se caracteriza por tener una estrella hídrica, una zona de endemismos, y por varias lagunas de origen glaciario, las cuales aportan a las cuencas del río Chicamocha y Magdalena. Sin embargo, a lo largo de los años se ha visto afectada la integridad del territorio, el cual se ha ido transformando por la intervención del hombre, por zonas de pastos, cultivos y zonas dedicadas a la minería, afectando la zona de recarga hídrica y el área de amortiguación del páramo. (Fernandez, 2015).

Este proyecto abarca la adquisición y el preprocesamiento de las imágenes satelitales tipo LandSat, así como datos hidroclimatológicos necesarios para la generación de mapas de cobertura vegetal, bases de datos climatológicas, entre otros, con los cuales se generan los respectivos análisis estadísticos de cambio en la cobertura vegetal en el periodo 1985-2015, necesarios para el desarrollo de un modelo hidrológico, cuyas condiciones simulen con cierto grado de certeza las condiciones reales de la zona de estudio, el cual, como indicador de calidad debe ser calibrado para que el resultado de la modelación se ajuste en mayor medida a los valores registrados por estaciones pluviométricas y pluviográficas de la zona, con lo que se podrá determinar el grado de afectación ecosistémica y su influencia negativa o positiva sobre la recarga hídrica.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACION

Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña, estos se ubican por debajo de las nieves perpetuas y encima de los bosques (Paramos.org, 2010), se presentan desde los 3.200 m.s.n.m, hasta aproximadamente los 4200 m.s.n.m y localizados en las cordilleras de los andes, desde Venezuela hasta Colombia pasando por Ecuador (Minambiente, 2016); Los ecosistemas paramunos, en estado natural son habitados por musgos, líquenes, frailejones y pastizales, entre otras especies las cuales contribuyen a la captación y posterior regulación del recurso hídrico y su almacenamiento en acuíferos (Humboldt, 2011).

Actualmente se estima que el 99% de los páramos del mundo se encuentran en la cordillera de los andes y la sierra nevada de Santa Marta, siendo Colombia el país en cuya extensión se presenta la mayor proporción de este ecosistema alcanzando un 45% de los páramos del mundo (Greenpeace, 2013), de los cuales, el páramo de Pisba, comprende una extensión de 45000 hectáreas, de las cuales se han concesionado un total de 13.508 hectáreas para el desarrollo de actividades mineras, así como una extensión desconocida dedicada a la minería ilegal principalmente en cercanías al municipio de Tasco, Boyacá (Greenpeace, 2013). debido a su ubicación es un elemento de gran importancia hídrica debido a su función como nacimiento de la vertiente occidental de la cordillera oriental y la vertiente oriental, del mismo modo, alberga lagunas de montaña como la laguna de Socha y se conecta con el parque nacional del cocuy mediante el corredor hidrológico Pisba-Cocuy, se encuentra en jurisdicción del municipio de Tasco, Socha, Socotá y Mongua (Parques Nacionales, 2009).

Los páramos se ven afectados por una multitudinaria gama de factores como lo son la agricultura, la agronomía, la minería, el calentamiento global, entre otras las cuales desembocan en la destrucción de la vegetación autóctona del páramo. Las actividades de siembra generan variaciones en la composición y estructura del páramo, así como en el descenso de especies en el mismo, de igual manera la

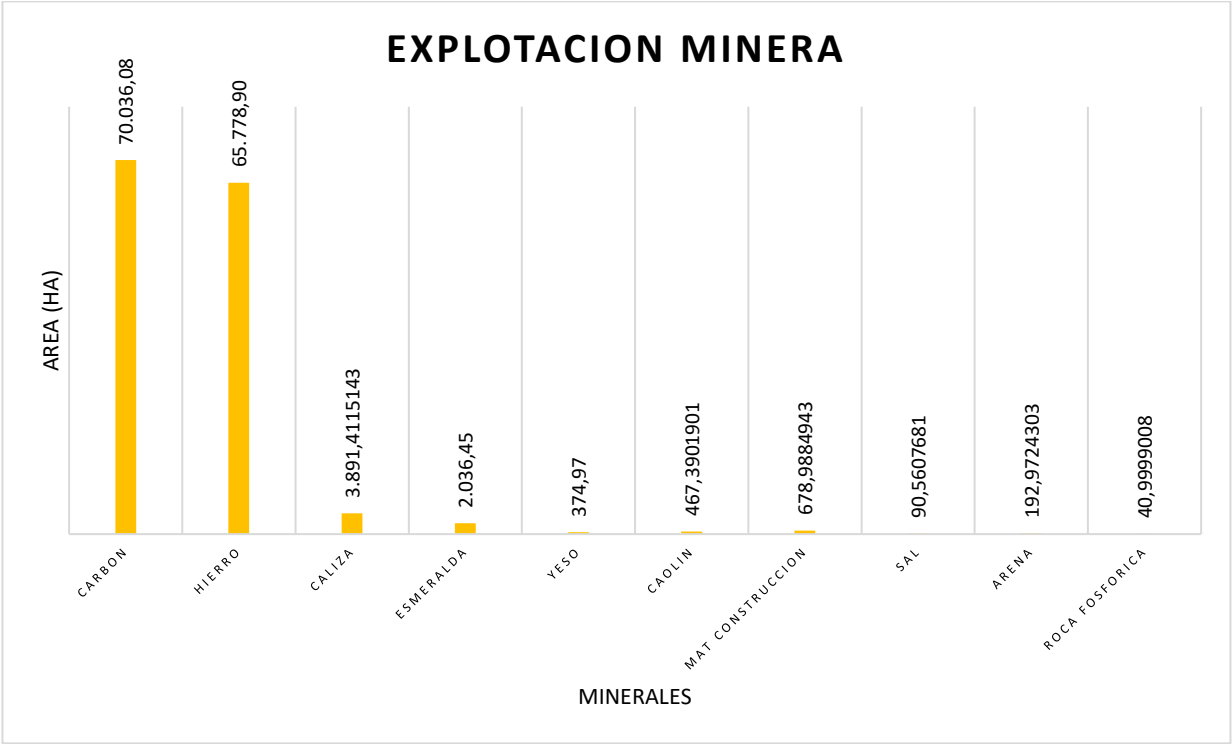
plantación de especies intrusivas como el pino llega a reducir los niveles de retención y almacenamiento de agua en los páramos (Rincon, 2012). El uso de abonos, pesticidas y demás químicos, así como las actividades de pastoreo pisoteo y quemas afectan gravemente la cobertura vegetal (IDEAM, 2014). Otro de los factores que afectan gravemente el ecosistema y funciones del páramo es la minería, la cual fomenta la destrucción de la cobertura vegetal, las quemas y la construcción de infraestructura, cabe mencionar también los efectos del calentamiento global que generan graves daños a los ecosistemas más vulnerables como los nevados y paramos, de cuyos efectos a largo plazo se espera la reducción en un 75% de los páramos colombianos (Greenpeace, 2009).

Debido a la riqueza mineral de los páramos, junto al alza en los precios de recursos como el carbón, cuyo precio subió de 90 US\$ por tonelada de carbón antracita en 2004 a 160 US\$ en 2011 (Ronderos, 2011), estos se han convertido en blanco de numerosas exploraciones y extracciones mineras de recursos como el carbón, oro y materiales de construcción, dejando a su paso daños de alta envergadura en las condiciones químicas del ecosistema por la naturaleza de la actividad económica y el procesamiento que tienen los minerales en la zona, presentándose principalmente la contaminación de las corrientes de aguas superficiales y subterráneas con cianuro y mercurio (Greenpeace, 2013), de igual forma se generan graves daños sobre la cobertura vegetal por la remoción de grandes porciones de zonas verdes para la excavación y transporte de los materiales minados y según estudios del IGAC (instituto Geográfico Agustín Codazzi) fomentando así la erosión y disminuyendo la capacidad del páramo como regulador hídrico (Dinero, 2014).

En Colombia, en abril del año 2015, se reportaron 364 títulos mineros en zonas de paramo, equivalentes a 79.930 hectáreas de paramo destinadas a la extracción de carbón, oro, zinc, entre otros (Valenzuela, 2015) , de los 364 títulos, la empresa Anglogold posee 40 de estos correspondientes al 34% del área minera en paramos, seguida de Eco Oro con un 9 títulos y 12% del área y Minas paz del rio con 9 títulos

y el 9% del total de minería ubicada en paramos (Abiente, 2014), además, según datos de Corpoboyaca, en la zona se explota mayoritariamente carbón con una extensión de 70036.08 hectáreas, seguido de mineral de hierro con una extensión de 65778.9 hectáreas, seguidos de otros minerales como la esmeralda, el yeso, la sal, entre otros con áreas de explotación reducidas.

Figura 1 Recursos explotados en la zona de estudio.



Fuente: Shape de Títulos mineros. Corpoboyaca, 2014.

En el páramo de Pisba, la empresa Hunza Coal, actualmente dueña de alrededor de 5 títulos mineros y 8 túneles activos en el área del páramo, según estudios de Greenpeace, planea desarrollar un mega proyecto de minería hidráulica de carbón, afectando las zonas de recarga hídrica del páramo, por medio del cual se inyectara agua a alta presión para separar la roca del carbón a distancias de 30 a 40 metros propiciando la aparición de más drenajes ácidos producto de las actividades requeridas para la construcción operación y abandono del área a intervenir

(Greenpeace, 2013) , de igual forma, según información de los acueductos comunitarios del municipio de Tasco, Boyacá, la empresa Hunza Coal ha retirado especies de frailejones de manera ilegal sin autorización de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyaca) ni por el Ministerio de Medio Ambiente, a su vez que recalcan el potencial daño que pondría en riesgo el suministro de agua para alrededor de 10.000 habitantes (Censat, 2013). , de igual manera se han presentado alrededor de 201 títulos mineros en el páramo y zonas aledañas según el shape de minería de CorpoBoyaca, el mayor porcentaje lo ocupa al extracción de mineral de carbón con un 80.6% de presencia en la zona, seguida de subproductos del carbón con un 9%, Esmeraldas con un 2% y demás elementos como el yeso, material de construcción, hierro, sal, entre otros correspondiendo al 5.4% restante para alcanzar el 100% de las concesiones mineras según la base de datos de Corpoboyaca.

Otro factor negativo para la conservación y adecuado funcionamiento de los páramos es la ganadería, sumada a la tala de bosques y las quemas ocasionan daños severos al ecosistema, así como los efectos que puedan derivarse de las actividades agrícolas y agronómicas, entre las cuales se encuentran la erosión por escorrentía, la eliminación de la capacidad de retención hídrica del páramo, la extinción de especies endémicas, la contaminación con residuos sólidos y líquidos por abonos y herbicidas, el deterioro del suelo y la pérdida de biodiversidad (Cleef, 1996).

Y es que, en Colombia, según el instituto Alexander Von Humboldt, se determinó que los páramos de la cordillera oriental son los más afectados por actividades humanas como la ganadería y las obras de infraestructura, amenazando las especies naturales y la producción del recurso hídrico de varios departamentos (Caracol, 2015), tomando como ejemplo el estudio realizado en el páramo de Laguna verde entre los años 1970 y 1990, se determinó la disminución de la vegetación paramuna un 30% siendo sustituida por potreros y cultivos permanentes, así mismo se reportó la desaparición de una gran extensión de arbustales

presentando este un descenso del 45% a tan solo el 6% de la extensión analizada (Procuraduría General de la Nación, 2008).

En el páramo de Pisba, el desarrollo de actividades ganaderas y agrícolas ha propiciado la disminución en la densidad de formaciones arbustivas y frailejonales del páramo, desembocando en una reducción en las capacidades de retención de agua del suelo y la introducción de especies foráneas (Greenpeace, 2013), y es que, según estudios, el 70% de los habitantes de poblaciones vecinas al páramo como Tasco, sobreviven gracias a actividades de cultivo con una menor incidencia de ganadería de tipo vacuno (Orduz, 2012), fomentando así la desestabilización de las condiciones naturales del páramo.

Otro de los factores que afectan los páramos es el cambio climático, factor que, por su naturaleza y reciente aparición, apenas se están estudiando medidas de mitigación y adaptación de los ecosistemas. A nivel nacional se prevé la desaparición parcial o total de 6 nevados como lo son el nevado del Ruiz, Santa Isabel, El cocuy, La sierra nevada de Santa Marta, entre otros (Dicyt, 2010) , de igual manera se estima que una gran proporción de los páramos a nivel mundial pueden desaparecer fruto del calentamiento global y la variación de las precipitaciones, para lo cual, la única solución posible conocida es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera por parte de todos los países incluido Colombia (Partner, 2013).

Como consecuencia del calentamiento global, también han incrementado la tasa de incendios por altas temperaturas a nivel nacional y es que, según estimaciones del Sistema Nacional de Bomberos (SNB), se han presentado 11 veces más pérdidas por incendios forestales en el año 2003 con respecto al año 2004, siendo estas alrededor de 12.915 hectáreas, siendo mayormente afectado el departamento de Boyacá con 3.769 hectáreas arrasadas, 3.500 de ellas en zona de reserva forestal del páramo de Rabanal, seguido de Casanare con 3.003 hectáreas y el departamento del Meta con 2.900 hectáreas (Nacional R. , 2004). Según el subdirector de parques naturales, el daño producto de un incendio en un páramo es

incalculable, debido a la capacidad de incineración del frailejón que puede tardar alrededor de un minuto, más sin embargo para que vuelva a crecer se deberá esperar un siglo puesto que su crecimiento es de un centímetro por año y su máxima altura es de un metro (Radio, 2007).

Y es principalmente por estos 3 factores que las capacidades del páramo como regulador hídrico se ven gravemente afectadas, además, analizando estudios realizados en paramos del vecino país del Ecuador, el caudal producido por la cuenca con pajonal es 3 veces mayor que la cuenca con pinos, a su vez que la retención de agua bajo la cobertura vegetal natural es muy superior a la cobertura modificada por pinos, concluyendo que la presencia de pinos fomenta una fuerte disminución del contenido volumétrico de agua y puede desembocar en posibles implicaciones hidrológicas (Celleri, 2004). Y es que la remoción o alteración de la cobertura vegetal de los páramos, desemboca en graves daños a la capacidad de regulación hídrica del páramo, tal hecho se puede evidenciar en Casanare, donde por la remoción de la cobertura vegetal nativa, cuya función principal como se ha mencionado anteriormente es la de captar y retener el agua con la cual se surten los nacimientos y quebradas del país, ha disminuido al punto que se aprecia más como un cañón seco que un caudaloso río (IGAC, 2014).

1.1. Preguntas de Investigación

- ¿Se ha afectado la capacidad de regulación hídrica del páramo de Pisba?
- ¿Cuáles son las consecuencias por reducción y alteración de la cobertura vegetal del páramo de Pisba en la captación y mantenimiento del recurso hídrico?

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, múltiples paramos se encuentran amenazados por acciones humanas y medioambientales, las cuales de no ser controladas terminarían diezmando los páramos y transformándolos en pequeños fragmentos aislados (Cortolima, 2008), destacándose entre estos muchos factores la minería, ya que es un componente de gran importancia para el desarrollo de países y regiones como Colombia, Ecuador, Perú, entre otros, gracias a su modelo económico basado en la exportación y venta nacional de materia prima, más sin embargo desconociendo en cierto grado los impactos negativos que genera el vertimiento de diferentes elementos y productos químicos derivados de la actividad minera a los efluentes, generando en la mayoría de los casos, daños irreparables a los cuerpos receptores y a la comunidad de la región paramuna (Guerrero, 2009).

Y es que, los páramos se encuentran entre los ecosistemas más sofisticados de captación del agua, esto gracias a la acumulación de materia orgánica en el subsuelo y la capacidad de algunas plantas de actuar como esponjas, las cuales retienen grandes cantidades de líquido, por medio del cual son alimentadas las corrientes hídricas (Corpocaldas, 2010), lo cual constituye su principal beneficio ecosistémico como regulador del recurso hídrico, más sin embargo existen otros múltiples beneficios generados por este ecosistema, como lo son el almacenamiento de carbono, la diversidad de especies que habitan y conviven en el páramo, el ecoturismo y las características de los suelos (Martínez, 2008).

Analizando el contexto nacional, se evidencia un detrimento en las áreas pertenecientes a paramos a lo largo de la geografía nacional, asociados a efectos medioambientales y humanos, los cuales podrían destruir la gran mayoría de los páramos, los cuales, según estimaciones del año 2009, entre los años 2020 y 2030 podrían reducirse en un 56% (El Tiempo, 2009), por lo cual se hace prioritaria la toma de decisiones a favor de la protección de los ecosistemas paramunos, así como la preservación de la biodiversidad.

En el ámbito regional, en cercanías al páramo de Pisba, han existido múltiples concesiones mineras, de las cuales aún muchas de estas se encuentran activas, coexistiendo en zonas que la comunidad vecina al paramo reclama como zonas pertenecientes al paramo de Pisba, convirtiéndolo en una gran problemática, debido a que se ve afectado el recurso hídrico por causa de la variación de la cobertura vegetal, donde la empresa Hunza Coal, envuelta en polémica debido a un mega proyecto de minería hidráulica, afectando las zonas de recarga y amortiguación del páramo, en el cual también se ve involucrado los municipios de los Llanos orientales. Esta actividad a su vez pone en riesgo el suministro de agua de aproximadamente 10.000 personas y el Parque Nacional Natural de Pisba (Censat, 2013); esta empresa cuenta actualmente con tres títulos mineros (050-93. HDH-151 y HI16-08001), convirtiéndola en la principal promotora para la afectación del ecosistema tropical de montaña, la cual por medio de evidencia fotográfica ha sido acusada de detrimento al patrimonio ecológico del estado según la denuncia 2013-51655-80154-D, en la cual se evidencian los efectos destructivos de la actividad minera y el paso de maquinaria pesada en zonas habitadas por frailejones (Contraloría, 2015).

Esta investigación, pretende determinar el grado de alteración de las corrientes hídricas en la zona de paramo en aspectos ambientales y sus respectivas consecuencias sociales generadas por factores antropogénicos, como: la ganadería, la deforestación y la explotación minera, entre otros, siendo la minería un factor de gran impacto debido al daño de la vegetación y al vertimiento de sustancias tóxicas a las corrientes hídricas y suelos de la región, “debido a que durante los últimos 20 años y principalmente la última década, Colombia se ha ido transformando por la explotación minera, debido que potencia el sector económico, fomentando una inversión transnacional e incrementando el interés por este tipo de actividades, sin tener en cuenta la parte ambiental” (Greenpeace, 2013), Producto de estas múltiples actividades se da la alteración de la cobertura vegetal en el páramo de Pisba, conllevando a un deterioro en sus funciones.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la afectación del recurso hídrico, por causa de la variación de la cobertura vegetal en el páramo de Pisba, por medio del análisis multitemporal de imágenes satelitales tipo Landsat.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una Geodatabase compuesta de imágenes satélites tipo Landsat, obtenidas por medio de la base de datos Earth Explorer del páramo de Pisba
- Analizar la variación de la cobertura vegetal en el periodo de 1985 a 2015 en el páramo Pisba, a través del procesamiento de imágenes satelitales tipo Landsat, utilizando la tabulación cruzada propuesta por Petit y Lambin
- Interpretar el comportamiento hidrológico del páramo de Pisba ante el cambio de la cobertura vegetal, en el periodo de 1985 a 2015, a través del software S.W.AT (Soil and Water Assessment Tool)

4. ESTADO DEL ARTE

De la misma manera como se realiza el análisis y modelamiento hídrico del páramo de Pisba, existen diversos paramos en los cuales se presentan o se han presentado diversos escenarios y experiencias relevantes para el desarrollo y enriquecimiento de esta investigación, y para comprender de mejor manera la influencia de la disminución de la cobertura vegetal en un ecosistema analizando situaciones similares alrededor del globo.

Para el desarrollo de un modelo hidrológico se hace necesario el uso de un método de clasificación de la cobertura vegetal que satisfaga las condiciones y necesidades del territorio nacional y de igual forma permita su transformación o aplicación, por lo cual se toma en cuenta la aplicación de métodos de clasificación de cobertura vegetal a lo largo de la geografía colombiana, presentando en mayoría la metodología Corine land cover adaptada para Colombia en zonas como la cuenca del magdalena donde se aplicó un plan piloto por medio de la metodología Corine estandarizada para la clasificación y análisis de la zona de forma eficiente y permitiendo alcanzar resultados de alta calidad y de fácil comprensión (IDEAM I. Y., 2008). El empleo de esta metodología permite el desarrollo de un mapa de clasificación de la cobertura por medio de procesos de teledetección empleando imágenes satelitales Landsat, las cuales son calibradas y clasificadas según su cobertura, en caso de presentarse dudas respecto a la clasificación se recomienda una inspección visual (IDEAM, 2008); finalmente se analizan las experiencias en el desarrollo de modelos hidrológicos y mapas de coberturas vegetales alrededor del globo con el fin de conocer experiencias, posibles resultados y datos de valor que permitan el desarrollo adecuado del presente proyecto, para la cual se analizan múltiples situaciones, empleando como referencias experiencias y estudios realizados alrededor del mundo aplicadas en variadas situaciones.

El páramo de Chingaza, en la cuenca del río blanco, departamento de Cundinamarca, encargado del suministro del recurso hídrico a la ciudad de Bogotá, fue analizado y modelado por estudiantes de maestría de la universidad de los Andes, en el cual luego de realizar el proceso de clasificación de la cobertura vegetal, modelamiento y análisis de balance hídrico se determinó una degradación de la vegetación autóctona de la zona siendo esta reemplazada por vegetación de menor tamaño, evidenciándose la disminución de bosques, paramos, entre otros para convertirse en pastizales, arbustos de bajo tamaño y bosques intervenidos, conllevando esto a una variación cercana al 16.5% de la esorrentía media multianual (Mario Diaz, 2005).

Igualmente se desarrolló un estudio titulado “aplicación del modelo Swat para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan bajo la influencia de la actividad minera”, en el cual se analizaron los efectos y consecuencias de la minería sobre la cuenca del río San Juan en el departamento del Choco, simulando para tal caso un escenario de expansión minera frente a la situación actual, determinando mayores áreas de deforestación, por lo tanto alcanzando caudales menores y mayores volúmenes de esorrentía. (Rivas, 2016)

El Instituto Internacional de Agricultura Tropical simulo, en el año 2010, el impacto generado por el uso del suelo en la cuenca del río Tunjuelo en el departamento de Cundinamarca, en el cual se analizaron el grado de afectación en la generación del recurso hídrico y los sedimentos, impulsados por cambios en la cobertura vegetal, y concluyendo que la remoción de zonas boscosas desembocaría en el aumento de la esorrentía, disminución de la recarga de acuíferos y reduciendo los flujos de retorno en periodos secos. (Rivera, 2010).

En el contexto suramericano se presentan casos como el del páramo de Quimsacocha en la provincia de Azuay, Ecuador, El cual es amenazado por el constante crecimiento de actividades agrícolas, agropecuarias y la presencia de recursos como el oro, el cual, gracias a la acción de la población cercana al páramo se logró reducir la zona destinada a la minería en 3200 hectáreas a la empresa

“Etapa” (Flores, 2013), Anteriormente se había desarrollado un estudio en dicho páramo para determinar las causas y efectos que generaba la reducción en la cobertura vegetal, con lo cual se comprobó que, debido a las actividades anteriormente nombradas se había reducido la cobertura vegetal y las características físicas y químicas del páramo, a su vez que se determinó que la siembra de papas generaba el mayor impacto a las propiedades físicas del páramo (Gavilanes & Landi, 2011).

Swat, además de permitir la simulación del comportamiento de ríos, permite analizar el comportamiento de parámetros de calidad del agua, tales como bacterias, demanda biológica de oxígeno, entre otras, así como la contribución de las plantas relacionada a la calidad del recurso hídrico, analizando parámetros tales como la absorción de nitrógeno, fosforo y agua por parte de la vegetación; estos factores permiten conocer con antelación el grado de impacto que generara la intromisión de especies vegetales diferentes a las actuales o la variación de las especies presentes en la zona, por medio de lo cual, en Costa Rica se desarrolló un estudio para la caracterización de fuentes de contaminación en la microcuenca del río Jaboncillal, en el cual se estudiaron los diferentes factores que contribuían a la contaminación de la cuenca, los efectos de los vertimientos puntuales sobre el río, las contribuciones de aguas residuales domésticas, entre otros factores asociados a la cobertura vegetal, con el fin de determinar zonas en las cuales se han de aplicar políticas de control para mitigar los efectos sobre las corrientes hídricas (Chacón, 2015).

En el año 2015, en el estado indio de Maharashtra, se llevó a cabo el análisis de escorrentías con el fin de comprobar la fiabilidad de los resultados generados por el software SWAT, empleando como zona de estudio la cuenca de Maheshgad en cercanías al campus Mahatma Pule Krishi Vidyapeeth, obteniendo resultados muy fiables en el proceso de modelación y calibración respecto a los datos observados alcanzando coeficiente de determinación de 0.98 y Nash de 0.62 (S. Malunjkar, 2015).

Finalmente, en Kenia se realizó una modelación y posterior calibración del río Naro Moru perteneciente a la cuenca del río Ewaso Ng'iro, para el cual se realizó el proceso desde la obtención de las imágenes satelitales hasta su calibración y análisis empleando métodos de desviación estándar Dv, eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de correlación (r) y coeficiente de determinación (r^2) como medios de validación de los datos obtenidos, obteniendo valores satisfactorios teniendo en cuenta la calidad de la información, obteniendo valores $r=0.7$, $r^2=0.6$ NS=0.5 y Dv=61.7% (Jhon Obiero, 2011).

Y es que la afectación en la cobertura vegetal, en menor o mayor medida genera cambios a pequeña mediana y gran escala que pueden inferir en el volumen y calidad del recurso hídrico generado por una cuenca, que, al largo plazo puede afectar el acceso de una región al agua, limitando actividades como la agricultura y la ganadería, y en casos más graves afectando el acceso al consumo de agua para la población, es por esto que se deben tener en cuenta estudios realizados que permitan conocer los efectos generados por la alteración de la cobertura y/o su total remoción para el desarrollo de proyectos inmobiliarios o actividades mineras a cielo abierto.

Según estimaciones de la FAO, en el periodo 1961-2011, las zonas agrícolas han venido ganando extensión en detrimento de los bosques, pasando de las 441 millones de hectáreas hasta las 607 millones de hectáreas, esto a su vez ha incrementado el uso de productos nocivos para fuentes hídricas y el suelo que generan una contaminación de los mismos y una reducción en la tasa de fertilidad de los suelos, presentando degradaciones cercanas al 14% del contexto mundial en fertilidad, reducción de la cobertura vegetal, contaminación del suelo y del agua respecto para el contexto latinoamericano (FAO, 2015).

Tomando en cuenta el contexto regional, en el departamento de Boyacá se realizó un análisis titulado “*Estudio multitemporal para la determinación de cambios en el uso del suelo en el complejo de páramos Tota - Bijagual - Mamapacha para el periodo 1992 – 2012.*” Realizado por estudiantes de la universidad militar nueva

granada, en el cual se realizó el análisis de coberturas vegetales en este complejo paramuno contiguo al paramo de Pisba, en el cual se evidenciaron cambios negativos principalmente en arbustales, vegetación de paramo y pastos limpios, los cuales disminuyeron en 165.69, 1574.851, 16411.03 hectáreas respectivamente, transformándose principalmente en zonas intervenidas por el hombre dedicadas a la agricultura y la ganadería con una ganancia de 22253.11 hectáreas (Elena Rebollo, 2012), coberturas con mayor número de curva (CN), las cuales reducen la infiltración de precipitaciones y favorecen la erosión del terreno.

Debido a esto, el efecto regulador del recurso hídrico de los páramos puede verse afectado, y este, es en varias zonas o sectores del hemisferio, la principal fuente de generación del recurso hídrico para grandes ciudades como Bogotá, Quito y Cuenca, es por esto que deben ser protegidos y antepuestos a intereses económico-industriales tomándolos como ecosistemas estratégicos, ya que sin ellos el agua tendría que ser extraída de acuíferos y pozos profundos, escasos, y con menores caudales de agua (W. Buytaert, 2005).

5. MARCO TEORIO

5.1. Páramo

Es un ecosistema, un bioma, un paisaje, un área geográfica, una zona de vida, un espacio de producción, un símbolo, inclusive es un estado del clima. Además, el valor y el significado del mismo pedazo de páramo pueden ser muy distintos para el campesino que pasta a sus animales o para la bióloga que estudio un bicho dentro de la paja (Hofstede, Segarra, & Mena Vásconez, 2003), este ecosistema pertenece a los ecosistemas de alta montaña tropical, localizado en los límites de bosques naturales y la nieve perpetua o nevado, y localizados en Venezuela, Colombia, Perú y Ecuador (Paramos, 2010).

Los páramos, como ecosistema de valor estratégico nacional, han de ser protegidos y preservados sobre los intereses económicos tanto a pequeña como a gran escala, motivo por el cual, en los últimos años se han producido diversas manifestaciones y proyectos para la delimitación de las zonas de paramo así como de la cancelación o no continuidad de los títulos mineros presentes en zonas pertenecientes al ecosistema paramuno, es por esto que en el año 2016 se inició un programa por el cual el gobierno generara la delimitación de los páramos nacionales, con el fin de proteger este ecosistema que, según estimaciones, 8 paramos, proveen de agua a una población cercana a los tres millones de habitantes, riega 180000 cultivos y provee agua a varias centrales hidroeléctricas (Minambiente, 2016).

Los Paramos, como medio ambiente poseen características dependientes de su cobertura vegetal y de su ubicación de alta montaña, conteniendo suelos ácidos, presiones atmosféricas bajas, altas variaciones en la humedad ambiental, bajas temperaturas cercanas a los 0°C, baja densidad de vegetación y alta variabilidad de las condiciones medioambientales dependiendo de las estaciones del año, porcentaje de nubes y tormentas (Mariano Ospina Rodriguez, 2003).

El páramo es, entonces todo ecosistema de alta montaña cuya función es la regulación hídrica, función realizada gracias a la flora presente en el mismo, compuesta principalmente por múltiples especies de frailejones, pastos, cardos, helechos, entre otros (Organización para la educación y Protección Ambiental, 2016), los cuales, en su mayoría se encuentran clasificados como especies en amenaza de extinción debido a su reducida proporción del territorio global, así como la constante amenaza de factores ambientales y humanos que amenazan su continuidad.

5.1.1. Normativa

Paramos según La Constitución política: Establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente y conservar las áreas de importancia ecológica. Además, deberá planificar el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. (Art. 79 y 89)

Ley 99 de 1993: Establece los principios generales ambientales. Resalta en su artículo 1 que los páramos, los subparamos, las nacientes de agua y zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial. En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.

Resolución 0769 de 2002 y Resolución 0839 de 2003 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: La primera resolución dicta disposiciones para contribuir en la protección, conservación de los páramos, considerando, entre otros aspectos, que los páramos son ecosistemas de una especial riqueza biótica, con un alto grado de especies de flora y fauna endémicas de gran valor, constituyendo un factor determinante para el equilibrio eco sistémico. La segunda Resolución establece los términos de referencia para el desarrollo de

los Estudios sobre el Estado Actual de Páramos (EEAP) y del Plan de Manejo Ambiental (PMA) de los páramos. A pesar de lo dictado en las normas el proyecto nunca concluyó, por lo tanto, no se cuentan con la totalidad de los EEAP, ni tampoco con los PMA. Esta normativa es luego sustituida por la Ley 1450 de 2011.

Ley 1450 de 2011: Establece el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. En referencia a la protección de los ecosistemas de páramos establece la delimitación de páramos y humedales a escala 1:25.000. en base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales adoptados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los grandes centros urbanos y los establecimientos Públicos Ambientales realizarán el proceso de zonificación, ordenamiento y determinación del régimen de usos de estos ecosistemas, con fundamento en dicha delimitación. Además, la norma establece que en los ecosistemas de páramos no se podrá adelantar actividades agropecuarias, ni de exploración o explotación de hidrocarburos y minerales, ni construcción de refinerías de hidrocarburos. Para tales efectos se considerará como referencia mínima la cartografía en Altas de Páramos de Colombia del Instituto de Investigación Alexander von Humboldt, hasta tanto se cuente con cartografía a escala más detallada.

Decreto 2372 de 2010: Este decreto hace referencia al Sistema Nacional de Áreas Protegidas y dispone que los ecosistemas estratégicos como páramos, gozan de protección especial.

5.2. Teledetección

La teledetección es un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto (ESA, 2009) , esta ciencia nace en el año 1972 posterior al lanzamiento del primer satélite de observación terrestre por parte de los

Estados Unidos, mas sin embargo, fue poco utilizada debido a los altos costes de la utilización de imágenes satelitales, pero, debido al avance tecnológico y la aparición de múltiples empresas que permitían un mayor espectro de posibilidades y características de las imágenes satelitales han permitido un amplio acceso a esta técnica (Nacional I. G., 2004), la cual está basada en el estudio de las longitudes de onda de luz visible, es por esto que, dependiendo de la conjunción de ondas de luz captadas por el satélite o “firmas espectrales”, es posible obtener información respecto al tipo de cobertura que refleja la radiación, de igual forma en algunos satélites existen sensores que permiten la detección de parámetros de temperatura, facilitando la detección de zonas de conflagración o puntos calientes en la superficie terrestre (European Space Agency , 2014).

La teledetección tiene un amplio espectro de aplicaciones que pueden favorecer en la toma de decisiones, estudios geodésicos, entre otros, cuyas principales aplicaciones se pueden presentar en el análisis de crecimiento/decrecimiento de zonas urbanas, aplicaciones militares estratégicas, arqueología, explotación de recursos naturales, entre otras, que permiten un acceso rápido y una comprensión adecuada de la información que favorece la realización de diferentes actividades a un estado o individuo (Educativa, 2006).

5.2.1. Clasificación de la Teledetección

Uno de los pilares de la teledetección es la generación de clases relativas a litología, tipos de vegetación, usos el suelo, entre otros, las cuales pueden realizarse mediante dos criterios, la clasificación supervisada, la cual depende de un conjunto de datos conocidos que al ser medido y aplicados en la zona no generen dudas, y la clasificación no supervisada por medio de la cual las categorías de pertenencia de cada tipo de cobertura son asignadas por medios automáticos, empleando la inteligencia artificial, la probabilidad y algunos algoritmos (Universidad de Murcia, 2004).

5.2.2. Imágenes Landsat:

Las imágenes satelitales LandSat, son imágenes satelitales de resolución moderada, que se encuentran de forma gratuita en los servidores del USGS (United States Geological Survey), las cuales comprenden la extensión del globo y se encuentran disponibles a partir del año 1972, inicialmente compuestas por 4 bandas espectrales (Verde, Roja, 2 bandas Infrarrojas Próximas), con diferente amplitud espectral la cual oscila $+0.1\ \mu\text{m}$ en cada banda, y con resolución espacial de 80 metros (DGI, 2009).

Posteriormente se realizaron lanzamientos de satélites más modernos, los cuales se encontraban equipados con instrumentos más modernos y sensores adicionales, los cuales permitieron captar una mayor cantidad de detalles, alcanzando su ultimo satélite desplegado, el LANDSAT 8 en febrero del año 2013 (USGS, 2014), el cual equipa 2 sensores térmicos (Bandas 10 y 11) con una resolución espacial de 100 metros, y 9 sensores espectrales (Banda visible 1, 2, 3, Banda Roja, Banda Verde, Infrarrojo cercano, SWIR 1 y 2, Pancromático y cirroso) con resoluciones espaciales de 30 metros (USGS, 2013).

Debido a la amplia cantidad de sensores y satélites Landsat, se deben conocer las diferentes asignaciones de bandas según el sensor equipado en el satélite, así sensores MSS (Escaneo multi espectral por sus siglas en ingles), pertenecientes a los satélites Landsat 1, 2 y 3, sus bandas comienzan desde la 4 hasta la 7, correspondiendo a las bandas 1, 2, 3 y 4 respectivamente en los satélites Landsat 4-7, las cuales poseen una resolución espacial de 60 metros debido al sensor MSS (USGS, 2013).

En el caso de satélites Landsat 4-5 TM (Mapeo Temático), su asignación de bandas espectrales corresponde de igual manera a los siguientes satélites del proyecto Landsat, con cambios referentes a la ausencia de sensores y bandas que los satélites más modernos poseen y resoluciones espaciales de 30 metros, que de

igual forma, se presentan en los satélites más modernos del programa Landsat equipados con sensores ETM+ (Escaneo Temático Mejorado Plus); esta asignación de las categorías de bandas cambia levemente con la introducción del sensor OLI/TIRS de los satélites Landsat 8, cuya banda inicial es reemplazada por un aerosol costero, por medio del cual es posible identificar mezclas de componentes en el agua, expresados en tonos de azul- violeta (USGS, 2014).

5.2.3. Clasificación de las imágenes LandSat

El proceso de clasificación de imágenes satelitales depende del tipo de sensor y las bandas espectrales asignadas para su análisis, permitiendo resaltar ciertos tipos de coberturas vegetal con tonos de color característicos a cada combinación de bandas espectrales, estas bandas se encuentran pre asignadas a un valor numérico de 1 a 11, con ligeras diferencias de asignación entre los satélites empleados para la captura de las imágenes, presentando en los satélites LandSat 7, o anteriores un máximo de 8 bandas, y en los satélites Landsat 8, un total de 11 bandas espectrales las cuales se pueden observar en la tabla siguiente.

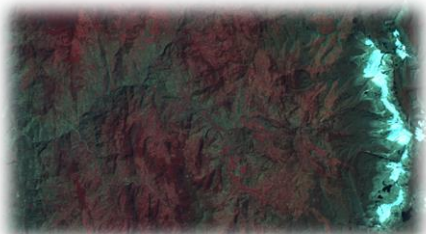
Tabla 1. Bandas espectrales según el tipo de satélite

LANDSAT 7		LANDSAT 8	
Banda	L7	Banda	L8
1	Azul	1	Costera
2	Verde	2	Azul
3	Roja	3	Verde
4	NIR	4	Roja
5	SWIR1	5	NIR
6	TIR	6	SWIR1
7	SWIR2	7	SWIR2
8	Pancromatica	8	Pancromatica
TIRS	Termica	9	Cirros
	infraroja	10	TIRS1
SWIR	Infraroja		
	corta	11	TIRS2
NIR	Infraroja		
	cercana		

Fuente: USGS

Por medio de la combinación de estas bandas se puede mejorar la precisión al determinar ciertos tipos de coberturas, del mismo modo permite analizar zonas de incendios aplicando combinaciones de bandas infrarrojas que son capaces de atravesar el humo y determinar de manera más clara la magnitud de un incendio (Esri, 2008), otras combinaciones de bandas permiten la mejor detección de zonas con presencia de agua, zonas urbanas, vegetación sana o en mal estado, entre otras; algunas de estas combinaciones se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Combinaciones de bandas espectrales empleadas en teledetección

Bandas	Elementos detectados	Imagen de Ejemplo
7,5,3	• Cuerpos de agua (Negro) • Vegetación en crecimiento (verde claro) • Nieve y hielo (Color Azul) • Incendios (Amarillo-Rojo)	
5,3,1	• Detección de texturas • Diferenciación de tipos de rocas • Detección de caminos (Blanco)	
4,3,2	• Vegetación en tonos de rojo • Zonas urbanas (Azul-Cian) • Bosques coníferos (Rojo oscuro) • Vegetación baja (Rojo claro)	

-3,2,1	• Vegetación sana (Verde) • Vegetación seca (Amarillo-Marrón) • Caminos (Gris) • Hielo-Nieve(Blanco)	
4,5,3	• Vegetación (Café-Verde-Amarillo) • Vegetación oscura es más húmeda • Vegetación clara es más seca • Nieve-Hielo (Violeta) • Zonas urbanas (Gris-Azul) • Zonas expuestas (Azul)	

Fuente, Imágenes: Autor, Datos: Quinn. 2001.

5.3. Procesamiento de las imágenes Landsat:

El propósito del procesamiento digital de imágenes, es el de resaltar elementos que son difíciles de percibir o no se pueden distinguir directamente en una imagen. En el procesamiento digital de imágenes, normalmente se utilizan varias bandas espectrales de un mismo satélite. Por ejemplo, Landsat TM tiene 7 y SPOT tiene 3 (CNICE, 2006), por medio del preprocesamiento de imágenes satelitales se busca la corrección de distorsiones de tipo radiométricas y geométricas, esto por medio de fórmulas matemáticas que buscan alterar los niveles digitales (DN) de las imágenes satelitales con el fin de reajustar valores del brillo de los pixeles debido a interferencias atmosféricas y posicionamiento o funcionamiento de los instrumentos a bordo del satélite responsable de la captura (Teledet, 2014).

5.3.1. Corrección Geométrica

El proceso denominado, corrección geométrica, consiste en el ajuste de parámetros de forma y posición de la imagen, con el fin de asegurar la correcta ubicación de la misma, evitando distorsiones o errores al estudiar zonas específicas de una

cobertura vegetal, este proceso se realiza principalmente a través de puntos de control tales como ríos, lagos, zonas urbanas, y demás elementos fácilmente reconocibles de los cuales se tenga plena certeza respecto a su locación y se encuentren en una imagen o shape diferente (Ambrosio, Gonzales, & Arevalo, 2002).

5.3.2. Corrección Radiométrica

La corrección radiométrica consiste en la eliminación de distorsiones del orden radiométrico tales como ruidos, líneas, vacíos, y efectos atmosféricos tales como neblina, variaciones en la iluminación solar, entre otros (RAPCA, UNESCO, 2003); este proceso se realiza por medio de múltiples ecuaciones aplicadas a cada una de las bandas que componen la imagen satelital, las cuales transforman los valores digitales (DN) a radiancia (L), la cual posteriormente se transforma a valores de reflectividad atmosférica (TOA), permitiendo la remoción de distorsiones empleando parámetros tales como la elevación solar y la humedad atmosférica, para finalmente ser re codificada a valores digitales (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014).

5.4. Modelamiento Hidrológico

Son simulaciones o acercamientos a las condiciones de una zona que permiten realizar diversos análisis, como la evaluación del recurso hídrico, predicción de eventos adversos como inundaciones, y como mecanismo para la toma de decisiones para prevenir futuros problemas o daños relacionados a efectos adversos provocados por situaciones naturales o humanas (Gestion ambiental del agua, 2013); Para el desarrollo de la modelación se requiere conocer el tipo de variables y características que se estimaran para el desarrollo del modelo, para lo cual se hace necesario observar parámetros como la esorrentía, evaporación, infiltración, entre otros, para posteriormente relacionarlos por medio de ecuaciones matemáticas y simplificaciones de las mismas cuando se requiera (Cabrera, 2012).

Posteriormente se han definido las variables a tener en cuenta se debe realizar la selección del modelo más adecuado para el caso específico a analizar, para lo cual se recomienda iniciar por la definición del problema y el objetivo a obtener, para a continuación determinar los elementos y capacidades de computo disponibles, el factor económico en caso de requerir adquirir elementos adicionales o requerir información con costo y, a partir de esto se selecciona un tipo de modelo particular que cumpla con las especificaciones y requerimientos acordes al fin requerido, el cual deberá ser calibrado y validado posterior a su ejecución y finalmente generalizado para su aplicación en futuras predicciones (Xu, 2002).

Los modelos hidrológicos se componen de una serie de ecuaciones y variables de entrada, las cuales pueden ser obtenidas por métodos matemáticos o por aleatorización, las cuales permiten la clasificación de los modelos hidrológicos en 3 grandes grupos según el tipo de ecuación que emplean, los modelos estocásticos y los modelos determinísticos, el primero compuesto por una o más variables aleatorias obtenidas por métodos probabilísticos, y los segundo compuesto por variables de entrada y ecuaciones sin inferencia de la probabilidad, de igual forma se presentan modelos en los cuales se han de aplicar ambas metodologías denominados métodos mixtos (Cabrera, 2015).

De igual manera los modelos hidrológicos pueden ser clasificados según la variabilidad espacial de los parámetros aplicados a la cuenca, entre estos se encuentran los modelos globales, los cuales no tienen en cuenta los efectos sobre cuencas adyacentes, y los modelos distribuidos, los cuales analizan el comportamiento de todas las cuencas adyacentes como un conjunto de elementos interdependientes, de igual manera permite la simulación de parámetros tales como lluvias, requiriendo una mayor calidad y confiabilidad de datos de entrada que un modelo global (Ponce, 1989).

5.4.1. Software de Modelación Hidrológica

Algunos de los softwares para la modelación hidrológica se presentan a continuación:

Tabla 3. Modelos hidrológicos e hidrogeológicos

NOMBRE	CLASIFICACION	USO
HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2012)	• Evento • Lineal • Semidistribuido	• Simulación del proceso hidrológico en cuencas dendríticas
PRMS (USGS, 2016)	• Determinístico • Parámetros distribuidos	• Análisis de la respuesta de varias combinaciones climáticas y de uso de suelos en corrientes hídricas y parámetros hidrológicos de la cuenca en general.
SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005)	• Basado en parametros fisicos como la elevacion, la cobertura vegetal, entre otros	• Predicción del impacto en la toma de decisiones relacionadas con el manejo del suelo, agua, sedimentos, y producción de sustancias agrícolas químicas en cuencas grandes y complejas
MODFLOW (USGS, 2016)	• Diferencia finita	• Simulación y predicción de interacciones agua subterránea/superficie y condiciones del agua subterránea
OPENFOAM (OPENFOAM, 2004)	• Semidistribuido	• Solución de problemas complejos de fluidos dinámicos, incluyendo reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, acústica, mecánica de sólidos y electromagnética
SPHY (SPHY, 2016)	• Balance hídrico	• Análisis y modelamiento de variables hidrológicas empleado para la toma de decisiones estratégicas en el manejo del recurso hídrico, así como para operaciones reales.

Fuente: Varios

5.4.2. Modelación y Calibración del modelo hidrológico

La modelación es una representación simplificada del funcionamiento real de una cuenca hidrográfica. En el cual se caracteriza la variabilidad espacial y temporal de la precipitación de las tormentas históricas. El proceso de estimación de los valores más adecuados para el funcionamiento del modelo hidrológico, se denomina calibración (Díaz Granados & Camacho, 2013).

El proceso de calibración se realiza de manera manual o automática por el uso de software y modelos matemáticos, los cuales requieren la sustitución de variables tales como en número de curva, la infiltración, evaporación, entre otros con el fin de ajustar los resultados observados en el mayor porcentaje posible respecto a los datos obtenidos previa simulación de las condiciones a analizar, y , con el fin de agilizar procesos es recomendable el uso de software, así como SWAT-Cup, software especializado en el proceso de calibración de modelos generados por SWAT.

Este software se encarga del proceso de calibración del modelo hidrológico y el análisis de datos inciertos en las cuencas empleando para tal fin, el método estocástico, según el cual el software determina los errores y datos de baja fiabilidad; el software SWAT-Cup posee múltiples modelos matemáticos empleados para el proceso de calibración del mismo enfocándose, entre estos, el método Sufi2 determina los valores inciertos expresándolos como una distribución de probabilidad del 95% denominado 95PPU, el cual engloba las posibles aproximaciones al modelo según los datos observados, el cual se va reduciendo a medida que la simulación se va ajustando a los valores medidos, para lo cual se emplean los factores parámetros de control de calidad como el coeficiente R^2 o NS, siendo estos representantes de fiabilidad del modelo calibrado al aproximarse al valor de la unidad, de igual manera valores muy bajos o negativos en estas variables representan un modelo lejano o errado que puede sugerir problemas en la etapa de modelación (Abbaspour, SWAT: Swat-Cup SWAT Calibration and Uncertainty Programs, 2015).

6. METODOLOGIA

6.1. Método de Investigación

Este proyecto, plantea una investigación tipo mixta con un diseño descriptivo, debido a que se recolectaran y analizaran las diferentes imágenes satelitales (TM, ETM y OLI-TIRS), comprendidas entre los años de 1985 a 2015. También se caracteriza por tener múltiples pasos o fases, los cuales se dividen en diferentes objetivos, uno de ellos y con el cual empezaría esta investigación, es la creación de una Geodatabase, la cual depende de la verificación, recolección y clasificación de las imágenes satelitales del USGS EarthExplorer e información cartográfica obtenida de las diferentes agencias nacionales. En segunda instancia se realiza el diagnóstico del comportamiento hídrico del ecosistema, comparando como el cambio en el uso del suelo afecta la regulación hídrica, esto, a través del software ArcGIS y una extensión denominada SWAT, por medio de la cual, empleando modelos matemáticos se estiman los caudales generados por la cuenca en los años analizados. Con el fin de ser base para la toma de decisiones ambientales, la protección y conservación este ecosistema de alta montaña.

6.2. Materiales y Herramientas

Para la ejecución del presente proyecto se emplearon las siguientes herramientas:

6.2.1. Computador:

Sera el eje central para el desarrollo del proyecto, por medio de este se realizarán todas las tareas necesarias para la inicialización, desarrollo y culminación del proyecto, en este se descargarán las imágenes satelitales y posteriormente se clasifican, luego son reprocesadas y posteriormente emplean para el desarrollo del

modelo hidrológico, para finalmente generar las calibraciones de los datos obtenidos y realizar el análisis correspondiente.

6.2.2. Libros y publicaciones:

Se hará uso de los libros y las publicaciones con el fin de enriquecer y adquirir nuevo conocimiento relacionado al proyecto a realizar con el objeto comprender a cabalidad las características inherentes al mismo y alcanzar satisfactoriamente las metas propuestas.

6.2.3. Software Arcgis, Swat y Swat-Cup

El software empleado (Arcgis, Swat y Swat-Cup) permite el ágil desarrollo de las actividades propuestas contribuyendo al procesamiento de las imágenes satelitales, las actividades consecuentes a el desarrollo del modelo hidrológico, así como su calibración, para finalmente conocer el comportamiento hidrológico del páramo de Pisba, Boyacá.

6.2.4. Excel

Se dispondrá del software Excel para realizar la clasificación y cuantificación de datos relativos al proyecto como lo son bases de datos de las imágenes seleccionadas, variables climatológicas, datos estadísticos, gráficos, entre otros.

6.2.5. Word

Por medio de este software se realizarán los diversos informes que sean requeridos a su vez que los resúmenes de información y documentos extraídos, creados o modificados que sean necesarios para la ejecución y adecuado desarrollo del proyecto.

6.2.6. Imágenes Satelitales tipo Landsat

Por medio de estas imágenes satelitales se obtendrá un prospecto de la situación actual del páramo de Pisba, con respecto a los años a analizar, y las cuales serán recortadas, corregidas y sometidas a una serie de procesamientos anteriormente descritos para el desarrollo y posterior culminación del proyecto

6.3. Metodología de la investigación

El desarrollo de proyecto se divide en 3 grandes fases o etapas, siendo la primera la obtención y preprocesamiento de la información con el fin de desarrollar los mapas de cobertura vegetal y geología, así como la generación de bases de datos climatológicas; la segunda etapa abarca el proceso de modelación hidrológica y finaliza con la generación del modelo no calibrado, finalmente la última etapa consiste en la calibración de los modelos generados y su respectivo análisis. Las fases empleadas en el proceso son explicadas a continuación.

6.3.1. Análisis multitemporal de la cobertura vegetal – suelo

6.3.1.1. Recolección de información

Como prerrequisito para el desarrollo de los modelos hidrológicos se han de generar los correspondientes mapas de cambio de la cobertura vegetal para los años seleccionados, así como la generación de una base de datos climatológica que será usada para la estimación de los caudales, por lo cual se inicia esta etapa con la obtención de las imágenes satelitales Landsat en el periodo de estudio, las cuales se obtienen por medio del servidor Earth Explorer del USGS (United States Geological Survey), las cuales deben cumplir con características de calidad relacionadas al porcentaje de nubosidad presente en la zona, el cual ha de ser

menor al 5% de la superficie a modelar, de igual modo se emplean imágenes satelitales en buenas condiciones de integridad, salvo en años en los cuales se hace necesario emplearlas, ya que a partir del año 2003, una falla en los sensores del satélite Landsat 7 generó bandas con vacíos en todas las imágenes satelitales captadas a partir de este año, las cuales aunque pueden ser corregidas, pueden suscitar errores leves a moderados en el proceso de generación de mapas de cobertura vegetal.

Acto seguido se descargan múltiples DEM a través el mismo servidor, empleando los satélites SRTM, MODIS y ASTER de la Nasa, con el fin de compararlos y determinar el más adecuado para la modelación, destacando el satélite SRTMGL30, de cual cuenta con una resolución espacial de 30 metros, brindando una resolución adecuada, además de no presentar datos faltantes en el área para su posterior uso en el proceso de modelación, debido a la ubicación y resolución del satélite se hace necesario descargar dos DEM con el fin de abarcar la zona de estudio a cabalidad; paralelamente se realiza la solicitud de registros de precipitación y caudales al IDEAM de las estaciones presentes en la zona de estudio, de igual manera se obtienen parámetros de temperatura, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento por medio del modelo desescalado global de simulaciones climatológicas (CMIP3) sugerido por SWAT, esto debido a la ausencia de múltiples registros en las bases de datos del IDEAM, desarrollado por el banco mundial, los cuales son generados de forma tal que son compatibles con el software SWAT. Finalmente se adquieren parámetros asociados a la geología nacional, empleando para tal fin el atlas geológico colombiano del Ingeominas, así como las cartillas de clasificación geológica de la FAO-UNESCO para Sur América volumen IV.

6.3.1.2. Preprocesamiento de imágenes.

Una vez han sido adquiridos todos los datos requeridos se inicia el preprocesamiento de la información, iniciando con la generación de bases de datos climatológicas en Excel, las cuales contengan los datos de precipitación y caudales

ordenados de forma tal que su manipulación sea sencilla y no conlleve a errores por organización de los datos, inmediatamente se procede a corregir las imágenes satelitales, comenzando con la corrección geométrica, por medio de la cual se asegura el adecuado posicionamiento de la imagen satelital, empleando para esta la comparación de puntos de control conocidos como ríos y lagos, finalizando con la delimitación de la zona de estudio por medio de la herramienta extract by mask, para finalmente realizar la corrección radiométrica por medio de la transformación de los valores digitales del pixel (ND) a valores de radianza y reflectancia y la aplicación de ecuaciones matemáticas que ajusten dichos valores, las cuales se presentan de forma específica en las secciones siguientes, con la cual se eliminarán errores tales como los vacíos producidos por la falla del sensor SLC a partir del año 2003, de igual forma se eliminan otras interferencias del orden atmosférico; una vez finalizado el proceso, las imágenes resultantes son almacenadas en bases de datos para su posterior utilización.

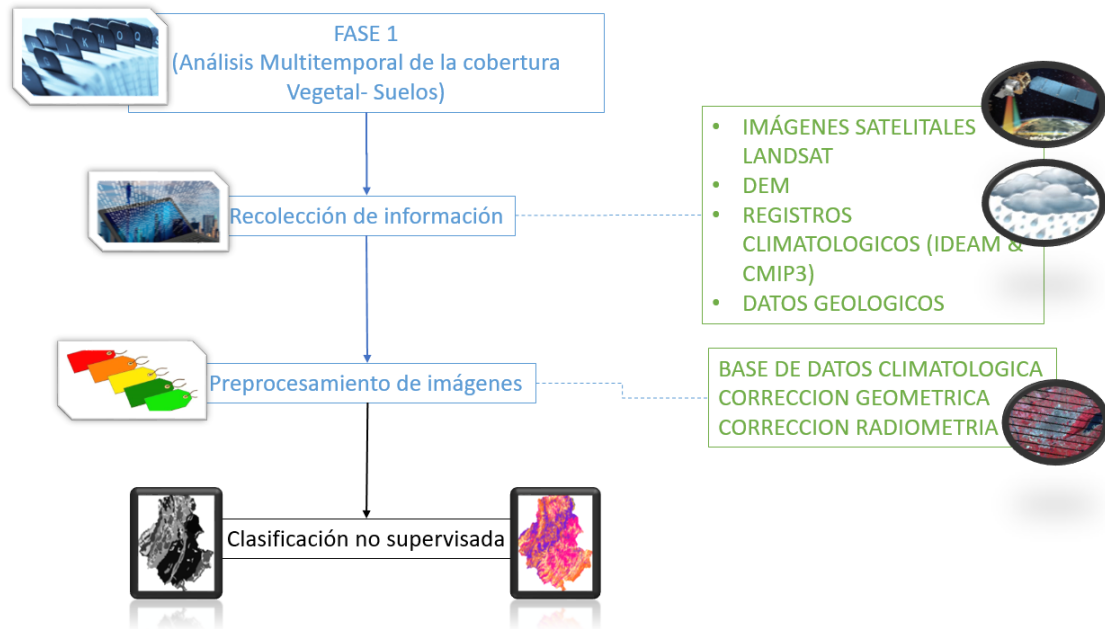
6.3.1.3. Clasificación no supervisada.

Luego de disponer de toda la información clasificada y corregida se procede a la generación de la cartografía de cobertura vegetal y geología de la zona, comenzando con los mapas de cambio de cobertura se cargan los mapas corregidos, los cuales son delimitados por un shape que abarca las cuencas a modelar, el cual es generado empleando el software SWAT con ayuda del DEM; una vez delimitado por medio de la herramienta “Extract By Mask” de la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools” en ArcMap, este es clasificado en 30 categorías basadas en la firma espectral de cada pixel, proceso realizado de forma automática por medio de la herramienta “Iso Cluster Unsupervised Classification” de la misma caja de herramientas; este procedimiento genera un raster dividido en 30 tipos diferentes de cobertura vegetal, algunas de las cuales difieren levemente de otras, por lo que se deberá clasificarlas de manera manual empleando para ello la imagen inicial y un shape que contenga las 30 clasificaciones en modo polígono.

Para el desarrollo de este proceso se emplea la herramienta “Raster to Polygon” de la caja de herramienta “Conversión Tools”, el cual es almacenado en una base de datos donde se contendrán todos los polígonos generados; una vez realizado esto se procede a editar el nuevo shape y a clasificar elementos de fácil distinción tales como nubes, nevados, cuerpos de agua, y zonas urbanas, una vez realizado este proceso se generalizan las coberturas restantes con el objeto de generar un polígono por cada tipo de cobertura vegetal, aplicando en este caso la herramienta “Dissolve” de la caja de herramientas “Data Management Tools”, el cual, al igual que el shape anterior, es almacenado en una base de datos donde se almacenaran los shapes generalizados; una vez finalizado el proceso anterior se procede a clasificar la cobertura vegetal presente en la zona de estudio según los códigos disponibles de clasificación de SWAT y las capacidades del sensor para la detección de los distintos tipos de cobertura vegetal según el tipo de combinación de bandas aplicado, empleando principalmente la combinación de bandas 4,3,2, la cual permite determinar la presencia de bosques, seguidamente se emplea la combinación 4,5,3 para confirmar la presencia de bosques, igualmente esta combinación permite la clasificación de paramos, suelos desnudos y zonas arbustivas, teniendo en cuenta para esto la tonalidad de cada cobertura. Una vez han sido clasificados los distintos mapas de cobertura vegetal estos son exportados a raster por medio de la herramienta “Feature to Raster” de la caja de herramientas “Conversión Tools”.

A continuación, se presenta un mapa de procesos resumido de la primera fase.

Figura 2 Mapa de procesos Primera fase



Fuente: Autor

6.3.2. Análisis lluvia-escorrentía

6.3.2.1. Definición del modelo

La extensión del modelo fue definida en un área comprendida entre las estaciones hidrológicas de Capitanejo, Puente Yopal, Puente Nonato, Puente Quemado, y El Playón siendo estas las más cercanas al paramo de Pisba, empleándolas como salidas de la cuenca, por lo que el área es generada depende de la dirección y ramificaciones de cada río analizado por las estaciones hidrológicas; esta zona es definida en el primer proceso de la modelación hidrológica SWAT denominado “Watershed Deliniation”, por medio de la cual son generadas las bases de datos relacionadas a parámetros de forma de la cuenca, topografía, subcuencas,

presencia de embalses, así como la dirección y acumulación de corrientes hídricas en la zona.

6.3.2.2. Definición según Swat Suelo – Geología

Una vez finalizado el procedimiento anterior se procede a “traducir” la clasificación empleada en los mapas de cobertura suelo – geología, para lo cual se emplean algunos registros de las bases de datos de SWAT por defecto, así como bases de datos ampliadas por distintos autores; para la definición de la cobertura vegetal en SWAT se emplean bases de datos ampliadas debido a la presencia de coberturas del suelo como el nevado, inexistente en la base de datos original para ArcGis, las cuales fueron extraídas de la base de datos de SWAT para software OpenSource como Qgis, las cuales, al igual que las bases de datos empleadas para geología, se presentan en los anexos en la sección E como parte de los modelos y puede ser consultada en la tabla SWAT2012.mdb.

Para la definición geológica, se emplean como referencia el shape “Unidades Cronoestratigraficas” del atlas geológico colombiano, así como las cartillas geológicas de la FAO-UNESCO, ya que, debido a la ausencia de datos geológicos correspondientes a la nación se hace indispensable emplear una clasificación que cumpla con las condiciones geológicas colombianas y que sea compatible con el software de modelación hidrológico a emplear; el proceso de “traducción” de la clasificación geológica Colombiana a la clasificación de la FAO-UNESCO, se realiza por medio convenciones empleadas en el atlas geológico colombiano, analizando la era geológica a la cual pertenece la formación, el tipo de roca presente en la zona y demás elementos que componen la geología, estos datos son comparados con la geología perteneciente a Colombia según el atlas de la FAO, para finalmente ser editadas en el shape original, el cual es almacenado en la misma base de datos que los raster finales de coberturas, cabe resaltar que SWAT posee datos geológicos y

climatológicos de los estados unidos únicamente, por lo cual se emplea la base de datos geológica de la FAO-UNESCO elaborada por el Dr. Karim Abbaspour, y disponible en versiones de SWAT para GIS libre, la cual ha de ser exportada a SWAT para su posterior utilización, esta contiene los datos mundiales de la clasificación geológica realizada por estas entidades; del mismo modo los datos climatológicos destinados a la estimación de datos faltantes son obtenidos de la base de datos CFSR (Climate Forecast System Reanalysis).

6.3.2.3. Climatología

Para la utilización de parámetros hidroclimatológicos tales como la temperatura, brillo solar, velocidad del viento, precipitación y humedad relativa se han de realizar algunas conversiones en el formato y la presentación de los datos, siendo estos ingresados en archivos individuales de texto de extensión txt, los cuales deben contener en la primera línea de texto el formato de fecha AAAAMMDD (Año 4 dígitos, Mes 2 dígitos, Día 2 dígitos), al cual corresponden los datos, seguido en las líneas posteriores de los datos observados en los distintos días del año, siendo cada día una línea del texto.

Adicional a esto se genera una base de datos de conexión o enlace entre estos datos y SWAT, la cual debe contener un ID o código, el cual parte de 1 hasta el número de estaciones empleadas, seguido por el nombre del archivo que contiene los datos de precipitación, su latitud y longitud y altitud, todos estos datos separados por comas y siguiendo un formato determinado, el cual puede ser consultado en la sección de anexos.

Una vez definidos los parámetros climatológicos se generan las tablas que contienen los parámetros de entrada que SWAT emplea para el proceso de modelación hidrológica, este proceso se realiza por medio de la herramienta "Write

Swat Input Tables”, con lo que, finalmente se procede a ejecutar el modelo hidrológico asignando los parámetros temporales a analizar.

En casos donde se presentan registros atípicos, determinados por medio de graficas de cajas y bigotes, este método permite la estimación de datos fuera de rangos, los cuales se presentan al exterior de los bigotes superior e inferior (Minitab, 2016), método equivalente al empleo de la función de formato condicional asignando limites superiores e inferiores por medio de Excel; estos datos atípicos son completados en su gran mayoría por medio de la metodología de la razón normal, empleando 2 estaciones cercanas, este método determina los valores faltantes en estaciones cuyos valores de precipitación difieran más del 10% (Gidaharti, 2014), factor que facilita el completado de datos debido a las distancias entre las múltiples estaciones y las limitaciones de datos en las estaciones en fechas con baja densidad de registros de precipitación. el desarrollo valor requerido, la metodología y las ecuaciones aplicadas se presentan a continuación.

$$1) \quad P_x = 0.5 * (N_x * P_A / N_A + N_x * P_B / N_B)$$

Donde:

N_x : precipitación promedio de la estación X, para el mismo período que se obtiene la lluvia promedio de la estación A (N_A) y B (N_B).

P_A y P_B : valores correspondientes a P_x , de las estaciones A y B.

6.3.2.4. Calibración

Para asegurar la calidad de los resultados y su cercanía a valores reales, se debe realizar la calibración y posterior análisis de los datos obtenidos con el fin de responder a las preguntas de investigación planteadas, para lo cual se inicia con el proceso de calibración empleando para tal fin el software SWAT-CUP, el cual carga los resultados de las modelaciones y permite modificar múltiples parámetros de

calibración tales como el número de curva; en este software se debe seleccionar el algoritmo de calibración dependiendo de las necesidades del proyecto, en este caso se emplea el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2), el cual permite el cálculo de los datos simulados en periodos de tiempo extensos empleando rangos o distribuciones uniformes, obtenidos de toda fuente que pueda generar incertidumbre como lo son las precipitaciones, el modelo conceptual y los demás datos ingresados, generando distribuciones de probabilidad del 95% por medio del modelo estadístico LHS (Latin Hypercube SAMpling), estas distribuciones de incertidumbre y probabilidad son reducidos a medida que factores como r^2 aumentan y se acercan a la unidad dependiendo del ajuste de los parámetros de calibración y el número de simulaciones e interacciones empleadas para la estimación de los mismos (Abbaspour, 2015).

El proceso de calibración por medio de Swat-CUP demanda menor tiempo comparado con la simulación manual, esto debido a la posibilidad de emplear ,múltiples combinaciones de datos en las variables al mismo tiempo, así como la posibilidad de emplear múltiples combinaciones de datos en cada simulación al mismo tiempo, realizando grandes cantidades de cálculos y combinaciones de parámetros comparado con el proceso manual, así como la generación de rangos de datos más ajustados a medida que se realiza el proceso de calibración.; para el desarrollo de este proceso requiere del ingreso de datos observados siguiendo un formato compuesto por un valor numérico en la primera columna correspondiente al día a analizar (1-365), la segunda columna debe seguir un formato con nombre aleatorio seguido del día analizado y finalizando con el año a analizar, estos elementos se separan por medio del carácter _, para el desarrollo de este proyecto se mantuvo el modelo estándar empleando FLOW_OUT_DIA_AÑO, la tercera columna representa el valor observado de caudal en la estación analizada en el día analizado; los datos faltantes no son ingresados y el valor siguiente continua con su numeración; estos datos son ingresados en las tablas “Observed.rch” y “Observed.txt”.

Las tablas "Var_File_rch.txt" y "Var_File_Name.txt" contienen el nombre dado al punto de control en las tablas "Observed.rch" y "Observed.txt", seguido de la extensión .txt, ya que en este archivo se almacenan los datos procesados por SWAT-CUP. Finalmente se modifica la tabla "Sufi2_extract_rch.def" en la cual se ingresan el número de puntos de control a analizar, el número de subcuencas modeladas, la subcuenca a la cual pertenece el punto de control, el periodo a calibrar y finalmente la posición en la cual se encuentra la variable a calibrar, siendo esta la columna 6 perteneciente a "Flow_Out"; el proceso final antes de ejecutar la simulación es el asignar el parámetro por medio del cual el software buscara el mejor ajuste de los datos observados VS simulados, el cual es modificado en la tabla "Observed.txt" columna 2, donde se asignó r2 como control.

Finalmente se asignan 5 simulaciones como método de control en las tablas Par_inf.txt y Sufi2_swEdit.def, con lo cual se ejecuta el proceso de calibración, una vez finalizado este se guarda la simulación generada y se verifica si se presentan mejoras en el comportamiento de la gráfica, luego se asignan los nuevos parámetros de calibración ubicados en las salidas de la simulación denominados "New_pars.txt", estos valores son reemplazados en "Par_inf.txt" y se calibra.

En el proceso se cambian el número de simulaciones entre iteraciones para mejorar la precisión de los datos obtenidos hasta alcanzar un resultado satisfactorio de ajuste en el parámetro r2, el cual depende de la calidad de los datos observados para asegurar un ajuste adecuado, por lo que, en situaciones en las que se presentaron gran cantidad de datos faltantes o datos fuera de rango (analizados por cajas y bigotes) se presentan ajustes moderadamente satisfactorios alcanzando valores superiores a 0.5.

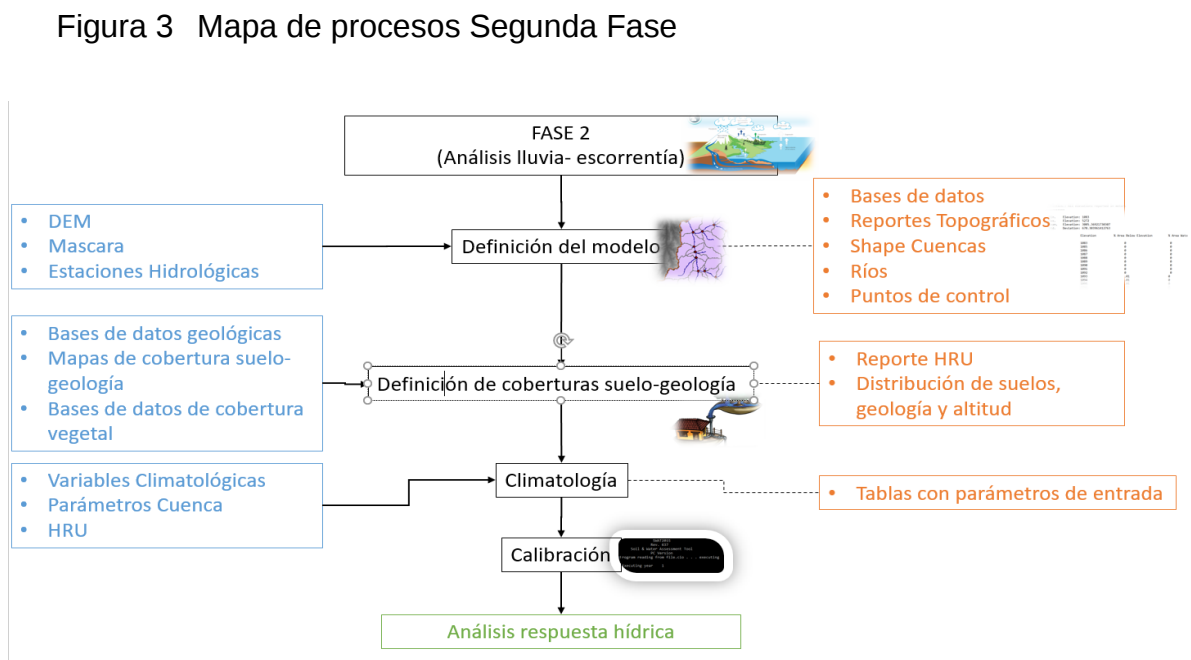
Una vez se ha calibrado el modelo se realizan los análisis pertinentes que presentan en la sección de resultados.

6.3.2.5. Análisis respuesta hídrica

Una vez alcanzados resultados de calibración satisfactorios se procede al análisis de la respuesta hídrica, empleando como elementos de comparación la variación de la cobertura vegetal, los años calibrados, así como una modelación generada para cada tipo de cobertura por medio de una tormenta sintética, la cual permitirá determinar el grado de variación de la regulación hídrica, dependiendo de cada tipo de cobertura presentado en el periodo analizado.

Para el análisis de respuesta hídrica se analizan como la variación de uno o más tipos de cobertura vegetal alteran la capacidad de regulación hídrica del páramo, acentuando así los picos en periodos lluviosos y las sequias en periodos de baja precipitación frente a otros tipos de cobertura con mayor proporción de un tipo otro de vegetación.

Los procesos realizados se presentan en el siguiente mapa de procesos:



Fuente: Autor

7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los múltiples procesos del proyecto se presentan, por etapas, empleando como referencia los resultados obtenidos en un año determinado para los resultados de las distintas etapas del proceso, los resultados de calibración y análisis se presentan en los numerales E y F de los anexos presentes en el disco, los parámetros de calibración calculados pueden ser consultados en los anexos del documento actual.

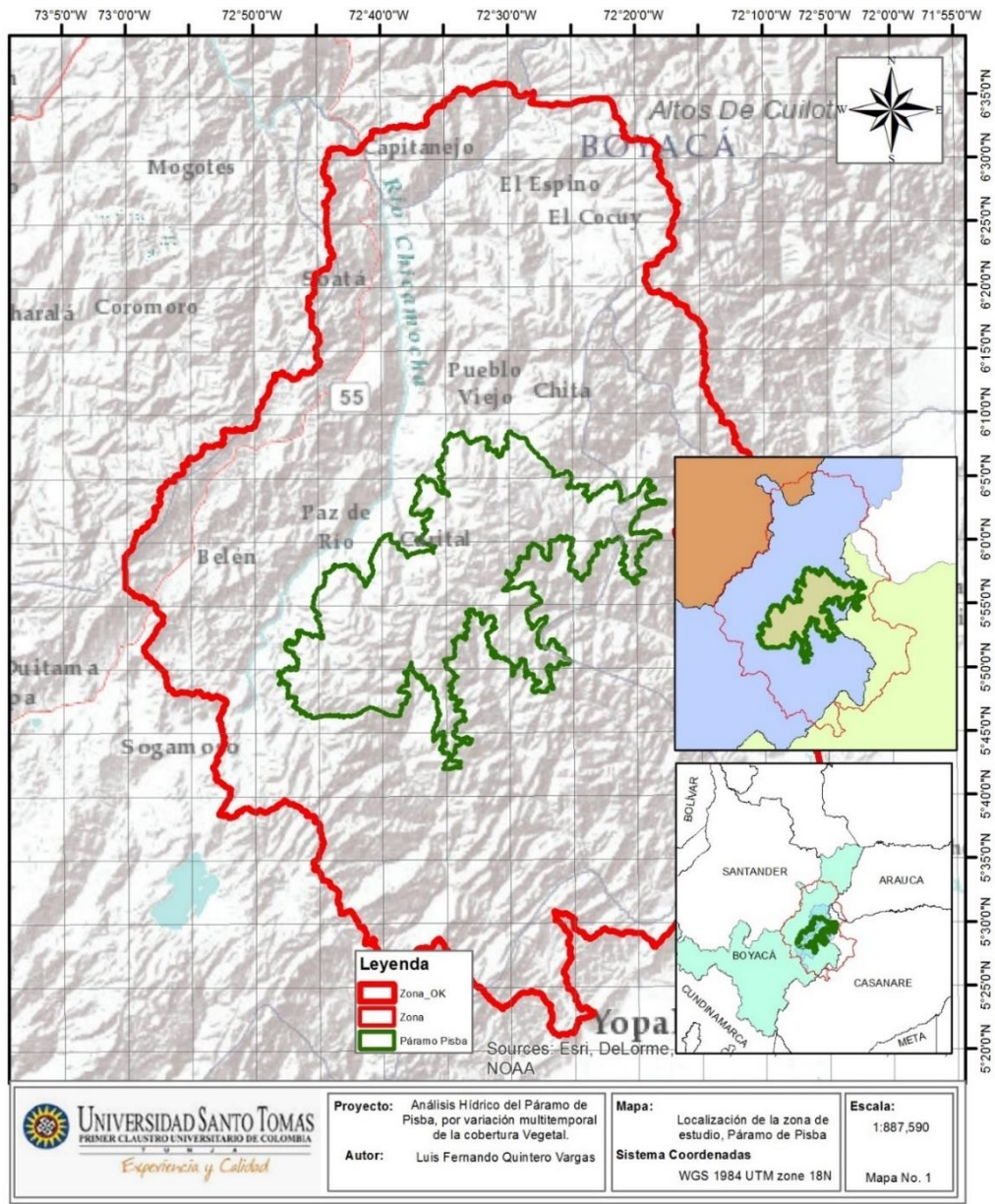
7.1. Delimitación del área de estudio

La zona de estudio asignada fue generada por SWAT, haciendo uso de las estaciones hidrológicas solicitadas al IDEAM, las cuales se ubican en las corrientes hídricas de los ríos Casanare, Cravo Sur, Meta y Chicamocha, generando una zona con un área 82931.8 hectáreas, incluyéndose zonas pertenecientes al complejo de paramos de tota- bijagual- mamapacha y del páramo del cocuy, localizada entre las latitudes 6°03'00" a 5°20'00" Norte y las longitudes 73°00'00" a 72°05'00" Oeste del sistema de coordenadas geográficas proyectadas UTM WGS 1984 Zona 18 Norte, cabe resaltar que esta zona fue generada por medio de la localización de estaciones hidrológicas del IDEAM, algunas de las cuales, debido a la ausencia de registros los periodos modelados, así como la existencia de pocos registros, fueron retiradas del proceso de modelación las estaciones de El Playón, Puente Yopal, Puente Quemado y Puente Nonato, ocupando estas una proporción del 20% del área total del páramo.

Los años analizados corresponden a aquellos con presencia de imágenes satelitales de baja o nula nubosidad inferior al 5% del área a estudiar, siendo estos 1986, 1992, 1997, 2001, 2003, 2007 y 2015. La zona en cuestión abarca una gran variedad de topografías y poblaciones, incluyendo gran parte del nevado del cocuy, el 100% del páramo de Pisba y fracciones de los llanos orientales, de igual forma abarca la

extensión territorial de alrededor de 34 municipios, siendo esta extensión causada por la ausencia de estaciones con registros de caudales en las cercanías, siendo estos en su mayoría pertenecientes al departamento de Boyacá, con pequeñas zonas en los departamentos de Casanare, Arauca y Santander; la zona de estudio desarrollada se presenta a continuación.

Mapa 1 Localización de la zona de estudio

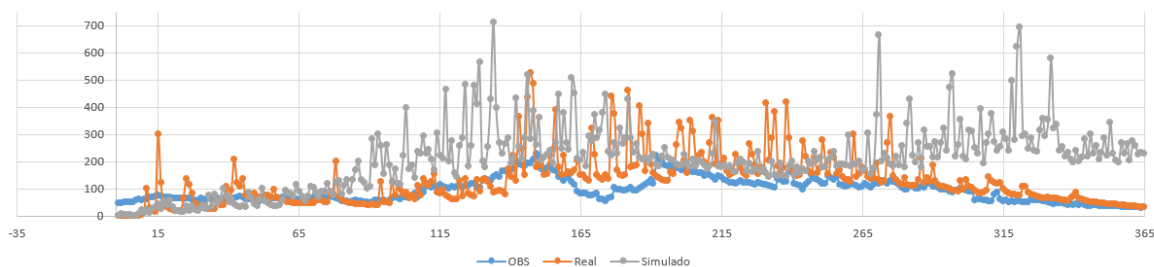


Fuente: Autor.

7.2. Climatología

La zona de estudio, debido a su variada topografía, hace necesario su estudio climatológico previo para estimar zonas con datos anormales o fuera de rango en la elaboración del modelo hidrológico, para lo cual se obtuvieron registros promedio del comportamiento de 5 variables climatológicas (Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Brillo Solar, velocidad del viento) obteniendo los registros de precipitación del IDEAM y los demás parámetros de la base de datos climatológica del banco mundial CMIP3 recomendada por SWAT; debido a la baja densidad de estaciones del IDEAM en la zona, sumado a la existencia de estaciones con alta presencia de datos faltantes, se emplearon los registros de Temperatura, Humedad relativa, Brillo solar y Velocidad del viento de la base de datos CMIP3, los registros de precipitación fueron clasificados en su totalidad de los registros suministrados por el IDEAM, siendo estos vitales para el proceso de modelación y calibración, ya que al emplear registros de precipitación simulados por los distintos sistemas de generación climatológica presentes en el CMIP3, se alcanzaban en algunos casos resultados erráticos y/o muy lejanos a los observados, la comparación de los resultados obtenidos en el proceso de modelación del año 1997 para la estación Capitanejo, empleando datos reales de precipitación y datos simulados se presenta a continuación.

Figura 4 Resultados modelación año 1997 Observados, Simulados con registros del IDEAM y Simulados con registros del CMIP3



Fuente: Autor

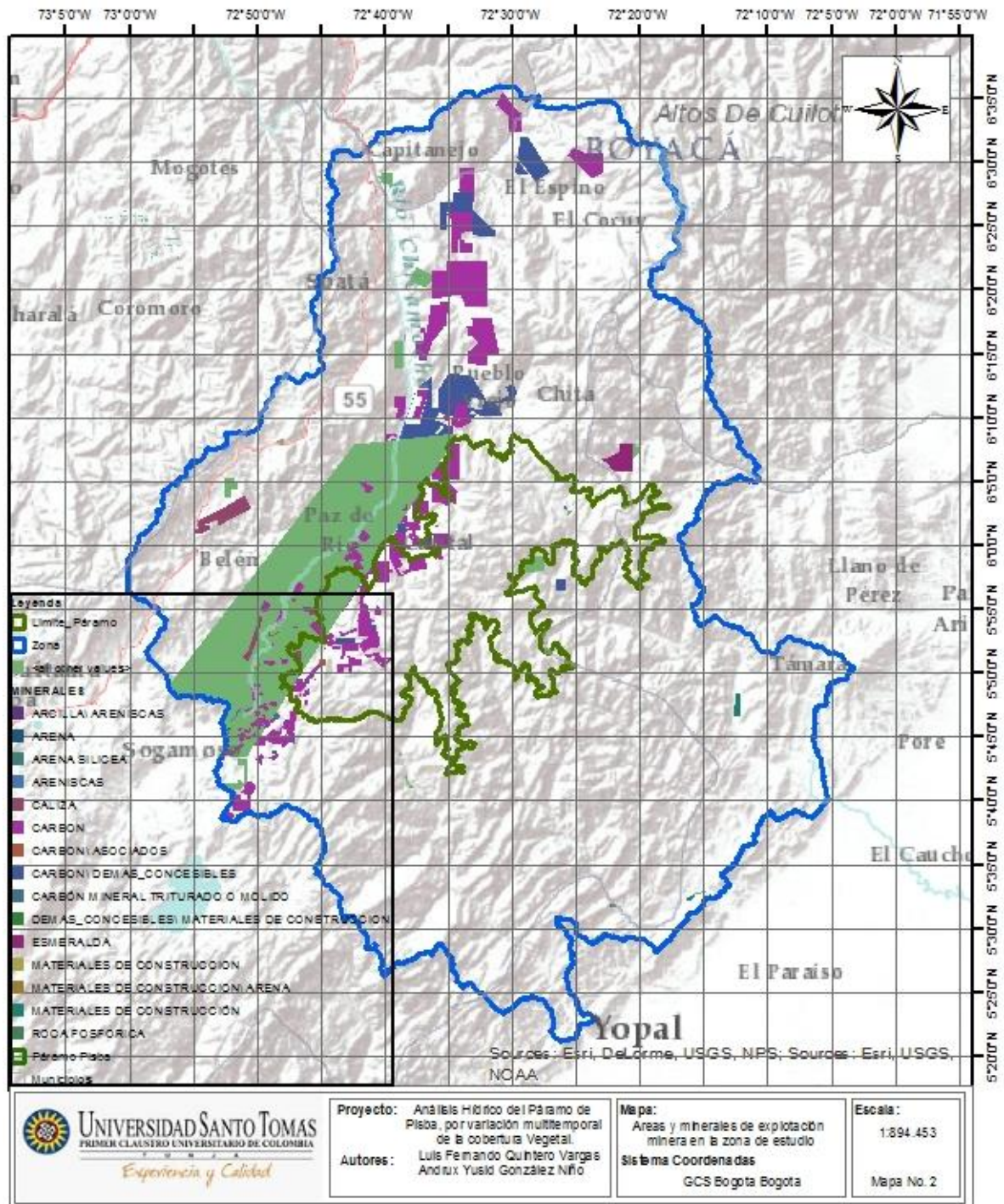
En esta grafica se pueden observar los valores registrados de los caudales para la estación Capitanejo en el año 1997 en color Azul, los valores calibrados por medio de los registros del Ideam en color naranja y los valores simulados por medio de la base de datos del CFSR descrita anteriormente en gris, cabe resaltar que los valores obtenidos por medio de la simulación con los registros de precipitación CFSR difiere totalmente de los datos medidos y de la calibración realizada por medio de los registros de precipitación del Ideam, es por esto que no se emplearon dichos datos para el proceso de calibración.

Además de la necesidad de conocer el comportamiento de parámetros hidroclimáticos, se han de conocer factores tales como las zonas de explotación minera históricas y vigentes, datos socioculturales relacionados a las actividades económicas de la región, corrientes hídricas en la zona y parámetros morfológicos, esto con el fin de comprender de manera más precisa la situación del sector, las zonas que mayor variación presentaran a lo largo de los años, así como las características de las cuencas, las cuales se presentan a continuación.

7.2.1. Economía:

La zona de estudio, debido a las condiciones topográficas, climáticas y de desarrollo de sus centros económicos se ha especializado en el desarrollo de actividades agrícolas, agronómicas, comerciales y de explotación de recursos naturales, siendo las actividades agrícolas el principal factor de desarrollo económico de la población, evidenciándose un crecimiento en las zonas ocupadas por zonas de siembra en los últimos años la minería pese a no ser la principal actividad económica del sector si genera grandes daños ambientales en la zona donde se realizan exploraciones mineras, siendo esta cercana al 30% del área de la zona de estudio según datos obtenidos del shape de explotaciones mineras de Corpoboyaca y siendo principalmente concesionada para la extracción de recursos como el carbón, la esmeralda y el hierro como se puede apreciar a continuación.

Mapa 2 Actividad minera en la zona de estudio



Fuente: Autor

7.2.2. Descripción de la zona de estudio:

La zona de estudio ocupa sectores urbanos y rurales de los municipios de La uvida, Chita, Jericó, Socha, Socotá, Pisba, Tasco, Aquitania, entre otros, cuya morfología es de tipo ortogonal (calles y carreras se cruzan perpendicularmente), con amplia presencia de múltiples elementos hidrográficos como lagos, lagunas y corrientes hídricas entre las cuales se encuentran el río Cravo Sur por el sur oeste, el río Pauto y el río Payero al oeste, el río Chitano al noreste y el río Casanare por el noroeste distribuidos a lo largo de la zona de estudio con mayor presencia de lagunas en zona del páramo.

La ubicación de los distintos cascos urbanos en la zona de estudio dada la topografía del sector, los numerosos cuerpos de agua y corrientes hídricas, así como las riquezas minerales presentes en el mismo, hacen favorable el desarrollo de actividades tales como la agricultura, la ganadería, la minería y la pesca. Los distintos emplazamientos urbanos en la zona se encuentran intercomunicados por medio de vías secundarias nacionales, así como caminos terciarios y trochas, dada su cercanía con la ciudad de Sogamoso se hace favorable el comercio intermunicipal con la misma y el resto del departamento de Boyacá.

7.3. Análisis Multitemporal de la cobertura del suelo

7.3.1. Procesamiento de imágenes satelitales

En el desarrollo del proyecto se hizo necesario el proceso de corrección posterior a la adquisición de las imágenes satelitales, asegurando así, que las imágenes a utilizar se encuentren en la misma posición una respecto a la otra y que al momento de realizar el mapa de coberturas no se presenten errores o confusiones entre uno o más tipos de cobertura vegetal, al mismo tiempo eliminando todo tipo de interferencias tipo ruido, vacíos y alteraciones en la imagen del orden atmosférico;

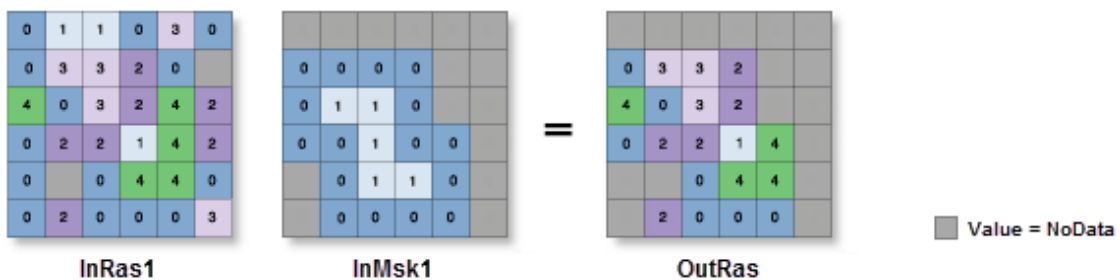
este proceso se divide en dos etapas descritas anteriormente y cuyos resultados y algunos procedimientos se presentan a continuación.

7.3.2. Corrección Geométrica

La corrección geométrica se realizó empleando como puntos de comparación otras imágenes LandSat, presentándose desviaciones menores a 2 píxeles de resolución 30m x 30m entre una imagen y otra, por lo tanto, no fue necesario realizar ningún ajuste en este aspecto, por lo cual solo se hizo necesaria la delimitación de la zona.

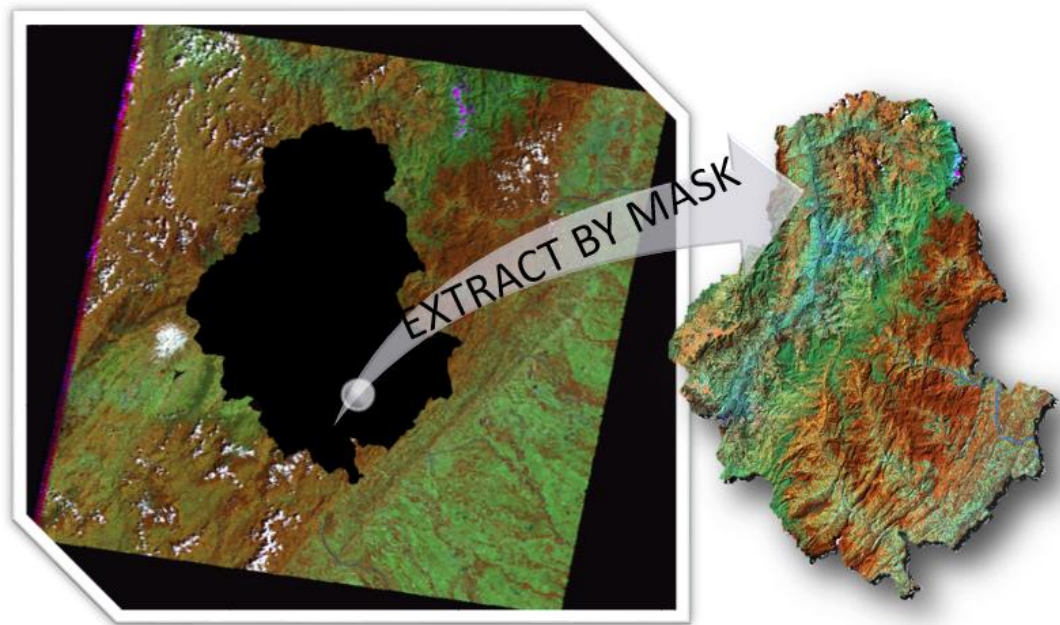
En esta etapa se delimito la imagen satelital para adaptarla al espacio designado como zona de trabajo, este proceso se realizó por medio de la herramienta “Extract By Mask” de la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools”; esta herramienta emplea los píxeles presentes en la primera imagen ingresada para compararlos con la segunda imagen o mascara, generando así una zona idéntica a la máscara, el funcionamiento de esta herramienta, así como el proceso y los resultados obtenidos para el año 2007 se presentan a continuación.

Figura 5 Funcionamiento de la herramienta Extract By Mask



Fuente: Esri, 2016

Figura 6 Proceso Extract By Mask, Año 2007, Bandas 4,5,3



Fuente: Autor

7.3.3. Corrección Radiométrica

Luego de comprobar la adecuada localización de las imágenes satelitales se procede a corregir radiométricamente la imagen, este procedimiento se realiza a cada banda por separado, aplicando una serie de ecuaciones y la herramienta “Raster Calculator” de la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools”, la primera ecuación transformara los valores digitales a radiancia espectral, expresada en $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$. (Molina, 2014), esta ecuación se presenta a continuación.

$$1) L_{\lambda} = (Gain * DN) + Bias$$

Siendo **L_λ**: Radiancia espectral y **DN**: Niveles Digitales de la imagen, los valores de ganancia (Gain) y desviación (Bias) deben ser calculados con base en los parámetros presentes en el metadato (Archivo .MTL), una vez hecho esto se procede a operar, la fórmula de ganancia y desviación se presenta a continuación.

$$2) \text{ Gain} = \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}} \quad \text{Bias} = L_{\min\lambda} - (\text{Gain} * Q_{\text{calmin}})$$

Donde **Qcal**: Es la radiancia calibrada, modificado a escala en unidades de números digitales, **Lmin_λ**: Es la radiancia espectral en Qcal, siendo Qcalmin en el metadato, y **Lmax_λ**: Es la radiancia espectral en Qcal, representada como Qcalmax. Una vez obtenidos los valores de la radiación espectral, se procede a continuar con la tercera fase, el cual es, convertir los valores anteriores a temperatura, aplicando este método solamente a bandas termale, las cuales están disponibles en los satélites más modernos de la serie Landsat. Este proceso se realiza a partir de la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que la temperatura a emplear este en grados centígrados (°C) (Molina, 2014).

$$3) \text{ T} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

En esta fórmula se emplean dos constantes de calibración **K2 y K1**, las cuales son obtenidas de la siguiente tabla.

Tabla 4. Constantes de calibración para sensores TM y ETM+

CONSTANTE	K1	K2
UNIDADES	W (m ² sr μm)	Kelvin
L4 TM	671.62	1284.30
L5 TM	607.76	1260.56
L7 ETM+	666.09	1282.71

Fuente: Molina, 2014

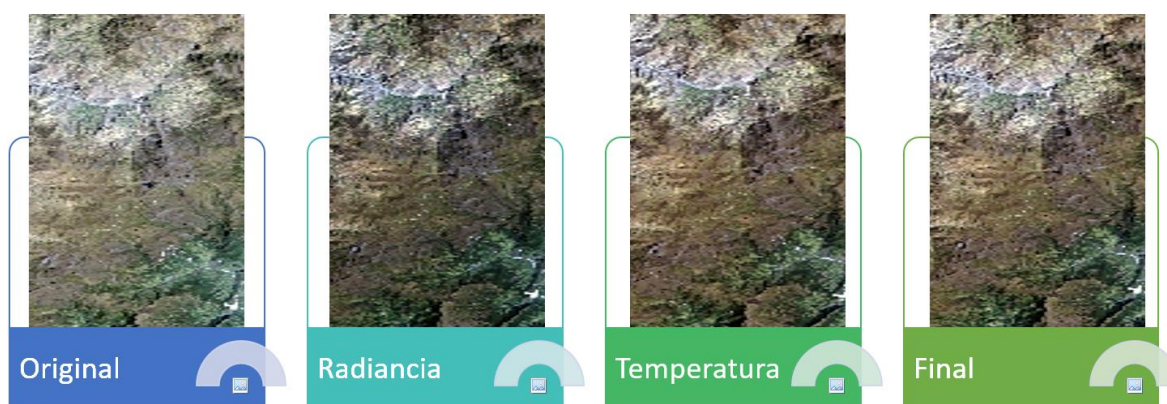
Acto seguido se deben transformar los valores de radiancia a reflectancia, este proceso se realiza empleando la formula siguiente, los valores correspondientes irradiación solar exoatmosferica en el sensor $ESUN_{\lambda}$, así como la distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas d , se obtienen por medio de tablas (Molina, 2014), los demás datos son cálculos de procesos anteriores u obtenidos por medio de Metadatos correspondientes a la imagen analizada (Molina, 2014).

$$4) \rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s}$$

En la cual ρ_{λ} representa la reflectancia, L_{λ} la radiancia, d es la distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas, $ESUN_{\lambda}$ corresponde al promedio de irradiación solar exoatmosférica para el sensor y finalmente θ_s corresponde al ángulo cenit solar (Molina, 2014).

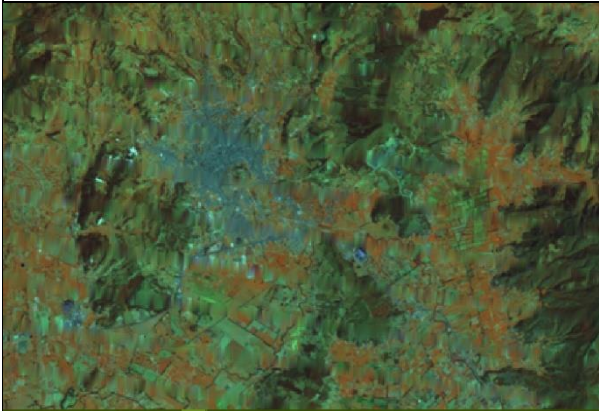
A continuación, se presentan los cambios observados en el proceso de corrección radiométrica del año 2001 en color natural 3, 2, 1, y la variación presentada entre la imagen en estado original y la imagen corregida para el año 2003 aplicando énfasis en la diferenciación de zonas de cultivo y zonas urbanas con una combinación de bandas 4,5,3.

Figura 7 Pasos en la corrección radiométrica año 2001, Bandas 3, 2, 1



Fuente: Autor

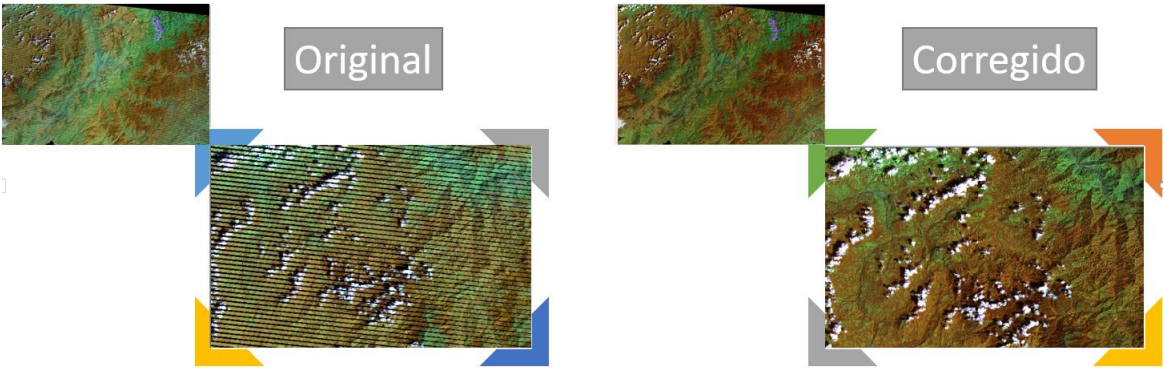
Figura 8 Comparación imagen corregida y sin corregir, año 2003, Bandas 4,5,3

Año 2003	Bandas 4,5,3
Imagen original	Imagen Corregida
	

Fuente: Autor

Adicional a las correcciones de tipo atmosférico, se hizo necesario una corrección de bandeo debido al fallo del sensor SLC que afecto al satélite LandSat 7 a partir del año 2003, hecho por el cual se realizó el llenado de bandas o Gapfill, proceso explicado con anterioridad, cuyos resultados son expuestos a continuación.

Figura 9 Imagen Landsat 7 SLC Off, antes y después del GapFill



Fuente: Autor

7.4. Generación de mapas de cobertura vegetal y geología

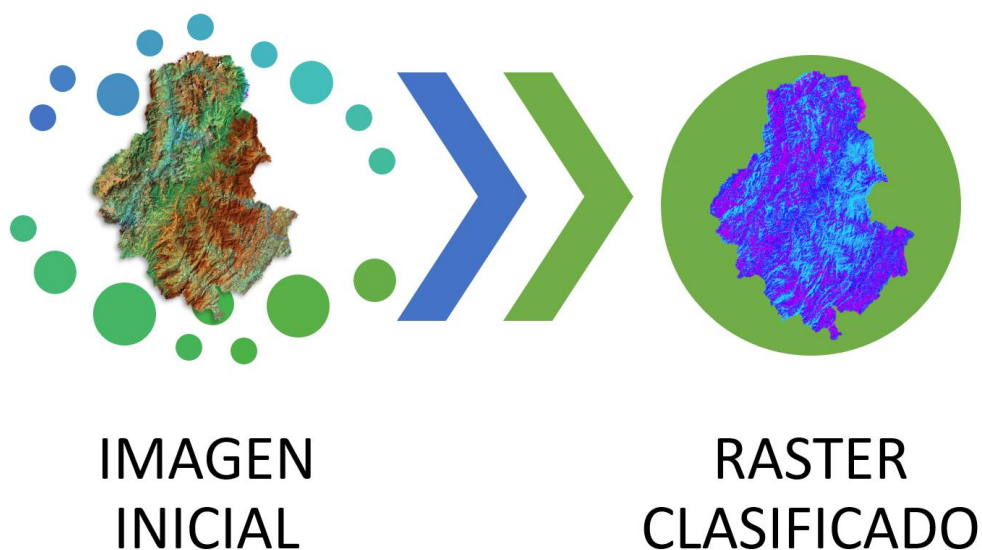
Los mapas de cobertura vegetal y mapa geológico, necesarios para la ejecución del modelo hidrológico fueron sometidos a múltiples etapas luego de su corrección geométrica y radiométrica, las cuales permitieron su clasificación, los resultados generados, así como los procesos realizados se presentan a continuación.

7.4.1. Clasificación no supervisada

Luego de la delimitación se generaron los raster de clasificación, paso fundamental para la clasificación de la cobertura vegetal, este proceso se lleva a cabo empleando la herramienta “Iso Cluster Unsupervised Classification”, de la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools”, esta herramienta emplea dos fases, inicialmente determina parámetros característicos de grupos de celdas, los cuales son almacenados en una base de datos, que finalmente es empleada en la segunda fase por medio de la ejecución de comandos de máxima verosimilitud, el cual genera un raster clasificado basado en la semejanza determinada (ESRI, 2016); este proceso se ejecutó en los años analizados empleando 30 categorías como referencia con el fin de disponer de múltiples polígonos clasificados bajo condiciones de similitud más precisas debido al número de clases empleadas.

El proceso y los resultados generados para el año 2007 se muestran a continuación.

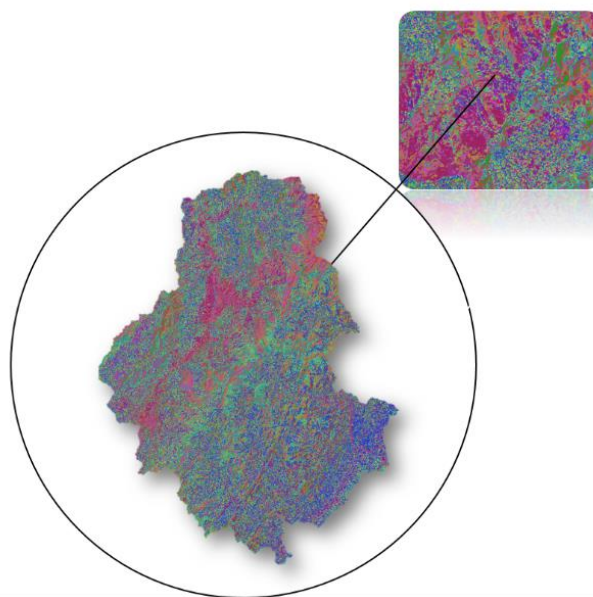
Figura 10 Clasificación no supervisada. Año 2007, Bandas 4,5,3



Fuente: Autor

Posteriormente se convierte el raster de clasificación no supervisada a un shape que pueda ser editado, para esta etapa se emplea la herramienta “Raster to Polygon” de la caja de herramientas “Conversion Tools”, y verificando que la simplificación de polígonos no este activa, ya que al simplificar polígonos se presentan perdidas del área de algunas coberturas vegetales en función de otras, este proceso se realizó en varias ocasiones en el desarrollo del proyecto, comprando variaciones importantes al simplificar polígonos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación para el año 2007.

Figura 11 Shape de clasificación no supervisada, año 2007

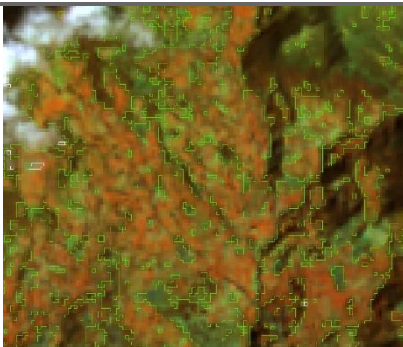
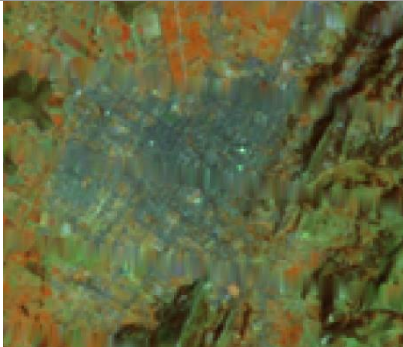
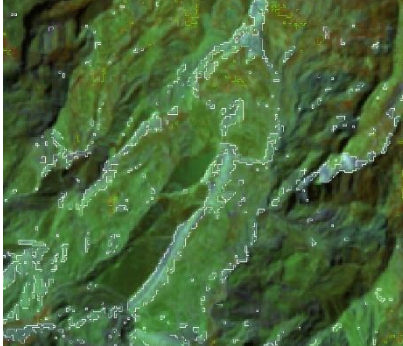


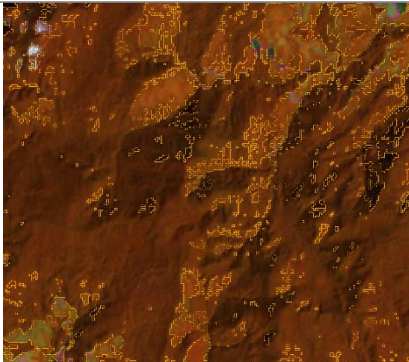
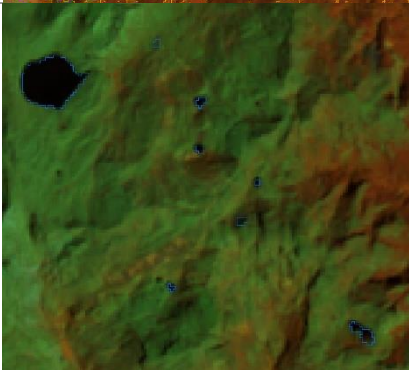
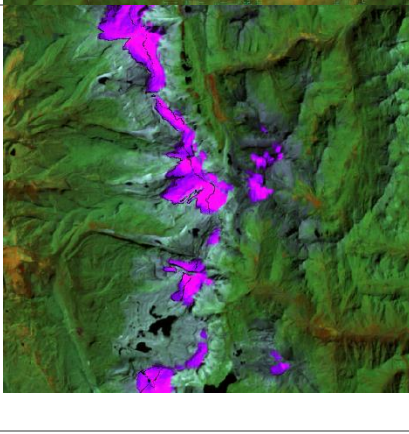
Fuente: Autor

7.4.2. Clasificación y generación de mapas de cobertura vegetal

Los mapas de cobertura vegetal para todos los años analizados fueron realizados clasificando inicialmente elementos asociados a otras coberturas vegetales, tales como el nevado del cocuy, el cual en algunos sectores se confundía con la categoría asignada a nubes, los cuerpos de agua, los cuales se encontraban asignados en su mayoría como sombras, y zonas urbanas las cuales se encontraban categorizadas como suelos desnudos; posteriormente se generalizo el shape con la herramienta “Dissolve”, con el objeto de clasificar cada categoría como un entero con características similares, ahorrando procesamiento del hardware y tiempo. Las condiciones empleadas para la clasificación de las coberturas y el resultado para el año 2007 se exponen a continuación

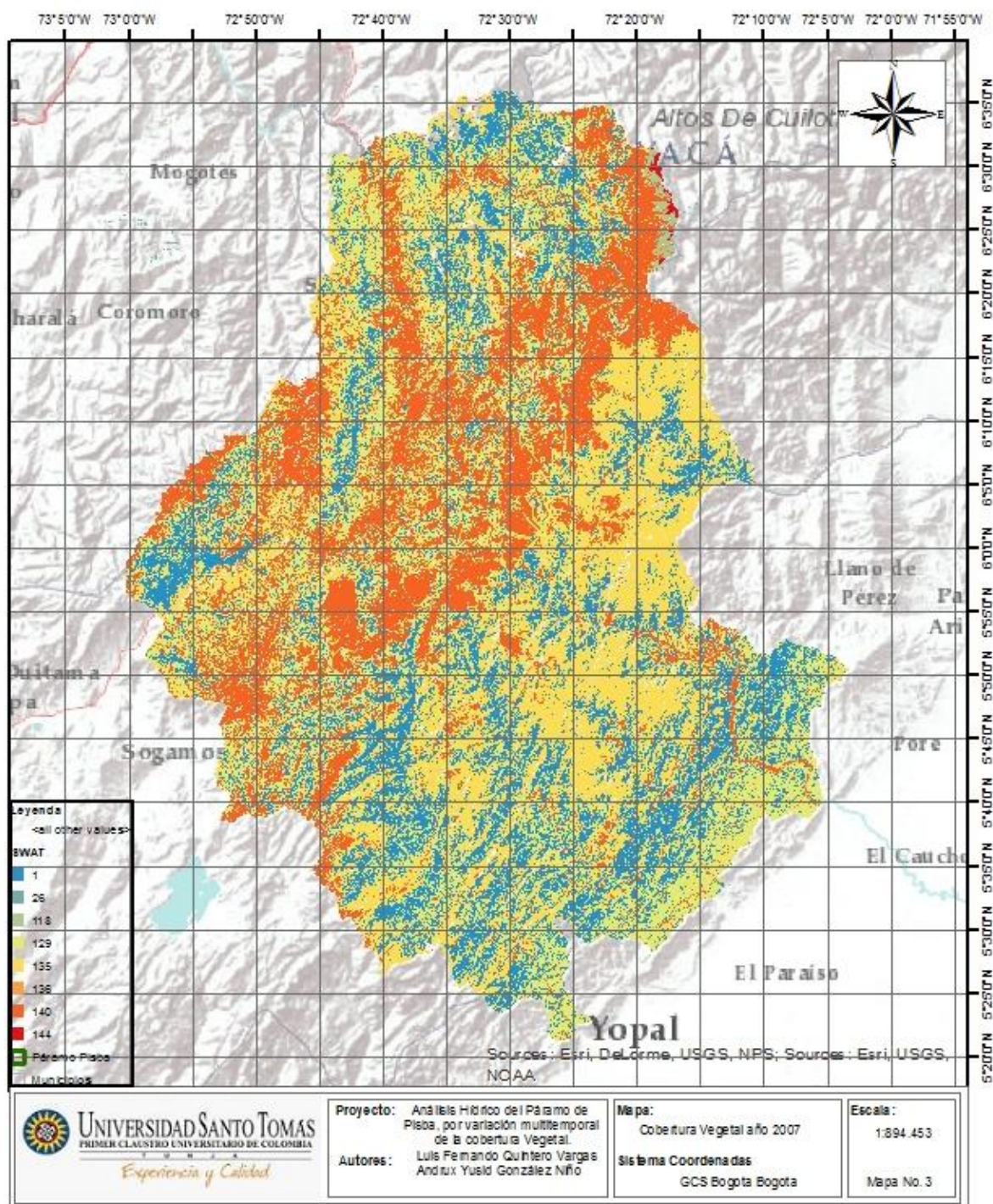
Tabla 5. Parámetros para la clasificación de la cobertura vegetal

Tipo de cobertura	Ejemplo	Características
Zona de cultivos (1)		Tonalidades de verdes claras con mezclas de café, se presentan múltiples tonalidades en pequeñas áreas, son reconocibles mediante acercamiento
Zonas Urbanas (26)		Tonalidades grises a azules, se pueden apreciar las vías en tonos blancos
Suelo Desnudo (118)		Tonalidades azules a azul celeste, suelen ubicarse en zonas montañosas
Matorrales, Arbustos y Pastos (129)		Poseen tonalidades verdes claro con ligeras zonas marrones, se ubican en límites con los bosques y las zonas de cultivo

Bosques (135)		Son representados por tonalidades marrón oscuro, al emplear la combinación de bandas 4,3,2 su tonalidad se torna a rojo oscuro
Cuerpos de Agua (136)		Suelen confundirse con las sombras, pero a diferencia de estas, los cuerpos de agua presentan formas más uniformes y se encuentran presentes en todas las imágenes satelitales ocupando la misma locación
Paramo (140)		Los páramos son identificables debido a la tonalidad verde oscura que poseen.
Nevado (144)		Los nevados son de fácil identificación debido al color violeta que poseen.

Fuente: Autor

Mapa 3 Clasificación de coberturas vegetales año 2007



Fuente: Autor

7.5. Análisis Multitemporal 1985-2015

Luego de realizar la clasificación de la cobertura vegetal para todos los años analizados, se genera una base de datos en Excel, por medio de la cual se analizan las variaciones de cada cobertura en un periodo de tiempo, con lo que se podrá analizar su comportamiento multitemporal y si su variación afecta la regulación hídrica. Los valores de áreas de cobertura vegetal para cada año obtenidos en hectáreas se presentan a continuación, cabe recalcar que, debido a la resolución de la imagen satelital, así como a los sensores a bordo del satélite, las coberturas analizadas a continuación, pueden contener en sí mismas dos o más coberturas vegetales de características similares.

Tabla 6. Cobertura vegetal clasificada en los años seleccionados del periodo 1985-2015

INFO		Area Ha (Año)						
Uso_Swat	Codigo	1986	1992	1997	2001	2003	2007	2015
Nubes	-	6496.2	135.45	45928.89	18606.15	4122.09	1825.38	4443.3
Cultivos	1	167410.2	174464.63	163725	161132.4	203552.19	186650	213828.8
Urbano	26	689.76	689.76	689.76	689.76	689.76	689.76	689.76
Suelo Desnudo	118	5197.59	14729.49	13459.41	10195.29	7616.61	5766.12	5985.63
Pastos/Matorrales	129	183979.9	202452.71	192051.1	197009.4	189752.13	204158.3	184442
Bosques	135	213325.2	198569.3	174584.9	214303.1	205839.82	215128.1	210053.2
Cuerpos de Agua	136	377.37	377.37	377.37	377.37	377.37	377.37	377.37
Paramo	140	231375.7	222308.1	218737.5	207234.4	199657.5	199573.9	198116.1
Nevado	144	2295.62	2209.23	1310.58	1021.32	971.37	728.37	780.93
Sombras	-	18170.82	13382.37	18989.1	18749.25	16739.55	14421.15	10601.1

Fuente: Autor

A lo largo de los años analizados se puede determinar un crecimiento constante en zonas de cultivos, el cual puede verse impulsado por crecimiento demográfico y por el abandono de tierras con suelos de baja fertilidad a causa de la actividad realizada, dando paso a la deforestación de zonas de bosque, zonas de paramo u otras donde sea posible encontrar tierra fértil., presentándose una variación de 46.000 hectáreas desde el año 1986 al año 2015.

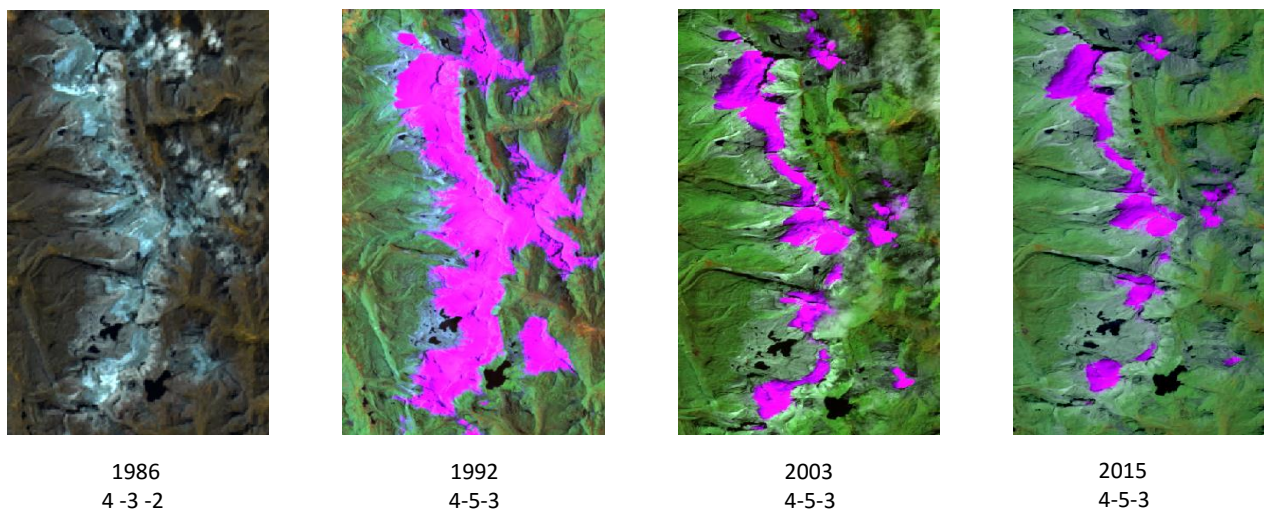
Los suelos desnudos particularmente aquellos en los límites con el nevado del cocuy han presentado reducciones debido al calentamiento global que ha generado la intromisión de nuevas especies vegetales, así como la constante puja por tierras fértiles para el desarrollo de actividades agrícolas y como fuente de alimento para los animales de granja; respecto a las zonas urbanas y los cuerpos de agua, estos fueron clasificados y comparados en múltiples imágenes, obteniendo resultados similares que variaban por la resolución de la imagen.

Tanto la vegetación asociada a bosques como la vegetación de pastos, matorrales y arbustos se mantuvieron estables, presentando baja variación entre los periodos inicial y final, el crecimiento de bosques puede deberse a siembra de árboles, esparcimiento de semillas de los arboles cercanos a predios abandonados, entre otras; de igual forma la estabilidad de zonas de pastos y matorrales puede deberse a la transformación de predios anteriormente dedicados a la ganadería o agricultura, los cuales son abandonados por sus ocupantes y son invadidos por la naturaleza circundante, de igual manera se presentan ajustes en este tipo de cobertura con la recesión de bosques o zonas de paramo.

Los páramos, por el contrario, solo han presentado descensos en su extensión territorial, efecto causado por el calentamiento global, minería, entre otras; la aparente ausencia de recuperación de cobertura vegetal de este ecosistema se puede explicar por el lento periodo de crecimiento que poseen las distintas especies vegetativas que lo habitan, entre ellas los frailejones, cuyo crecimiento es de pocos centímetros al año, algunos de ellos alcanzando un siglo de antigüedad (Semana, 2010). El mayor afectado en términos de pérdidas porcentuales es el nevado del

cocuy, el cual presenta pérdidas superiores al 50% de su extensión territorial en la zona de estudio desde el año 1986 hasta el año 2015, siendo esto fácilmente apreciable en la siguiente grafica comparativa del área de nevado (color fucsia) del año 1986 vs el año 2015

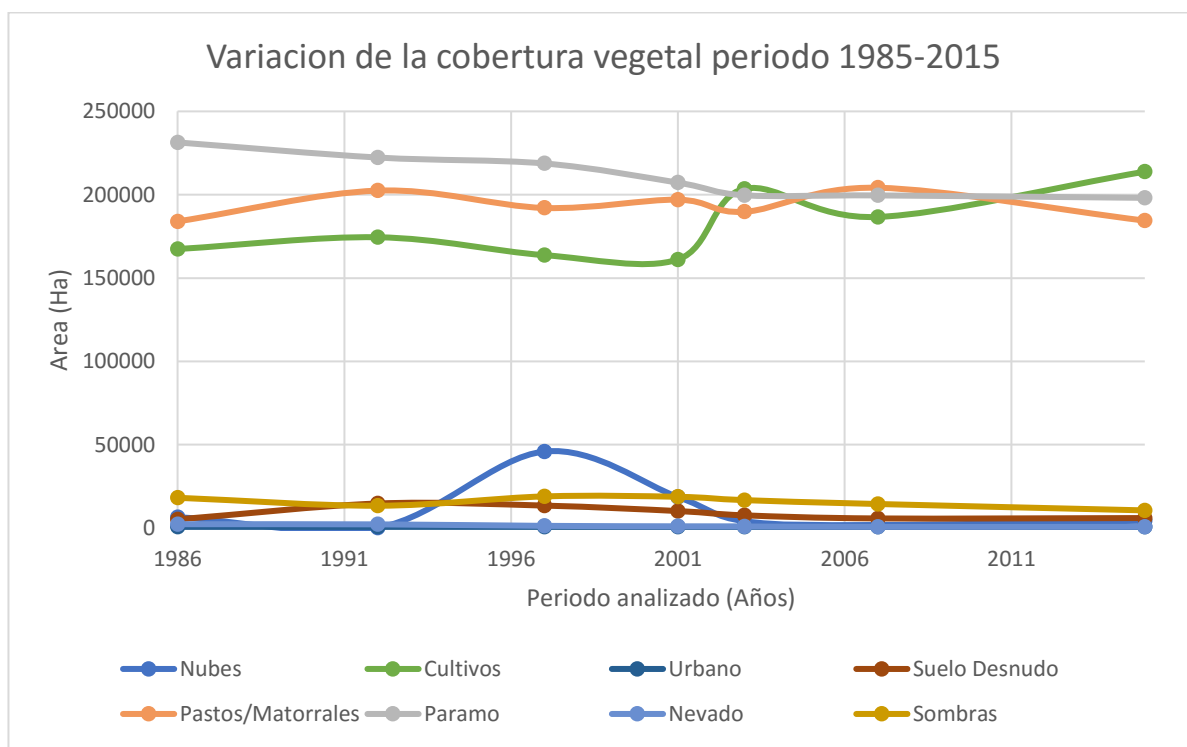
Figura 12 Variación del nevado del Cocuy Año 1986 5.



Fuente: Autor

La grafica siguiente presenta los distintos tipos de cobertura vegetal registrados, así como su proporción y variación en los periodos analizados

Figura 13 Cobertura vegetal registrada para el periodo 1985-2016 en los años analizados



Fuente: Autor

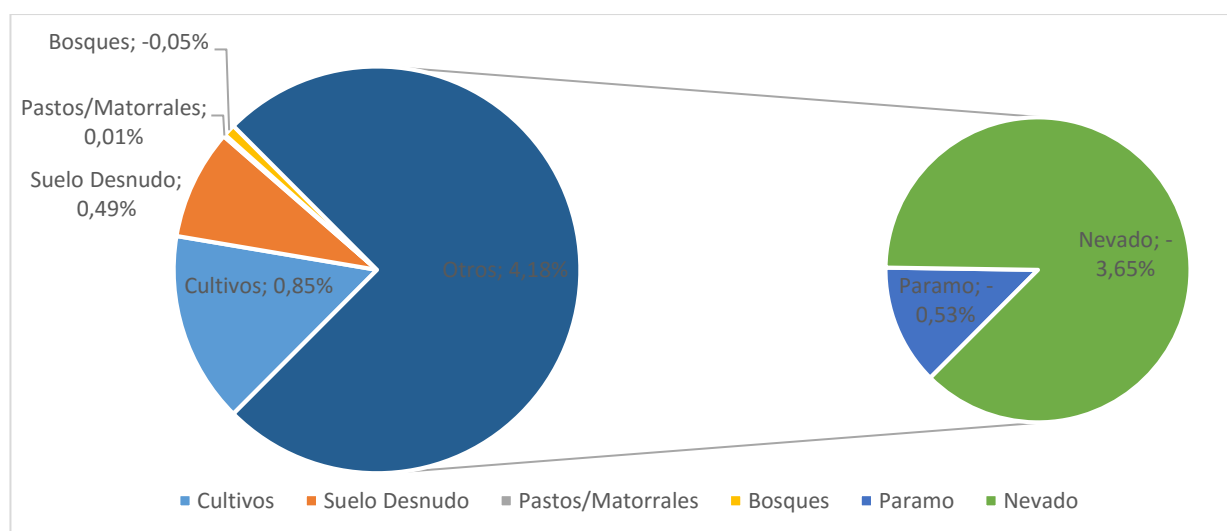
Como se puede determinar, la cobertura que sufrió mayor variación negativa corresponde al nevado, perdiendo un 3.65% en la tasa de cambio anual, seguido por el páramo con pérdidas del 0.53%, las demás coberturas vegetales presentaron variaciones positivas comenzando con los pastos y matorrales con el 0.01%, seguido del suelo desnudo con el 0.49%, para dar lugar al tipo de cobertura de mayor crecimiento, los cultivos con una tasa de crecimiento anual del 0.85%, un resumen de los datos obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 7. Cambio de la cobertura vegetal

Tipo de Cobertura	Perdida (-) / Ganancia (+)	Tasa de Cambio Anual (TAC)%
Nubes	-2052.9	-0.13%
Cultivos	46418.64	0.85%
Suelo Desnudo	788.04	0.49%
Pastos/Matorrales	462.1	0.01%
Bosques	-3272	-0.05%
Paramo	-33259.51	-0.53%
Nevado	-1514.69	-3.65%
Sombras	-7569.72	-0.18%

Fuente: Autor

Figura 14 Tasa de Cambio Anual – TAC (%)

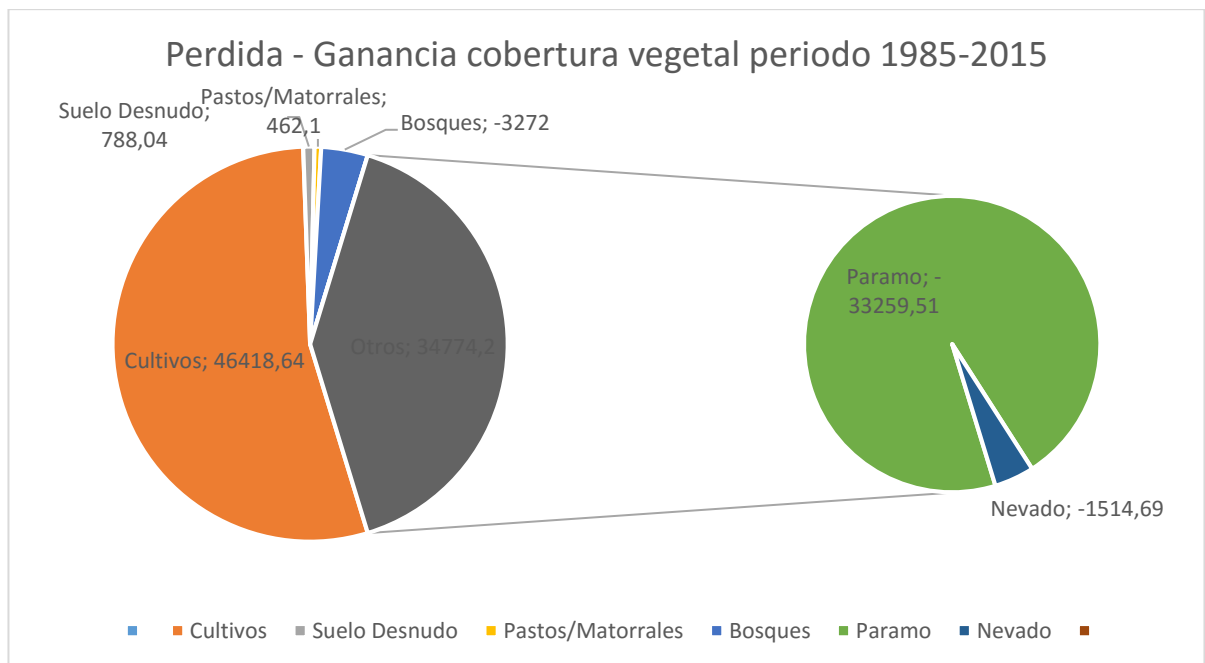


Fuente: Autor

El ecosistema paramuno, en términos de extensión fue el más afectado, perdiendo 33259 hectáreas, seguido de los bosques con pérdidas de 3272 hectáreas, a continuación el nevado con pérdidas de 1514 hectáreas, que debido a su baja extensión territorial ha presentado el porcentaje de cambio más alto y de mantenerse el nivel de deterioro presentado podría desaparecer en los próximos años; estas pérdidas en la extensión territorial han permitido el crecimiento de otros tipos de coberturas vegetales tales como los matorrales con 462.1 hectáreas,

seguida de los suelos desnudos con 788.04 hectáreas, y finalmente los cultivos con ganancias de 46418.64 hectáreas, presentando este el mayor incremento de cobertura vegetal de la zona analizada, impulsado por la creciente demanda de bienes alimenticios, así como la orientación económica de los habitantes del sector los cuales dependen principalmente de actividades relacionadas con la agricultura para su diario sustento.

Figura 15 Perdida y Ganancia - Páramo de Pisba



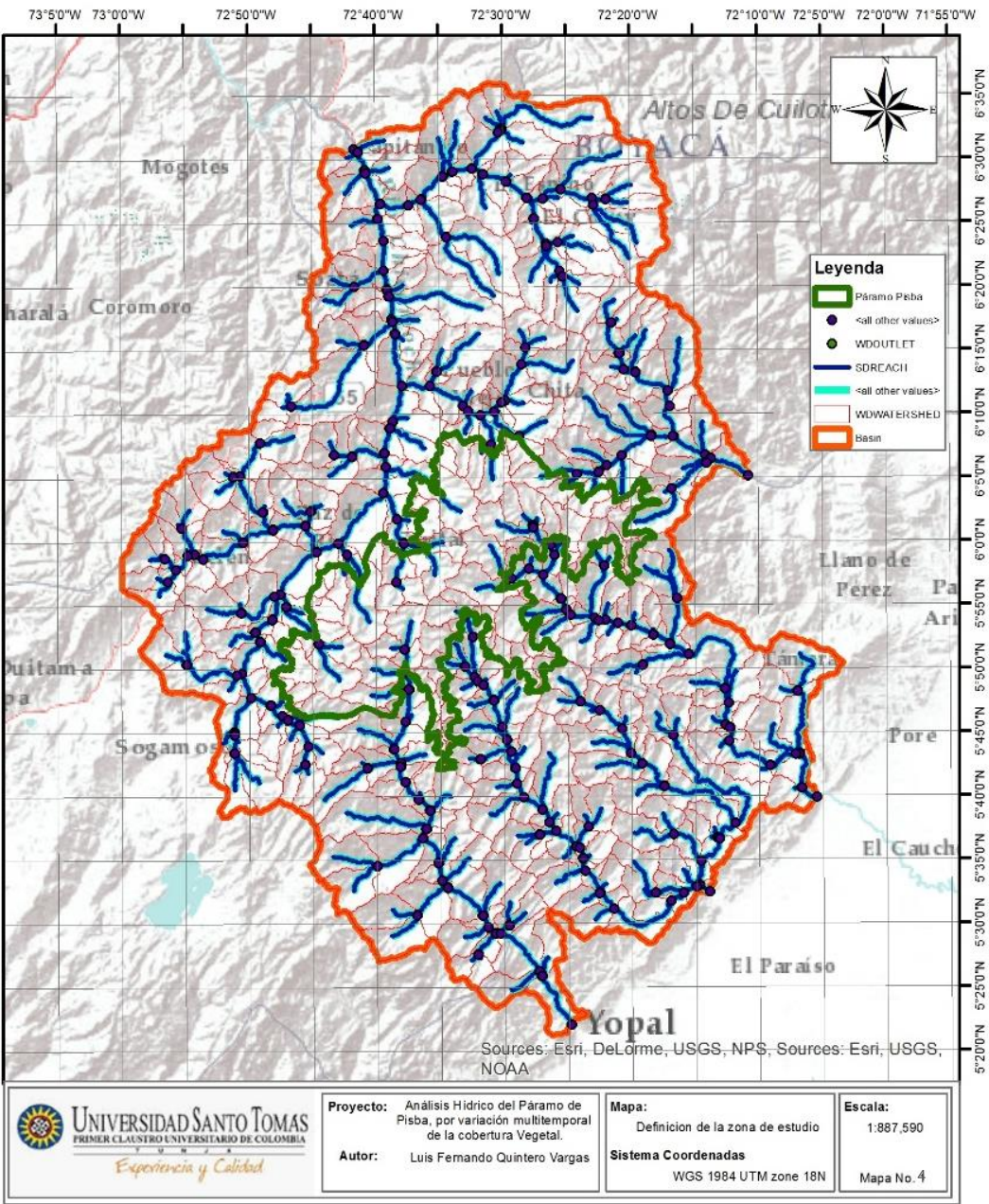
Fuente: Autor

7.6. Modelamiento Hidrológico

El modelo hidrológico seleccionado fue SWAT, debido al tamaño y las condiciones del proyecto, así como su capacidad para analizar el comportamiento de los ríos debido al cambio de las condiciones de cobertura vegetal, así como los parámetros de ingreso que requiere y la cantidad de elementos bibliográficos que pueden ser

empleados como guía o referencia en el desarrollo del proyecto, por medio de este fue definida el área de estudio basándose en la ubicación de las estaciones hidrológicas de Capitanejo, El Playón, Puente Quemado, Puente Nonato y Puente Yopal.

Mapa 4 Definición de la zona de estudio, SWAT

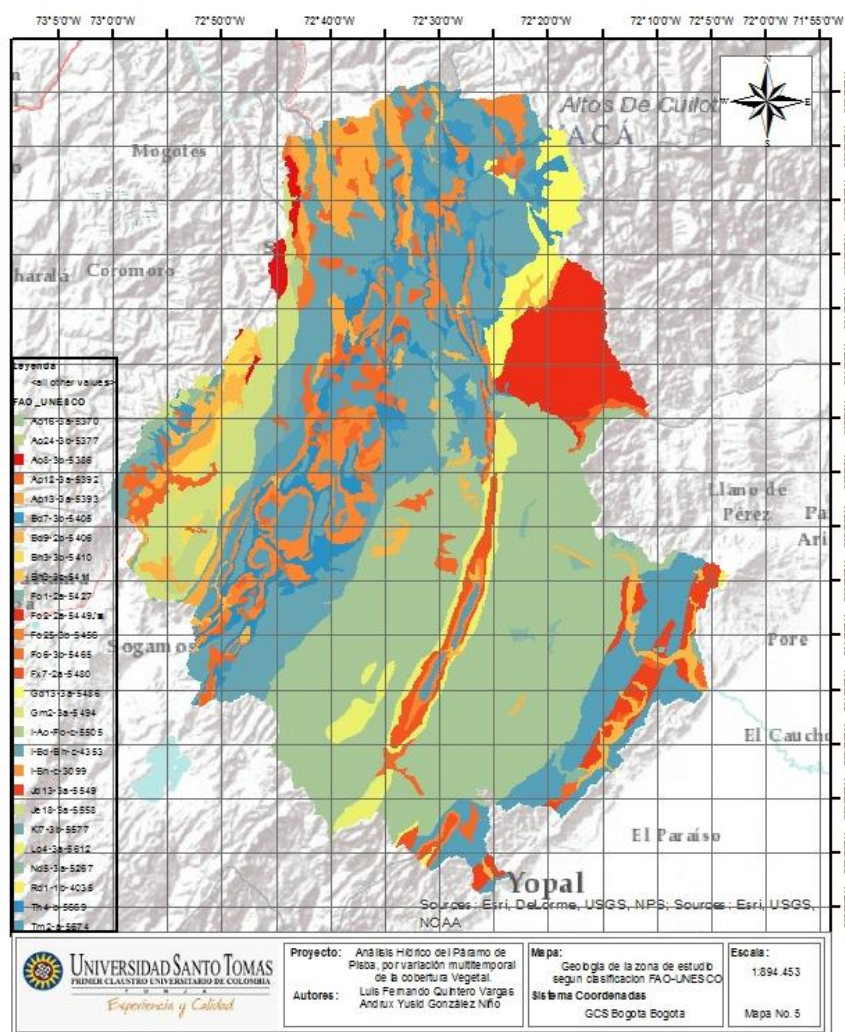


Fuente: Autor

7.6.1. Mapa Geológico

Como último requisito antes de ingresar los paramentos climatológicos se han de ingresar los distintos mapas de uso de suelo y mapa geológico, el cual, se genera mediante la comparación de los parámetros presentes en el shape de unidades Cronoestratigraficas perteneciente al atlas geológico colombiano, los resultados en función de la clasificación de la FAO-UNESCO para Colombia se presentan a continuación.

Mapa 5 Clasificación geológica FAO-UNESCO para la zona de estudio



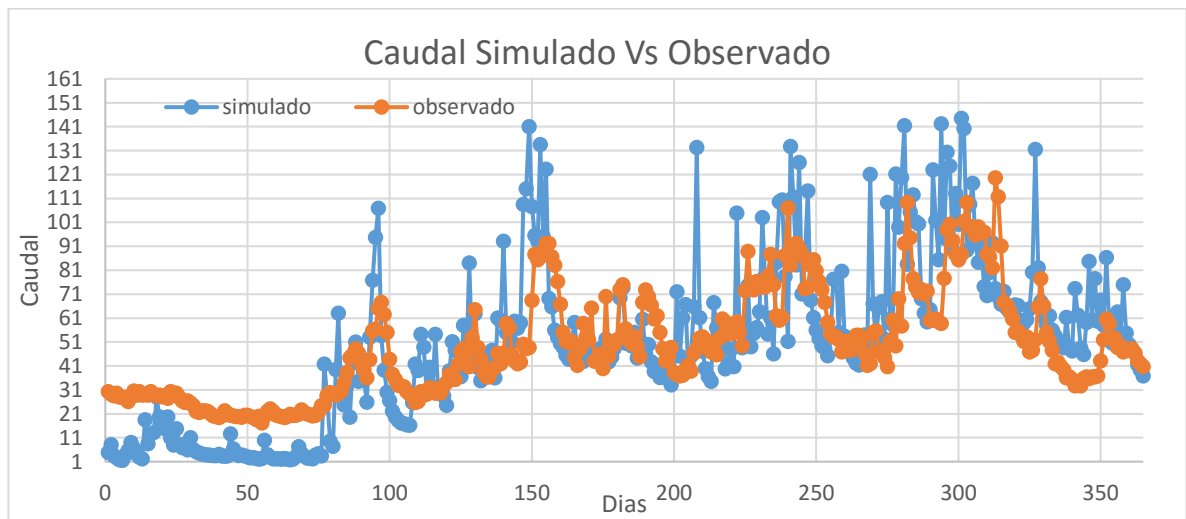
Fuente: Autor

7.6.2. Modelamiento

El modelamiento hidrológico se realizó por medio del complemento SWAT para ArcGis 10.2.2, se presentaron algunas fallas al emplear la versión 10.3 de ArcGis y la versión de SWAT correspondiente, la cual se encuentra en versión Beta, debido a esto se migro a ArcGis 10.2.2, entre los errores presentados se encontró errores en los permisos de escritura de las bases de datos, errores de memoria que corrompían la base de datos y errores en la verificación de los datos ingresados, permitiendo la aparición de coberturas vegetales con áreas del 0% absoluto.

Debido a la extensión de los reportes generados en el proceso de modelación, estos estarán disponibles en los anexos del cd, en su lugar se presentarán los resultados de la modelación del año 2007 de la tabla rch, para la subcuenca número 8 en la cual se ubica la estación hidrológica de Capitanejo, por medio de una gráfica de caudal simulado Vs Observado, cabe resaltar que en este estado sin calibración se alcanzó un coeficiente de Pearson r^2 de 0.54, siendo este cercano al valor obtenido en la calibración de la cuenca mencionada anteriormente en Kenia.

Figura 16 Comportamiento del caudal simulado y observado sin calibrar, año 2007

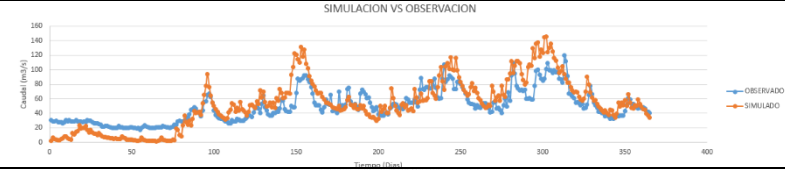
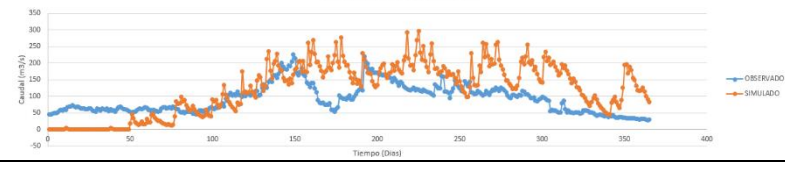
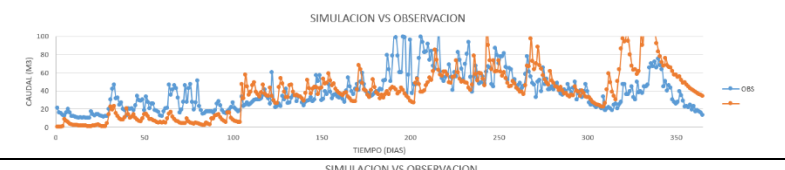
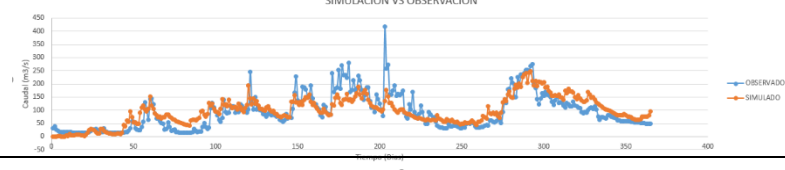


Fuente: Autor

7.6.3. Calibración

El proceso de calibración se realizó por medio del software SWAT-CUP, empleando el algoritmo SUFI2, en el desarrollo de esta etapa se detectaron fuertes variaciones en algunos periodos simulados, principalmente en aquellos con gran cantidad de datos faltantes en sus registros de precipitación, así como aquellos con gran cantidad de datos atípicos analizados por medio de cajas y bigotes, además, teniendo en cuenta que la variación en la cobertura vegetal se comporta de forma adecuada, presentándose cambios leves menores al 5% en cada cobertura, y que las demás variables ingresadas y procesadas derivan de los mismos elementos (Dem, Mapa geológico), se puede inferir que los errores presentados en la modelación y calibración dependen únicamente de la fiabilidad y continuidad de los registros de precipitación, más sin embargo, algunos de ellos fueron ajustados por medio de la completación de datos con la metodología de la razón q y la razón normal, así como simulados por el generador climático de SWAT, obteniendo así resultados superiores a los obtenidos con los datos originales; los procesos de completado de datos realizados por métodos matemáticos se presentan en anexos en el DVD, y, a continuación se presentan los resultados de la calibración para el periodo 1985-2015, empleando como control la estación hidrológica de Capitanejo, ya que, debido a la ausencia de datos fueron descartadas las estaciones de Puente Quemado y Puente Nonato, y debido a la leve presencia de afluentes y baja densidad de estaciones pluviométricas y pluviográficas fueron retiradas las estaciones El Playón y Puente Yopal, cabe destacar que el año 2015 no pudo ser calibrado debido a la ausencia de datos para este periodo en las bases de datos del IDEAM.

Tabla 8. Resultados Calibración periodo 1985-2015 Estación Capitanejo

CAPITANEJO		
AÑO	Parámetros de Calibración	Grafica
2007	$r^2=0.75$ $r=0.86$ $Nc=47.68$	
2003	$r^2=0.74$ $r=0.86$ $Nc=42.96$	
2001	$r^2=0.71$ $r=0.50$ $Nc=43.7$	
1997	$r^2=0.50$ $r=0.78$ $Nc=46.47$	
1992	$r^2=0.31$ $r=0.5$ $Nc=37.19$	
1986	$r^2=0.65$ $r=0.80$ $Nc=32.31$	

Fuente: Autor

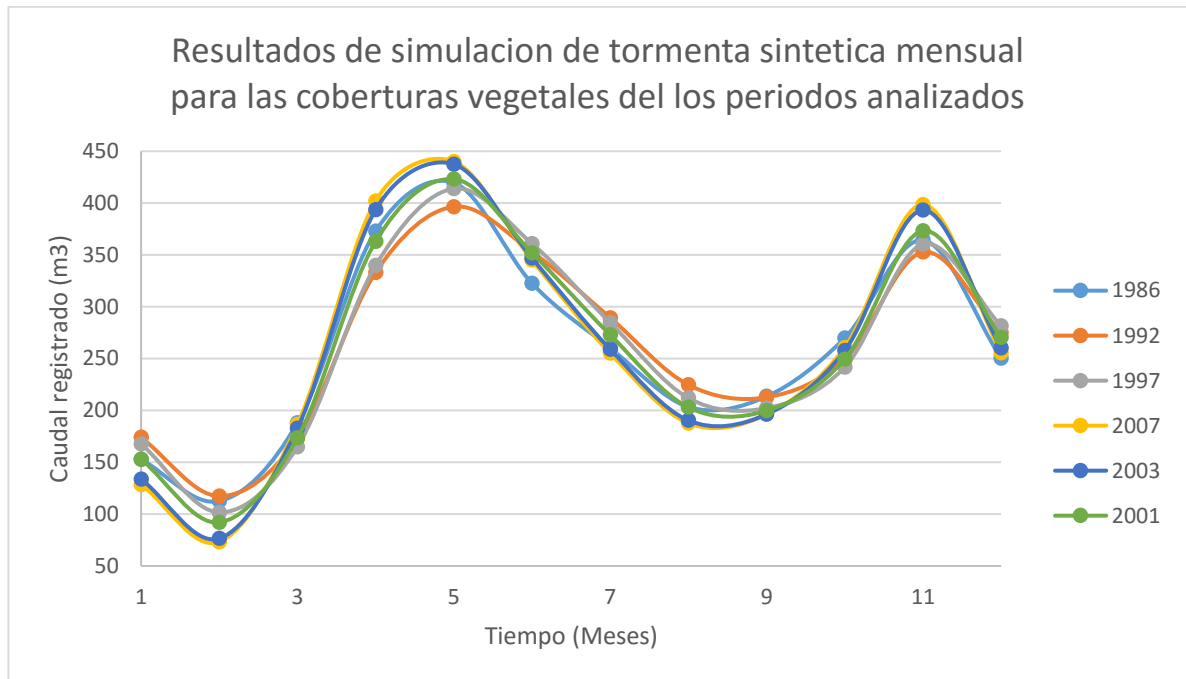
Los resultados de calibración tanto en los parámetros como en las gráficas presentan algunas zonas de incertidumbre, siendo estas causadas en su mayoría por la presencia de datos faltantes simulados por medio de SWAT o calculados por medio de 2 estaciones, en algunos casos lejanas debido a la ausencia de múltiples registros de precipitación, estos errores pueden ser definidos como errores causados por los registros de precipitación como se puede consultar en el

documento Q&A from the ArcSWAT Google Group de la pagina web de SWAT (<http://swat.tamu.edu/software/arcswat/>), de igual manera los resultados del parámetro de calibración r^2 a partir de 0.5 son considerados resultados promedio (Sexton, 2007). El parámetro $r^2 = 0.3$ obtenido en el año 1992 se debe a la cantidad de datos faltantes, para el cual se puede observar en la gráfica la coherencia de los datos observados y calibrados a excepción de un periodo en los meses intermedios y finales donde se presentan picos que reducen en gran medida el resultado de este parámetro. Valores superiores a 0.6 en el coeficiente de Pearson son considerados como resultados muy buenos en especial en calibraciones anuales diarias, en las cuales son calibrados 365 registros de precipitación de múltiples estaciones según el documento Q&A from the ArcSWAT Google Group.

7.7. Cambios presentados

Luego de realizar el proceso de calibración se simulan los múltiples escenarios de cambio de cobertura vegetal, empleando para tal caso una precipitación de estudio, la cual fue generada por el software SWAT y aplicada a todas las coberturas vegetales analizadas posterior calibración, empleando para esto los parámetros obtenidos en la calibración anual diaria; posteriormente estos resultados son comparados y presentados a continuación, respondiendo así a las preguntas de investigación.

Figura 17 Simulación con tormenta de diseño mensual para las distintas coberturas analizadas en el periodo 1985-2015



Fuente: Autor

Como se puede en la figura anterior, se han presentado deterioros en la respuesta hídrica de la zona analizada cuyo comportamiento climatológico sugiere un comportamiento bimodal, acentuándose la diferencia entre los periodos secos en los meses de febrero y agosto y los periodos húmedos para los meses de mayo y noviembre, a medida que avanzan los años y se deterioran las coberturas vegetales encargadas de la regulación hídrica como lo son los páramos y el nevado, de igual manera la reducción de bosques y aumento de zonas dedicadas al cultivo fomentan la erosión del terreno.

Comparando los resultados del año inicial y el año final se presentan variaciones superiores al 10% en los caudales registrados identificado grandes cambios

asociados a la alteración de la cobertura de paramo, principal cobertura afectada en la zona de análisis y responsable de la regulación hídrica.

Tomando como referencia las preguntas de investigación planteadas, se puede comprobar que el cambio en el uso del suelo ha afectado la capacidad de regulación hídrica del páramo de Pisba de forma negativa, presentándose una relación entre la pérdida de cobertura vegetal asociada a paramos y el incremento de los picos secos/húmedos registrados en los distintos escenarios de cobertura vegetal presentados.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Se pudo determinar que en el periodo analizado se ha presentado una disminución en el área ocupada por los páramos, perdiendo el 0.53% del año 1986 al año 2015, y dando paso a coberturas asociadas a la ganadería, y a la vegetación de bajo tamaño como los pastos, los arbustos y los matorrales
- ✓ Se determinó por métodos experimentales que el principal factor asociado a distorsiones en los procesos de modelación y calibración de una cuenca hidrológica corresponde a la calidad de los registros de precipitación, así como a la densidad de estaciones pluviométricas y pluviograficas de la región.
- ✓ Se recomienda emplear la versión de ArcGis 10.2.2 para la ejecución del modelo SWAT, debido a que en versiones más recientes este modelo se encuentra en fase Beta y puede generar errores en la modelación como se pudo comprobar en el desarrollo de este proyecto, presentándose en algunos casos áreas nulas, errores no detectados por el software y fallas en las bases de datos generadas.
- ✓ La clasificación no supervisada es un medio moderadamente eficaz para la clasificación de la cobertura vegetal, el cual puede presentar fallas debido a errores en la imagen, errores humanos o de asignación de categorías.
- ✓ Se pudo determinar pérdidas importantes en la extensión del nevado del cocuy del orden del 3.68%, asociada principalmente al ascenso de la temperatura global.
- ✓ Se encontró una relación entre la perdida de cobertura vegetal anual perteneciente a paramos y bosques, y el incremento de los picos en periodos húmedos/secos para los periodos analizados, encontrando, que la reducción de zonas de paramo afecta la recarga hídrica reduciendo la descarga del recurso hídrico captado por los frailejones a las corrientes dependientes de la misma, alcanzando variaciones en los resultados de la precipitación modelo que varían desde el 34% al -9% mensual.
- ✓ Las imágenes satelitales presentan variaciones importantes respecto a calidad y densidad de pixeles según la tecnología de abordó, presentándose imágenes de baja calidad en el año 1986, la cual fue captada por el satélite LandSat 4 MSS, frente a las imágenes satelitales modernas de las misiones

LandSat 7 y 8, hecho por el cual se pueden presentar errores relacionados a la clasificación de la cobertura vegetal debido a la resolución espacial del sensor y el tipo de sensores a bordo del satélite.

- ✓ Por medio del análisis de parámetros tales como números de curva y características del parámetro o cobertura se determinaron las categorías más adecuadas para el tipo de cobertura vegetal estudiado en la zona, siendo el asociado a paramos el de mayor dificultad, debido a las características endémicas del páramo, por lo cual este fue asociado con la cobertura de tundra herbácea, empleada en algunos procesos de modelación anteriores a nivel nacional, de igual manera se comprobó la existencia de pisos térmicos similares en ambas coberturas y la presencia de un número de curva bajo.
- ✓ A pesar de los ajustes realizados a los datos atípicos en los registros de precipitación de la zona, se presentaron múltiples picos en el proceso de modelación y posterior calibración, siendo estos uno de los factores principales en el desajuste de los parámetros de calibración empleados donde r , fluctúa de 0.5 a 0.86, y r^2 desde 0.3 hasta 0.75, siendo 0.3 un valor bajo, pero que analizando el comportamiento de la gráfica de valores observados vs calibrados se puede comprobar que este se debe a picos altos en periodos de mitad y fin del año, algunos de los cuales superan los 250 mm/s y se deben a la ausencia de datos obtenidos por medio de registros de precipitación.
- ✓ Se determinó un grado alto de fiabilidad de los registros de precipitación obtenidos del IDEAM, obteniendo resultados muy superiores frente a tormentas generadas por métodos matemáticos.
- ✓ El páramo como ecosistema estratégico debe ser protegido sobre todo interés económico, evidenciándose en el desarrollo de este proyecto como la alteración del mismo, que pese a haber alcanzado un máximo de pérdidas del 0.53% ha generado cambios importantes en la regulación hídrica.
- ✓ Por medio del proceso de corrección de imágenes satelitales se determinó un cambio importante en los resultados de la teledetección de estas frente a las imágenes en estado original, debido al mayor resalte de las firmas espectrales que favorecen la clasificación de las mismas en clases afines.
- ✓ La baja densidad de estaciones limnimétricas y limnigráficas de la zona fue la principal causa de la gran extensión de la zona de estudio, además, el mal estado de algunas de estas estaciones dificultó el desarrollo del proceso de calibración de estas zonas.

- ✓ Se recomienda el uso de Swat-Cup sobre el proceso de calibración manual debido a la capacidad del software de manipular múltiples variables al mismo tiempo y de realizar gran cantidad de interacciones en el tiempo en el que la calibración manual permitiría realizar un solo calculo.
- ✓ Es recomendable incentivar políticas que fomenten la reducción de emisiones de gas de efecto invernadero, ya que se puede evidenciar variaciones importantes en zonas pertenecientes al paramo que son afectadas principalmente por la variación de la temperatura global.
- ✓ Se deben adoptar políticas más estrictas respecto a la protección de los páramos como ecosistemas de interés estratégico de la nación, puesto que se evidencian perdidas en los caudales en periodos secos del año causados por la reducción de zonas de paramo e incrementos en periodos de gran humedad debido a la reducción de la vegetación encargada de la captación del mismo y el incremento de la escorrentía.
- ✓ Para el proceso de calibración es recomendable el uso de registros de precipitación reales, medidos por medio de estaciones climatológicas operativas en el territorio nacional frente a los datos generados a partir de simulaciones por computador, presentando grandes diferencias entre ellos.
- ✓ Se recomienda el uso de datos geológicos adaptados al contexto nacional como los de la FAO-Unesco o la generación de una base de datos geológica nacional para SWAT, ya que los datos presentes originalmente pertenecientes a los Estados Unidos pueden diferir en gran medida de las condiciones nacionales y el empleo de estos como sustituto de los parámetros geológicos nacionales conlleva a resultados erróneos como se pudo evidenciar en el desarrollo de este proyecto.

9. GLOSARIO

Algoritmo: operaciones matemáticas cuyo objeto es el cálculo y posterior solución de un problema matemático.

Banda espectral: rango de energía del espectro electromagnético reflejado que es captado a través de un sensor.

Beneficio Ecosistemico: Beneficios aportados por la naturaleza a la sociedad.

Calibración: Proceso por medio del cual los datos obtenidos en el modelo hidrológico son ajustados a valores cercanos a la realidad por medio de la comparación de los mismos con valores reales.

Cobertura Vegetal: Vegetación, o elemento presente en la capa superficial visible de la tierra.

Era Geológica: Unidad de tiempo que mide la escala temporal geológica, la cual abarca periodos de millones de años, y en donde se presentan múltiples procesos geológicos y biológicos.

Geología: Ciencia que estudia los diferentes procesos evolutivos y formativos de la tierra y los materiales que la componen.

Georreferenciación: Asignación de un sistema de referencia de coordenadas a una imagen satelital con coordenadas pixel o diferentes.

GIS: Sistema de información geográfico, el cual permite la visualización el análisis y la interpretación de datos geográficos.

Hidráulica: Rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos

Hidrología: Análisis del agua en movimiento, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como la distribución y calidad de la misma alrededor del mundo.

Landsat: Satélite encargado de la obtención de imágenes satelitales mundiales de resolución moderada

Modelamiento Hidrológico: Modelo matemático con condiciones similares al elemento real representado como 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico.

Modelo de elevación digital: Representación digital compuesta por valores matemáticos que representan la altitud de una zona con respecto al mar

Geomorfología: Estudio de las características físicas de la superficie terrestre

Multitemporal: Que comprende múltiples periodos, estaciones, o eventos.

Paramo: Ecosistema tropical de alta montaña ubicado entre los 3000 a 5000 metros, compuesto por especies vegetales como los frailejones.

Pixel: menor unidad de la cual está compuesta una imagen en un sistema informático

Precipitación: todo tipo de estado del agua que cae sobre la tierra producto de las lluvias.

Radiancia: Flujo o potencia emitida por un elemento sólido, expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián.

Radiometría: Estudio de la medición de las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético

Reflectancia: Capacidad de todo cuerpo de reflejar la luz natural o artificial.

Resolución: Nivel de detalle visible en una imagen digital.

RGB: Composición de colores primarios de la luz Rojo, Verde y Azul (RGB Por sus siglas en ingles)

Sensor Remoto: Todo elemento o instrumento capaz de captar datos visuales, auditivos, electromagnéticos, entre otros.

Servidor: Lugar físico donde son almacenados datos informáticos

SWAT: Soil & Water Assessment Tool , Modelo hidrológico que permite el análisis del comportamiento hídrico en grandes cuencas.

Teledetección: Ciencia que estudia la detección de elementos en la superficie terrestre por medio de satélites u otros instrumentos a distancia

Unidad de respuesta hídrica: Área perteneciente a una cuenca, las cuales comparten atributos comunes relacionadas al ciclo hidrológico

Uso del suelo: Actividad o situación presente en la superficie terrestre, puede ser natural o alterada por el hombre.

10. BIBLIOGRAFÍA

- "Istigatore". (2015). *Geonet: Removing stripes from Landsat 7 SLC OFF images*. Retrieved from <https://geonet.esri.com/thread/164902>
- Abbaspour, K. (2015). Retrieved from http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- Abbaspour, K. (2015). *SWAT: Swat-Cup SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. Retrieved from http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- Abiente, R. M. (2014, 4 17). *El Espectador: Habría al menos 347 títulos mineros en 26 páramos del país*. Retrieved from <http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/habria-al-menos-347-titulos-mineros-26-paramos-del-pais-articulo-555693>
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014, 12). *Portal electronico de revistas academicas de la universidad nacional: Metodologia para la correccion atmosferica de imagenes aster, rapideye, spot 2 y landsat 8 con el modulo FLAASH del software ENVI*. Retrieved from <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/viewFile/6609/6743>
- Ambiente, M. d. (Febrero de 2002). Paramos: Programa para el manejo sostenible y restauracion de ecosistemas de la alta montaña colombiana. 1. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/5595_250510__rest_alta_montana_paramo.pdf
- Ambrosio, G., Gonzales, J., & Arevalo, V. (2002). *Machine Perception & Intelligence Robotics: Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la*

detección de cambios en una serie temporal. Retrieved from <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>

ANDRADE, E. (2011, 09 27). *civilgeeks.com Ingenierias y construcción*. Retrieved from [civilgeeks.com Ingenierias y construcción: http://civilgeeks.com/2011/09/27/conceptos-basicos-de-los-modelos-hidrologicos/](http://civilgeeks.com/2011/09/27/conceptos-basicos-de-los-modelos-hidrologicos/)

Banco de Occidente. (2001). *imeditores.com*. Retrieved from Paramos de Colombia: <http://www.imeditores.com/banocc/paramos/cap3.htm>

Barriga, J. E. (2013). *Universidad de Antioquia, Taller de aplicacion de HEC-HMS*. Retrieved from [http://ingenieria.udea.edu.co/~jecanon/hojadevidajecb_archivos/HTML/taller %20HEC-HMS/caracter%EDsticas.htm](http://ingenieria.udea.edu.co/~jecanon/hojadevidajecb_archivos/HTML/taller%20HEC-HMS/caracter%EDsticas.htm)

Cabrera. (2015, 7 29). *Universidad Nacional de Ingenieria: Modelos Hidrologicos*. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/

Cabrera, J. (2012). *Imefen: Modelos Hidrologicos*. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf

Caracol. (2015, 8 16). *Caracol Radio*. Retrieved from <http://www.caracol.com.co/noticias/regionales/la-ganaderia-esta-acabando-con-los-paramos-en-colombia/20150816/nota/2896006.aspx>

Celleri, R. (2004). *Condesan, Efectos de la cobertura vegetal en la regulacion hidrológica de mcrocuencas de paramo*. Retrieved from http://www.condesan.org/portal/sites/default/files/publicaciones/archivos/celleri-et-al-2004-efecto_del_pino_en_el_paramo-informe_final_diuc_ii.pdf

Censat. (2013). *Censat Agua Viva: Minería de carbón afecta al municipio de Tasco, Boyacá, páramo y Parque Natural Pisba*. Retrieved 8 19, 2015, from <http://censat.org/es/noticias/mineria-de-carbon-afecta-al-municipio-de-tasco-boyaca-paramo-y-parque-natural-pisba>

- Chacón, D. B. (2015). *Tecnologico de Costa Rica: Caracterización de fuentes de contaminación y estrategia de manejo ambiental de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica*. Retrieved from http://bibliodigital.itcr.ac.cr/bitstream/handle/2238/4032/estrategias_manejo_microcuenta_jaboncillal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cleef, T. y. (1996). *Banco de la republica, Biblioteca virtual Luis Angel Arango: El páramo: un ecosistema de alta montaña*. Retrieved 1 1, 2015, from <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/faunayflora/paramo/indice.htm>
- CNICE. (2006). *Procesamiento digital de las imagenes satélite*. Retrieved from *Procesamiento digital de las imagenes satélite*: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/i_filtros.htm
- Colparques. (2016). *Organizacion Colparques*. Retrieved 1 8, 2016, from <http://www.colparques.net/PISBA>
- Columbia, M. y. (2015). *Drenaje Ácido de la Minería*. Británica, Canadá.
- Contraloria, C. d. (2015, 4 27). *Contraloria General de la republica*. Retrieved from http://www.contraloria.gov.co/documents/72584229/190243783/Rpta_COR_POBOYACA_2013-51655-80154-D.pdf
- Corpocaldas. (2010, 12 30). *Corpocaldas: ECosistemas de Paramos*. Retrieved from http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=639
- Cortolima. (2008). *Cortolima: El páramo un ecosistema afectado por el cambio climatico*. Retrieved from https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/paramo_cortolima.pdf
- DGI. (2009). *divisão de geração de imagens: Landsat123*. Retrieved from http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT123_ES.php

- Díaz Granados, M., & Camacho, L. (2013, 03 19). MODELACIÓN HIDROLOGICA Y AMBIENTAL DE UNA SUBCUENCA DE LA CIUDAD DE BOGOTA. BOGOTA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.
- Dicyt. (2010, 7 26). *Agencia iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología*. Retrieved from <http://www.dicyt.com/noticias/los-paramos-colombianos-podrian-desaparecer-como-consecuencia-del-cambio-climatico?handle=los-paramos-colombianos-podrian-desaparecer-como-consecuencia-del-cambio-climatico&newsId=>
- Dinero. (2014, 8 23). *Dinero: Alerta en los paramos*. Retrieved from <http://www.dinero.com/pais/articulo/alertas-danos-paramos-colombia/200159>
- Educativa, C. N. (2006). *CNICE: Aplicaciones de la Teledetección*. Retrieved from http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_aplicacion.htm
- El Tiempo. (2009, 3 19). *El Tiempo: Hasta el 75 por ciento de los páramos de Colombia podría desaparecer por el cambio climático*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4888809>
- Elena Rebollo. (2012). *UniMilitar, ESTUDIO MULTITEMPORAL PARA LA DETERMINACIÓN DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS TOTA - BIJAGUAL -MAMAPACHA PARA EL PERIODO 1992 – 2012*. Retrieved 3 3, 2016, from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11863/1/ESTUDIO%20MULTITEMPORAL%20PÁRAMO%20TOTA-BIJAGUAL-MAMAPACHA.pdf>
- ESA, E. S. (2009). *EUROPEAN SAPCE AGENCY*. Retrieved from EUROPEAN SAPCE AGENCY: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html

- Esri. (2008). *Learn Arcgis: Valorar las huellas de incendios con imágenes de satélite*. Retrieved from <https://learn.arcgis.com/es/projects/assess-burn-scars-with-satellite-imagery/lessons/compare-band-combinations.htm>
- ESRI. (2016). *Arcgis: Clasificación no supervisada de cluster ISO*. Retrieved from <http://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/iso-cluster-unsupervised-classification.htm>
- European Space Agency . (2014). *Esa: Teledeteccion a ondo*. Retrieved from https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMZ3YD3GXF_0.html
- FAO. (2015). Retrieved from <http://www.fao.org/americas/perspectivas/suelo-agua/es/>
- Fernandez, Y. O. (2015). *EXPLORACION MINERA EN EL PARAMO DE PISBA - BOYACA*. Retrieved 2 2, 2016, from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7798/3/OSORIOFERNANDEZAURAYESIKA2015.pdf>
- FERNÁNDEZ, Y. O. (2015). *EXPLORACION MINERA EN EL PARAMO DE PISBA - BOYACA*. Retrieved 2 2, 2016, from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7798/3/OSORIOFERNANDEZAURAYESIKA2015.pdf>
- Flores. (2013). Retrieved 1 16, 2015, from <http://www.explored.com.ec/noticias-ecuador/la-unesco-salva-quimsacocha-582341.html>
- Gavilanes, P., & Landi, M. (2011). *UNIVERSIDAD DE CUENCA: EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LA MICROCUENCA DEL RIO ZHURUCAY*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/388/1/TESIS.pdf>
- Gestion ambiental del agua. (2013, 9 23). *Gidatahari*. Retrieved from <http://gidahatari.com/ih-es/modelamiento-hidrologico>

- Gidaharti. (2014). *Gestion sustentable del agua: Métodos de estimación para completar datos de precipitación*. Retrieved from <http://gidahatari.com/ih-es/metodos-estimacion-completar-datos-precipitacion>
- GOSO AGUILAR, P. C. (2015). MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA MINERÍA. *SECCIÓN GEOLOGÍA REGIONAL Y AMBIENTAL*.
- Greenpeace. (2009). *Greenpeace: Paramos en peligro*. Retrieved 5 22, 2015, from <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/paramos-en-peligro/>
- Greenpeace. (2013, 12). *Paramos en peligro: El caso de la minería de carbon en Pisba*. Retrieved from <http://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/images/2013/paramos/12/Informe%20Páramos%20en%20peligro.pdf>
- Guerrero, E. (2009, 3). *Condesan: Implicaciones de la minería en los paramos de Colombia, Ecuador y Peru*. Retrieved 9 20, 2015, from http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/Informe_Mineria___Paramos__Version_Preliminar_.pdf
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena Vásconez, P. (2003). *Los Páramos del Mundo*. ECOCIENCIA.
- Humboldt, I. (2011, 12). *El gran libro de los paramos*. Retrieved 6 13, 2015, from https://rds.org.co/documentos/el_gran_libro_de_los_paramos
- IDEAM. (2008). *IDEAM*. Retrieved 5 5, 2016, from <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>
- IDEAM. (2012). *IDEAM: Calibración radiométrica y Corrección atmosférica*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022108/PARTE2.pdf>

- IDEAM. (2014). Retrieved 11 24, 2015, from IDEAM: Incendios en la cobertura vegetal: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/incendios-cobertura-vegetal>
- IDEAM, I. Y. (2008). *IDEAM: Mapa de cobertura de la tierra, Cuenca Magdalena-Cauca*. Retrieved 5 5, 2016, from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021521/LIBROCORI NEFINAL.pdf>
- IGAC. (2014, 3 31). *IGAC: Estos son los 5 “pecados” que podrían haber desencadenado la tragedia ambiental en Casanare, según estudio del IGAC*. Retrieved from <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/ef2a84804391398596edf7f9d08ae71d/Estos+son+los+5+pecados.pdf?MOD=AJPERES>
- Jhon Obiero, M. H. (2011). *Scientific Research: Modelling of Streamflow of a Catchment in Kenya*. Retrieved 8 12, 2016, from <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=7522>
- L.Neitsch, G. A. (2011, 9). *SWAT: Soil & Water Assement Tools Theorical Documentation Version 2009*. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Luteyn. (1999). *Lib.icimod.org*. Retrieved from Paramos: A checklist of plant diversity, geographical distribution and botanical literature: <http://lib.icimod.org/record/10268/files/235.pdf>
- Mariano Ospina Rodriguez. (2003). *Sogeocol: El paramo de sumapaz un ecosistema estrategico para Bogota*.
- Mario Diaz, J. N. (2005, 10 25). *Scielo: Páramos: Hidrosistemas Sensibles*. Retrieved 2 1, 2016, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200008

- Martinez, C. L. (2008, 6). *Pontificia Universidad Javeriana: Servicios ecosistémicos que provee el páramo de la cuenca alta del río Teusacá: Percepción de los actores campesinos y su relación con los planes ambientales en la vereda Verjón Alto, Bogotá D.C.* Retrieved from file:///C:/Users/LuisFernando/Downloads/LANDSAT/servicios_paramos_teusaca.pdf
- Minambiente. (2016). *Minambiente*. Retrieved 29, 2016, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/410-plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-12>
- Minambiente. (2016, 3 22). *Minambiente: Avanza la delimitación de páramos en Colombia*. Retrieved 6 16, 2016, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2246-avanza-la-delimitacion-de-paramos-en-colombia>
- Minitab. (2016). Retrieved from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/graphs/graphs-that-compare-groups/boxplots/boxplot/>
- MOLINA S, I. (11 de 2014). *GISGEEK, Todo lo relacionado con la tecnología Geoespacial en un sólo Blog*. Obtenido de GISGEEK, Todo lo relacionado con la tecnología Geoespacial en un sólo Blog: <http://sistemasdeinformaciongeografica911.blogspot.com.co/2014/11/correcion-radiometrica-una-imagen.html>
- Molina, I. (22 de 11 de 2014). *Drive.Google: CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA A UNA IMAGEN LANDSAT EN ARCGIS 10.2.2*. Obtenido de <https://drive.google.com/drive/folders/0B27DKCbNwIP9SVIUMGtJMDNLWmc?usp=sharing>
- Nacional, I. G. (2004). *Instituto Geografico Nacional: Teledeteccion*. Retrieved from <https://www.ign.es/ign/layoutIn/teledeteccionQueEs.do>

- Nacional, R. (2004, 2 14). *El Tiempo: COLOMBIA ESTÁ QUE ARDE*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1500303>
- Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams. (2005, 6). *SWAT Soil & Water Assessment Tool: Herramientas de evaluacion del suelo y agua documentacion tecnica*. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>
- OPENFOAM. (2004). *OPENFOAM: About OpenFOAM*. Retrieved from <http://openfoam.com>
- Ordúz, L. E. (2012). *Docplayer, PROTECCIÓN DEL PÁRAMO DE PISBA, PARTICIPACIÓN DE LA COMUNIDAD CAMPESINA DE TASCO EN LA DEFENSA DE SU TERRITORIO Y EL DERECHO AL MEDIO AMBIENTE SANO*. Retrieved 8 29, 2015
- Organizacion para la educacion y Proteccion Ambiental. (2016). *Opepa, Paramo- Descripcion Completa*. Retrieved 4 29, 2016, from http://www.opepa.org/index.php?option=com_content&task=view&id=195&Itemid=31
- Paramos, M. d. (2010). *Mecanismo de informacion de Paramos, ¿Que son los paramos?* Retrieved from <http://www.paramo.org/content/¿qué-son-los-páramos>
- Paramos.org. (2010). *Mecanismo de informacion de Paramos*. Retrieved 1 5, 2015, from <http://www.paramo.org/content/¿qué-son-los-páramos>
- Parques Nacionales. (2009). *Parques Nacionales De Colombia*. Retrieved from <https://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.0121>
- Partner, J. (2013, 9 5). *BBC Mundo*. Retrieved from http://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/09/130905_ciencia_verde_paramos_andinos_cambio_climatico_np

- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology*, Prentice Hall . Retrieved from http://ing.unne.edu.ar/pub/Modelos%20hidrologicos_Tema9.pdf
- Procuraduria General de la Nacion. (2008, 6). *Panorama y perspectivas sobre la gestion ambiental de los ecosistemas de paramo*. Retrieved 12 5, 2015, from <http://fundacionecoan.org/Documentos/Eventos/libro5.pdf>
- Radio, C. (2007). *Caracol: Los páramos de Colombia en la mira de los incendios forestales*. Retrieved from http://caracol.com.co/radio/2007/02/12/nacional/1171298340_390234.html
- RAPCA, UNESCO. (2003). *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation: Correcciones Radiometricas*. Retrieved from <https://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/02%20Introduccion%20Sensores%20Remotos/Correcciones%20Radiometricas.pdf>
- Rincon, W. (2012, 1 18). *Sistemas Agroforestales*. Retrieved 5 19, 2015, from <http://sistemasagro-forestalesboyac.blogspot.com.co/2012/01/problematica-ambiental-de-los-paramos.html>
- Rivas, M. A. (2016, 2 3). *Escuela Colombiana de Ingenieria: APLICACIÓN DEL MODELO SWAT PARA LA SIMULACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAN JUAN BAJO LA INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA*. Retrieved from <http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/376/1/CF-Maestría%20en%20Ingeniería%20Civil-1130612607.pdf>
- Rivera, G. (2010, 6). *Ambiente Bogota*. Retrieved from http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Informe_Final_Tunjuelo_Julio.pdf

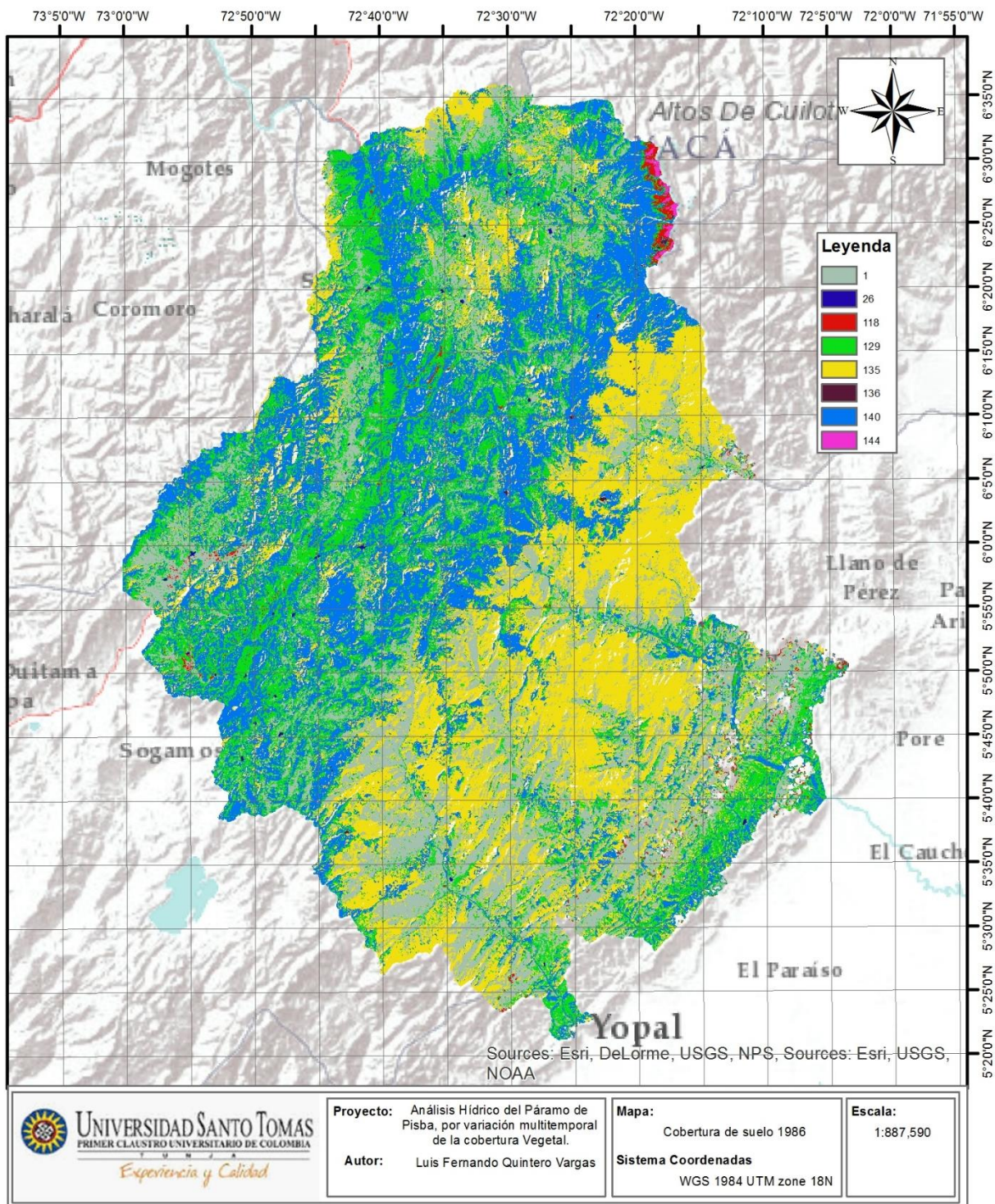
- Ronderos, M. T. (2011, 9 6). *Semana*. Retrieved from <http://www.semana.com/nacion/articulo/la-fiebre-minera-apodero-colombia/246055-3>
- S. Malunjkari, G. S. (2015, 3). *International Journal of Inventive Engineering and Sciences: Estimation of Surface Runoff using SWAT Model*. Retrieved from <http://www.ijies.org/attachments/File/v3i4/D0600033415.pdf>
- S. Neitsch, J. A. (2005). *SWAT: Herramienta de Evaluacion de suelo y agua Documentacion Teorica*. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>
- Semana. (2010, 11 22). *Semana: El monje de los paramos*. Retrieved from <http://www.semana.com/especiales/articulo/el-monje-paramos/125790-3>
- Sexton, A. M. (2007). Retrieved from Evaluation of Swat Model Aplicability for Waterbody Impairment Identification and TMDL Analysis: <https://books.google.com.co/books?id=yxBUfn-P0nkC&pg=PA77&lpg=PA77&dq=r2+0.5+swat&source=bl&ots=BcpNTkwKvF&sig=muNvzHqJ9-m71jtYg-FBxA7ph-0&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj7yu-826fQAhWJ8CYKHx3RAsgQ6AEIJzAB#v=onepage&q=r2%200.5%20swat&f=false>
- SPHY. (2016). *SPHY: Spatial Processes in Hydrology model*. Retrieved from <http://www.sphy.nl>
- TELEDET. (2010). *TELEDET*. Obtenido de TELEDET: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/procesamiento-imagenes-satelitales.htm>
- Teledet. (2014). *Teledet: Procesamiento de las imagenes satelitales*. Retrieved from <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/procesamiento-imagenes-satelitales.htm>

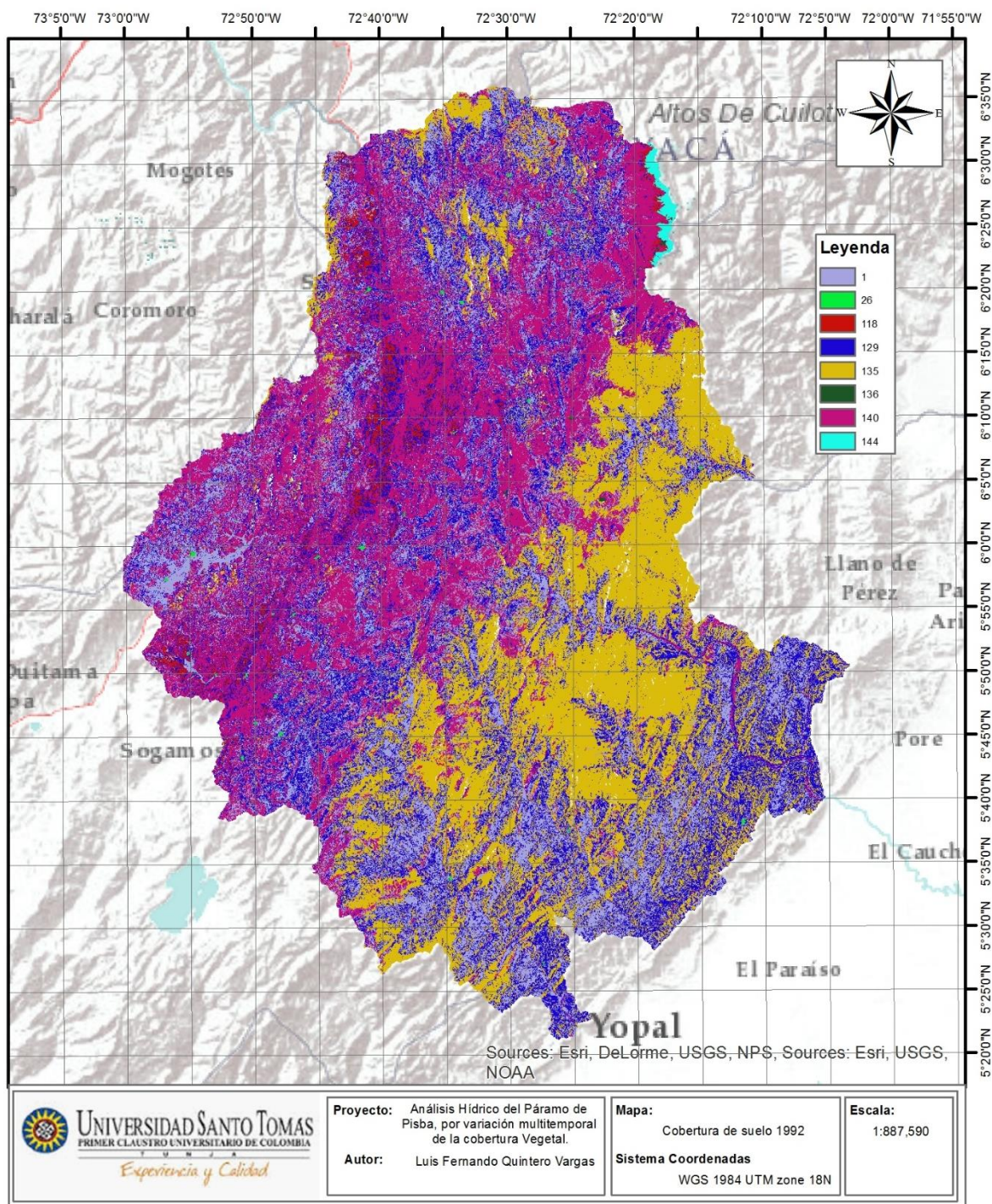
- TodaColombia. (2006). *Clima Colombiano - Factores Atmosféricos del Clima*. Retrieved from <http://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombiano.html>
- UAEM. (2015, Junio 24). *Universidad Autonoma del Estado de Morelos*. Retrieved from Universidad Autonoma del Estado de Morelos: <http://www.uaem.mx/gacetavirtual/colaboraciones/analisis-de-los-cambios-de-cobertura-vegetal-y-uso-del-suelo-para-el-municipio-de-jojutla/286>
- Universidad de Murcia. (2004). Retrieved from <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema09.pdf>
- URIBE, N. (2010, 03 20). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005.
- US Army Corps of Engineers. (2012). *Hydrologic Engineering Center*. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- USGS. (2003). *USGS: SLC-off Products: Background*. Retrieved from http://landsat.usgs.gov/products_slc_offbackground.php
- USGS. (2006). Retrieved from http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php
- USGS. (2013). *USGS: Frequently Asked Questions About the Landsat Missions*. Retrieved from http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php
- USGS. (2013). *USGS: Landsat 8 History*. Retrieved from http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php
- USGS. (2014). *USGS, Frequently Asked Questions about the Landsat Missions: How is Landsat 8's Coastal/Aerosol band (Band 1) used?* Retrieved from http://landsat.usgs.gov/L8_band_1.php

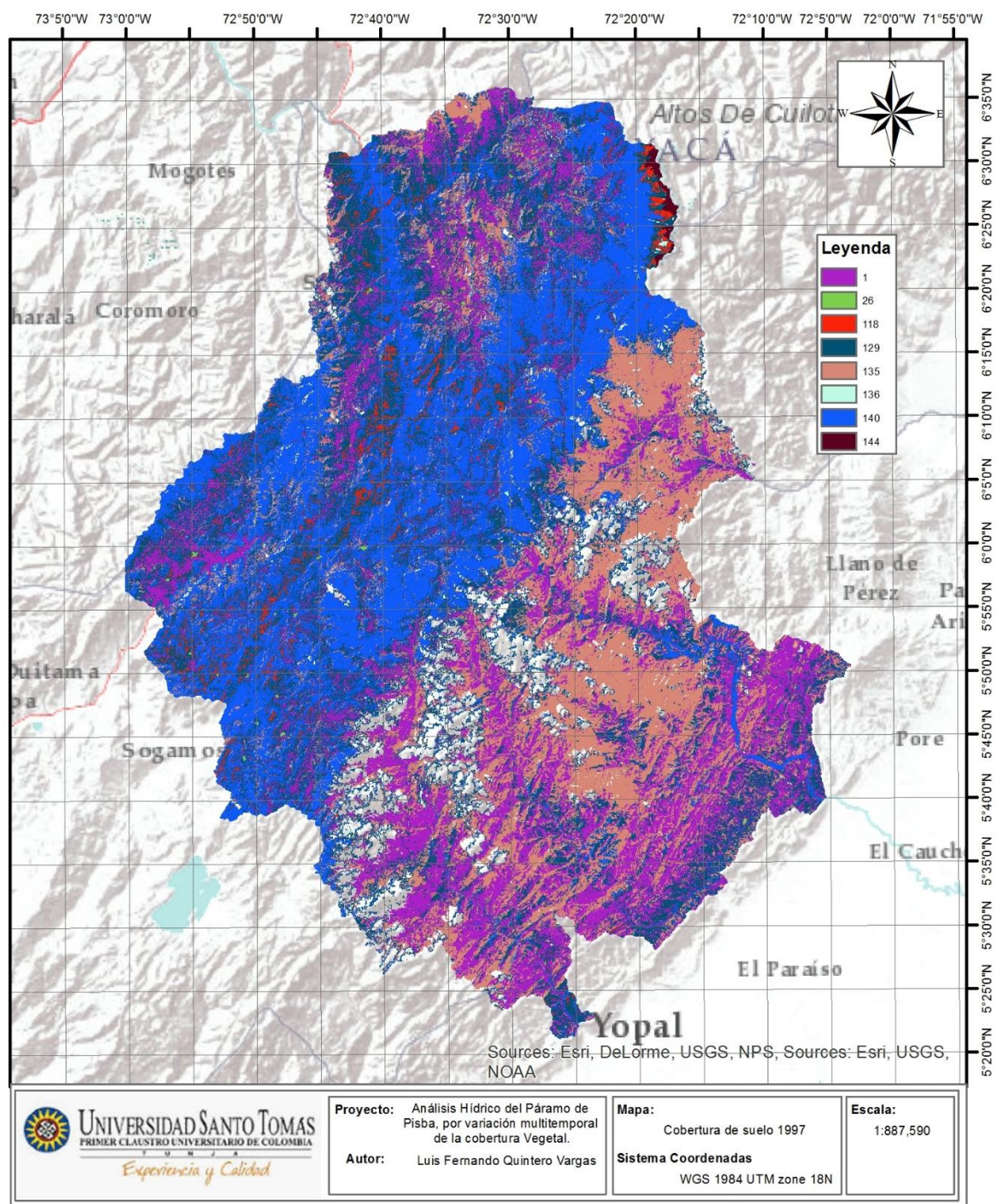
- USGS. (2014). *USGS: Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972*. Retrieved from http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php
- USGS. (2016, 08). *USGS*. Retrieved from http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/PRMS.html
- USGS. (2016, 5). *USGS: MODFLOW and related programs*. Retrieved from <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>
- Valenzuela, A. (2015, 5 10). *ElColombiano: Preocupante minería en los paramos*. Retrieved from <http://www.elcolombiano.com/colombia/en-79-930-hectareas-de-paramo-hay-actividad-minera-YE1886771>
- W. Buytaert, D. B. (2005). *Hydrology & Earth System Sciences: The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes*. Retrieved 11, 2015, from <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/8/108/2004/hess-8-108-2004.pdf>
- Xu, C.-y. (2002, 10 20). *Technische Universität Braunschweig*. Retrieved from http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Master.Unsicherheiten/2012/Lit/Hydrology_textbook.pdf

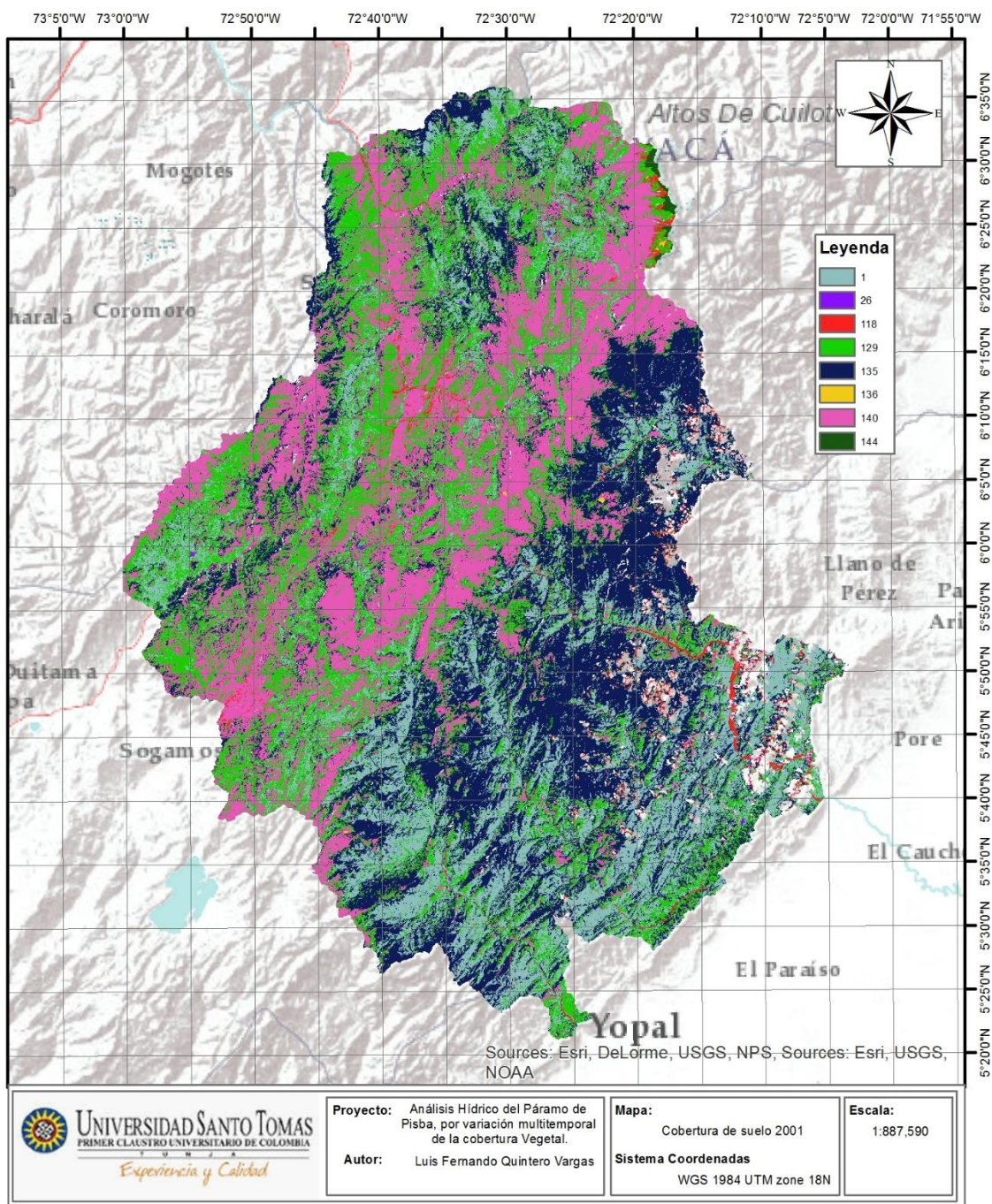
11. APÉNDICES Y ANEXOS

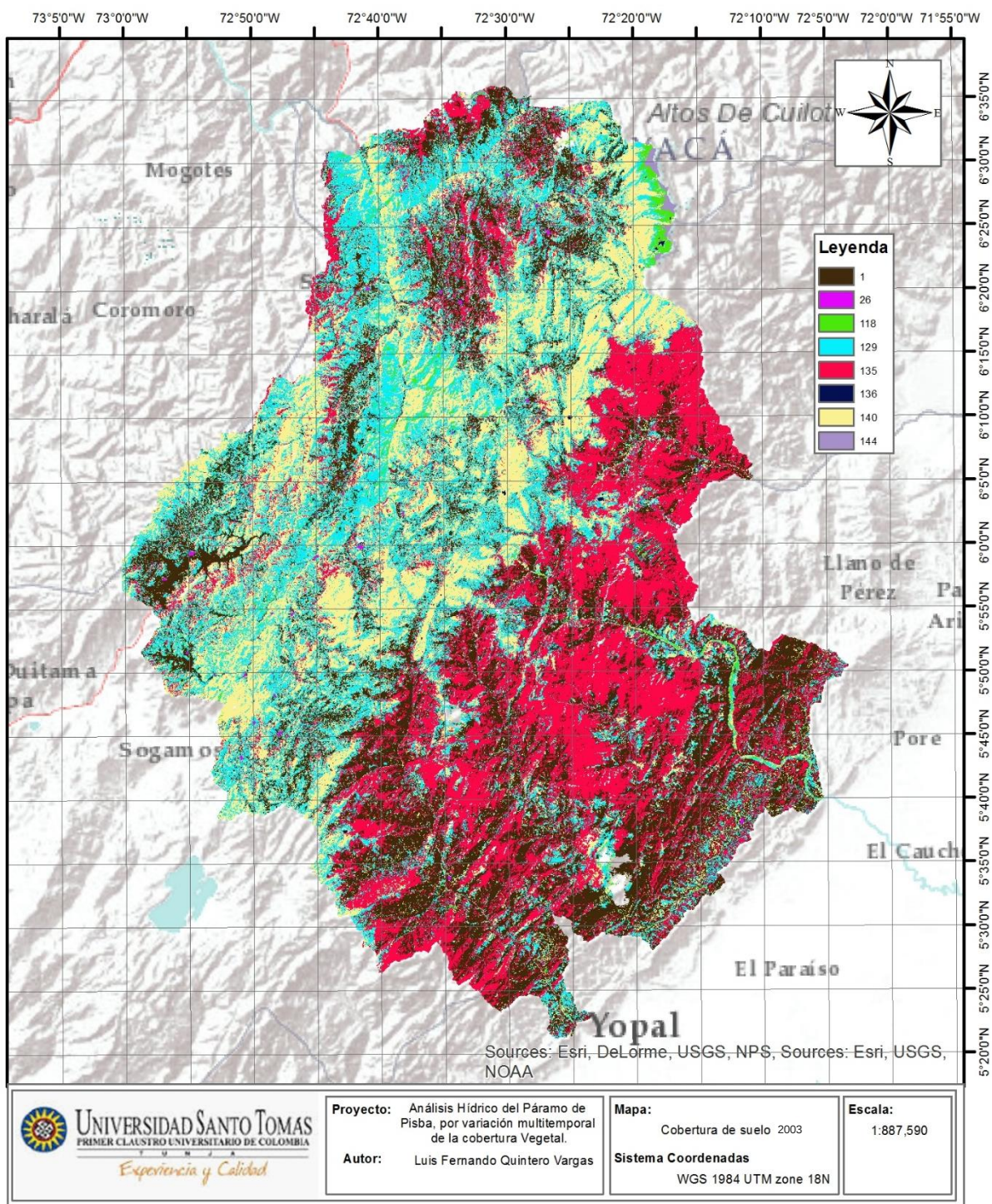
11.1. Anexos mapas cobertura de suelo

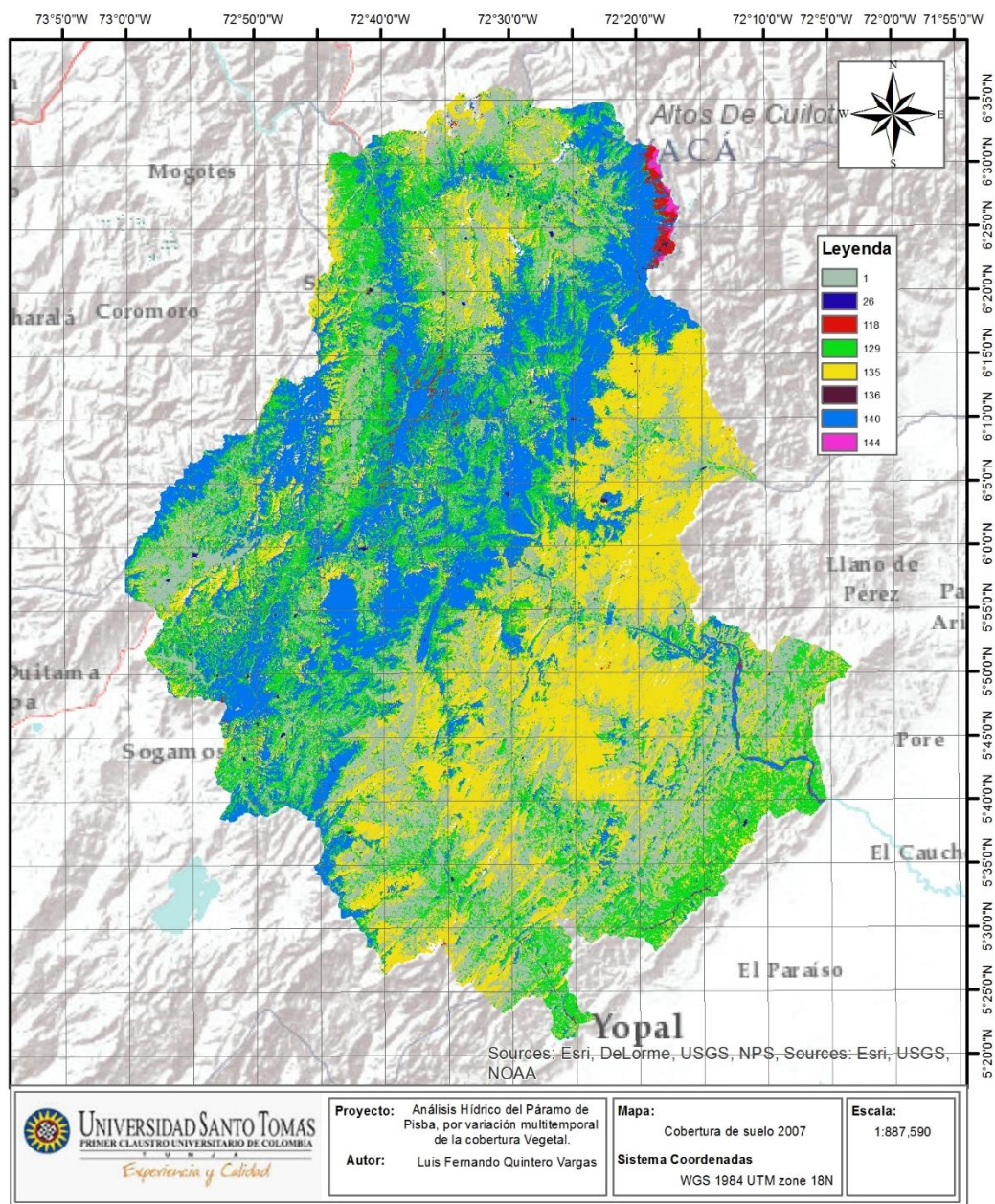


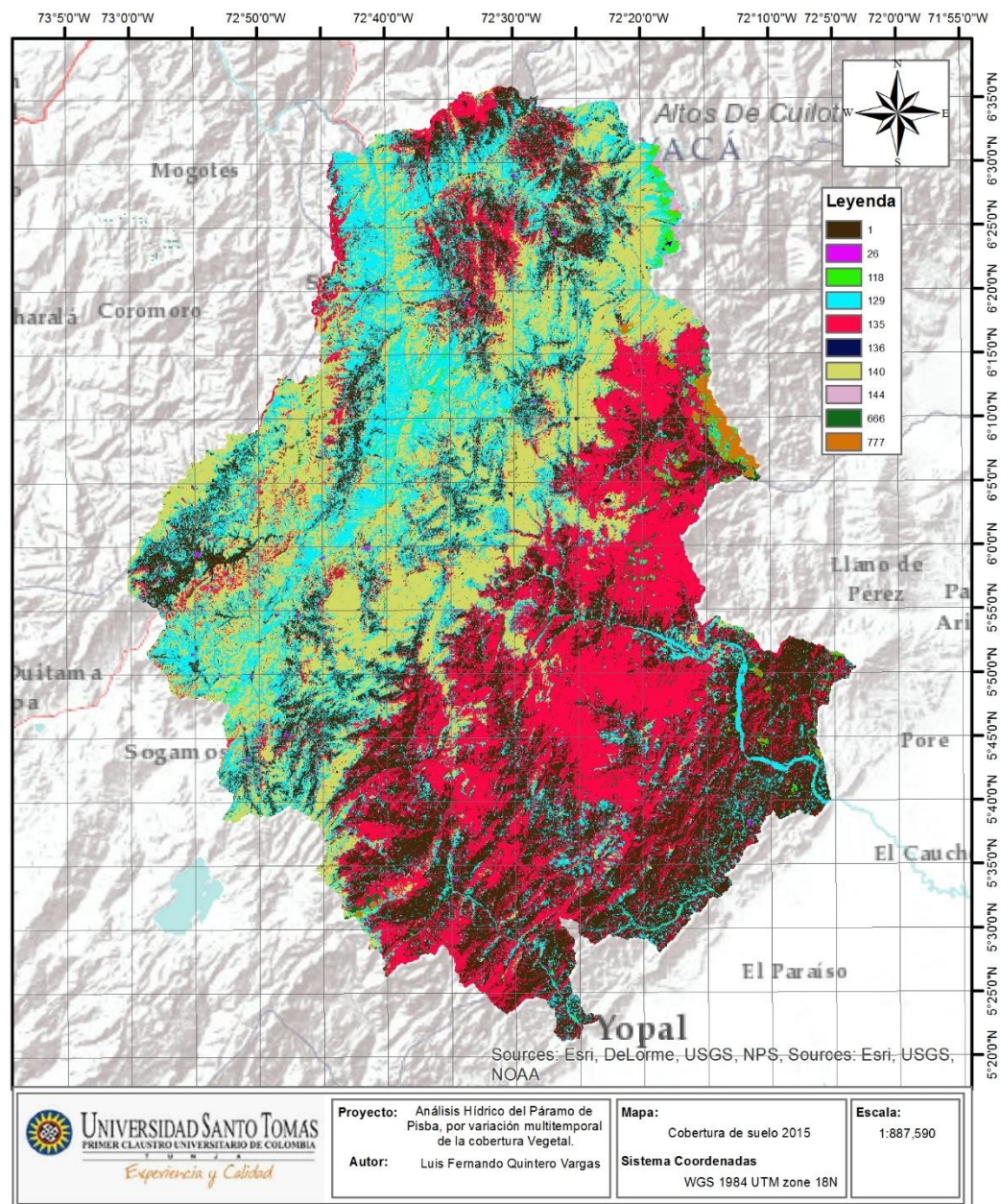












11.2. Anexos Calibración

1986

Goal_type= R2 No_sims= 50 Best_sim_no= 11 Best_goal = 6.467956e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.568878	-0.591511	-0.385753
2:V__ALPHA_BF.gw	1.182487	0.695829	1.187403
3:V__GW_DELAY.gw	37.842121	-28.128489	106.505409
4:V__GWQMN.gw	-2.429353	-2.899856	-1.382104

-0.568878 1.182487 37.842121 -2.429353

r__CN2.mgt	-0.568878
v__ALPHA_BF.gw	1.182487
v__GW_DELAY.gw	37.842121
v__GWQMN.gw	-2.429353

1992

Goal_type= R2 No_sims= 50 Best_sim_no= 1 Best_goal = 3.131544e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.510765	-1.993973	-0.206975
2:V__ALPHA_BF.gw	1.836133	0.577815	2.455901
3:V__GW_DELAY.gw	37.956100	-255.988876	298.624268
4:V__GWQMN.gw	-0.454155	-0.769977	1.659421

-0.510765 1.836133 37.956100 -0.454155

r__CN2.mgt	-0.510765
v__ALPHA_BF.gw	1.836133
v__GW_DELAY.gw	37.956100
v__GWQMN.gw	-0.454155

1997

Goal_type= R2 No_sims= 100 Best_sim_no= 85 Best_goal = 5.973055e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.339401	-0.360003	-0.217921
2:V__ALPHA_BF.gw	0.042113	-0.057098	0.143328
3:V__GW_DELAY.gw	-25.6847	-35.1147	-14.5874
4:V__GWQMN.gw	-1.021616	-1.480169	-0.257361

-0.339401 0.042113 -652.465881 -1.021616

r__CN2.mgt	-0.339401
v__ALPHA_BF.gw	0.042113
v__GW_DELAY.gw	-652.465881
v__GWQMN.gw	-1.021616

2001

Goal_type= R2 No_sims= 10 Best_sim_no= 10 Best_goal = 5.013757e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.211230	-0.230151	-0.176091
2:V__ALPHA_BF.gw	0.700283	0.688249	0.928933
3:V__GW_DELAY.gw	15.824353	0.928704	20.789570
4:V__GWQMN.gw	-0.958553	-1.053690	-0.907326

-0.211230 0.700283 15.824353 -0.958553

r__CN2.mgt	-0.211230
v__ALPHA_BF.gw	0.700283
v__GW_DELAY.gw	15.824353
v__GWQMN.gw	-0.958553

2003

Goal_type= R2 No_sims= 5 Best_sim_no= 2 Best_goal = 7.152932e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.343600	-1.355288	0.668088
2:V__ALPHA_BF.gw	0.572564	-2.115272	3.260400
3:V__GW_DELAY.gw	131.631073	-282.922455	1098.922607
4:V__GWQMN.gw	-1.845402	-4.913503	5.313503

-0.343600 0.572564 131.631073 -1.845402

r__CN2.mgt	-0.343600
v__ALPHA_BF.gw	0.572564
v__GW_DELAY.gw	131.631073
v__GWQMN.gw	-1.845402

2007

Goal_type= R2 No_sims= 5 Best_sim_no= 2 Best_goal = 7.462826e-001

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
1:R__CN2.mgt	-0.395000	-0.400000	-0.390000
2:V__ALPHA_BF.gw	0.363700	0.293600	0.433800
3:V__GW_DELAY.gw	22.727001	19.850000	29.440001
4:V__GWQMN.gw	2.025000	1.980000	2.130000

-0.395000 0.363700 22.727001 2.025000

r__CN2.mgt	-0.395000
v__ALPHA_BF.gw	0.363700
v__GW_DELAY.gw	22.727001
v__GWQMN.gw	2.025000