



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 16 de marzo de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

VERONICA ALEXANDRA ARANGO CUBILLOS con C.C. No. 1.110.454.239 de Ibagué

ANGELA ASTRID SALAZAR MARTINEZ con C.C. No. 26.427.192 de Nieva

Autor(es) del trabajo de grado titulado “Análisis Multitemporal del Impacto Generado por la Evolución de la Cobertura Vegetal Sobre el Balance Hídrico de la Cuenca del Río Saldaña”, presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental. Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR:

VERONICA ALEXANDRA ARANGO CUBILLOS

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

ANGELA ASTRID SALAZAR MARTINEZ

Firma:

Vigilada Mineducación



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “Análisis Multitemporal del Impacto Generado por la Evolución de la Cobertura Vegetal Sobre el Balance Hídrico de la Cuenca del Río Saldaña”

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ARANGO CUBILLOS	VERONICA ARANGO
SALAZAR MARTINEZ	ANGELA ASTRID

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
HERNANDEZ LOPEZ	JORGE ARMANDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
OLAYA AMAYA	ALFREDO
CASTRO CAMACHO	JENNIFER KATIUSCA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental

FACULTAD: INGENIERIA

PROGRAMA O POSGRADO: Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 90

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas X Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros___

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: N/A

MATERIAL ANEXO:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): N/A

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| 1. Balance Hídrico | water supply |
| 2. cobertura vegetal | vegetation cover |
| 3. herramientas geoinformáticas | Geoinformatics Tools |
| 4. Río Saldaña | Saldaña River |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El desarrollo industrial, agrícola, pecuario y el surgimiento de grandes concentraciones humanas, han generado una afectación drástica en cuanto a protección y cobertura de fuentes abastecedoras del Río Saldaña.

Para el estudio se realizó el análisis de precipitación, evapotranspiración y contenido de agua almacenada por el suelo (HU), basado en la ecuación general de balance hídrico utilizando información de las estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM); se trabajó las imágenes satelitales para los años 1992, 2001, 2011 disponibles de la página del servicio geológico de Estados Unidos <https://earthexplorer.usgs.gov> para identificar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la zona de estudio se realizara la interpretación por medio de los sistemas de información geográfica (SIG) con el programa arcgis 10.7.

El objetivo de la investigación fue determinar el impacto de la variación de la cobertura vegetal sobre el balance hídrico en la cuenca del río Saldaña para i) Analizar la evolución de la cobertura vegetal mediante procesamiento NDVI entre los años 1992, 2001, 2011. ii) Determinar el balance hídrico en cada una de los años del periodo de análisis multitemporal y iii) analizar comparativamente la evolución de la cobertura vegetal frente a la evolución del balance hídrico.

Se evidenció que las coberturas de vegetación dispersa y vegetación abierta presentan una correlación alta ($r = 0.962$; 0.990) respectivamente. Las coberturas de tierra desnuda y vegetación cerrada tienen una correlación moderada ($r = 0.587$ y un $r = 0.423$) con lo que se pudo establecer que otros factores como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la morfología del área son variables que inciden en la disponibilidad del recurso hídrico.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The industrial, agricultural, livestock development and the emergence of large human proteins, the generator of a drastic impact on the protection and coverage of the supply sources of the Saldaña River, which has created a concern regarding the water sustainability of the area ; which necessitates the generation of data that is lost, implementing policies that help acquire, recover and conserve water sources and their strategic ecosystems. The objective of the investigation was to determine the impact of the variation of the vegetal cover on the hydric balance of the Saldaña river basin. To achieve the objective, an evaluation, evapotranspiration and infiltration analysis was performed using information from the climatological stations of the Institute of Hydrology,



meteorology and environmental studies (IDEAM, 2010), with which the water balance of the basin was determined; For the analysis of the NDVI Normalized Difference Vegetation Index, it will be used with the satellite images for the years 1992, 2001 and 2011 available from the page of the United States Geological Survey. Photointerpretation, geoprocessing of the data was carried out by means of of the geographic information systems (GIS) established in the arcgis 10.7 program

The objective of the research was to determine the impact of the variation of the vegetation cover on the water balance in the Saldaña river basin to i) Analyze the evolution of the

vegetation cover by NDVI processing between the years 1992, 2001, 2011. ii) Determine the water balance in each of the years of the multitemporal analysis period and iii) comparatively analyze the evolution of the vegetation cover against the evolution of the water balance.

It is evident that the coverings of dispersed vegetation and open vegetation show a high correlation ($r = 0.962$; 0.990) respectively. The bare land and closed vegetation cover have a moderate correlation ($r = 0.587$ and $r = 0.423$), which can establish that other factors such as precipitation, temperature, evapotranspiration and morphology of the area are variables that affect the availability of water resources

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: ALFREDO OLAYA AMAYA

Firma: 

Nombre Jurado: JENNIFER KATIUSCA CASTRO CAMACHO

Firma: *Jennifer Katiusca Castro Camacho*

Nombre Jurado: ALFREDO OLAYA AMAYA

Firma: 

**Análisis Multitemporal del Impacto Generado por la Evolución de la Cobertura
Vegetal Sobre el Balance Hídrico de la Cuenca del Río Saldaña**

Verónica Alexandra Arango Cubillos

Ángela Astrid Salazar Martínez

Director De trabajo de grado

Jorge Armando Hernández López, M.Sc

Universidad Surcolombiana

Facultad De Ingeniería

Programa maestría en ingeniería y gestión ambiental

Neiva, 2020

**Análisis Multitemporal del Impacto Generado por la Evolución de la Cobertura
Vegetal Sobre el Balance Hídrico de la Cuenca del Río Saldaña**

presenta:

Verónica Alexandra Arango Cubillos

Ángela Astrid Salazar Martínez

Director De trabajo de grado:

Jorge Armando Hernández López, M.Sc

INGENIERO FORESTAL, M.Sc

**Trabajo de grado para obtener el título de magister en Ingeniería y Gestión
Ambiental**

Universidad Surcolombiana

Programa maestría en ingeniería y gestión ambiental

Facultad De Ingeniería

Neiva, 2020

Agradecimientos

Agradecemos primero a Dios por darnos la sabiduría para poder sacar esta maestría adelante, a nuestras familias por todo su apoyo y ánimo, al ingeniero Andrés Tafur lozano por su orientación y aportes y a los profesores y asesores por brindarnos todos los conocimientos que permitieron culminar estos estudios. *Verónica Alexandra Arango Cubillos y Ángela Astrid Salazar Martínez*

1. Contenido	
2. RESUMEN	14
3. INTRODUCCIÓN.....	17
4. OBJETIVOS	21
4.1. Objetivo general	21
4.2. Objetivos específicos.....	21
5. MARCO TEÓRICO	22
5.1. Cuenca Hidrográfica.....	22
5.2. Balance Hídrico	22
5.2.1 Precipitación	23
5.2.2 Evapotranspiración	24
5.2.3 Infiltración	27
5.3. Cobertura Vegetal.....	30
5.3.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	31
5.4. Sistemas de Información Geográfica.....	32
5.4.1 Imágenes Satelitales	33
5.4.2 Landsat	33
6. ÁREA DE ESTUDIO	36
7. METODOLOGÍA.....	38
7.1. Fase I Análisis de la Cobertura Vegetal.	38
7.1.1 Estudio del Arte.	38

7.1.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI.....	38
7.2. Fase II Determinación de la Oferta Hídrica.....	39
7.2.1 Precipitación	39
7.2.2 Evapotranspiración.....	39
7.2.3 Infiltración.....	40
7.2.4 Balance Hídrico para el Área de Estudio.....	41
7.3. Fase III. Análisis Comparativo de la Cobertura Vegetal y el Balance Hídrico....	41
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
8.1. Fase 1. Análisis de la Evolución de la Cobertura Vegetal en la Cuenca del Rio Saldaña Mediante Procesamiento NDVI para los Años 1992, 2001, y 2011.....	¡Error!
	Marcador no definido.
8.1.1 Estudio del Arte	¡Error! Marcador no definido.
8.1.2 Cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación NDVI ..	¡Error!
	Marcador no definido.
8.2. Fase 2. Determinación del Balance Hídrico para la cuenca del rio Saldaña para cada uno de los años de análisis multitemporal.....	¡Error! Marcador no definido.
8.2.1 Determinación de las estaciones hidrométricas con influencia dentro de la zona de estudio a través del método de Los Polígonos de Thiessen.¡Error!	Marcador no definido.
8.2.2 Precipitación temperatura y evapotranspiración.¡Error!	Marcador no definido.

8.2.3 Profundidad hidráulica del suelo HU (1992, 2001, 2011);	Error!	Marcador no definido.
8.2.4 Balance hídrico para el área de estudio	Error!	Marcador no definido.
8.3. FASE III. Análisis Comparativo de la Evolución de la Cobertura Vegetal Frente al Balance Hídrico Durante los Años de Estudio en la Cuenca del Río Saldaña;	Error!	Marcador no definido.
9. CONCLUSIONES	Error!	Marcador no definido.
10. BIBLIOGRAFÍA		80
4 ANEXOS		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI.....	32
Tabla 2. Satélites serie LANDSAT 1-5	34
Tabla 3 Satélites series LANDSAT 4-5	35
Tabla 4 Límites de la Cuenca del Río Saldaña.....	37
Tabla 5 Litros concesionados de la subzona hidrográfica de del Río Saldaña.....	37
Tabla 6 Relación de imágenes satelitales empleadas para el análisis de coberturas.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7 Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 1992.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8 Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 2001.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9 Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 2011.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10 Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 1992.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11 Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 2001.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12 Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 2011.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13 Evapotranspiración media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 1992.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14 Evapotranspiración media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 1992.....	¡Error! Marcador no definido.

Tabla 15 Evapotranspiración media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio para el año 2011. Fuente Autoras..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 16 Suelos presentes en la cuenca del Rio Saldaña. Fuente Autoras. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 17 Resultado de HU Rio Saldaña. Fuente Autoras. **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Porcentaje de cobertura vegetal para el año 1992. **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 2. Porcentaje de cobertura vegetal para el año 2001. **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 3. Porcentaje de cobertura vegetal para el año 2011. **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 4. Correlación tierra desnuda versus disponibilidad de agua. **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5. Correlación vegetación abierta versus disponibilidad de agua..... **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 6. Correlación vegetación cerrada versus disponibilidad de agua..... **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 7. Correlación vegetación abierta versus disponibilidad de agua..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Subzona Hidrográfica del Rio Saldaña Fuente CORTOLIMA 2015.	36
Figura 2 Imágenes satelitales periodo 1992	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del rio Saldaña año 1992. Fuente Autoras.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Tabla de atributos software Arcgis 10.7 de las Estaciones meteorologías con influencia en la cuenca del rio Saldaña	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7. Área de influencia de cada estación en la zona de estudio a través de los Polígonos de Thiessen, generado en Arcgis 10.7	¡Error! Marcador no definido.

Figura 8. Ráster de precipitación cuenca del rio Saldaña año 1992. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9. Ráster de precipitación cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 10. Ráster de precipitación cuenca del rio Saldaña año 2011. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11. Ráster de Temperatura cuenca del rio Saldaña año 1992. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 12. Ráster de Temperatura cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 13. Ráster de Temperatura cuenca del rio Saldaña año 2011. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 14. Ráster de Evapotranspiración cuenca del rio Saldaña año 1992. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 15. Ráster de Evapotranspiración cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 16. Ráster de Evapotranspiración cuenca del rio Saldaña año 2011. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 17. Ráster de Almacenamiento de agua HU cuenca del rio Saldaña año 1992. Fuente Autoras..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 18. Ráster de Almacenamiento de agua HU cuenca del rio Saldaña año 2001. Fuente Autoras..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 19. Ráster de Almacenamiento de agua HU cuenca del rio Saldaña año 2011. Fuente Autoras..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 20. Ráster de Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 1992. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 21. Ráster de Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 2001. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 22. Ráster de Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 2011. Fuente Autoras **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	23
Ecuación 2	23
Ecuación 3	25
Ecuación 4	25
Ecuación 5	25
Ecuación 6	25
Ecuación 7	26
Ecuación 8	27
Ecuación 9	28

Ecuación 10	28
Ecuación 11	28
Ecuación 12	28
Ecuación 13	28
Ecuación 14	28
Ecuación 15	29
Ecuación 16	29
Ecuación 17	29
Ecuación 18	29
Ecuación 19	31

ANEXOS

Anexo 1 Imágenes satelitales periodo 2001	89
Anexo 2. Imágenes satelitales periodo 2011	90

2. RESUMEN

El desarrollo industrial, agrícola, pecuario y el surgimiento de grandes concentraciones humanas, han generado una afectación drástica en cuanto a protección y cobertura de fuentes abastecedoras del Río Saldaña.

Para el estudio se realizó el análisis de precipitación, evapotranspiración y contenido de agua almacenada por el suelo (HU), basado en la ecuación general de balance hídrico utilizando información de las estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM); se trabajó las imágenes satelitales para los años 1992, 2001, 2011 disponibles de la página del servicio geológico de Estados Unidos <https://earthexplorer.usgs.gov> para identificar el Índice de Vegetación de

Diferencia Normalizada (NDVI) de la zona de estudio se realizara la interpretación por medio de los sistemas de información geográfica (SIG) con el programa arcgis 10.7.

El objetivo de la investigación fue determinar el impacto de la variación de la cobertura vegetal sobre el balance hídrico en la cuenca del río Saldaña para i) Analizar la evolución de la cobertura vegetal mediante procesamiento NDVI entre los años 1992, 2001, 2011. ii) Determinar el balance hídrico en cada una de los años del periodo de análisis multitemporal y iii) analizar comparativamente la evolución de la cobertura vegetal frente a la evolución del balance hídrico.

Se evidenció que las coberturas de vegetación dispersa y vegetación abierta presentan una correlación alta ($r = 0.962$; 0.990) respectivamente. Las coberturas de tierra desnuda y vegetación cerrada tienen una correlación moderada ($r = 0.587$ y un $r = 0.423$) con lo que se pudo establecer que otros factores como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la morfología del área son variables que inciden en la disponibilidad del recurso hídrico.

Palabras clave. Rio Saldaña, Balance Hidrico , cobertura vegetal , herramientas geoinformaticas,

ABSTRACT

The industrial, agricultural, livestock development and the emergence of large human proteins, the generator of a drastic impact on the protection and coverage of the supply sources of the Saldaña River, which has created a concern regarding the water sustainability of the area ; which necessitates the generation of data that is lost, implementing policies that help acquire, recover and conserve water sources and their strategic ecosystems. The objective of the investigation was to determine the impact of the variation of the vegetal cover on the hydric balance of the Saldaña river basin. To

achieve the objective, an evaluation, evapotranspiration and infiltration analysis was performed using information from the climatological stations of the Institute of Hydrology, meteorology and environmental studies (IDEAM, 2010), with which the water balance of the basin was determined; For the analysis of the NDVI Normalized Difference Vegetation Index, it will be used with the satellite images for the years 1992, 2001 and 2011 available from the page of the United States Geological Survey. Photointerpretation, geoprocessing of the data was carried out by means of of the geographic information systems (GIS) established in the arcgis 10.7 program

The objective of the research was to determine the impact of the variation of the vegetation cover on the water balance in the Saldaña river basin to i) Analyze the evolution of the

vegetation cover by NDVI processing between the years 1992, 2001, 2011. ii) Determine the water balance in each of the years of the multitemporal analysis period and iii) comparatively analyze the evolution of the vegetation cover against the evolution of the water balance.

It is evident that the coverings of dispersed vegetation and open vegetation show a high correlation ($r = 0.962$; 0.990) respectively. The bare land and closed vegetation cover have a moderate correlation ($r = 0.587$ and $r = 0.423$), which can establish that other factors such as precipitation, temperature, evapotranspiration and morphology of the area are variables that affect the availability of water resources

Key Words: Saldaña River, water supply, vegetation cover, Geoinformatics Tools

3. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas brindan diversos servicios ambientales, entre ellos el mantenimiento, recarga y flujo del recurso hídrico, cuando su dinámica natural se ve alterada por las actividades que realiza el ser humano sobre la tierra, se influencia de manera diferente en la calidad y cantidad de afloramientos (nacientes) de mantos

acuíferos de un lugar determinado y en la dinámica del ciclo hidrológico (Acevedo, 2012 p.45).

En las últimas décadas el recurso hídrico es uno de los componentes ambientales más afectados por la intervención antrópica, las actividades humanas y la naturaleza misma ejercen presión sobre los recursos naturales; entre los impactos más relevantes que afectan la sostenibilidad del recurso hídrico es el avance de la frontera agrícola, la cual genera pérdida de cobertura vegetal vital en el sostenimiento de los drenajes de primer orden, los cuales abastecen o conforman las redes hídricas principales de las cuencas hidrográficas, alterado de esta manera el balance hídrico de la cuenca hidrográfica .(Martínez y Villalejo, 2018 p.53)

Una cuenca hidrográfica puede ser definida como "el área topográfica de la zona en la que el escurrimiento de agua superficial aparente drena a un punto específico de un arroyo o de un cuerpo de agua, como un lago" (Anisfeld, 2010. p 85), de esta forma una cuenca funciona como un colector de agua convirtiendo las entradas de agua en esorrentía y almacenando agua (Vargas, 2010 p.15). Conociendo las características de una cuenca (precipitación, escurrimiento, evapotranspiración e infiltración de agua subterránea), se puede evaluar la temporada y la disponibilidad espacial del agua, esto es útil para la asignación y control de flujo del agua (Anderson et al., 2006 p. 2825).

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad (Rose, 2004), de acuerdo con este principio, cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área del presupuesto (Lucero et al., 2018 p. 23).

La ecuación de continuidad, o de balance hidrológico, es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es

normalmente complicada, principalmente por la falta de mediciones directas en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas es decir de los acuíferos, y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. Como respuesta a estas dificultades, generalmente se admiten dos asunciones (Gaspari et al., 2013 p 101):

a. Supone que las pérdidas profundas son despreciables por lo que se considera que la cuenca es impermeable,

b. Admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca son despreciables para un período suficientemente largo, por lo normal es un año.

El acoplamiento hidrológico entre las unidades del paisaje ejerce un control significativo sobre el movimiento del agua en las cuencas de drenaje y en la respuesta de los caudales (Todd et al. 2006 p.15) a través de diversas relaciones reciprocas. Así, por ejemplo, la estructura y actividad biótica regulan los procesos hidrológicos y, del mismo modo, los procesos hidrológicos moderan la estructura y actividad biótica, la cual, finalmente, determina las funciones y servicios ecosistémicos a múltiples escalas (Asbjornsen et al., 2011 p. 18)

Durante algún tiempo, los investigadores se han enfrascado en una discusión al parecer interminable sobre la influencia de las coberturas vegetales en las condiciones del suelo y el agua (Leguizamón y Tobón, 2017 p.25). Esta polémica se ha establecido en quienes apoyan la introducción de especies exóticas en los ecosistemas y quienes promueven la conservación y conocimiento de las especies nativas. Se han generado, entonces, una serie de hipótesis y opiniones acerca de estas relaciones, que en muchos casos no responden a procesos de investigación científica y que producen mayor confusión en la determinación real de la influencia de diferentes tipos de cobertura vegetal sobre las características hídricas y edáficas (Luna et al., 2004 p 148).

Se ha demostrado el papel de las coberturas boscosas como reguladoras de caudal, porque favorecen la infiltración, gracias a la producción de una capa de hojarasca sobre el suelo mineral y a la disposición de su sistema radicular. Estas propiedades regulan el nivel freático, permiten la recarga de acuíferos alimentadores del flujo base de las corrientes, disminuyen también la cantidad de pérdidas por escorrentía directa de la superficie y retrasan la evacuación instantánea de las lluvias (Villegas, 2004 p. 78).

Los datos experimentales conducen a que los caudales pico de cuencas con coberturas vegetales de porte bajo son más marcados que los de las cuencas cubiertas de vegetación de porte medio y porte forestal (González et al., 2016 p.86). En cuencas que han sido sometidas a tratamientos silviculturales. remoción o sustitución de la cobertura vegetal natural, se ha encontrado un incremento del caudal medio durante el primer año, pero ese caudal medio disminuye luego en forma logarítmica, hasta conseguir valores iguales o incluso menores que el caudal medio original (Nieto y Uscategui, 2015 p.25)

El conocimiento real de estas relaciones es de gran utilidad en la formulación de planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, proceso al que se orienta el ordenamiento territorial actual, teniendo en cuenta la cuenca como unidad básica de desarrollo ambiental. Además, dicho conocimiento aporta criterios con justificación científica y técnica para el desarrollo de actividades de explotación de la vegetación y su uso apropiado en proyectos de desarrollo en los que está involucrada, ya sea con fines de protección o de explotación. (García et al 2017 p 13)

Con lo anterior los autores plantean como pregunta de investigación ¿Cómo influye la evolución de las coberturas vegetales en el balance hídrico del río Saldaña ubicado en el departamento del Tolima?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

- Determinar cómo la evolución de las coberturas vegetales influye en el balance hídrico del río Saldaña ubicado en el departamento del Tolima.

4.2. Objetivos específicos

- Analizar la evolución de la cobertura vegetal en la cuenca del río Saldaña mediante procesamiento NDVI entre los años 1992, 2001 Y 2011.
- Determinar para la cuenca del río Saldaña el balance hídrico para cada uno de los años de análisis multitemporal
- Analizar comparativamente la evolución de la cobertura vegetal frente a la evolución del balance hídrico durante los años de análisis en la cuenca del río Saldaña.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Cuenca Hidrográfica

Teniendo en cuenta la normatividad ambiental en Colombia, en el Decreto 1640 del 2012, “Por medio del cual se reglamenta los instrumentos de planeación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”, en su Artículo 3 define cuenca hidrográfica: *área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar*”.(MinAmbiente, 2014)

Así mismo Gaspari et al., (2013), demarca a la cuenca hidrográfica como una unidad morfológica integral, que se define en un territorio, donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales.(p.32)

En una cuenca hidrológica, además se incluye toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo, conformando un sistema integral, constituyendo un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad. La estabilidad y permanencia de todos sus componentes estructurales son propiedades y formas de comportamiento del sistema.

5.2. Balance Hídrico

El balance hídrico se refiere a la cuantificación de los recursos hídricos que ingresan a un sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado y es calculado a partir de la ecuación de continuidad (ecuación 1), o de balance hidrológico, que es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, principalmente por

la falta de mediciones directas en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca (Ordoñez, 2011 p.10).

$$\sum \text{entradas} - \sum \text{salidas} = \Delta \text{Almacenamiento}$$

Ecuación 1

El balance hídrico a través de la implementación del principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad permite conocer características de la cuenca (Calvin, 2004), por lo tanto; cualquier alteración entre las entradas y salidas refleja un cambio en el almacenamiento de agua en el área de la cuenca (Mogor et al., 2014), es así como el balance hídrico influye de manera directamente proporcional en la oferta hídrica, la cual, se entiende como aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales (Coral, 2015).

Las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación en forma de lluvia, mientras, las salidas en la ecuación incluyen la evapotranspiración y la infiltración (ecuación 2).

$$\Delta \text{Almacenamiento} = P(mm) - ETP(mm) - HU(mm)$$

Ecuación 2

5.2.1 **Precipitación**

Se denomina precipitación, a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida como llovizna, lluvia, etc. y sólida como nieve, granizo, etc. y las precipitaciones ocultas entre las que se encuentra rocío, la helada blanca, etc. Ellas

son provocadas por un cambio de la temperatura o de la presión. La precipitación constituye la única entrada principal al sistema hidrológico continental (Musy, 2001 p16).

5.2.1.1. **Polígonos de Thiessen**

Los polígonos de Thiessen, son la base de un método de interpolación simple, que asigna un valor constante a todos los puntos del polígono que se define con base en la distancia euclidiana, es método especialmente apropiado para datos cualitativos. (Hernández, 2002 p 45).

El método de los polígonos de Thiessen se implementa a través de la herramienta *create Thiessen polygons* del Arcgis 10.6, el cual arroja como resultado el área de influencia de cada estación.

5.2.2 *Evapotranspiración*

Es el total de agua convertido en vapor por una cobertura vegetal; incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por los estomas de las hojas (Jaramillo, 2006 p 32).

El cálculo de la Evapotranspiración Potencia (ETP) para cada década a evaluar, se basó en las recomendaciones expuestas en el estudio realizado por (Corporacion Autonoma Regional Del Tolima, 2015 p 21), en el cual se referencia como opción de variables directas la altura y la temperatura, debido a la correlación que tienen estas dos (2) variables marcando un patrón de acuerdo a la ubicación de las estaciones.

La evapotranspiración potencial, se determinó tal como se expuso anteriormente en función de la latitud representativa de la extensión de horas-sol por día y la temperatura media (Gómez y Cadena, 2018 p 14), de acuerdo a lo establecido en la Ecuación de Thornthwaite la cual estima la evapotranspiración potencial ETP en función de la temperatura media mensual de la siguiente manera:

- 1- Se calcula un “índice de calor mensual” (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$ETP = ETP_{sin\ corr} \frac{N}{12} \frac{d}{30}$$

Ecuación 3

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial corregida

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud

d = número de días del mes

- 2- Se calcula el “índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Ecuación 4

- 3- Se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la fórmula:

$$I = \sum i$$

Ecuación 5

- 4- Corrección para el n° de días del mes y el n° de horas de sol:

$$ETP_{sin\ corr.} = 16 \left(\frac{10t}{I}\right)^a$$

Ecuación 6

Donde:

ETP_{sin corr} = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas)

t = temperatura media mensual, °C

I = índice de calor anual, obtenido en el punto 2°

a = 675. 10⁻⁹ I³ - 771. 10⁻⁷ I² + 1792. 10⁻⁵ I + 0,49239

Para la estimación de la evapotranspiración Real (ETR), se realizó de acuerdo a lo señalado por (Hernandez Cely & Santamaria Tangua, 2011); los cuales establecen que el método Budyko es uno de los más sencillos y confiables para estimar evapotranspiración real, ya que solo se necesitan 2 variables calculadas ETP y precipitación. Budyko notó que cuando la precipitación decrece, la escorrentía superficial también decrece, pero cuando la precipitación aumenta, el caudal tiende a un valor límite.

$$ETR = \sqrt{ETP \left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right)}$$

Ecuación 7

Donde

ETR = es la evaporación real

P = es la precipitación (mm)

ETP= es la evaporación potencial en mm por el período considerado.

5.2.2.1. Temperatura

La temperatura es la única variable meteorológica que tiene una relación lineal con la altitud, a mayor altura, menor temperatura (Serrano Vincenti et al., 2012). En la evaluación del comportamiento de la temperatura para cada periodo de estudio, se determinó la relación existente entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, en donde la temperatura disminuye en la medida que aumenta la altura en una relación de 3.2 °C por cada 500 metros de altura, esto se denomina como gradiente de temperatura (Corporacion Autonoma Regional Del Tolima, 2015 p.28):

$$T = \text{diferencia de altura (estacion A - estacion B)} \times (-0.0064)$$

5.2.3 *Infiltración*

La infiltración es el proceso de paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra. Este concepto hay que distinguirlo del de percolación, que es el movimiento del agua dentro del suelo. Ambos fenómenos están relacionados, puesto que la Infiltración no puede continuar libremente hasta que la Percolación haya removido el agua de las capas superiores del suelo. (Alvarado y Barahona, 2017 p 26).

5.2.3.1. **Análisis de Profundidad Hidráulica del Suelo**

La infiltración se define como la capacidad que tiene el suelo de movilizar agua por sus perfiles. Ésta depende de la textura del perfil, la compactación del suelo y las propiedades del líquido que se infiltra. Para encontrar la cantidad de agua que el suelo es capaz de almacenar dentro de sus perfiles, existen diferentes metodologías que involucran la realización de ensayos de campo, determinación de propiedades en laboratorio y estimación de parámetros físicos del suelo a través de ecuaciones de correlación. (Ruiz y Martínez, 2015 p 20). Para el caso de estudio se tuvo en cuenta las funciones de pedro transferencia de Saxton y Rawls, las cuales incluyen algunos ajustes a las propuestas por Campbell (1974), Brooks and Corey (1964), Van Genuchten (1980). La estimación se realizó a partir de la textura del suelo, en la cual, se tiene en cuenta el porcentaje de arena (S), porcentaje de arcilla (C) y porcentaje de materia orgánica (OM), de cada perfil de suelo. (Saxton y Rawls, 2006 p.56)

Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas para el cálculo de las características de agua de cada horizonte del perfil de unidad de suelo:

$$\theta_{1500} = \theta_{1500t} + (0,14 * \theta_{1500t} - 0,02)$$

Ecuación 8

$$\theta_{1500t} = -0,024S + 0,487C + 0,006OM + 0,005(S * OM) - 0,013(C * OM) + 0,068(S * C) + 0,031$$

Ecuación 9

$$\theta_{33} = \theta_{33t} + [1,283(\theta_{33t})^2 - 0,374(\theta_{33t}) - 0,015]$$

Ecuación 10

$$\theta_{33t} = -0,251S + 0,195C + 0,011OM + 0,006(S * OM) - 0,027(C * OM) + 0,452(S * C) + 0,299$$

Ecuación 11

$$\theta_s = \theta_{33} + \theta_{(s-33)} - 0,097S + 0,043$$

Ecuación 12

$$K_s = 1930(\theta_s - \theta_{33})^{(3-\lambda)}$$

Ecuación 13

$$\lambda = \frac{1}{\frac{\ln(1500) - \ln(33)}{\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})}}$$

Ecuación 14

Donde: K_s : Conductividad hidráulica saturada del horizonte (cm/h)

θ_s = Contenido de agua volumétrico en condición saturada (kPa), densidad normal. ($m^3 \cdot m^{-3}$), %v

θ_{1500} = Retención de agua a 1500kPa (tensión), punto de marchitez permanente, ($m^3 \cdot m^{-3}$), %V

θ_{33} = Retención de agua a -33KPa, capacidad de campo, ($m^3 \cdot m^{-3}$), %V

λ = Pendiente de la curva logarítmica humedad – tensión

(Saxton y Rawls, 2006 p 87)

Con lo anterior, el contenido de agua HU, almacenado en la unidad de suelo, con la siguiente ecuación:

$$AW = \theta_{33} - \theta_{1500}$$

Ecuación 15

$$\text{Densidad aparente } \left(\frac{g}{cm^3}\right) = (1 - \theta_s) * 2,65$$

Ecuación 16

$$HU (mm) = \frac{AW * \text{Densidad aparente} * Prof}{\text{Densidad del agua}} * 1000$$

Ecuación 17

Donde:

HU = Contenido de agua útil en milímetros para cada horizonte de la unidad de suelo (mm).

Prof = Profundidad de cada horizonte del perfil (m).

Densidad del agua = 1 g/cm³

Luego, una vez determinados todos los horizontes, se calculó el contenido de agua útil para toda la unidad de suelo, con la siguiente ecuación.

$$HU_{TOTAL} = \frac{\sum_{i=1}^n HU_i * Prof_i}{Prof}$$

Ecuación 18

Donde:

HU_{TOTAL} = Contenido de agua disponible en el conjunto del perfil de suelo (mm)

HU_i = Contenido de agua útil de cada horizonte del perfil (mm)

Prof_i = Profundidad de cada horizonte (m)

Prof = Profundidad total del perfil (m)

(Francesc & Mondria Garcia, 2004)

5.3. Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal del suelo constituye el límite entre atmósfera y litosfera, donde las actividades humanas y los procesos hidrológicos están modulados por los cambios de uso del suelo y la cobertura de vegetación (Ren et al., 2014 p 18)

En cuanto a la relación entre la cobertura vegetal y el caudal en las cuencas es muy importante, ya que regula la recarga de las fuentes hídricas y minimizan las pérdidas por escorrentía, en ese orden es preciso tener presente lo dicho por Villegas, (2004):

- Se ha demostrado el papel de las coberturas boscosas como reguladoras de caudal, porque favorecen la infiltración, gracias a la producción de una capa de hojarasca sobre el suelo mineral y a la disposición de su sistema radicular. Estas propiedades regulan el nivel freático, permiten la recarga de acuíferos alimentadores del flujo base de las corrientes, disminuyen también la cantidad de pérdidas por escorrentía directa de la superficie y retrasan la evacuación instantánea de las lluvias.
- Los datos experimentales conducen a que los caudales pico de cuencas con coberturas vegetales de porte bajo son más marcados que los de las cuencas cubiertas de vegetación de porte medio y porte forestal.
- En cuencas que han sido sometidas a tratamientos silviculturales o sustitución de la cobertura vegetal natural, se ha encontrado un incremento del caudal medio durante el primer año, pero ese caudal medio disminuye luego en forma logarítmica, hasta conseguir valores iguales o incluso menores que el caudal medio original”.

5.3.1 *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) el cual se basa en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Manrique, 1999 p 53).

El índice de vegetación NDVI se calcula con base en la banda infrarroja y roja de una imagen y para ello se utiliza la siguiente ecuación:

Donde

$$NDVI = \frac{[IR - R]}{[IR + R]}$$

Ecuación 19

IR = valores de píxel de la banda infrarroja

R = valores de píxel de la banda roja

Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Los valores extremadamente bajos o negativos representan a las áreas sin ninguna vegetación, tales como nubes, agua o nieve (Cartaya et al 2014). Los valores muy bajos representan áreas con muy poca vegetación o sin ninguna vegetación, tales como hormigón, piedra o suelo desnudo. Los valores moderados representan áreas de matorrales y praderas. Los valores altos representan a las zonas forestales y la vegetación densa. La clasificación que se usó para este estudio fue la establecida por Rios (2014) las cuales se reporta en la Tabla 3.

Tabla 1

Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI

Clase	Valores de NDVI	Cobertura de la Tierra	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas, nubes.
2	-0.1 – 0.15	Tierra Desnuda	Tierras degradadas, asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal.
3	0.15 – 0.25	Vegetación Dispersa	Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado para cultivo.
4	0.25 – 0.40	Vegetación Abierta	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco.
5	> 0.40	Vegetación Cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo.

Fuente: Rios, Cartaya, Montalvo, & Zurita (2014)

5.4. Sistemas de Información Geográfica

De acuerdo a lo establecido por (Olmos, 2010 p.35) un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información.

Los SIG gestionan, por tanto, bases de datos gráficos y alfanuméricos vinculadas entre sí e integran funciones típicas de las bases de datos (consultas, análisis estadísticos, etc.) con las propias de la cartografía digital (visualización, análisis geográfico, etc.). (Erba, 2006 p 78)

5.4.1 *Imágenes Satelitales*

Las imágenes satelitales registran el comportamiento de la superficie terrestre a través de diferentes regiones del espectro electromagnético (ello depende de la resolución espectral de la imagen, es decir, del número de bandas o rangos de longitudes de onda discriminados en ésta), proporcionando una gran cantidad de datos espacialmente contiguos entre sí (éstos se ordenan en una grilla de celdas cuadradas o píxeles, que almacenan un valor de energía electromagnética en una unidad de medida llamada radiancia) y distribuidos a lo largo de extensas áreas geográficas (las escenas completas de imágenes de baja y moderada resolución espacial cubren miles de kilómetros cuadrados). (Lillesand, 2004 p 65).

Las imágenes satelitales se generan mediante sensores que capturan la porción de la radiación solar que llega al sensor a bordo del satélite luego de interactuar con la superficie terrestre (cutivos, agua, suelo desnudo, etc). Es importante destacar que una imagen no es una foto, sino que contienen información de los valores de reflectancia de la superficie terrestre en distintas zonas del espectro electromagnético; estas zonas en las que el sensor adquiere información se denominan bandas y son particulares para cada sensor, (Mieza et al., 2012 p 71)

Existen diversas formas de extraer información de las imágenes satelitales, el mecanismo más simple denominado fotointerpretación consiste en observar una imagen en alguna combinación de bandas y extraer conclusiones a partir de observar la textura, el color y las formas. (Mieza et al., 2012 p 71)

5.4.2 *Landsat*

El Programa Landsat es una serie de satélites de observación de la Tierra cogestionados por el USGS y la NASA y ofrece el registro espacial más largo continuo de la Tierra que existe. Todos los días, los satélites Landsat orbitan la Tierra y brindan

información esencial para ayudar a los administradores de tierras y a los responsables políticos a tomar decisiones informadas sobre nuestros recursos naturales y el medio ambiente. (USGS 2019 p 13).

Este sensor es el más empleado en aplicaciones agrícola, forestales, de uso de suelo, hidrología, recursos costeros y monitorización medioambiental. Sobre todo, está ligado a estudios territoriales en los que el parámetro fundamental es el medio ambiente. (Fernández y Herrero, 2001 p 58).

Las imágenes del escáner multiespectral (MSS) Landsat 1-5 consisten en cuatro bandas espectrales con una resolución espacial de 60 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 185 km de este a oeste (106 millas por 115 millas). Las designaciones de banda específicas difieren de Landsat 1-3 a Landsat 4-5. (Tabla 1) (USGS 2019).

Tabla 2.
Satélites serie LANDSAT 1-5

Landsat 1-3	Landsat 4-5	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 4	Banda 1	0.5-0.6	60 60
Banda 5	Banda 2	0.6-0.7	60 60
Banda 6	Banda 3	0.7-0.8	60 60
Banda 7	Banda 4	0.8-1.1	60 60

Fuente: USGS 2019

Las imágenes Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) consisten en siete bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las Bandas 1 a 5 y 7. La resolución espacial para la Banda 6 (infrarrojo térmico) es de 120 metros, pero se vuelve

a muestrear a 30- medidor de píxeles. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste (106 millas por 114 millas) (USGS 2019).

Tabla 3

Satélites series LANDSAT 4-5

Landsat 4-5	Wavelenth (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1	0.45-0.52	30
Banda 2	0.52-0.60	30
Banda 3	0.63-0.69	30
Banda 4	0.76-0.90	30
Banda 5	1.55-1.75	30
Banda 6	10.40-12.50	120 (30)
Banda 7	2.08-2.35	30

Fuente: USGS 2019

El río Saldaña supe las necesidades hídricas del distrito de riego del triángulo del Tolima con 20.300 l/s, a Uso Saldaña con 25.000l /s además abastece la población del casco urbano del municipio de Coyaima con 14 l/s (En la tabla 4 se observa los límites de la cuenca del río Saldaña).

Tabla 4

Límites de la Cuenca del Río Saldaña

Punto Cardinal	Límites de la Cuenca
Norte	Municipio de Ibagué, municipio de Cajamarca y municipio de Espinal
Oriente	Municipio de Ataco, Municipio de Coyaima y Municipio de Purificación
Occidente	Departamento del Valle del Cauca y Departamento del Quindío
Sur	Departamento del Huila

Fuente: (CORTOLIMA, 2007)

En la tabla 5 se observa las concesiones otorgadas a los diferentes municipios pertenecientes a la subzona hidrográfica del río Saldaña, con un total de 280 concesiones con 65.971,991 litros concesionados (CORTOLIMA, 2015).

Tabla

5

Litros concesionados de la subzona hidrográfica de del Río Saldaña.

Municipio	Cantidad de Concesiones	Litros concesionados
Ataco	13	329,250
Chaparral	73	19.627,100
Coyaima	8	31,300
Guamo	20	6.200,680
Ortega	66	3.397,030
Planadas	8	88,734
Purificacion	6	44,590
Rio Blanco	4	65,423
Roncesvalles	30	6.644,870
Rovira	10	30,290
Saldaña	9	26.329,397
San Antonio	14	190,797
San Luis	15	2.836,890
Valle De San Juan	4	155,640
Totales	280	65.971,991

Fuente: (CORTOLIMA, 2015)

7. METODOLOGÍA

7.1. Fase I Análisis de la Cobertura Vegetal.

7.1.1 *Estudio del Arte.*

En esta primera etapa se realizó la búsqueda de imágenes satelitales correspondientes a los municipios del norte del Tolima en la página web del servicio geológico estadounidense USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (Herrera, 2017 p 12) En esta plataforma se delimito la zona de estudio para poder encontrar las imágenes apropiadas de la región, el estudio para los años 1992, 2001, 2011; para esto se utilizaron los satélites landsat MSS 4 y 5, landsat TM 4 y 5, Landsat OLI 8.

7.1.2 *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI.*

Luego de obtener las imágenes satelitales con su respectiva corrección atmosférica se procedió a calcular el NDVI para el cual se utilizó el software ArcGis y su herramienta ArcMap pues este GIS permite analizar e integrar datos geográficos recolectados en la zona para luego modelar su comportamiento espacio-temporal, con lo que se obtuvieron los mapas vegetativos (Rueda et al., 2015 p 9), luego de cargar las bandas necesarias para calcular el índice vegetativo se realizó la georreferenciación cuyo proceso consiste en introducir las coordenadas de puntos fácilmente reconocibles en la imagen (REUTER, 2002 p 20) el sistema de coordenadas que se utilizo fue Magna Sirgas el cual según la resolución No. 068 de 2005 se adoptó como único Marco Geocéntrico Nacional de Referencia oficial de Colombia (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, 2005 p 54).

Para calcular el Índice normalizado de diferencia de vegetación se utilizó la herramienta raster calculator en la cual se ingresó la fórmula propuesta por(GONZALES

VARGAS, 2015) y luego de obtener dicho resultado se procedió a reclasificar la imagen teniendo en cuenta la Tabla No. 1. Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI.

7.2. Fase II Determinación de la Oferta Hídrica

Para determinar la oferta hídrica se analizaron los siguientes parámetros

7.2.1 Precipitación

Para conocer los valores de la precipitación se utilizó los polígonos de Thiessen como metodología. El presente método requiere del conocimiento de la localización de cada una de las estaciones que se encuentren dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, reconociendo el área de influencia de cada estación. Así se van estableciendo triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí y tratando que los triángulos sean lo más equiláteros posibles. Este procedimiento se realiza tomando como entrada el shapefile de puntos de todas las estaciones Hidrometeorológicas suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.

Posteriormente se adjunta el área del polígono de la cuenca del río Saldaña y a través de la herramienta *create Thiessen polygons* del Arcgis 10.6 se dibujan las líneas bisectoras perpendiculares a todos los lados de los triángulos, las que al unirse en un punto común dentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que demarcan el área de influencia de cada estación, conociendo este dato se determinan las estaciones de con las cuales se realizará el estudio.

7.2.2 Evapotranspiración.

La evapotranspiración potencial, se determinó en función de la latitud (representativa de la extensión de horas-sol por día) y la temperatura media, teniendo en cuenta lo establecido en la Ecuación de Thornthwaite. (Sánchez, 2010, pág. 135)

Para la estimación de la evapotranspiración Real (ETR), se realizó de acuerdo a lo señalado por (García y Otero, 2005 p 24) los cuales establecen que el método Budyko es uno de los más sencillos y confiables para estimar evapotranspiración real, ya que solo se necesitan 2 variables calculadas ETP y precipitación.

Los resultados de los valores medios totales se unieron a través a la tabla de atributos de Joins and Relates para cada estación, interpolando los resultados de ETR (evapotranspiración real), por medio del método IDW, para generar una capa ráster que represente los datos espacialmente en el Software Arcgis 10.7.(Sánchez, 2005 p 41)

7.2.3 Infiltración.

Para obtener los valores de infiltración se aplicó el método de profundidad hidráulica del suelo (HU). Una vez obtenidos los mapas de cobertura vegetal y tipos de suelos de las bases de datos del IGAC, que se encuentran disponibles en la página web (<http://sigotn.igac.gov.co>), en formato Shape (vectorial), se ingresan al sistema de información geográfico ArcGis, para determinar nuevas áreas de polígonos teniendo en cuenta la cobertura existente encima de cada unidad de suelo, según su uso. La extensión utilizada para tal fin fue Intersect (interseccionar), que crea una nueva capa como resultado de la superposición de lo anterior. Para poder realizar este paso, las dos capas a interseccionar se deben encontrar en el mismo sistema de referencia geográfica y que las líneas, puntos o polígonos se encuentren debidamente realizados, pues el proceso podría fallar. En el caso de estudio se trabajó con el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), y el Marco Geocéntrico Nacional de referencia (MAGNA), en su adopción para el territorio nacional Colombiano MAGNA – SIRGAS, con el datum Bogotá (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, 2005 p 32). Esto permitió el cálculo de HU para cada sub área, el valor fue ingresado en el resultado de la intersección, con el fin de realizar un mapa que refleje los valores del contenido de agua almacenada en la zona de estudio

Para obtener los mapas de los ítems 6.4.1, 6.4.2 y 6.4.3 se realizó una interpolación, para cada parámetro en mención, por el método de la inversa al cuadrado, IDW, avalado y recomendado para el área de estudio (Barón, 2003 p 54). La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra (Roa, 2015 p 20). La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación (Roa, 2015 p 85).

7.2.4 Balance Hídrico para el Área de Estudio

Luego de obtener los mapas de precipitación, evapotranspiración, contenido de agua HU, se estimó el balance hídrico de oferta y demanda de la teniendo como base una simplificación de la ecuación de (Silva León, 2005 p 27)

En el caso de estudio, las entradas fueron la precipitación media mensual en mm y las salidas la evapotranspiración y el contenido de agua almacenada (HU) en m.m.. Esto permitió estimar el almacenamiento de aguas lluvias en el área de estudio y estimar que zonas se encuentran en déficit y las que pueden almacenar aguas lluvias. Para tal fin, se realizó la resta utilizando la herramienta del ArcToolbox, raster calculator, disponible en el ArcMap, y el resultado fue una imagen con la cantidad de agua almacenada, donde el valor positivo refleja almacenamiento superficial (gama de azules) y el negativo déficit hídrico (gama de rojos).

7.3. Fase III. Análisis Comparativo de la Cobertura Vegetal y el Balance Hídrico

Para la realización del análisis comparativo de la evolución de la cobertura vegetal frente a los cambios en el balance hídrico se usará el Coeficiente de correlación de

Pearson este Mide el grado de relación lineal entre dos variables (Restrepo & Gonzáles, 2007). El coeficiente de correlación presupone un valor entre -1 y $+1$. Si una variable tiende a aumentar mientras la otra disminuye, el coeficiente de correlación es negativo. En cambio, si las dos variables tienden a aumentar al mismo tiempo, el coeficiente de correlación es positivo (Camacho-Sandoval, 2008).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describen los resultados por cada una de las fases:

8.1 Fase I Análisis de la Cobertura Vegetal.

8.1.1 *Estudio del Arte*

El criterio de selección de las imágenes satelitales estuvo dado por el porcentaje de nubosidad de la imagen el cual debía ser menor al 20% (Bedoya, 2015 p 85); En la tabla 6 se encuentran las características de las imágenes seleccionadas y en el anexo 1 y 2 se registran las imágenes empleadas para los años 2001 y 2011.

Tabla 6

Relación de imágenes satelitales empleadas para el análisis de coberturas

Década	Path /Row	Fecha imagen	Misión Landsat	ID escena
1992	9/58	30-03-1991	5	LT05_L1TP_009058_19910330_20170127_01_T1
	9/57	30-03-1991	5	LT05_L1TP_009057_19910330_20170127_01_T1
	8/57	11-03-1991	5	LT05_L1TP_008057_19910611_20170126_01_T1
	8/58	5-06-1992	4	LT04_L1TP_008058_19920605_20170122_01_T1
2001	9/58	14-12-2002	7	LT07_L1TP_009058_20021014_20170127_01_T1
	9/57	14-12-2002	7	LT05_L1TP_009057_20021014_20170127_01_T1
	8/57	25-02-2002	7	LT05_L1TP_008057_20020225_20170127_01_T1
	8/58	25-02-2002	7	LT05_L1TP_008058_20020225_20170127_01_T1
2011	9/58	8-08-2012	7	LE07_L1TP_009058_20120806_20161129_01_T1
	9/57	19-06-2012	7	LE07_L1TP_009057_20120619_20161130_01_T1
	8/57	21-02-2012	7	LE07_L1TP_008057_20120221_20161202_01_T1

8.1.2 *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI.*

A continuación, se analizó el índice NDVI para los años 1992, 2001 y 2011.

8.1.2.1. NDVI 1992

Como se observa la figura 3 en 1992 la cuenca del río Saldaña presenta una distribución del 56% de vegetación cerrada, un 17% de clases no vegetales, un 13 % de vegetación abierta, un 9% de vegetación desnuda y un 5% de vegetación dispersa.

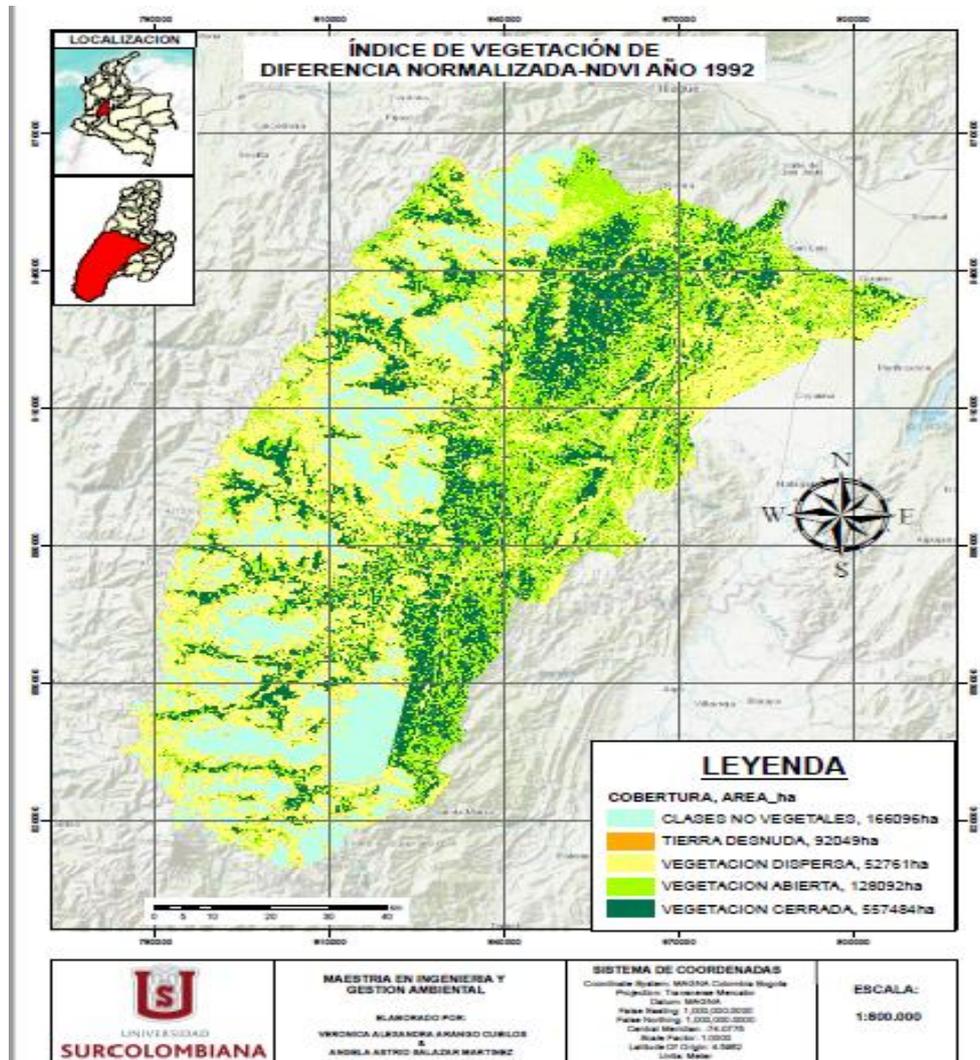


Figura 2. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del río Saldaña año 1992.

Para el año 1992 la cuenca del río Saldaña era operado por grupos de fuerzas revolucionarias de Colombia (FARC), ya que las grandes unidades geográficas de estas áreas fueron funcionales para que los frentes guerrilleros establecieran zonas de repliegue y corredores vitales en los desplazamientos hacia el piedemonte y los departamentos del Valle, Quindío,

Risaralda y Caldas (Prem et al., 2019 p 25), esto permitió el establecimiento de zonas con coberturas vegetales cerradas que les permitieran su desplazamiento de forma más clandestina. En 1991 el fenómeno del niño afectó considerablemente al departamento del Tolima (IDEAM, n.d.), lo que podría indicar el alto porcentaje de tierras degradada o sin coberturas vegetales para el área de estudio.

8.1.2.2. **NDVI 2001**

Los resultados obtenidos de NDVI para el año 2001, muestran, que la cobertura vegetación cerrada posee un área con un área de 538498 hectáreas, la Vegetación abierta cuenta con 193093 ha, la Vegetación dispersa con un total de 90668 ha, Tierra desnuda con 109001 ha y clase no vegetales con 63823 ha (ver figura 4). Al realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos para el año 1992 se evidencia una disminución del 3.6% de la vegetación cerrada y de clase no vegetales en 64.7%; pero se evidencio un aumento del 46.2% en la vegetación abierta, del 33.3% para la cobertura de tierra desnuda y un incremento del 80% en vegetación dispersa.

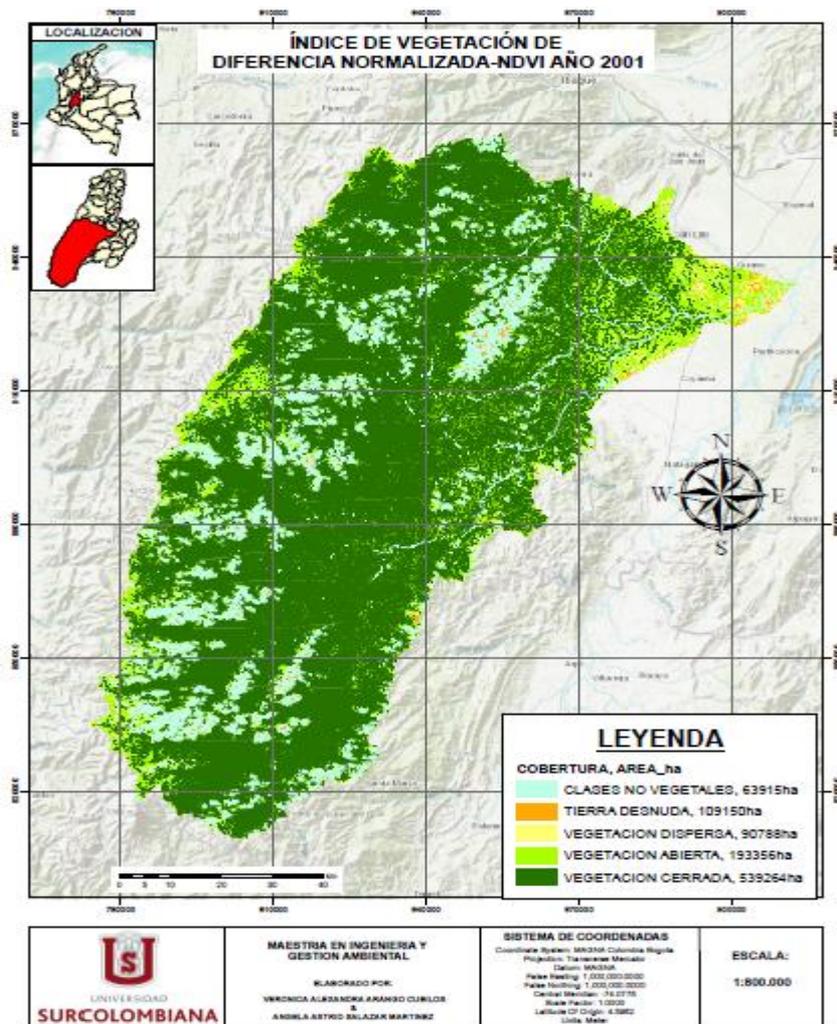


Figura 3. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del río Saldaña año 2001.

De acuerdo a lo informado por (Romero, 2019 p 23) para este período las principales causas de deforestación para la región andina están dada por principalmente a procesos de degradación paulatinos por tala, construcción de obras de infraestructura o minería; Sin embargo, la transformación a pastos y áreas de producción agrícola también es significativa, principalmente para producción de leche y carne, el cultivo de café en sus diferentes modalidades y en combinación con frutales, plátano, caña, o cultivos transitorios como papa, arveja, frijol y otras hortalizas.

Así mismo, la década de los 2000 para el departamento del Tolima estuvo lleno de presencia de grupos armados fuera de la ley como el ejército de liberación nacional (ELN), Ejército revolucionario del pueblo (ERP) y FARC, los cuales aprovecharon la existencia de variedad de pisos térmicos, para constituir importantes fuentes de financiamiento a partir de los cultivos ilegales de coca y especialmente de amapola (Observatorio de Derechos Humanos y Derecho Internacional, 2002).

8.1.2.3. **NDVI 2011**

En el año 2011, se genera un aumento del 9.3% de la vegetación cerrada y 10.5% en la vegetación abierta, una disminución del 50% para la cobertura de tierra desnuda, una baja del 16.7% de clase no vegetales en 64.7%, mientras que la vegetación dispersase se mantuvo igual (ver figura 5).

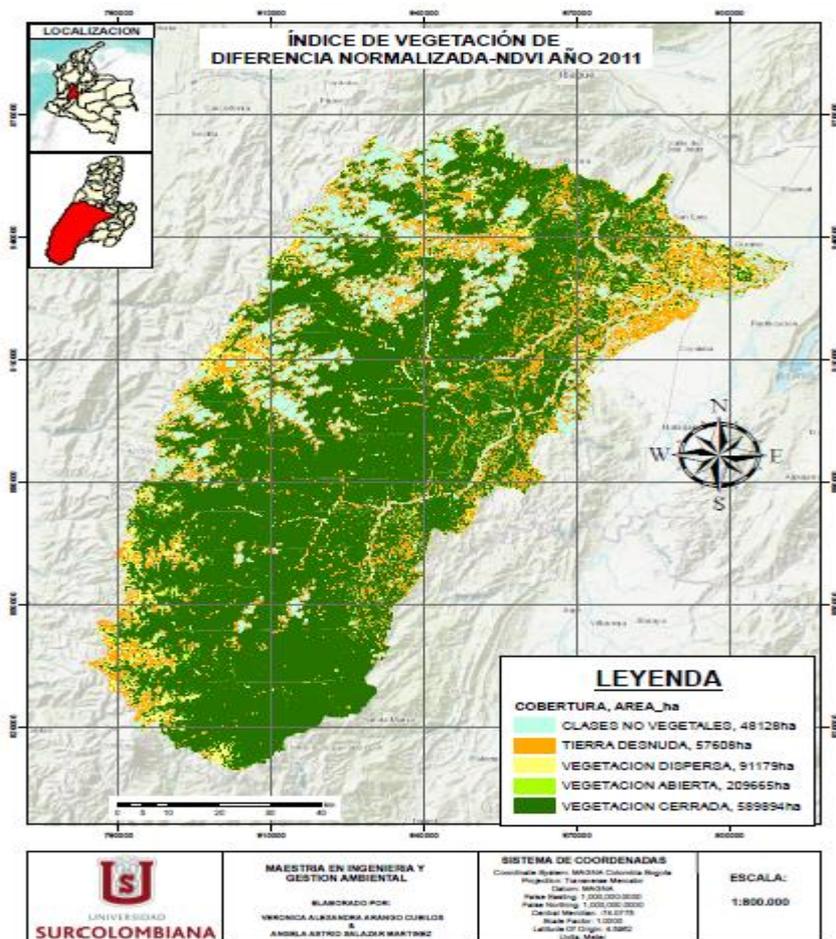


Figura 4. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) cuenca del río Saldaña año

Para este año se ejecutaron programas de conservación en convenios con el FONAM (2F/08), y con FONADE (Cuenca Saldaña - Triángulo del Tolima) realizado por parte de la Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA. Estas líneas de conservación permitieron aumentar la cobertura vegetal en áreas protectoras de cuencas hidrográficas que surten acueductos municipales y/o veredas (Corporacion Autonoma Regional Del Tolima, 2011 p 74).

De igual manera la formulación de los POMCA (Planes De Ordenamiento De Cuencas Hidrográficas) desde el año 2010 de los ríos Anamichu y Cambrin que son

tributarias del río Saldaña ha permitido generar Planes de manejo para la conservación y preservación de las fuentes hídricas a través de procesos de reforestación o mantenimiento de áreas de importancia estratégicas a través regeneración pasiva.(Corporación Autonoma Regional Del Tolima, 2012 p32).

8.2. Fase 2. Determinación del Balance Hídrico

Para determinar el balance hídrico se calcularon los siguientes parámetros:

8.2.1 *Precipitación*

Se determina la precipitación para cada año utilizando el método de los polígonos de Thiessen. Como se observa en la figura 7 se trabajaron 43 estaciones meteorológicas que tienen influencia dentro y fuera de la cuenca del río Saldaña para evitar el efecto de borde. (Marciano 2018 p 5)

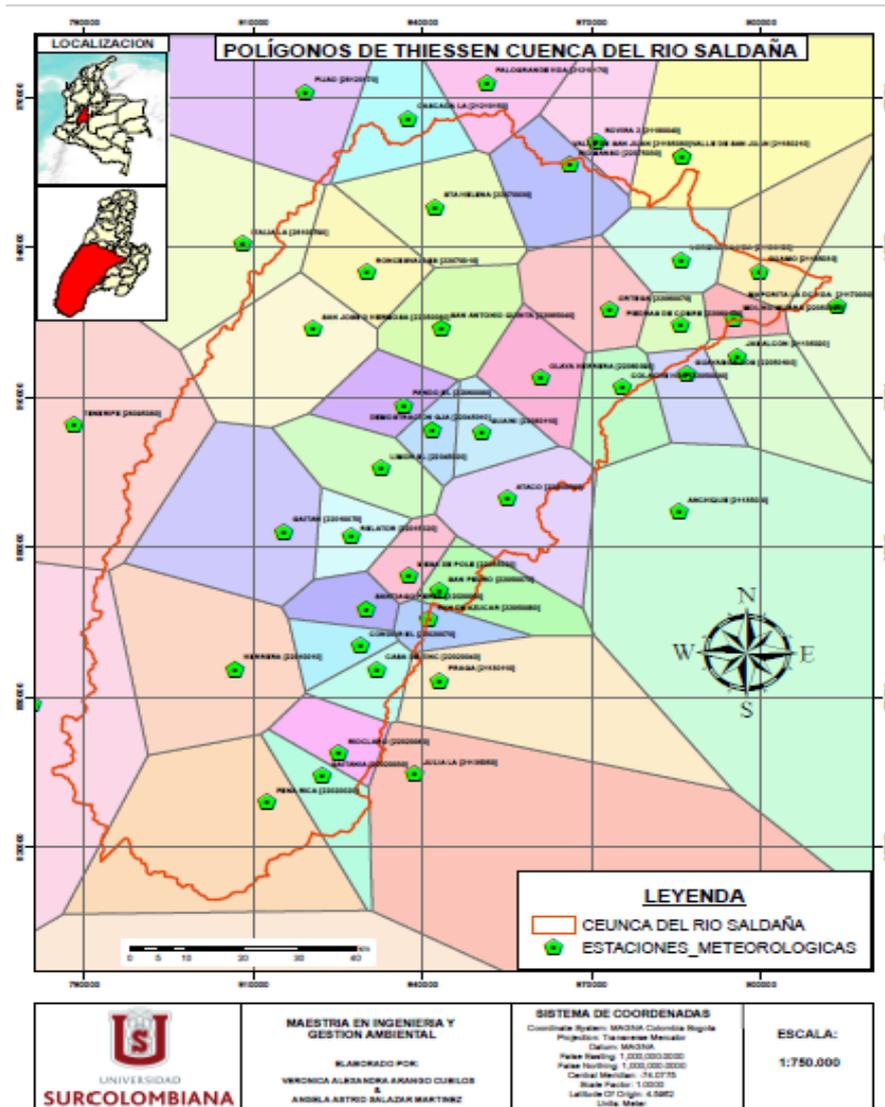


Figura 5. Área de influencia de cada estación en la zona de estudio a través de los Polígonos de Thiessen, generado en Arcgis 10.7

7.2.1.1 Precipitación año 1992

Como se observa en la figura 8 se obtuvo una imagen en formato raster donde se observa un rango de 866.9 a 2352.2 mm anuales de precipitación. La zona de la cuenca que presentó una mayor precipitación fue en los municipios de Ataco, Chaparral y Rióblanco, que corresponden a la zona media de la cuenca representadas por las estaciones El Condor, El Limón y Gaitán; Las estaciones que reportaron una menor

precipitación fueron La Italia, Guamo y Hacienda Coloche, localizadas en la zona baja de la cuenca en los municipios de Chaparral, Guamo y Coyaima.

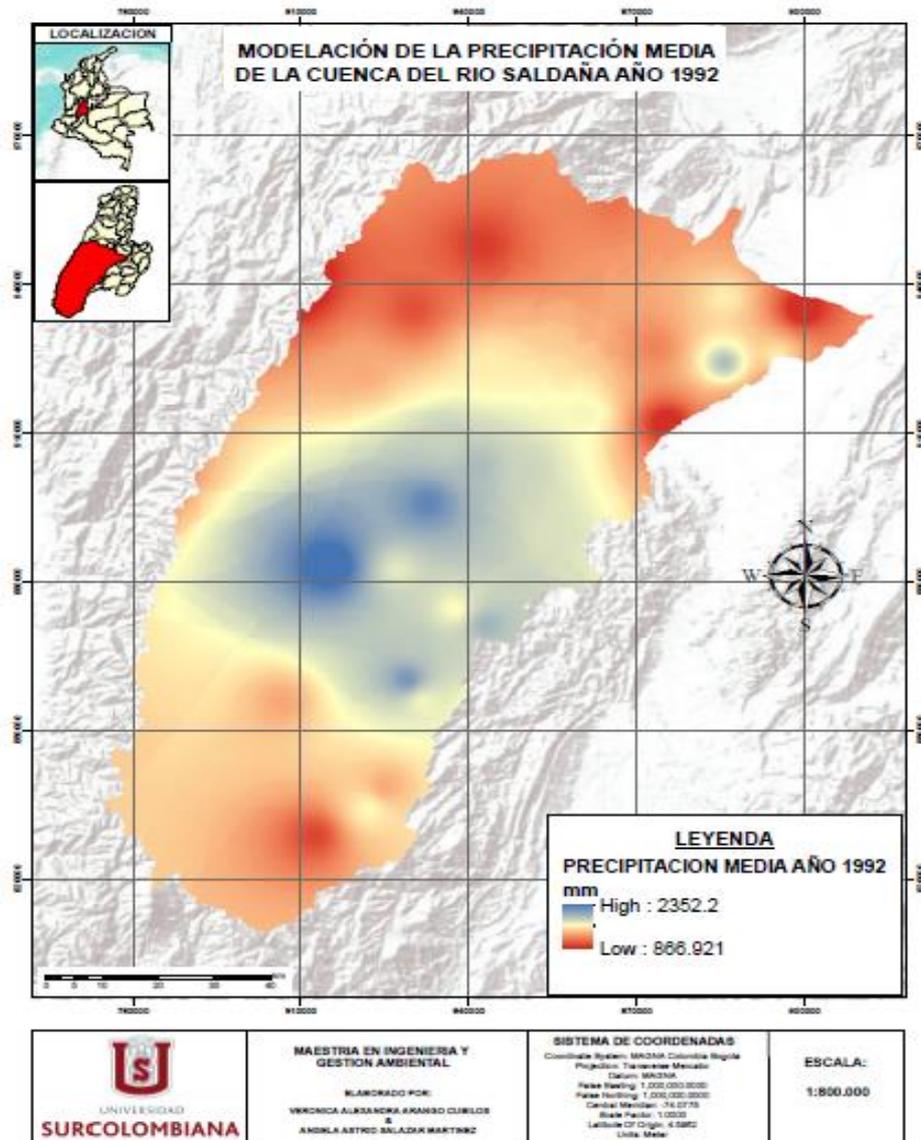


Figura 6. precipitación cuenca del río Saldaña año 1992.

De acuerdo como lo establecido por (Benavides & Rocha, 2012) los años con menores precipitaciones en el país durante los últimos 42 años (período 1970-2011), fueron 1997, 1992, 1991, 1976 y 1977.

Según (Jaramillo & Chaves, 2000) indica que las lluvias registradas en la región cafetera de Colombia, situada en zonas de vertiente de las cordilleras, aumentan con la altitud hasta un nivel máximo que varía de acuerdo con la ladera, pero en general, la máxima lluvia se presenta entre los 1300 y 1500 m, y a partir de esta altitud, la cantidad de precipitación disminuye hacia la parte alta de la montaña.

7.2.1.2 Precipitación año 2001

Para el año 2001 la tendencia para el parámetro de precipitación se presentó con una distribución entre 1327 mm y 3213.58 (ver figura 9). Los municipios que presentaron menor precipitación fueron Chaparral, Río blanco y Rovira, mientras que entre las estaciones que reportaron la mayor precipitación están El limón del municipio de Chaparral, Gaitan del municipio de Río blanco y Pan de azúcar localizada en el municipio de Ataco. Al comparar los resultados del 2001 con el año 1992 se evidencia un aumento en la precipitación pasando de una mínima de 886.9 a 1327 mm lo que equivale a 410.1mm más y una máxima con una diferencia de 861.38 mm es decir paso de 2352.2 a 3213.58, sin embargo la distribución es similar entre los años, las zonas con mayor precipitación se localizan en el área media de la cuenca y los de menor precipitación en la zona alta y baja de la cuenca.

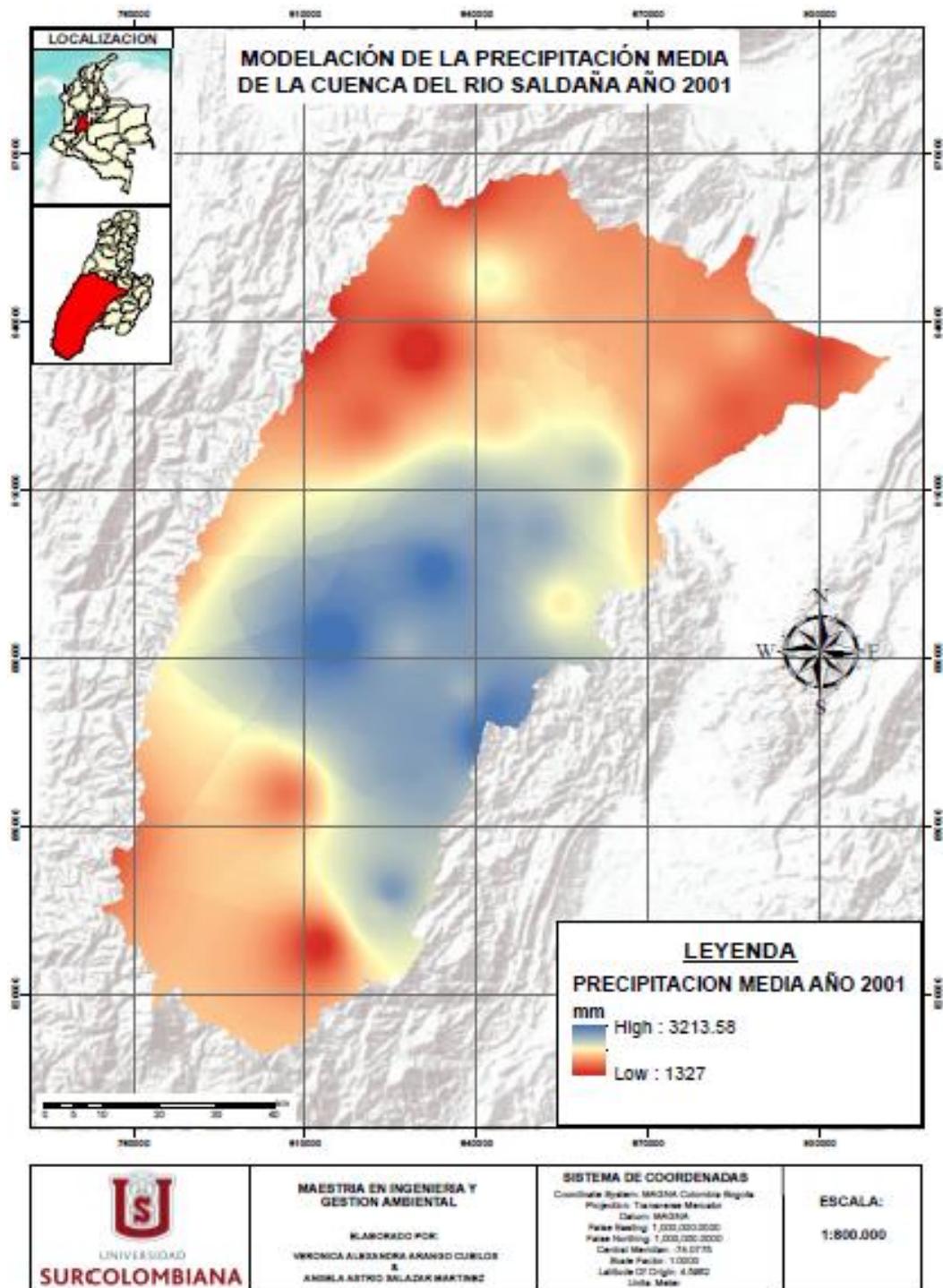


Figura 7. Precipitación cuenca del río Saldaña año 2001

Segun (Arango et al., 2012) que la precipitación en el territorio colombiano para las décadas 1971-1980 y, principalmente 2001-2010, fueron las más lluviosas, los cuales son similares éstos resultados planteados por World Climate Programme) en el contexto

mundial; donde menciona que a nivel global, el decenio 1951-1960 fue el que presentó mayor cantidad de precipitaciones medias mundiales desde 1901, seguido de los decenios 2001-2010 y 1971-1980 (Orozco et al., 2011 p 39) por lo tanto los resultados obtenidos se comportan de igual manera con otras investigaciones.

7.2.1.3 Precipitación año 2011

En el año 2011 el parámetro de precipitación registró en un rango entre 1513.38 mm y 4480. Los municipios que aportaron a la cuenca la mayor precipitación fueron Ataco, Roncesvalles y planadas. Se realiza la comparación del año 2011 con el 2001 y se observa un aumento en la precipitación equivale a 168.3 mm más; Cabe resaltar que para el año 2011 la distribución de la precipitación fue diferente a lo registrado en los años 1992 y 2001, teniendo cuenta que para los dos años las precipitaciones más altas se dieron en la zona media de la cuenca, mientras que para el año 2011 se genera una distribución en puntos focales como se observa en la figura 10.

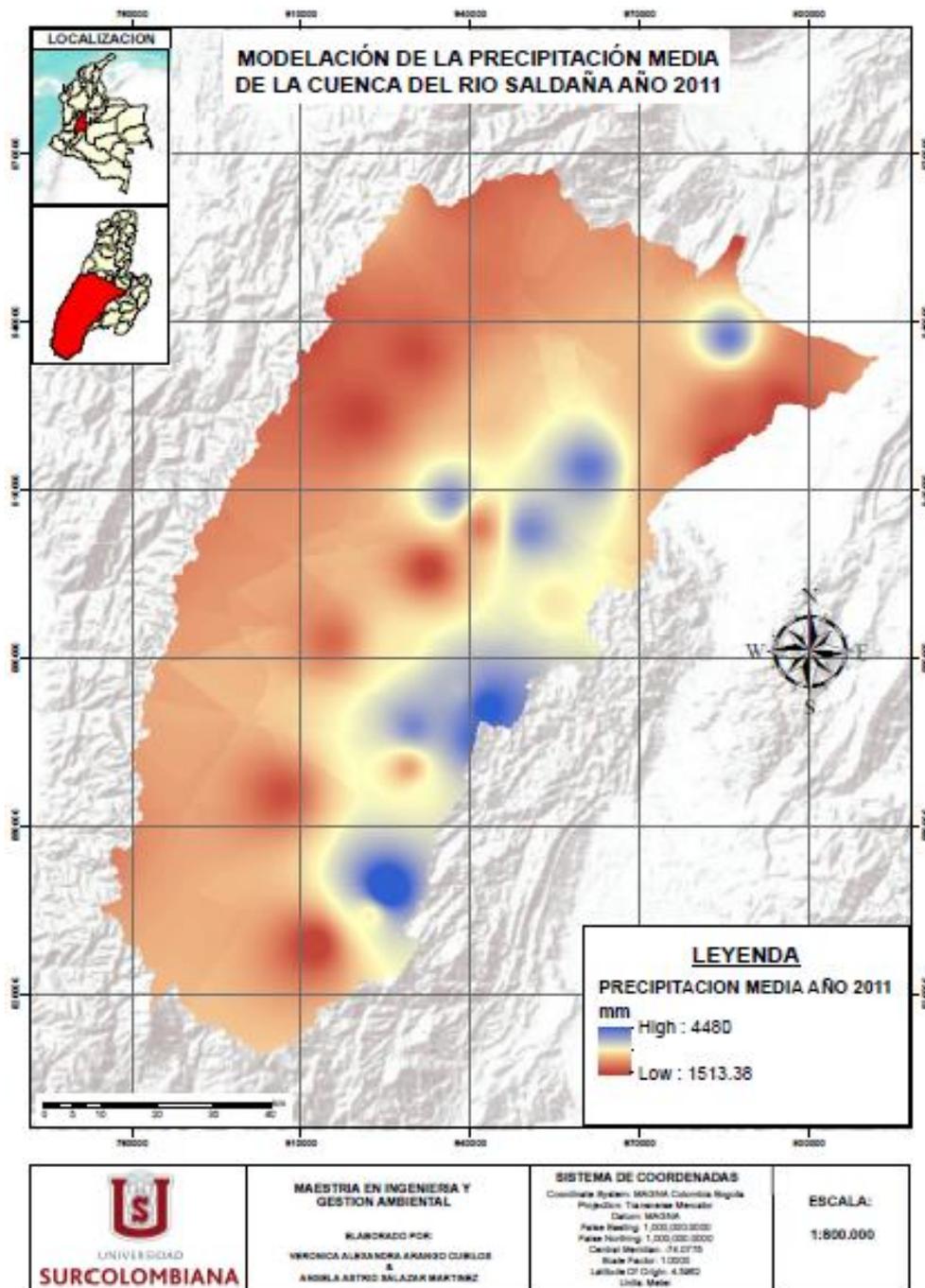


Figura 8. precipitación cuenca del río Saldaña año 2011.

Según (Corporacion Autonoma Regional Del Tolima, 2015 p 47), en el 2011 la cuenca del río saldaña presento eventos extremos de precipitación Ademas (Benavides & Rocha, 2012) expresan que respecto a los años más lluviosos en el país durante los últimos 42 años (período 1970-2011), el 2010 ocupa el primer lugar, seguido de los años 2011,

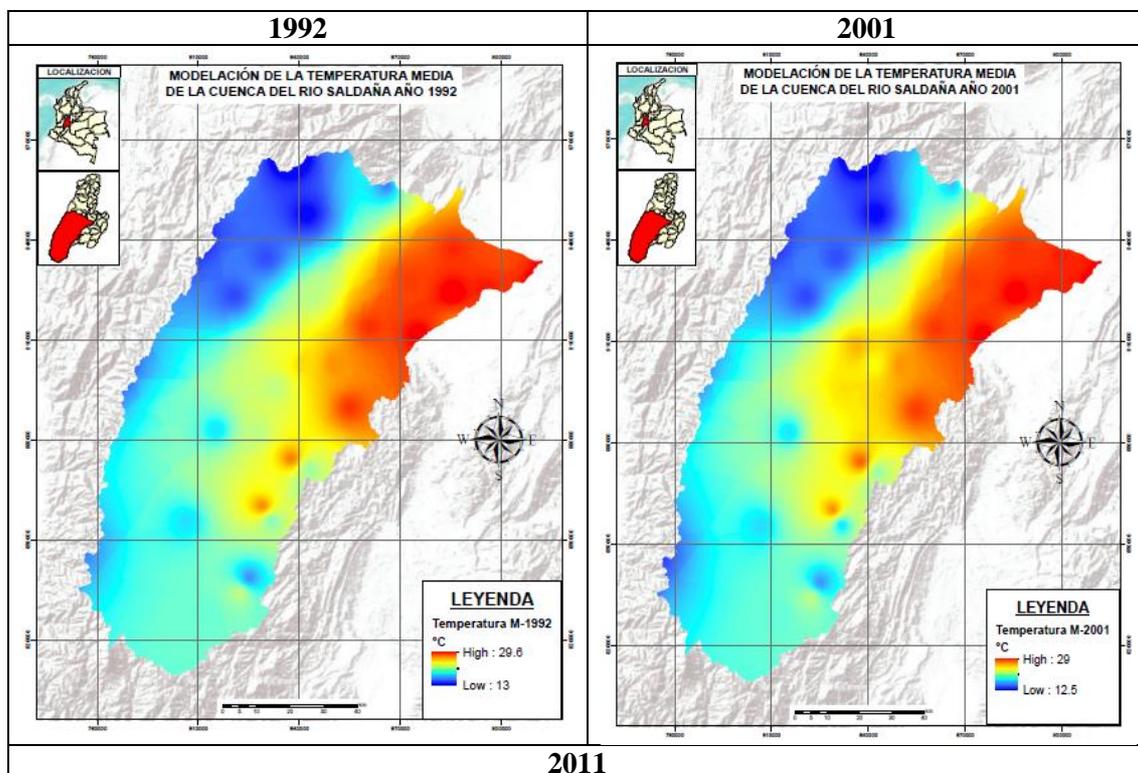
1999, 2008 y 1984. Los dos primeros años con más altas precipitaciones en el país, coinciden con los que se presentaron a nivel global.

8.2.2 Evapotranspiración

Para identificar la evapotranspiración se utiliza el método de Thornthwaite. Se analizó la temperatura para cada uno de los años debido a que es una variable fundamental para aplicar el método.

8.2.2.1. Temperatura

Como se observa en la figura 11, la temperatura del año 1992 muestra una distribución de los 13 a los 29.6 °C; para el 2001 se identificó que el rango de temperatura en el río Saldaña es de 12.5 a los 29 °C y para el año 2011 tuvo un rango de 11.4 a 27.9 °C.



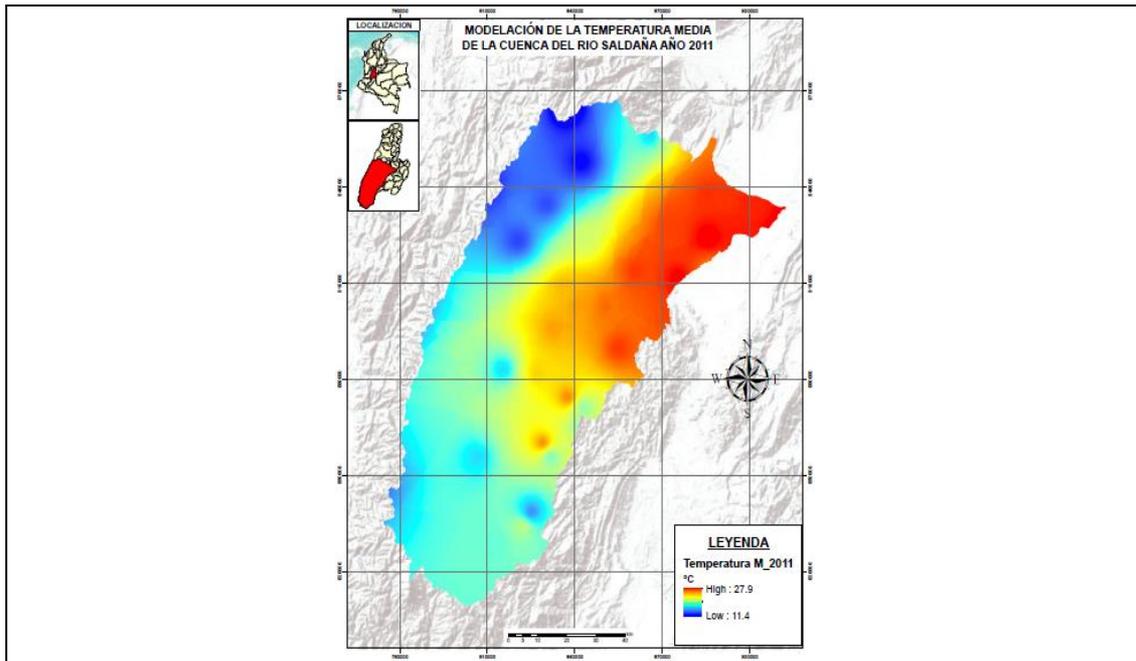


Figura 9. Temperatura de los años 992, 2001 y 2011 de la cuenca del río Saldaña.

En estudios realizados por (Gonzalo Hurtado, 2012 p58) los cinco años con temperaturas máximas medias más altas fueron para Colombia en el período comprendido entre 1971-2010 1997, 2002, 1972, 1992 y 1991. Así mismo (Chaves Cordoba & Jaramillo Robledo, 1998) establecen que el comportamiento anual de la temperatura del aire en Colombia, está determinado por su posición altitudinal en la franja tropical, la cual condiciona muy poca variación entre un mes u otro.

Los resultados obtenidos se ven afectados por la variabilidad climática cuyas fases extremas alteran temporalmente la frecuencia de los eventos meteorológicos y propician la presencia de fenómenos hidroclimáticos (sequía, períodos anormalmente lluviosos) (Corporacion Autonoma Regional Del Tolima, 2015).

Según (IDEAM, 2018) temperaturas medias anuales por encima de 24°C cubren cerca del 70% del área total del país. Pequeños núcleos con temperaturas medias anuales

superiores a 28°C se observan en el Valle del Magdalena a la altura de Huila y Tolima, en el Magdalena Medio y Bajo, así como en La Guajira.

8.2.2.2. Evapotranspiración año 1992

En el año 1992, la cuenca del río Saldaña presento un rango de 455 a 1200 mm de evapotranspiración. Los municipios que presentaron los mayores valores fueron Ortega, Saldaña, y Ataco (ver figura 14).

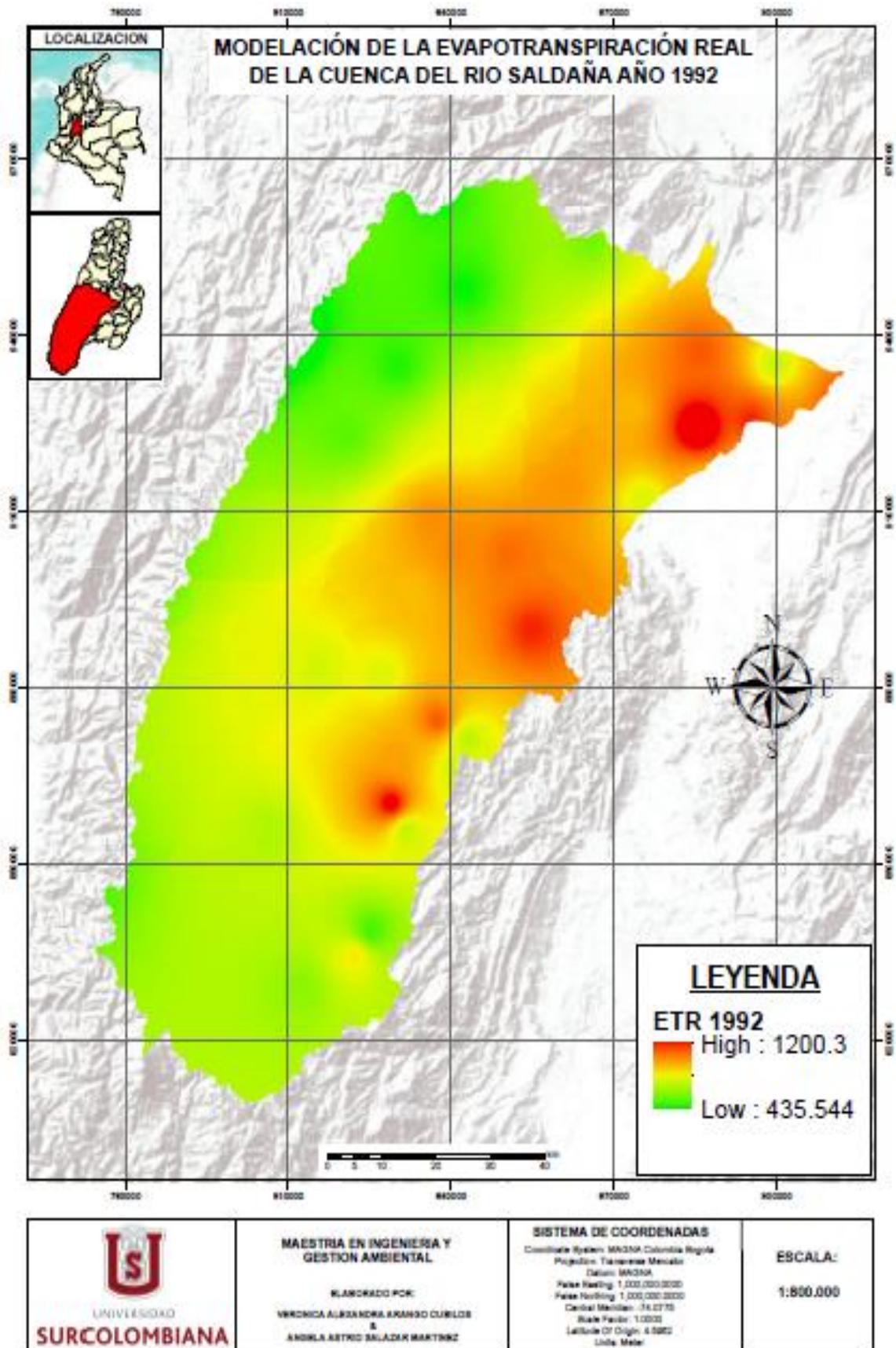


Figura 10. Evapotranspiración cuenca del río Saldaña año 1992.

Estos resultados concuerdan con los reportados por (Ulloa Pino, 2014) en donde se determinó que la distribución de la evapotranspiración estaba dada por variables topográficas ya que a medida que la altura es mayor la evapotranspiración disminuye, la explicación de este hecho reside en que la poca precipitación que cae en realidad en las zonas bajas se evapora en su totalidad, debido a que estas áreas es donde se registran la mayores temperaturas.

8.2.2.3. Evapotranspiración año 2001

El año 2001 arrojó un rango de 437 a 1134 mm; los municipios que presentaron una mayor evapotranspiración para este año de estudio fueron Saldaña, Ataco y Guamo con valores que van desde 1093 y 1205 mm,; mientras que las estaciones que reportan menor evapotranspiración están Tenerife, Cajones y La Italia con una distribución de 371 a 450.5 mm , esta estaciones se localizan en los municipio de Río Blanco, Planadas y Roncesvalles (ver figura 14). Al realizar un análisis comparativo con los resultados generados para el año 1992 se observa un aumento de la evapotranspiración de 1.08 mm para la mínima y una disminución de 66.75mm para la máxima.

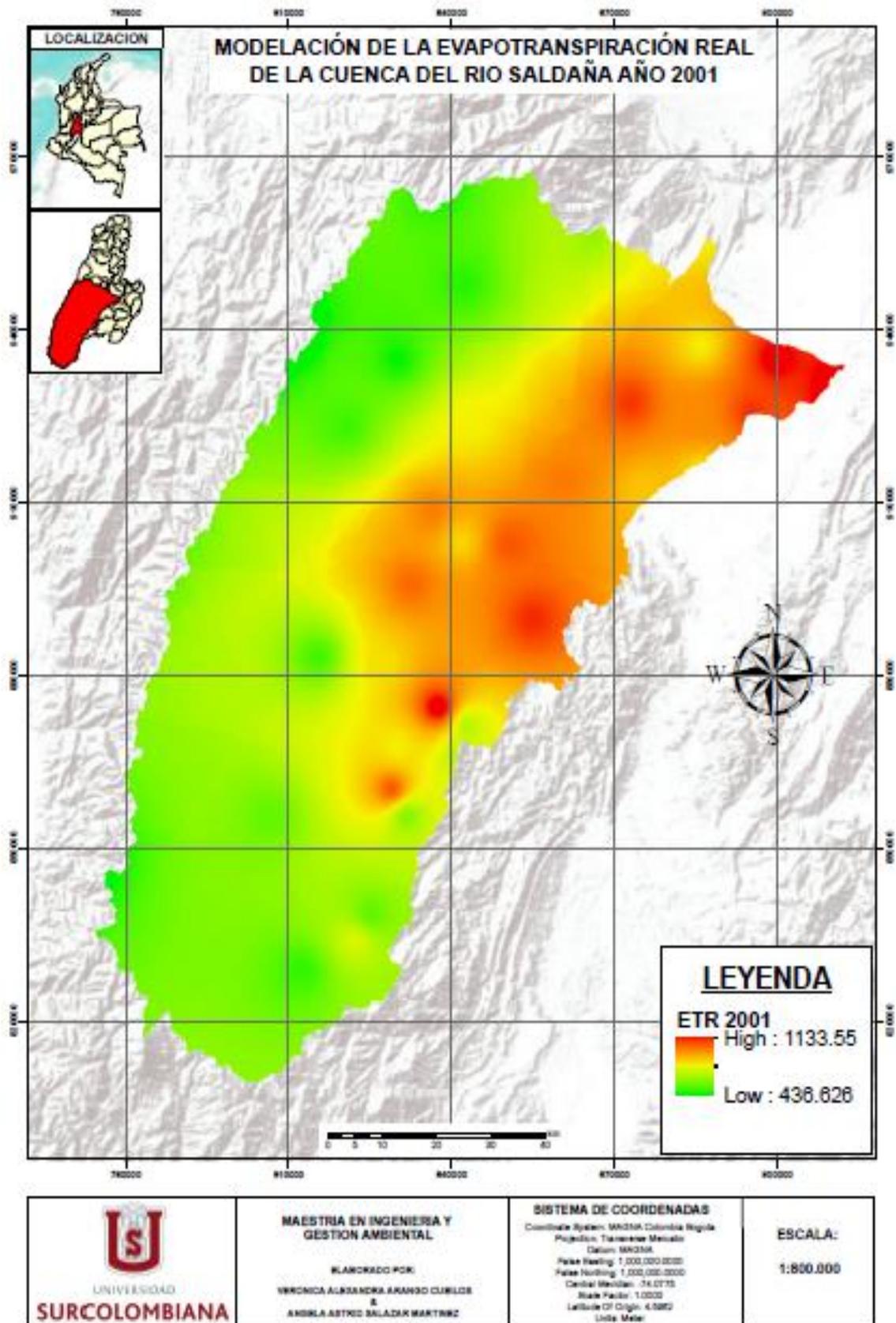


Figura 11. Evapotranspiración cuenca del río Saldaña año 2001.

De acuerdo a (Garcia & Otero, 2005 p 21) las regiones húmedas frías a muy frías, posee los valores más bajos de evapotranspiración teniendo en cuenta que la alta humedad del aire y la presencia de nubes generarían una tasa baja de evaporación; además, el viento únicamente puede reemplazar el aire saturado con aire un poco menos saturado y remover energía calórica; Así mismo estos autores indican que para los climas húmedo templado a cálido la demanda evaporativa es alta debido a la resequedad del aire y a la cantidad de energía disponible en forma de radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, gran cantidad de vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que más vapor sea elevado, Concordando con los resultados presentados para el año 2001.

8.2.2.4. Evapotranspiración año 2011

Para el año 2001 el rango de evapotranspiración fue de 453.5 y 1183.8 mm; Comparados estos resultados con los del año 2001 se evidencia un aumento de la evapotranspiración de 50.25 mm para la máxima y de 16.88 mm para la mínima. (ver figura 16).

El aumento de evapotranspiración para este año de estudio puede deberse principalmente por el incremento de coberturas boscosas para el área de la cuenca tal como se mostró en el numeral 8.1.2 ; esto se puede confirmar por lo expuesto por (Pérez et al., 2018) el cual indica que los mayores cambios de la evapotranspiración se dieron principalmente en aquellas áreas en donde se presentó en gran parte el reemplazo de coberturas de uso agrícolas por coberturas forestales las cuales presentaron un mayor coeficiente de la evapotranspiración, mientras que las áreas que experimentaron una pérdida de la superficie boscosa hacia otras con menor densidad vegetal, disminuyeron

sus valores de evapotranspiración , lo cual se debe exclusivamente a los procesos de transpiración vegetal.

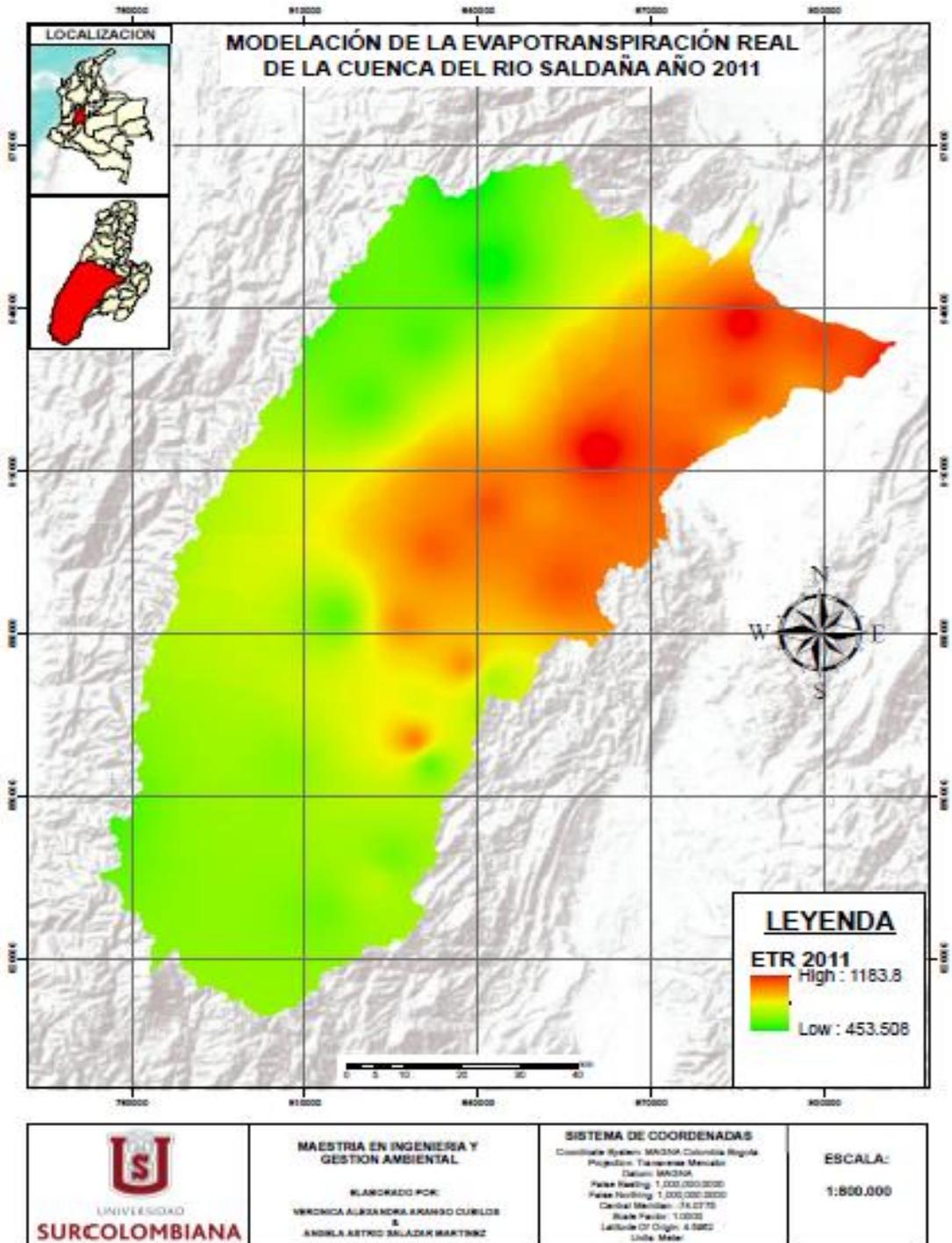


Figura 12. Evapotranspiración cuenca del río Saldaña año 2011.

7.1.1 Infiltración

Se aplica para cada año el método de profundidad hidráulica del suelo (HU); Se genera un archivo ráster para los tres años de estudio 1992, 2001 y 2011. Se utilizó en formato shape los tipos de suelos del Tolima generado por el (IGAC 1997). La zona de estudio presenta en total 36 tipo de suelo, las cuales se distribuyen en función de los diferentes paisajes y climas (ver tabla 16).

Tabla 7
Suelos presentes en la cuenca del Río Saldaña.

Tipo de suelo	Significado	Tipo de suelo	Significado
MAA	Montaña clima Nival y subnival, pluvial	MKD	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo
MDB	Montaña clima Extremadamente frío, muy húmedo	MKE	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo
MGB	Montaña clima Muy frío, muy húmedo	MKG	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo
MGC	Montaña clima Muy frío, muy húmedo	MKI	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo
MGE	Montaña clima Muy frío, muy húmedo	MQD	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo
MKB	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo	MQE	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo
MKC	Montaña clima Frío húmedo, muy húmedo	MQF	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo
MWC	Montaña clima Cálido seco	PWE	Pie de Monte clima Cálido seco
MWI	Montaña clima Cálido seco	PWH	Pie de Monte clima Cálido seco
PWK	Pie de Monte clima Cálido seco	NP	Montaña clima Nival y subnival, pluvial
PWA	Pie de Monte clima Cálido seco	VWA	Valle clima Cálido seco
PWB	Pie de Monte clima Cálido seco	VWB	Valle clima Cálido seco
MQG	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo	MWA	Montaña clima Cálido seco
MQH	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo	MWB	Montaña clima Cálido seco
MQN	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo	Zu	Zona Urbana
MQO	Montaña clima Medio húmedo, muy húmedo	WJ	Montaña clima Cálido seco
MR	Montaña clima Cálido seco	PWL	Pie de Monte clima Cálido seco
VVC	Valle clima Cálido seco	PWC	Pie de Monte clima Cálido seco

De acuerdo a los resultados de valor de la capacidad de almacenamiento de los suelos en el área de la cuenca (ver tabla 17), se observa que en áreas con presencia de bosque los suelos tienen una mayor capacidad de almacenamiento, Esta condición se puede deber a que los sistemas radiculares bajo los bosques son extensos y relativamente profundos en comparación con las tierras agrícolas y los pastizales; en conjunto, estas condiciones biológicas crean suelos con alta microporosidad, baja densidad aparente, conductividades hidráulicas altamente saturadas y elevadas tasas de infiltración (Ramos y Armenteras, 2019 p 20).

Tabla 8
Resultado de HU Río Saldaña. Fuente Autoras.

Unidad de suelo	Bosque	cultivo	Unidad de suelo	Bosque	cultivo
MAA	0	0	MR	0	0
MDB	66.47	33.23	MWA	372.84	186.42
MGB	395.18	197.59	MWB	244.75	122.37
MGC	300.88	150.44	MWC	422.98	211.49
MGE	387.18	193.59	MWI	443.16	221.58
MKB	327.27	163.63	MWJ	377.4	188.71
MKC	303.43	151.71	NP	0	0
MKD	356.64	178.32	PWA	73.7	36.83
MKE	193.95	96.97	PWB	352.5	176.23
MKG	476.06	238.03	PWC	531.1	265.55
MKI	131.35	65.67	PWE	244.2	122.07
MQD	438.83	219.42	PWH	179	89.52
MQE	857.1	428.57	PWK	385.5	192.74
MQF	315.04	157.51	PWL	327	163.5
MQG	259.92	129.96	VWA	302.7	151.33
MQH	412.23	206.12	VWB	432.1	216.07
MQN	450.35	255.17	VWC	423.1	211.5
MQO	381.42	190.71	Zu	0	0

Para los años de estudio se determinó que la mayoría de las unidades de suelo de cobertura bosque almacenan entre 300 y 400 mm; la unidad MQE con 857 mm es la que mayor capacidad de almacenar agua tiene en la cuenca, esta unidad se caracteriza por tener un tipo de relieve filas y vigas, con una litología correspondiente a rocas

metamórficas volcanosedimentarias e ígneas sobre las cuales se han depositado mantos de cenizas volcánica distribuidos de manera irregular (IGAC 2016), lo que permite el almacenamiento de agua de forma simple; y las que menos almacenan son las unidades MR, MAA, NP, zonas urbanas, ya que son suelo que presentan características de los convierte en impermeables. Por otro lado, para la cobertura cultivos el rango de almacenamiento HU en la superioridad de las unidades de suelo oscila entre 120 y 198 mm, de igual manera tal como la cobertura boscosa la unidad MQE presentan el mayor valor de almacenamiento con 428.5mm para el área de la cuenca de estudio.

En los ráster de contornos generados para los años 1992, 2001 y 2011(ver figura 17) se evidencia que las zonas que reporta menores almacenamiento de agua son aquellas que presentan la menores temperaturas y las que reportan presencia de coberturas no boscosas, Esto se debe a que las zonas de menor temperatura se relaciona con áreas de mayores alturas y mayores pendiente la cual juega un factor muy importante para la infiltración y está en función del tiempo de retención que puede ser menor, así mismo la temperatura es un factor que influye en varios aspectos como en la viscosidad del agua para infiltrarse y la evapotranspiración que pudiera generar la vegetación y la radiación solar (de la Torre- Gonzales, 2014 p 15).

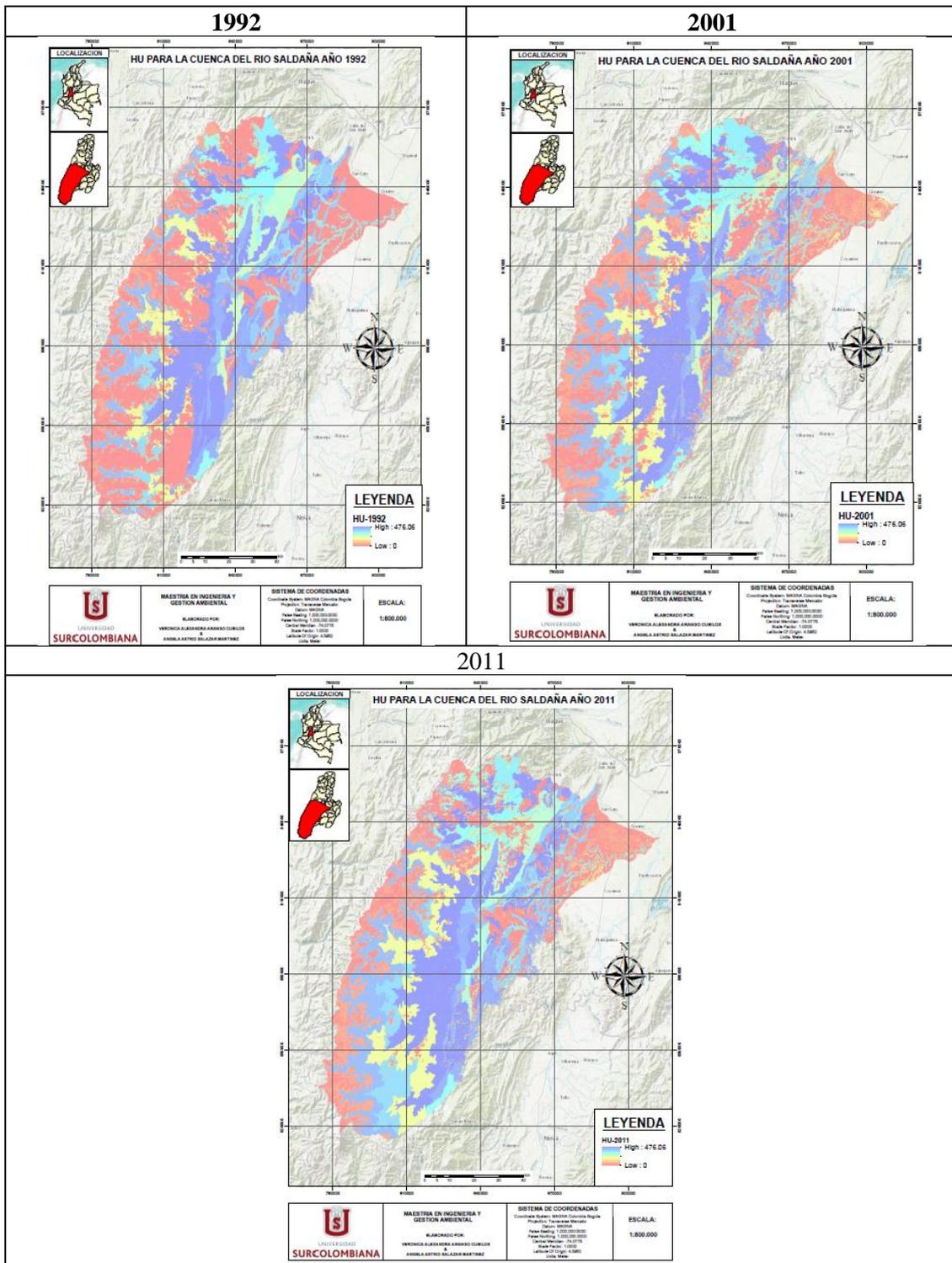


Figura 13. Infiltración de los años 1992, 2001 y 2011 del río Saldaña por el método de almacenamiento de agua HU.

8.2.3 *Balance hídrico para el área de estudio*

A continuación, se analiza los resultados obtenidos para cada año.

8.2.3.1. **Balance hídrico Año 1992**

Se genera una imagen raster para el año 1992 el cual permitió establecer la disponibilidad de recurso hídrico en la cuenca distribuida en un rango de -181 a 1627.mm (ver figura 20), Las zonas que mayor disponibilidad de recurso hídrico presentaron fueron las ubicadas en la zona centro de la cuenca en donde se localizan los municipios de Planada y Ríoblanco, mientras que en municipios de la zona baja de la cuenca como San Luis, Ortega y Coyaima registran valores de menor disponibilidad, hasta el punto de producirse un déficit hídrico para el año de estudio. Las zonas que presentan la menor disponibilidad de agua, son aquellas que presentan una mayor temperatura, una menor precipitación una mayor evapotranspiración y presentan áreas de poca cobertura boscosa.

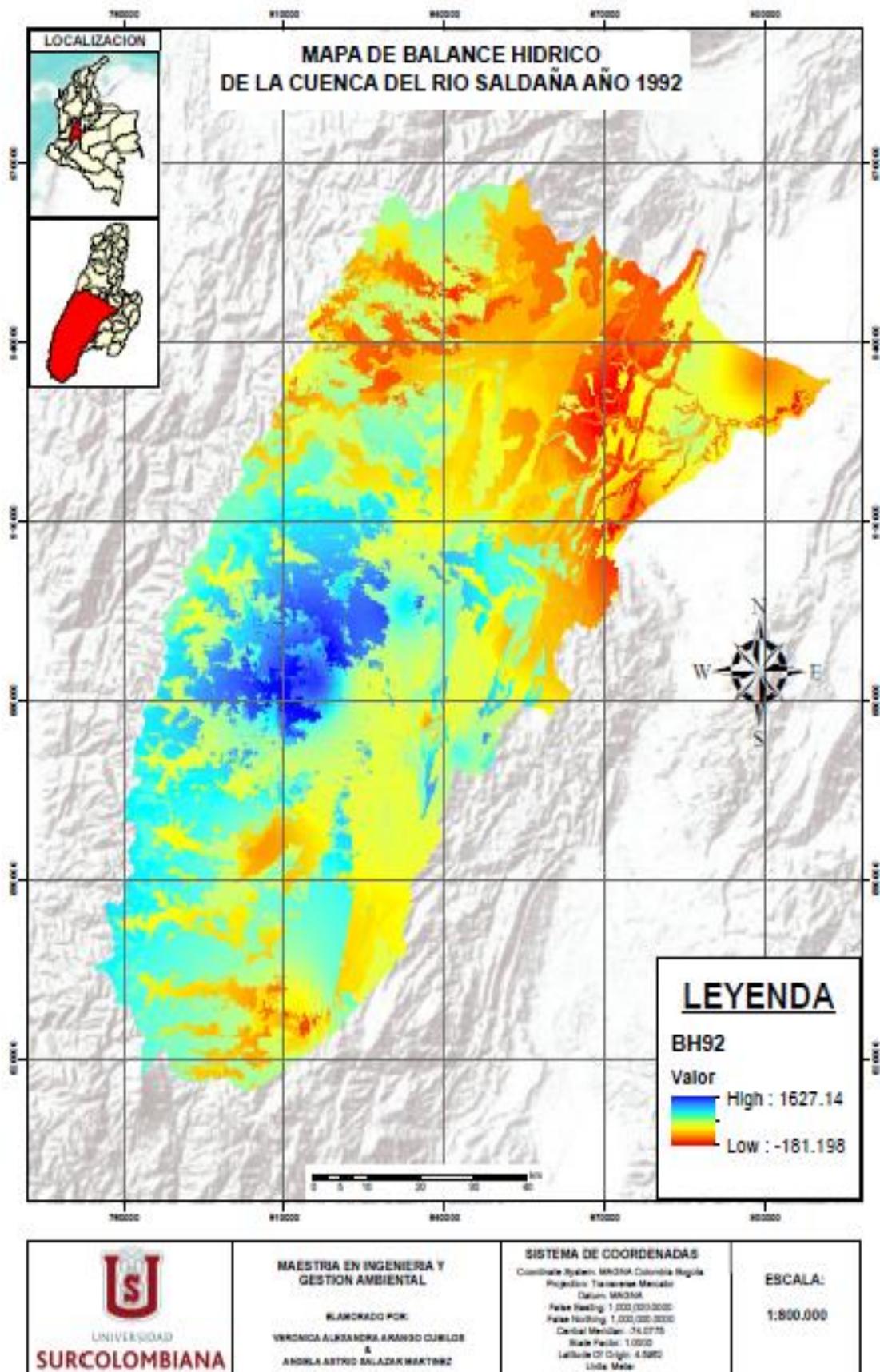


Figura 14. Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 1992.

7.2.4.2 Balance hídrico Año 2001

El balance hídrico para el 2001 presento un rango de 271 a 2649 mm (ver figura 21). Al comparar los rangos del 2001 con el año 1992 se observó un alza en los valores de para el año 2001; A diferencia del año 1992, en el año 2001 no se registran zonas con déficit hídrico, Sin embargo, la distribución de la disponibilidad se mantiene, en donde los municipios de centro de la cuenca son los que mayor recurso hídrico presentan y los de la zona baja de la cuenca como San Luis, Ortega y Coyaima registran valores de menor disponibilidad. Estos valores de disponibilidad de recurso se deben principalmente a que en el año 2001 se presentó una mayor precipitación, una menor temperatura y menor evapotranspiración que en el año 1992.

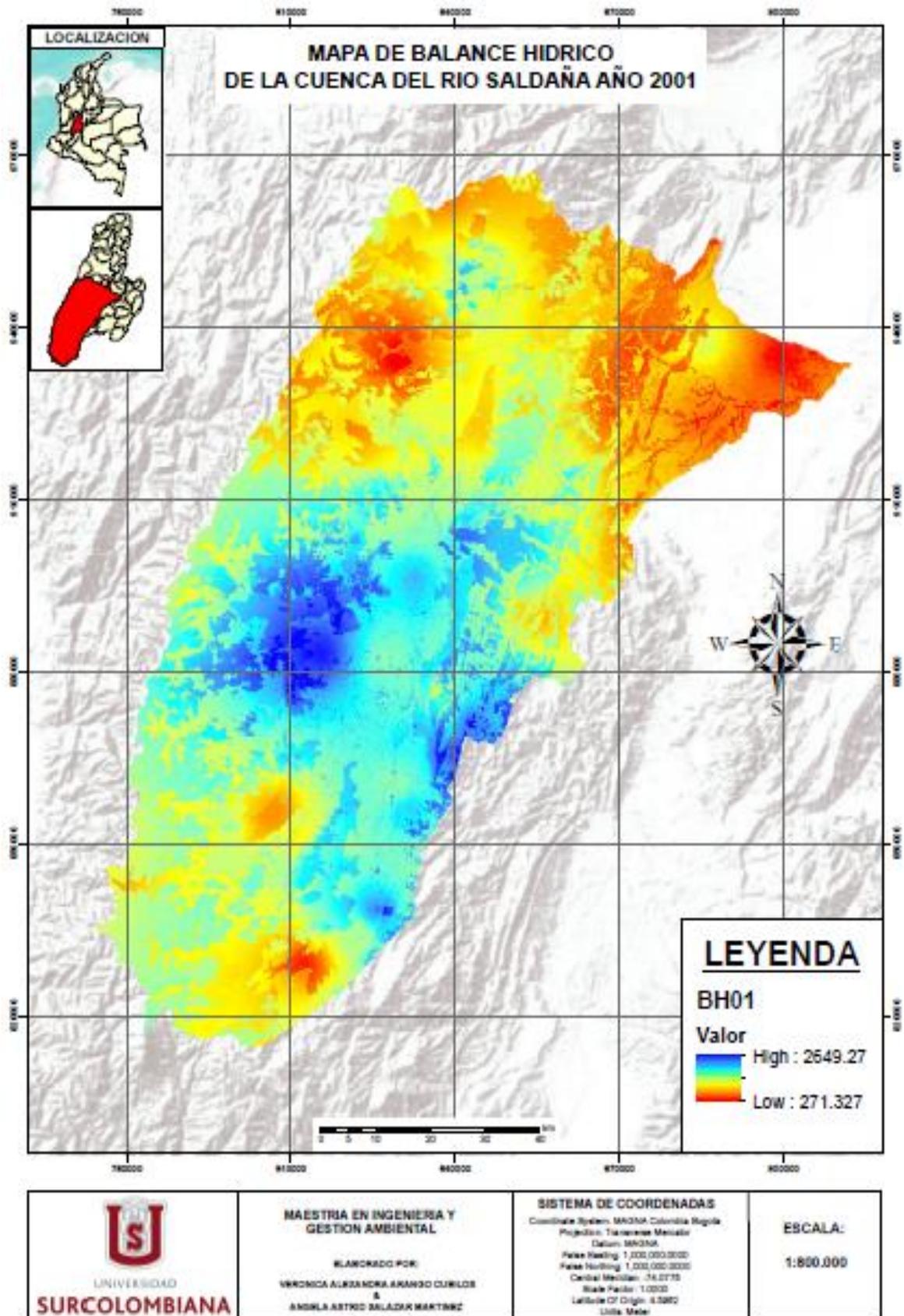


Figura 15. Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 2001.

7.2.4.2 Balance hídrico Año 2011

Para el año 2011 la disponibilidad de recurso hídrico se presentó en un rango entre 297 a 3880 mm (ver figura 22). Con respecto al año 2001, se evidencia un incremento del 9% (25.8mm) en el valor mínimo y un aumento del 32% (1189 mm) para el máximo, en cuanto a la distribución de la disponibilidad de recurso el año 2011 a diferencia de los otros años de estudio, las zonas con mayor y menor recurso se puntualizaron localizándose en específicamente en el municipio de planada, ataco y san Luis; de igual manera las áreas con menos disponibilidad quedaron específicamente en el municipio de chaparra y algunos sectores de Saldaña. Estos resultados se presentaron de esta manera ya que a pesar de que el año 2011 fue uno de los de mayor precipitación para la década, se observó que en la cuenca estas lluvias no fueron estandarizadas si no que se sectorizaron; de igual manera la temperatura también fue baja, pero la evapotranspiración fue mayor.

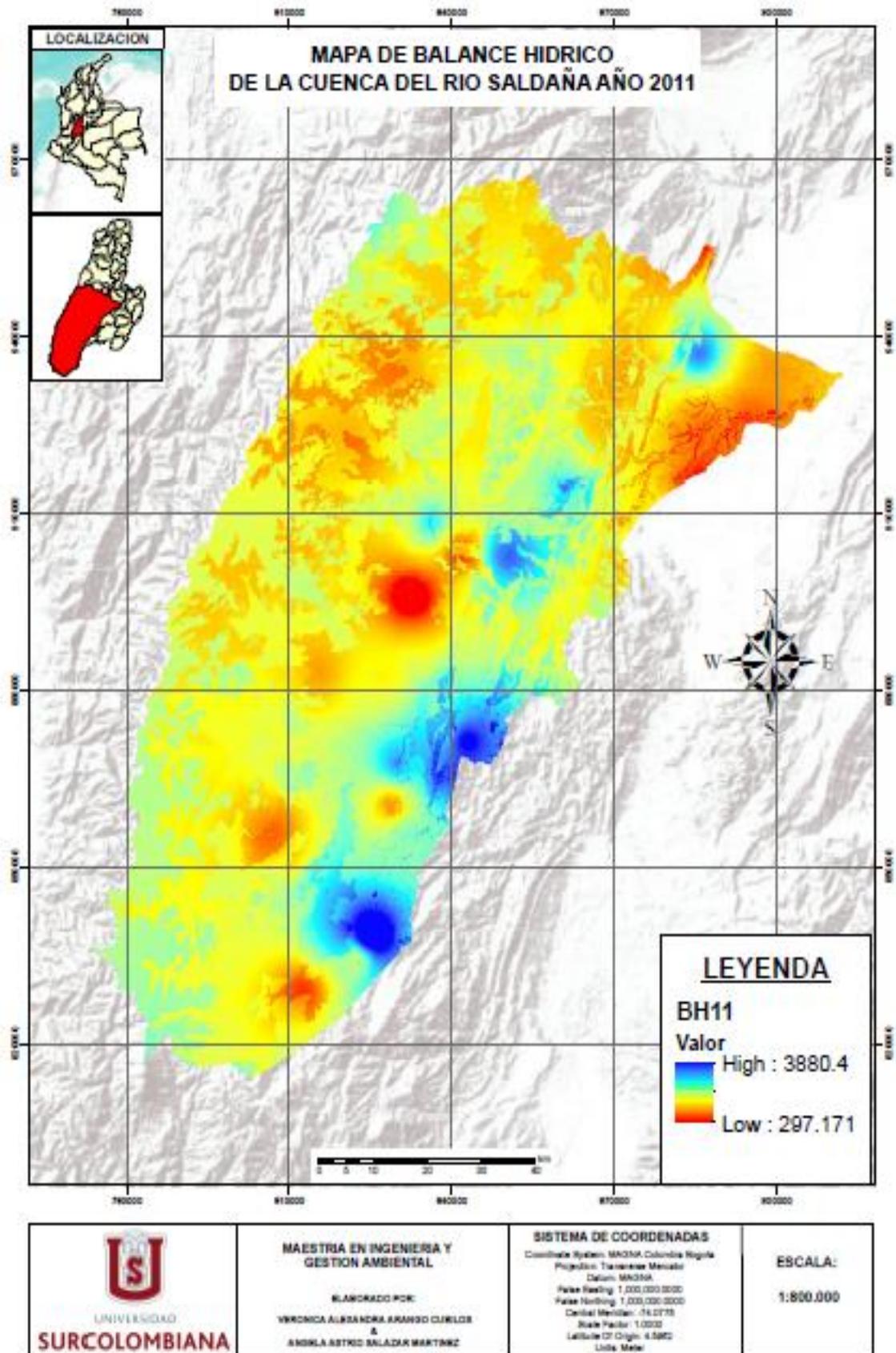


Figura 16. Balance hídrico de la cuenca del río Saldaña año 2011.

8.3. FASE III. Análisis Comparativo de la Evolución de la Cobertura Vegetal y el Balance Hídrico

Al realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en los ráster de para el balance hídrico y el NDIV de la cobertura vegetal de los años de estudio en la cuenca del río Saldaña, se visualiza que existe una relación entre la presencia de vegetación cerrada y la disponibilidad de recurso hídrico, ya que para el año 1992 la presencia de cobertura boscosa fue menor y la disponibilidad de recurso también entre los 3 años de estudio, mientras que el año 2011 fue el que presentó mayor coberturas boscosa y mayor disponibilidad de agua (figura 17).

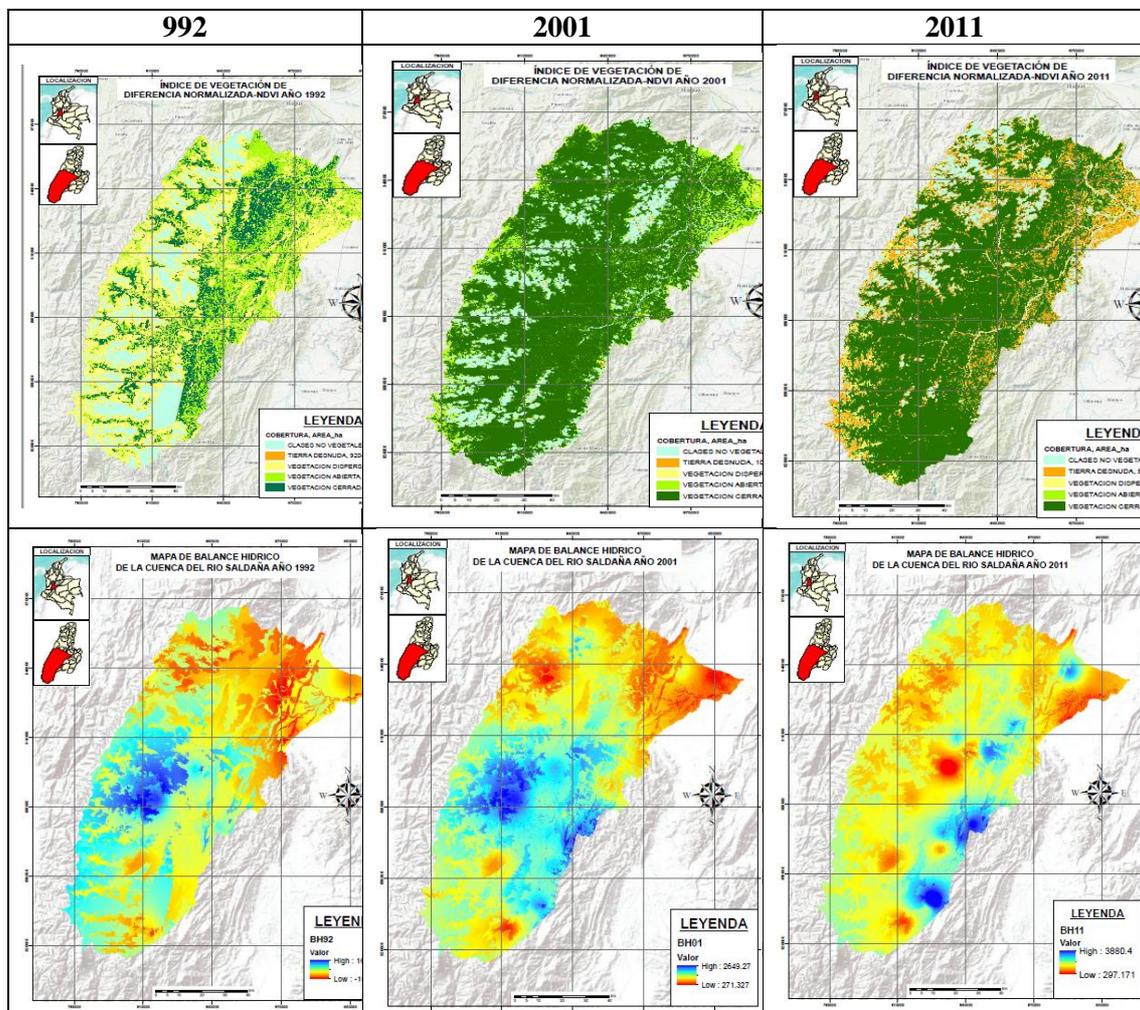


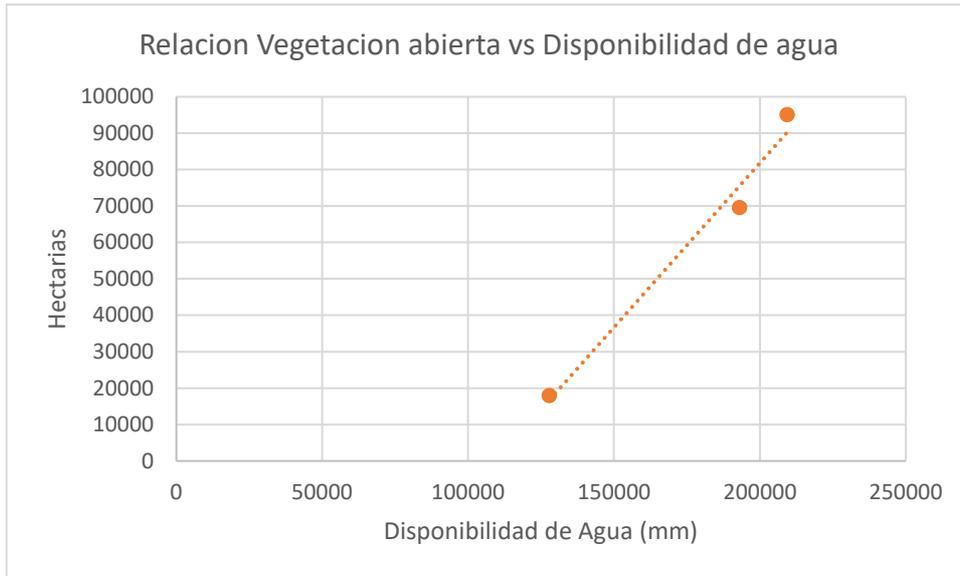
Figura 17. Comparación entre NDVI y disponibilidad de recurso en la cuenca del río Saldaña. Fuente Autoras

Se evidencia por el método de Pearson, que las coberturas que presentan una correlación muy alta la vegetación dispersa ($r = 0.962$) compuesta de tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales y terreno arado para cultivo; La vegetación abierta presenta una correlación de ($r = 0.990$); Por otro lado las coberturas de tierra desnuda y vegetación cerrada presenta valores de correlación baja ($r = 0.587$) y ($r = 0.423$) respectivamente. En la gráfica 4, 5 6 y 7 se representan las correlaciones arrojadas para cada cobertura.



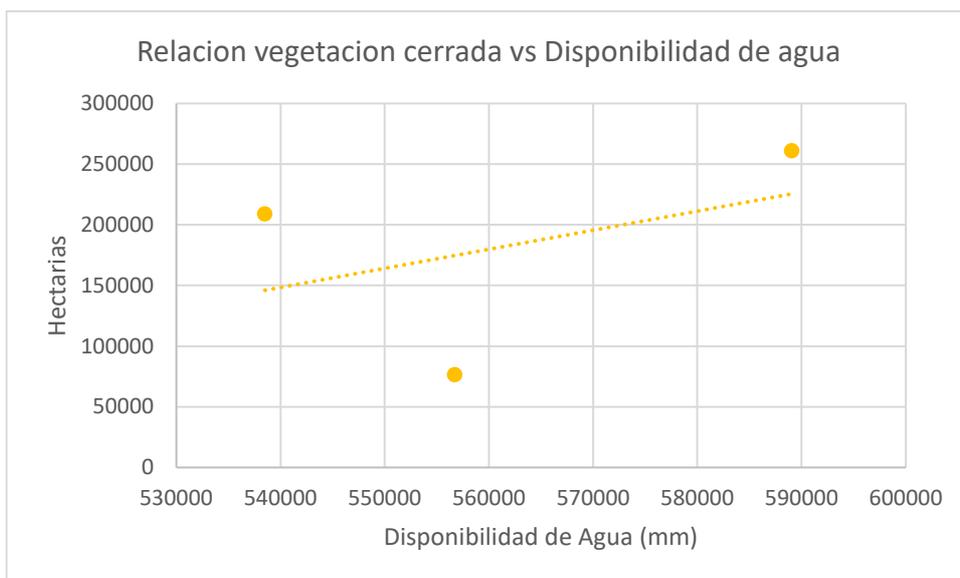
Gráfica 1. Correlación tierra desnuda versus disponibilidad de agua. Fuente. Autoras

Estos resultados concuerdan con lo establecido por (Wulf, 2013) la cual indica que una reducción en la cubierta vegetal de una cuenca genera un aumento en la producción de agua, debido a la disminución en el porcentaje de precipitaciones interceptadas y disminución en la evapotranspiración; así mismo (Giraldo, 2002) concluye en su estudio que no se encontró una relación entre el aumento de la reforestación y la producción de agua en la cuenca de Piedras Blancas, ya que a nivel de la escorrentía media no hubo cambios significativos a través del tiempo.



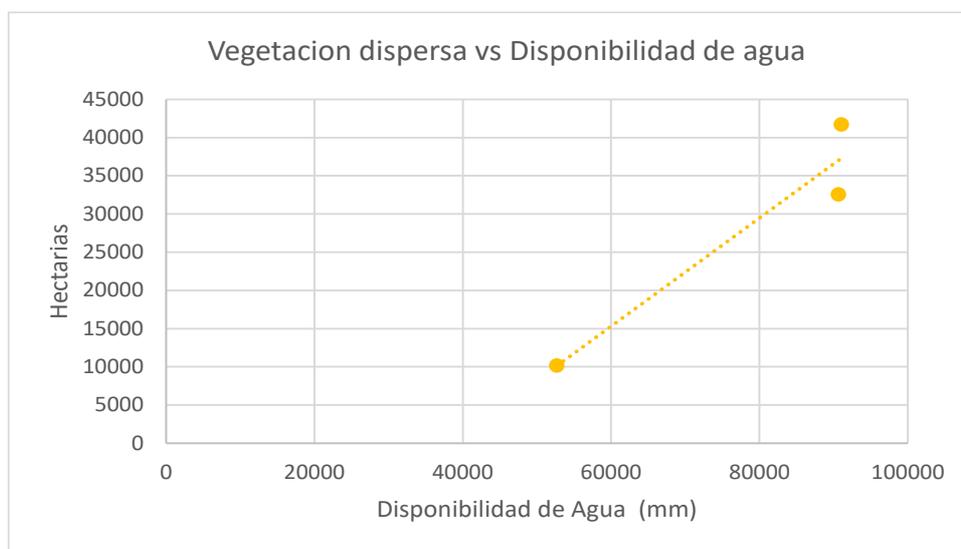
Gráfica 2. Correlación vegetación abierta versus disponibilidad de agua. Fuente. Autoras

De igual manera (Luis et al., 2014) establece que el efecto del cambio de uso y de cobertura del suelo en la generación de escorrentía en donde se evidencia que un cambio de pradera a plantación adulta disminuye fuertemente la generación de escorrentía debido a una mayor capacidad de intercepción, una mayor tasa de evapotranspiración y una mayor capacidad de retención de humedad en el suelo de las plantaciones forestales.



Gráfica 3. Correlación vegetación cerrada versus disponibilidad de agua. Fuente. Autoras

Otros autores como (Pizarro-Tapia et al., 2005) dejan claro que los bosques disminuyen drásticamente las aportaciones de agua superficial, la velocidad de la escorrentía y el caudal punta de descarga, debido a tasas más altas de evaporación e interceptación, lo cual es particularmente sensible cuando se comparan plantaciones de rápido crecimiento, frente a cubiertas precedentes de pastos y/o arbustos.



Gráfica 4. Correlación vegetación dispersa versus disponibilidad de agua. Fuente. Autoras

Estudios realizados la variación temporal de los componentes del balance hídrico entre bosque y cobertura pradera se debe fundamentalmente a la distribución de las precipitaciones, a las condiciones climáticas, a las características aéreas de la vegetación y a la morfología y profundidad del sistema radicular. Se puede concluir que el reemplazo de un bosque por una cubierta herbácea inducirá a cambios importantes en los aportes de agua que llegarán al suelo mineral, en la distribución espacial y temporal del contenido de agua del suelo y en la profundidad y en la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración y percolación (Manrique-Alba et al., 2015).

Así mismo, (Sabate, 2009) indica que parte del agua que entra en el ecosistema se intercepta y se evapora, pero la cantidad depende del tipo de cobertura y de la intensidad de la lluvia. En el caso de las lluvias escasas, inferiores a 10 mm, el agua tiende a ser interceptada en una gran proporción, mientras que, en el caso de lluvias superiores a 10 mm, los valores de intercepción tienden a situarse en torno al 20 % de la precipitación o incluso en valores inferiores.

9. CONCLUSIONES

- Se presenta una correlación alta entre la disponibilidad de agua y las coberturas con menor presencia de masa forestal como vegetación abierta o vegetación dispersa, mientras que en las coberturas boscosas la relación es moderada; lo anterior puede indicar que para el área de estudio la cuenca del río Saldaña la cobertura vegetal boscosa no influye en la presencia de agua; con lo que se puede establecer que otros factores como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la morfología del área son variables que pueden incidir en la disponibilidad o no del recurso hídrico tal como lo indican algunos autores.
- La variación temporal de los componentes del balance hídrico en las diferentes coberturas, se debió fundamentalmente a la distribución de las precipitaciones, a las condiciones climáticas, y a las condiciones de la vegetación, por lo tanto, puede concluir que el reemplazo de un bosque por una cubierta herbácea inducirá a cambios importantes en los aportes de agua que llegarán al suelo, y por ende en la cantidad de agua que llega de manera superficial a la cuenca hídrica.
- La información registrada por las estaciones climatológicas presentes en la cuenca de estudio, fue un aporte fundamental para el establecimiento del comportamiento temporal de las variables precipitación y temperatura, las cuales son básicas para la valoración de la oferta hídrica, por tal motivo es necesario seguir estableciendo de esta clase de herramientas a través del territorio para futuros estudios.

- La incorporación de sistemas de información geográfico ligados a modelos de simulación hidrológica ayuda a realizar una representación gráfica especial de los diferentes procesos que pueden estar vinculados en el balance hídrico de una cuenca. Dichas representaciones permiten a los tomadores de decisiones implementar diferentes prácticas para el manejo de cuencas de acuerdo al objetivo primordial que se tengan para cada una de ellas.
- El desarrollo en los últimos años de metodologías para el monitoreo de las tierras basadas en el uso sensores remotos son datos valiosos para determinar relaciones en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas; permitiendo una visualización idónea de los cambios que se pueden presentar a través del tiempo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Mairena, H. (Universidad I. de A. (2012). *Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, desde la aproximación de los servicios de los ecosistemas: el caso de la cuenca del Río Frío*. 1–70.
- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para el cálculo del balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23–33. <https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674>
- Anderson, R., Hansen, J., Kukuk, K., Powell, B., & Nw, C. S. (2006). *Water Supply Alternative Evaluations*. 2817–2830.
- Arango, C., Dorado, J., Guzman, D., & Ruiz, J. . (2012). CAMBIO CLIMÁTIO MÁS PROBABLE PARA COLOMBIA A LO LARGO DEL SIGLO XXI RESPECTO AL CLIMA PRESENTE. *Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático*.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., Chen, J., Gotsch, S., Tobón, C., Geissert, D. R., Gómez-Tagle, A., Vache, K., & Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>
- Barón Leguizamón, A. (2003). *Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el territorio colombiano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bedoya, M. L. (2015). *Análisis Del Cambio De La Cobertura Entre 1999 Y 2015 Del*

Páramo De Chiles - Cumbal a Través De La Utilización De Herramientas Sig .

Universidad De Manizales.

Benavides, H., & Rocha, C. (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. *IDEAM-METEO/001-2012 Nota Técnica Del IDEAM*, 1–26.

Calvin W. Rose. (2004). *An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds* (Primera ed). Cambridge University Press.

Camacho-Sandoval, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta Méd. Costarric*, 50(2), 94–96.

Cartaya, Scarlet; Zurita, Shirley; Rodríguez, Elvira; Montalvo, V. (2014). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico , Manabí , Ecuador. *Revista Ud Y La Geomática*, 9, 5–17.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.udgeo.2014.9.a01>

Chaves Cordoba, B., & Jaramillo Robledo, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafe*.

Coral, A. C. (2015). CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO USANDO MODELAMIENTO DE DATOS ESPACIALES: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. *CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO USANDO MODELAMIENTO DE DATOS ESPACIALES: Estudio Aplicado a La Cuenca Del Río Buena Vista, Ecuador*, 1(22), 119–137.
<https://doi.org/10.33081/formação.v1i22.3165>

Corporación Autónoma Regional Del Tolima. (2011). *Ajuste al plan de acción 2007-2011*.

Corporación Autónoma Regional Del Tolima. (2012). *INFORME DE GESTIÓN 2012*.

Corporación Autónoma Regional Del Tolima. (2015a). *Balace hídrico de largo plazo*

en la subzona hidrogràfica del rio saldaña, afluente de la gran cuenca del magdalena (cauca).

Corporacion Autonoma Regional Del Tolima. (2015b). *Informe de Cambio Climático Cuenca del rio Saldaña* (Issue 052).

de la Torre- Gonzales, D. (2014). *Simulación de la Infiltración de agua en el Bosque de la Primavera*. <http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/0614a-dinamica-de-sistemas.pdf>

Erba, D. A. (2006). Sistemas de informacion geografica aplicados a estudios urbanos. In *Sistemas de Información Geográfica aplicados a estudios urbanos. Experiencias latinoamericanas*. Sistemas de Información Geográfica.

Fernández-Coppel, I., & Herrero Llorente, E. (2001). El satelite LANDSAT: análisis visual de imagenes. *Universidad de Valladolid*, 37. <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf>

Francesc, F., & Mondria Garcia, M. (2004). *Estudio para el desarrollo sostenible de L'Albuifera de Valencia*.

Garcia, S., & Otero, J. (2005). Estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del río lebrija. *Universidad Nacional de Santander*.

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>

Giraldo, L. (2002). *MEMORIAS: HIDROLOGIA FORESTAL: Influencia de los bosques*.

Gómez-Blanco, J. A., & Cadena, M. C. (2018). VALIDACIÓN DE LAS FÓRMULAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_0) PARA COLOMBIA. *Ideam*, 1–47.

Gonzales Vargas, M. E. (2015). *“Impacto Del Cambio De Uso Del Suelo En Las Áreas*

Productoras De Agua De La Cuenca Del Río Magdalena, Cantón Cotacachi.”

<https://doi.org/1541-8561>

González, A., Alvarez, P., González, M., & Aguirre, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador. *Cedamaz*, 6, 50–59.

Gonzalo Hurtado, M. (2012). *Largo Plazo De Las Temperaturas Mínimas Medias Para Las Regiones Hidroclimáticas De Colombia.*

Hernandez Cely, W. L., & Santamaria Tangua, M. A. (2011). *Aplicación De Hidrosig Para El Cálculo Del Balance Hídrico En La Cuenca Superior Del Río Lebrija* (Vol. 11, Issue 2) [UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER].
<https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016>

Herrera, N. (2017). *Implementación de bimodales estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar* [Universidad Distrital Francisco José De Caldas].
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

IDEAM. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. *Universidad Nacional de Colombia: José Daniel Pabón Caicedo*, 28.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>

IDEAM, I. de H. M. y estudios ambientales. (n.d.). El medio ambiente en Colom. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (Vol. 2, Issue 3).
<https://doi.org/10.29057/esat.v2i3.1450>

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (2005). *Datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, también denominado: MAGNA-SIRGAS.*

Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la Región Andina de Colombia.

Cenicafe, 57(4), 288–298.

Jaramillo, Á., & Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), 102–113.

Lucero, D. S., Lizeth, & Alarcon Africano, J. G. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interverdad en Nunchia, Casanare. [Universidad Católica De Colombia]. In *Procedia Computer Science*.
<https://doi.org/10.15439/2019F121>

Luis Carlos Vargas Fallas. (2010). *Modelo teórico determinístico para análisis de la disponibilidad estacional del agua en cuencas hidrográficas con datos discretos de caudales*. Universidad Nacional Universidad Estatal a Distancia.

Luis, J., Cano, C., Andreoli, A., Luis, J., & Diego, A. (2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(4), 145–151.

Luna, L., Moreno, F., Roldán, J., & Cienfuegos, I. (2004). Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica de “ El Cabril .” *Revista Ingeniería Del Agua.*, 1971.
www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p498.pdf

Manrique-Alba, A., Ruiz-Yanetti, S., Chirino, E., H., M., C., G., & Bellot, J. (2015). El balance hídrico en el suelo de 4 pinares (*Pinus halepensis*) de repoblación de la provincia de Alicante. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 354, 343–354.

Manrique, E. G. (1999). Índice de Vegetación. Aplicación del NDVI. *VIII Congreso Nacional de Teledetección.*, 217–219.

Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los

- recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58–72.
- Mieza, M. S., Kovac, F. D., & Martínez, D. (2012). Imágenes satelitales y aéreas en aplicaciones sitio-específicas. *Avances de La Agricultura Por Ambientes En La Región Semiárida Pampeana*, 9, 10–14.
- MinAmbiente. (2014). Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (Vol. 1).
http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/GUIA_DE_POMCAS.pdf
- Mogor, E., California, B., José, F., Thomas, T., & Hinojosa-corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(6), 69–81.
- Nieto, S. M. B., & Uscategui, C. A. P. (2015). *Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del instituto geográfico Agustín Codazzi*. (Vol. 53, Issue 9) [Universidad Catolima de Colombia].
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Observatorio de Derechos Humanos y Derecho Internacional. (2002). *Panorama actual del Tolima*.
- Olmos, P. S. (2010). *Sistemas de Información Geográfica (SIG). Técnicas básicas para estudios de biodiversidad* (Primera ed). Instituto Geológico y Minero de España.
- Ordoñez Juan, J. G. (2011). Balance Hídrico Superficial. *Global Water Partnership South America Sociedad Geográfica de Lima*, 44.
<https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp->

sam_files/publicaciones/varios/balace_hidrico.pdf

- Orozco, O. L. P., Escobar, Y. C., & Angel, M. Q. (2011). Study of monthly rainfall trends in the upper and middle Cauca river basin, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 78(169).
- Pérez, P., Cataldo, M., Zema, D., De Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). *Bosque*, 39(1), 119–129. <https://doi.org/10.4067/S0717>
- Pizarro-Tapia, R., Benítez-Girón, A., Farías-Daza, C., Jordán-Díaz, C., & Santibáñez-Quezada, F. (2005). Influencia de las masas boscosas en la producción de agua de una cuenca subhúmeda, Chile. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*, 20(3), 7–20.
- Prem, M., Saavedra, S., & Vargas, J. F. (2019). *End-of-conflict deforestation: evidence from colombia's peace agreement*. May, 1–37.
- Ramos, A., & Armenteras, D. (2019). Interceptación Y Escorrentía Del Bosque Altoandino En La Reserva Forestal Protectora “ El Malmo ” Interception and Runoff of High Andean Forest in the Protective Forest Reserve “ El Malmo .” *ACTA BIOLÓGICA COLOMBIANA*, January. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.67039>
- Ren, L., Yuan, F., Yong, B., Jiang, S., Yang, X., Gong, L., Ma, M., Liu, Y., & Shen, H. (2014). Where does blue water go in the semi-arid area of northern China under changing environments? *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 364(June), 88–93. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-88-2014>
- Restrepo, L., & Gonzáles, J. (2007). From Pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183–192. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902007000200010
- Reuter, F. (2002). Índice De Prácticos. *CARPETA DE TRABAJOS PRÁCTICOS*

Teledetección Forestal.

- Roa, A. O. R. (2015). *Implementación de un método para la espacialización de las salidas de un modelo climático global en zonas montañosas considerando el gradiente altitudinal*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Romero, H. G. (2019). *Deforestación en Colombia : Retos y perspectivas*.
- Rueda, F., Peñaranda, L. A., Velásquez, W. L., & Díaz, S. A. (2015). Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16, 25–40.
- Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (2015). Hidrología Aplicada Tema 4. Infiltración Y Humedad Del Suelo. *Hidrología Aplicada*, 24. https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/4575/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf
- Sabate, S. (2009). Los bosques y la evapotranspiración. *Agua y Cambio Climático*, 115–126.
- Sánchez, T. (2005). *Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección*. *March*, 25–27.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Serrano Muela, M. P., Nadal Romero, M. E., & Lana-Renault Monreal, N. (2014). La relación suelo-vegetación y su influencia en el comportamiento hidrológico de distintos ambientes vegetales. *Geoecología, Cambio Ambiental y Paisaje: Homenaje Al Profesor José María García Ruiz, 2014, ISBN 978-84-617-3212-8*,

Págs. 217-228, 217–228.

Serrano Vincenti, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja*, 16(2), 23. <https://doi.org/10.17163/lgr.n16.2012.03>

Shimon C. Anisfeld. (2010). *Water Resources* (2010th ed.). Island Press.

Silva León, G. (2005). La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. The Orinoco River basin: hydrographic view and its hydrological balance. *Revista Geográfica Venezolana*, 46(1), 75–108.

Ulloa Pino, J. F. (2014). Estimación de la evapotranspiración real mediante teledetección satelital y su relación con la composición florística y estructura de la vegetación en una cuenca árida de la región de Coquimbo [Universidad de Chile]. In *Universidad de Chile* (Issues 97–98). <https://doi.org/10.5354/anuc.v0i97-98.11040>

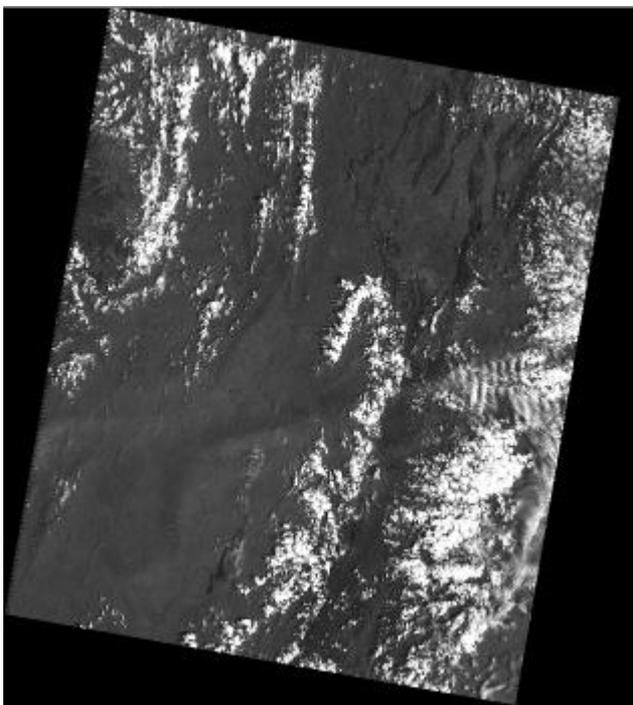
Valencia-Leguizamón, J., & Tobón, C. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas*, 26(2), 10–17. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.02>

Víctor Mauricio Aristizábal Murillo, Blanca Adriana Botero Hernández, J. J. V. U. (2002). *Manual de hidrología para obras viales basado en el uso de sistemas de información geográfica* (U. N. de Colombia (ed.); 1st ed.).

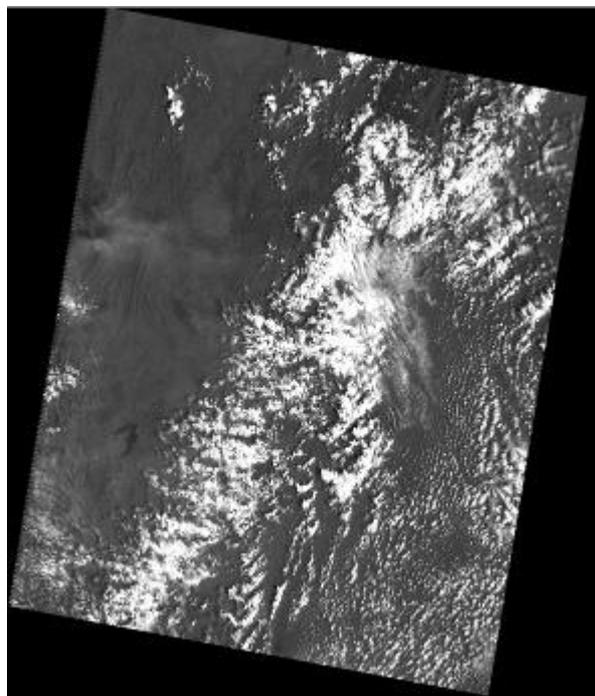
Villegas, J. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquia. *Revista EIA*, 1, 73–79. <https://doi.org/10.24050/reia.v1i1.125>

Wulf, K. (2013). *Cambios en los componentes del balance hídrico debido a intervenciones en la cobertura vegetal*. Universidad Austral de Chile.

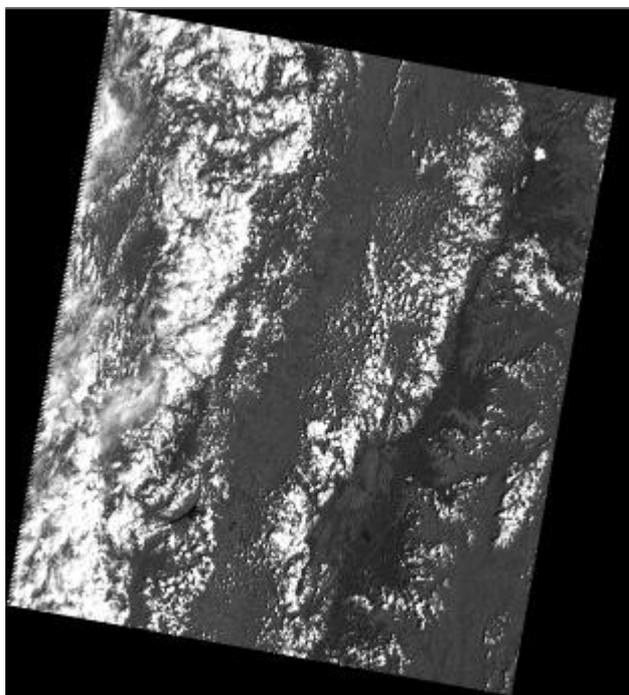
4 ANEXOS



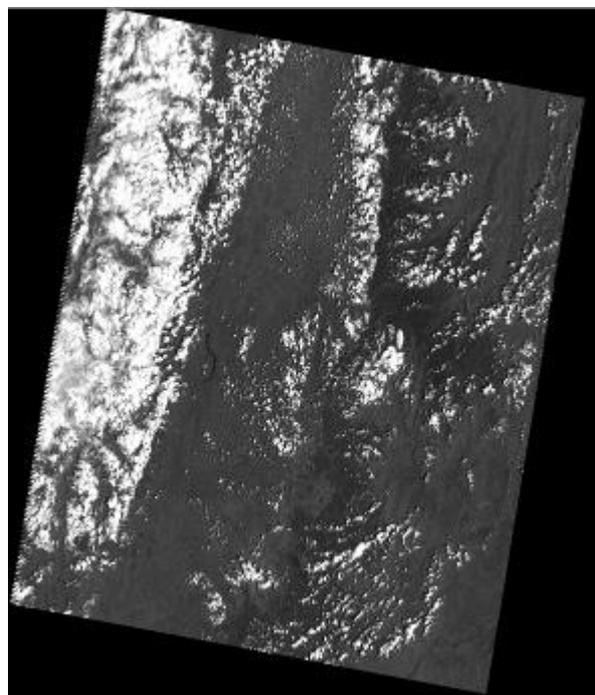
LT05_L1TP_008057_20020225_20170127_



LT04_L1TP_008058_19920605_20170122_

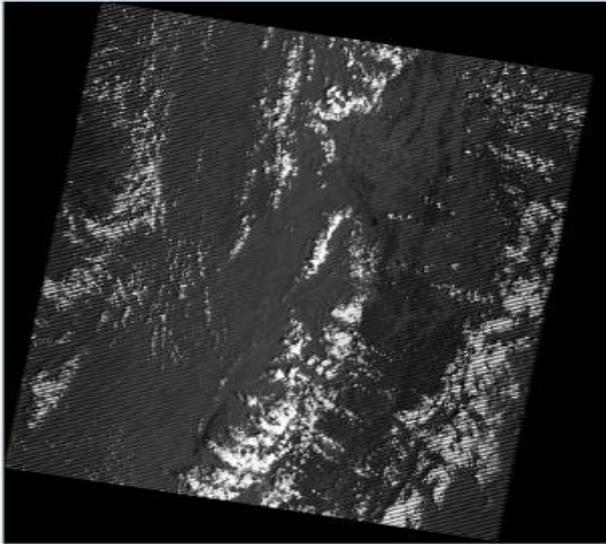


LT05_L1TP_009057_20021014_20170127_

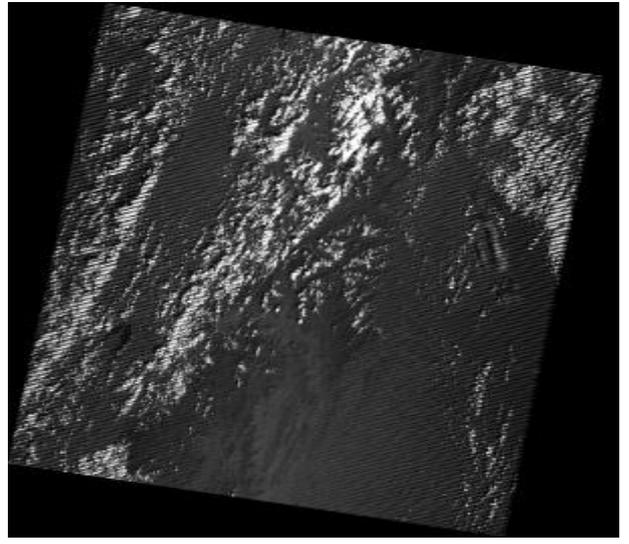


LT07_L1TP_009058_20021014_20170127_

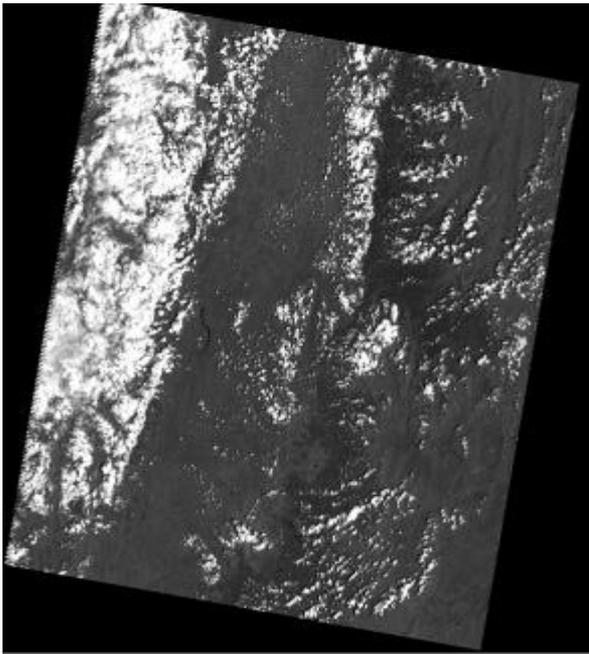
Anexo 1 Imágenes satelitales periodo 2001



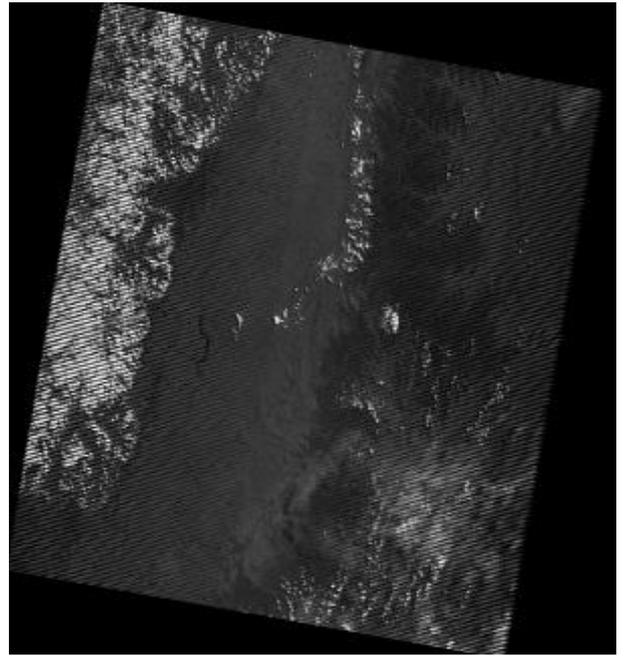
LE07_L1TP_008057_20120221_20161202_



LE07_L1TP_008058_20110101_20161210_



LE07_L1TP_009057_20120619_20161130_



LE07_L1TP_009058_20120806_20161129_

Anexo 2. Imágenes satelitales periodo 2011