



TRABAJO DE GRADO:

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS GENERADOS EN EL BALANCE HÍDRICO DEL PÁRAMO DE CRUZ VERDE POR DINÁMICAS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO

PRESENTADO POR:

CRISTIAN ENRIQUE CARPETA RAMÍREZ

CÓDIGO: 560514

JUAN SEBASTIÁN REYES LOPEZ

CÓDIGO: 560509

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C

2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

CONTENIDO

CONTENIDO	2
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. GENERALIDADES.....	8
2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	8
2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
2.2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	8
2.2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	12
2.2.3 VARIABLES DEL PROBLEMA	12
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCOS DE REFERENCIA.....	15
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	19
5. METODOLOGÍA.....	24
5.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	24
5.1.1 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	24
5.1.2 DETERMINACIÓN CAPACIDAD DE CAMPO	35
5.1.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDROCLIMÁTICOS	37
5.1.4 CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS, USOS DEL SUELO Y CN POR EL MÉTODO SCS (Soil Conservation Service).....	42
5.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS	51
5.3 POBLACIÓN Y MUESTRA	51
5.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	52
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	53
6.1 AÑO 1998.....	53
6.2 AÑO 2001.....	57
6.3 AÑO 2011.....	61
6.4 AÑO 2018.....	65
6.5 CAUDALES	69
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74

8. BIBLIOGRAFÍA 75

LISTA DE TABLAS

✓	Tabla 1 Referencias estado del arte. Fuente: Autores	22
✓	Tabla 2 Relación municipios y páramos. Fuente: Autores	25
✓	Tabla 3 Temperatura por municipio. Fuente: autores.	26
✓	Tabla 4 Precipitación por municipio, Fuente: autores.	27
✓	Tabla 5 Perfiles suelo complejo páramo Cruz Verde. Fuente: autores.	27
✓	Tabla 6 Valores capacidad de campo. Fuente: Autores	36
✓	Tabla 7 Datos precipitación complementados estación Torca. Fuente: Autores	38
✓	Tabla 8 Datos precipitación complementados estación Santa Teresa. Fuente: Autores	38
✓	Tabla 9 Datos precipitación complementados estación La casita. Fuente: Autores	39
✓	Tabla 10 Datos precipitación complementados estación Doña Juana. Fuente: Autores.	39
✓	Tabla 11 Datos precipitación complementados estación El bosque. Fuente: Autores	40
✓	Tabla 12 ETP método Turc año 1998. Fuente: Autores.	40
✓	Tabla 13 ETP método de Turc año 2001. Fuente: Autores.	41
✓	Tabla 14 ETP método de Turc año 2011. Fuente: Autores.	41
✓	Tabla 15 ETP método de Turc año 2018. Fuente: Autores.	41
✓	Tabla 16 Parámetros método Turc. Fuente: Autores	42
✓	Tabla 17 Grupos hidrológicos páramo. Fuente: Autores	42
✓	Tabla 18 Balance hídrico 1998 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores.....	53
✓	Tabla 19 Balance hídrico 1998 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores	53
✓	Tabla 20 Áreas balance año 1998 método SCS. Fuente: Autores	54
✓	Tabla 21 Balance hídrico 2001 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores	57
✓	Tabla 22 Balance hídrico 2001 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores	57
✓	Tabla 23 Áreas balance año 2001 método SCS. Fuente: Autores	¡Error! Marcador no definido.
✓	Tabla 24 Balance hídrico 2011 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores	61
✓	Tabla 25 Balance hídrico 2011 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores	61
✓	Tabla 26 Áreas balance año 2011 método SCS. Fuente: Autores	62
✓	Tabla 27 Balance hídrico 2018 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores	65
✓	Tabla 28 Balance hídrico 2018 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores	65
✓	Tabla 29 Áreas balance año 2018 método SCS. Fuente: Autores	66

○

LISTA DE ILUSTRACIONES

✓ Ilustración 1 Ubicación Páramo de Cruz Verde. Fuente: https://caminaeko.files.wordpress.com/2011/10/atlas_paramos_completo-982.jpg	15
✓ Ilustración 2 Valores de Rtt en función a la latitud y mes. Fuente: Pontificia Universidad Javeriana (Marin, 2010)	18
✓ Ilustración 3 Ejemplo organización bibliografía estado del arte. Fuente: https://elsancarlistau.com/2018/03/21/como-se-presenta-un-estado-del-arte	19
✓ Ilustración 4 División político-administrativa complejo páramo de Cruz Verde. Fuente: autores	24
✓ Ilustración 5 Temperatura por municipio. Fuente: autores.....	25
✓ Ilustración 6 Precipitación por municipios. Fuente: autores.....	26
✓ Ilustración 7 Perfiles de suelo complejo páramo Cruz Verde. Fuente: autores.	28
✓ Ilustración 8 Descripción perfil MEFg. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	29
✓ Ilustración 9 Descripción perfil MGFf. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	29
✓ Ilustración 10 Descripción perfil MGSg. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	30
✓ Ilustración 11 Descripción perfil MGTd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	31
✓ Ilustración 12 Descripción perfil MKCf. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	31
✓ Ilustración 13 Descripción perfil MLCd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	32
✓ Ilustración 14 Descripción perfil MLKd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	33
✓ Ilustración 15 Descripción perfil MLSd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	33
✓ Ilustración 16 Descripción perfil MLTd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	34
✓ Ilustración 17 Descripción perfil MLVf. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC	35
✓ Ilustración 18 Capacidad de campo páramo. Fuente: Autores.....	36
✓ Ilustración 19 Ubicación estaciones meteorológicas. Fuente: Autores	37
✓ Ilustración 20 Grupos hidrológicos páramo. Fuente: Autores.....	43
✓ Ilustración 21 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 1998. Fuente: Autores	44
✓ Ilustración 22 Cobertura y uso del suelo, ejemplo banda 5/4/3 año 1998. Fuente: Autores	45
✓ Ilustración 23 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2001. Fuente: Autores	46
✓ Ilustración 24 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2011. Fuente: Autores	47
✓ Ilustración 25 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2018. Fuente; Autores	48
✓ Ilustración 26 Ejemplo características. Fuente: Autores	49
✓ Ilustración 27 Ejemplo asignación tipo de suelo. Fuente: Autores	49
✓ Ilustración 28 Áreas obtenidas para el año 1998. Fuente: Autores.....	49
✓ Ilustración 29 CN ponderado y almacenamiento año 1998. Fuente: Autores	49
✓ Ilustración 30 Áreas obtenidas para el año 2001. Fuente: Autores.....	50
✓ Ilustración 31 CN ponderado y almacenamiento año 2001. Fuente: Autores.....	50
✓ Ilustración 32 Áreas obtenidas para el año 2011. Fuente: Autores.....	50
✓ Ilustración 33 CN ponderado y almacenamiento año 2011. Fuente: Autores.....	51
✓ Ilustración 34 Áreas obtenidas para el año 2018. Fuente: Autores.....	51
✓ Ilustración 35 CN ponderado y almacenamiento año 2018. Fuente: Autores.	51
✓ Ilustración 36 Balance hídrico año 1998 método SCS. Fuente: Autores	55
✓ Ilustración 37 Mapa balance hídrico año 1998. Fuente: Autores	56
✓ Ilustración 38 Balance hídrico año 2001 método SCS. Fuente: Autores	59
✓ Ilustración 39 Mapa balance hídrico año 2001. Fuente: Autores	60
✓ Ilustración 40 Balance hídrico año 2011 método SCS. Fuente: Autores	63
✓ Ilustración 41 Mapa balance hídrico año 2011. Fuente: Autores	64
✓ Ilustración 42 Balance hídrico año 2018 método SCS. Fuente: Autores	67
✓ Ilustración 43 Mapa balance hídrico año 2018. Fuente: Autores	68

✓ Ilustración 44 Comparación caudales medidos 1998.....	72
✓ Ilustración 45 Comparación caudales medidos 2001.....	72
✓ Ilustración 46 Comparación caudales medido 2011.....	73
✓ Ilustración 47 Comparación caudales medidos 2018.....	73

○

1. INTRODUCCIÓN

La demanda hídrica mundial ha aumentado considerablemente en los últimos años en función al crecimiento poblacional que atraviesa la humanidad, así mismo, el crecimiento y desarrollo económico y el cambio en los factores de consumo producto del mencionado crecimiento. Estos factores, influyen de manera directa en la necesidad de abastecimiento hídrico para las diversas actividades económicas, en su mayoría agrícolas, que, a la fecha, sigue siendo la actividad con más consumo de agua en el mundo (WWAP, 2018). Por otra parte, es importante resaltar que economías emergentes del mundo, como es el caso de Colombia, son las que más agua demandan para ejecutar sus actividades económicas y domésticas, y que este recurso proviene de diversas fuentes, una de ellas, los páramos, regiones de vital importancia socioeconómica por su alta capacidad hídrica debido a ciertas características climáticas especiales como los altos regímenes de precipitación, los suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica que permite el almacenamiento de agua, además de esto, su topografía formada por la acción de los glaciares, permite que este tipo de regiones presenten una hidrología superficial extraordinaria caracterizada por una excelente auto regulación y cuerpos de agua con buen flujo (Ortiz & Vásconez, 2006).

Colombia, posee un área total de 2'906.136 hectáreas en extensión de páramo, el cual corresponde al 1.4% de la superficie total de la nación, además de esto, es importante de resaltar que el país presenta el 50% del total de páramos existentes en el planeta, haciendo del país un lugar estratégico en cuanto a la cantidad de recurso hídrico disponible, esto último se evidencia en mayor medida dado que de los páramos nace el 85% de las principales estrellas fluviales que abastecen la demanda doméstica, agrícola e industrial, esta última vista en mayor medida para la generación de energía eléctrica, pero a pesar de la importancia estratégica de este tipo de ecosistema, en los últimos años el aumento de las actividades mineras sin control ha disminuido la capacidad de producción de este tipo de ecosistema, debido a la pérdida de cobertura por los métodos de extracción, pero además de esto, el aumento de la frontera agrícola y ganadera ha producido cambios en la cobertura vegetal propia, única y característica de estas áreas, impacto que también ha afectado de manera negativa la capacidad de regulación y producción hídrica de los páramos, como es el caso del páramo de Cruz Verde, un complejo ubicado al oriente de la capital del país, entre los municipios de Chiquaque, Ubaque, Choachí y una pequeña parte de la Calera.

En función de lo anteriormente descrito, se realizará la determinación y evaluación de los impactos generados al balance hídrico del páramo de Cruz Verde, teniendo en cuenta los cambios de cobertura, usos del suelo y los parámetros meteorológicos propios de la región en diferentes periodos de tiempo y de esta manera poder establecer como a través de los años estas dinámicas han cambiado la capacidad del páramo; importante ecosistema clave para la región oriental de la capital del país y de los municipios que hacen parte de su jurisdicción.

2. GENERALIDADES

2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

✚ Gestión y Tecnología para la sustentabilidad de las comunidades

El tipo de investigación corresponde al método analítico, ya que se hace necesario realizar un análisis del impacto generado en el balance hídrico del páramo Cruz Verde por las variables de cambio de cobertura y usos del suelo, teniendo en cuenta las características que componen este fenómeno y permita analizar más fácilmente las partes integradoras del evento, así mismo establecer relaciones existentes entre cada una de las propiedades a ser estudiadas.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El páramo Cruz Verde hace parte del sistema de paramos Cruz verde – Sumapaz, y se localiza al oriente de la ciudad de Bogotá D.C. ocupando parte de su jurisdicción y secciones de los municipios de: Chipaque, Ubaque, Choachí y La Calera, estos municipios presentan un constante crecimiento demográfico y urbano por lo que se generan cambios en el uso del suelo y sus características intrínsecas en zonas cercanas al páramo, ya que al existir abundantes recursos hídricos y terrenos regulares se incrementa la siembra y la construcción, esto con las obras que conllevan a un desarrollo urbano tales como vías, servicios públicos y demás. Así mismo se ha presentado un interés minero en cercanías al páramo lo que lleva a poner más presión a las zonas de transición en donde se presenta movimiento de aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas, lo que hace que la interacción con proyectos de desarrollo urbano y minero sea inevitable. Por lo anterior al desarrollarse esta interacción se pueden presentar cambios en los cursos de agua, erosión, siembra de cultivos con altas necesidades hídricas, contaminación atmosférica y de afluentes y ausencia de adecuados sistemas de acueducto en fincas que posibilitan el desperdicio del recurso hídrico. La erosión y los cambios en las especies nativas por cultivos pueden ir transformando las condiciones del balance hídrico ya sea por disminuciones o aumentos drásticos de la infiltración y potenciales de evapotranspiración que a largo plazo pueden generar variaciones en caudales de quebradas y ríos. La contaminación atmosférica asociada a gases generados por el uso de combustibles e industria originados en las urbes también influye mediante el calentamiento global y cambio climático, por lo tanto, la alteración en los regímenes de lluvia y temperatura puede crear diferentes afectaciones en la capacidad hídrica del páramo e inundaciones en cascos urbanos. Los cambios progresivos antes mencionados sostenidos a largo plazo deben ser analizados ya que permitiría tomar las decisiones adecuadas en cuanto a la creación de estrategias articuladas con las entidades estatales y distritales correspondientes para la preservación de los recursos generados en el páramo Cruz Verde que son de vital importancia para las comunidades cercanas, la fauna y la flora.

2.2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

✚ **Nombre del trabajo:** Estimación De La Oferta Hídrica Con Información Escasa En Ecosistemas Estratégicos

Fuente: Revista Facultad Nacional de Agronomía - Universidad Nacional de Colombia

Autor(es): Otaña Burbano, Leodán Andrés; Vásquez Velásquez, Guillermo León; Bustamante Carmona, Guillermo de Jesús.

Fecha: junio de 2008

Área de estudio: Sistema de Páramos y Bosques Alto andinos del Noroccidente Medio Antioqueño

Objetivos de la investigación:

- ✓ Estimar la oferta ambiental del recurso hídrico que se origina en dicho sistema.
- ✓ Estimar el caudal medio mensual y anual que se origina en el sistema.
- ✓ Estimar el caudal mínimo anual para diferentes periodos de retorno

Síntesis de la situación problemática planteada:

Se plantea en el trabajo un análisis con información básica tomada de bases de datos climatológicas para las zonas de paramo, para el cual se hace énfasis en su uso con poca cantidad de información ya que se acude a un análisis adicional del entorno y la clasificación del páramo. La falta de información se destaca como una de las falencias para estudios detallados de este tipo dentro del planteamiento del problema en el proyecto.

Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo

- Descriptivo y Analítico

Resultados y conclusiones más importantes:

Mediante el uso del método para contabilidad de aguas de Holdridge y cálculo del balance hídrico por el método de Thornwaite e identificando datos climatológicos del IDEAM y características del entorno, se realizó la determinación de la precipitación media anual en el páramo de estudio y de los valores de caudal mínimo y medio mensual.

- ✚ **Nombre del trabajo:** Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz – Colombia.

Fuente: Revista Facultad Nacional de Agronomía - Universidad Nacional de Colombia

Autor(es): Martha Constanza Daza Torres, Fanny Hernández Flórez y Flor Alba Triana

Fecha: septiembre de 2013

Área de estudio: Parque Natural Nacional del Sumapaz (Cundinamarca-Colombia)

Objetivos de la investigación:

- ✓ Selección de un tipo de suelo representativo de una misma unidad cartográfica de suelos bajo diferentes usos (cultivos de papa, ganadería, suelo en descanso con vegetación de barbecho y suelos con vegetación nativa, como tratamiento testigo) y evaluación de propiedades del suelo como retención de humedad, densidad aparente, porosidad total, distribución de la porosidad y contenido de carbono orgánico

- ✓ Cálculo de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo y densidad aparente de los suelos con diferente uso al ser comparados con el suelo del tratamiento testigo.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos.

Síntesis de la situación problemática planteada:

En el páramo de Sumapaz se identificó que “las principales amenazas identificadas son las siguientes: quemas indiscriminadas, sistemas de producción papa-pastos no apropiados para el ecosistema, ganadería extensiva, pérdida de endemismos, sedimentación y eutrofización de las lagunas, pérdida del potencial de regeneración natural, minería en pequeña escala y sin control, plantaciones forestales con especies exóticas, turismo sin control, infraestructura vial sin planeación, pérdida de biodiversidad, no valoración de la biodiversidad, pérdida de la regulación hídrica, no valoración de los recursos hidrológicos en el páramo, presencia institucional reducida y poco apropiada, concentración de población humana en cercanías al ecosistema, y migración de población humana” (Podwojewski y Poulenard, 2000), por lo anterior se “señala la relación que existe entre el avance de la frontera agrícola y la reducción de la cantidad de agua; así, al reemplazar muchas áreas de páramo por cultivos, se reduce su capacidad de regular el flujo hídrico.” Martínez (2004)

Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo

- Exploratorio y Analítico

Resultados y conclusiones más importantes:

Mediante este estudio se determinó que existe una afectación en la capacidad de almacenamiento del suelo posterior a procesos de cultivo de papa y pastizales diferentes al del páramo lo que puede afectar la flora y fauna cercana.

- ✚ **Nombre del trabajo:** caracterización socioeconómica y cultural del complejo de páramos cruz verde-Sumapaz en jurisdicción de la CAM, CAR, CORMACARENA, SDA y CORPORINOQUIA.

Fuente: Instituto Von Humboldt

Autor(es): Instituto Humboldt – Fundación Universidad Externado de Colombia

Fecha: abril de 2015

Área de estudio: Complejo de Páramos Cruz Verde-Sumapaz

Objetivos de la investigación:

- ✓ Aproximación al entorno local a través de la revisión de información secundaria
- ✓ Selección y caracterización de los municipios y actores claves
- ✓ Selección y caracterización de entornos locales veredales

- ✓ Sistematización y análisis

- ✓ Construcción de recomendaciones

Síntesis de la situación problemática planteada:

En este trabajo se realizó un análisis de las variables culturales y socioeconómicas y como estas influyen en el uso del suelo y su afectación en las áreas de paramo ya que cambia las dinámicas hídricas y ecológicas del mismo.

Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo

- Descriptivo y exploratorio

Resultados y conclusiones más importantes:

Como conclusión más importante se resalta el cambio en el enfoque de la relación de las comunidades y el páramo que deben brindar las instituciones encargadas en la protección de la oferta hídrica en el páramo, para que con un correcto acompañamiento por parte de los funcionarios concedores de la importancia de la conservación del páramo y sus bondades, se pueda generar un desarrollo sostenible en las comunidades cercanas.

- ✚ **Nombre del trabajo:** Análisis Del Cambio De La Cobertura Entre 1999 Y 2015 Del Páramo De Chiles - Cumbal A Través De La Utilización De Herramientas Sig.

Fuente: Revista Facultad Nacional de Agronomía - Universidad Nacional de Colombia

Autor(es): Bedoya Álvarez, Mary Luz; Portillo Moreno, Javier Flavio; Sáenz Cortes, Hans Rene.

Fecha: febrero de 2016

Área de estudio: El complejo de páramos Chiles – Cumbal delimitado por el Instituto Alexander Von Humbold en el 2012, se encuentra conformado por seis (6) áreas distribuidas en 11 municipios del departamento de Nariño, con una superficie total de 63.223 hectáreas.

Objetivos de la investigación:

- ✓ Determinar el cambio de la cobertura del páramo de Chiles - Cumbal entre los años 1999-2015 a través de imágenes satelitales.
- ✓ Identificar y clasificar las coberturas con base en la metodología Corine Land Cover del páramo de Chiles - Cumbal para los años 1999 y 2015.
- ✓ Cuantificar la cobertura del área de estudio para cada imagen usando el método de clasificación supervisada por máxima probabilidad.

Síntesis de la situación problemática planteada:

Según el texto analizado los ecosistemas de paramo presentan gran afectación por factores antrópicos y de cambio climático acentuados por la deforestación, la tala, quema y ampliación de la frontera agrícola, por lo que presentan el monitoreo mediante imágenes SIG como una opción para hacer el respectivo control del incremento de la frontera agrícola.

Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo

- Descriptivo, comparativo y Analítico

Resultados y conclusiones más importantes:

El estudio presenta resultados en el análisis de las imágenes obtenidas por satélites, las cuales presentan una reducción en los ecosistemas de paramo por aumento de la frontera agrícola, y hace énfasis en que la recuperación realizada por las instituciones encargadas de la conservación del ecosistema paramuno no es suficiente ya que es mayor la deforestación presentada en las imágenes satelitales que la recuperación realizada. Así mismo se especifica que el cambio de vegetación nativa de paramo por pastos comunes para pastoreo también es alta.

2.2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el impacto en la oferta hídrica del páramo Cruz Verde por dinámicas de cambio de cobertura y usos del suelo?

2.2.3 VARIABLES DEL PROBLEMA

Variables dependientes

- ✓ Oferta hídrica (cuantitativa): corresponde a la escorrentía superficial excedente, posterior descuento de la infiltración y la evapotranspiración que llega a los cauces de agua cercanos por escurrimiento.
- ✓ Almacenamiento (cuantitativa): cantidad de humedad existente en el suelo que varía de acuerdo a las características edafológicas.
- ✓ Evapotranspiración (cuantitativa): cantidad de agua que se evapora directamente de la superficie y por la transpiración de las plantas.

Variables independientes

- ✓ Cambio en la cobertura vegetal (cuantitativa): variaciones en el tipo de vegetación nativa existentes en un área determinada.
- ✓ Cambio en el uso del suelo (cuantitativa): variación en el uso de suelo por actividades y dinámicas antrópicas.

Variables intervinientes

- ✓ Calentamiento global y cambio climático: variaciones anormales en las temperaturas y los regímenes climáticos ocasionados por el exceso en la producción de gases de efecto invernadero.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Los páramos, son ecosistemas estratégicos debido a su capacidad de almacenamiento, producción y regulación hídrica, además de esto, presentan gran diversidad biológica y son hábitats estratégicos para la preservación del medio ambiente. El páramo de Cruz Verde se encuentra ubicado en la parte oriental de la capital del país, su jurisdicción comprende los municipios de Chochí, Ubaque, Chiriquí y un fragmento de la Calera, tiene una altura sobre el nivel del mar entre los 3.300 y los 3.700 metros, hace parte del complejo de páramo de Sumapaz, el cual es el complejo de páramo más grande del mundo.

La zona anteriormente descrita, tiene una extensión territorial de 333.420 hectáreas, de las cuales 142.112 se encuentran protegidas por el estado bajo la figura de Parque Nacional Natural Sumapaz, su importancia radica en que regula hídricamente la parte alta de las cuencas de los ríos Tunjuelo, Sumapaz, Blanco, Ariari, Guape, Duda y Cabrera. Pero, a pesar de ser una zona protegida por el estado, a partir del año 2015, el complejo de páramos ha sido intervenido en repetidas veces por proyectos de exploración y explotación minera, como lo publicó *El Espectador* en el año 2015, la empresa Cosargo SAS, está en busca de arenisca, material utilizado para la construcción. En años anteriores, un fallo del Tribunal Superior de Bogotá prohibió a los pobladores cercanos al páramo realizar actividades económicas tales como la ganadería, agricultura y minería. A pesar de ello, la Agencia Nacional de Minería otorgó el título y el permiso de exploración minera a la empresa Cosargo SAS en el páramo de Cruz Verde (Romero, 2015).

Según reportes realizados a *El Espectador*, la empresa estuvo realizando exploración en tres puntos del páramo de Cruz Verde, además de esto, realizó extracción de agua del parque ecológico Matarredonda, que se encuentra también dentro la zona protegida del páramo (Romero, 2015).

La extracción de arenisca y otros productos de la minería implica la remoción en primera instancia de la cobertura vegetal, por ende, se da un cambio en la cobertura característica de este tipo de ecosistema, lo cual influye directamente en la capacidad de producción y regulación hídrica, además de esto, para la extracción y procesamiento de los minerales se utilizan cantidades grandes de agua, afectando directamente el ciclo del agua propio del páramo y su capacidad hídrica.

Al ser un ecosistema estratégico para el abastecimiento hídrico de los municipios anteriormente mencionados, es importante evaluar como el cambio en la cobertura puede afectar la disponibilidad y capacidad hídrica del páramo de Cruz Verde, no exclusivamente por actividades mineras, también por otro tipo de actividades económicas que implican un cambio en el uso del suelo, por otra parte, la dinámica de las variables climáticas que ha cambiado a través de los años, afecta directamente en el balance hídrico de la zona, la entrada y salida de agua en diversas formas, y en conjunto con los cambios en el uso del suelo, son las variables a evaluar con el fin de establecer las problemáticas asociadas al objeto de este trabajo: Evaluar y determinar los impactos al balance hídrico en el páramo de Cruz Verde.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar y evaluar los impactos generados en el almacenamiento y escurrimiento del balance hídrico de la unidad en estudio Páramo de Cruz Verde por variaciones en la cobertura vegetal y uso del suelo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Evaluar y describir el impacto en el balance hídrico generado por los cambios multitemporales de los parámetros climáticos y meteorológicos propias de la zona de estudio.
- ✓ Determinar los impactos generados por el cambio de cobertura y usos del suelo en el balance hídrico de la unidad en estudio.
- ✓ Establecer el porcentaje de cambio a nivel multitemporal

4. MARCOS DE REFERENCIA

El complejo de páramo Cruz Verde - Sumapaz, está ubicado sobre la cordillera oriental de Colombia, ocupando los departamentos de Cundinamarca, Meta, Huila y una parte del distrito capital. Este complejo cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 333.420 hectáreas, de las cuales el 43% hace parte del área protegida conocida como el Parque Nacional Natural (Por sus siglas PNN) de Sumapaz, establecido en el año 1977. El 14 de julio de 2017, la resolución 1434/2017 del Ministerio de Ambiente, delimitó el área de páramos Cruz Verde – Sumapaz y la adjuntó a la base de datos de del Instituto de Investigación Alexander Von Humboldt y a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR); dentro de la resolución se estableció la importancia de este páramo debido a su diversidad biológica y los servicios ecosistémicos que este presta (Puello & Männich, 2018).

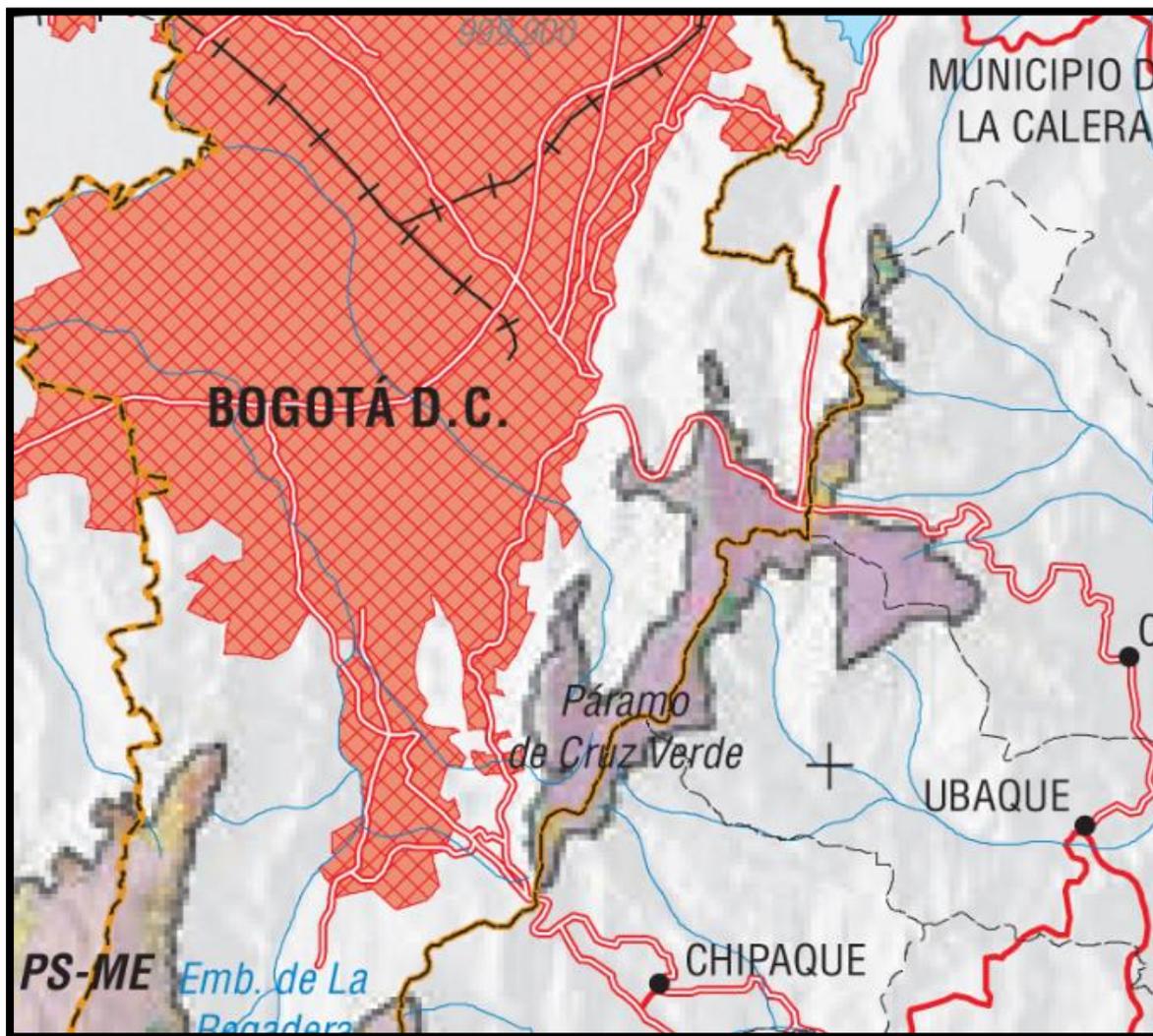


Ilustración 1 Ubicación Páramo de Cruz Verde. Fuente:
https://caminaeko.files.wordpress.com/2011/10/atlas_paramos_completo-982.jpg

Son alrededor de 15 municipios los que conforman este complejo de páramos perteneciente al departamento de Cundinamarca: Pasca, Arbeláez, San Bernardo, Cabrera, Chipaque, Choachí, Fosca, Fusagasugá, Guayabetal, La Calera, Sibaté, Soacha, Ubaque, Une, Venecia y Gutiérrez. Siendo los municipios de Choachí, La Calera, Chipaque, Ubaque y una parte de Bogotá los que hacen parte de la región de estudio, el páramo de Cruz Verde. Este páramo se encuentra entre los 3.300 y los 3.700 metros sobre el nivel del mar. De este ecosistema estratégico para el oriente de la capital, nacen importantes ríos como el Fucha, clave para la sabana de Bogotá.

El clima del complejo de páramos va de cálido a frío, esto va en función de la altura, además de que la zona presente una alta densidad de nubosidad con precipitaciones que oscilan entre los 680 mm y los 3.062 mm total multianual y con temperaturas que fluctúan entre los 0° C y los 20° C con un promedio de 6.5° C. Dentro del territorio se presenta régimen bimodal, con dos periodos marcados por un alza en el promedio de precipitación, los cuales van comprendidos entre los meses de marzo a mayo y de octubre a noviembre, los demás meses presentan periodos relativamente secos. Los suelos presentes en el páramo son de carácter nuevo y poco desarrollado (entisoles), por otra parte, se presentan suelos inceptisoles, que presentan alta humedad, pero poca fertilidad, y finalmente suelos andosoles, cuya alta cantidad de materia orgánica y composición permite un gran almacenamiento de agua, aspecto clave para el tipo de cobertura vegetal propia del ecosistema y además, para la regulación del ciclo hidrológico (Puello & Männich, 2018).

En cuanto a normatividad, el complejo de páramo Cruz Verde-Sumapaz hace parte de un conjunto de normas y directrices cuya función principal es la de proteger este ecosistema estratégico, las dos primeras normas, fueron propuestas por la UNESCO, cuyo propósito es el de proteger al páramo en cuanto a las actividades de extracción de madera y de agua, de manera que estas actividades se hagan de manera sostenible (Puello & Männich, 2018).

Con la ley 99 de 193, se dio creación al Ministerio de Ambiente, con el objetivo de gestionar el medio ambiente y los recursos naturales. Los páramos, al ser ecosistemas estratégicos, fueron inscritos y acogidos con esta ley, lo cual estableció a estos territorios como entes de planificación, debido a la cantidad de recursos renovables y servicios ecosistémicos que estos prestan. Actualmente, en el año 2018, se expidió la ley 1930, por medio de la cual se dictan las disposiciones generales para la gestión integral de páramos en Colombia. El objeto de la ley es el de establecer a los páramos como ecosistemas estratégicos los páramos, así como fijar directrices que propendan por su integralidad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento.

Los páramos, gracias a sus características anteriormente descritas, son ecosistemas estratégicos, su importancia radica en la oferta hídrica que estos brindan a las comunidades.

La oferta hídrica permite saber si la cantidad de agua disponible en la superficie terrestre es suficiente para satisfacer las necesidades de la fauna, la flora, el consumo, y las actividades económicas y sociales generadas por las comunidades circundantes para su subsistencia, así mismo la escorrentía superficial útil (descontada ET y ΔS) permite la recarga de cuerpos de agua, tales como ríos, lagunas y reservorios naturales o artificiales, los ríos permiten llevar esta oferta mediante gravedad a comunidades más lejanas. Esta oferta hídrica así mismo depende de distintas variables que hacen parte del balance hídrico tales como la precipitación (P), evapotranspiración (ET), precipitación útil (P-ETP), almacenamiento en la masa de suelo (ΔS), percolación, déficit o excedente.

El balance hídrico se expresa en su forma básica como:

$$P + Q \text{ entrada} = ET + \Delta S + Q \text{ salida} \quad (1)$$

Donde la precipitación se obtiene mediante los registros de estaciones existentes en la zona de estudio, Q entrada corresponde al flujo de agua existente en la zona de estudio, que es igual a la evapotranspiración más el cambio en el almacenamiento del suelo y sus salidas.

Estas variables se estiman de acuerdo al rango de tiempo que se deba analizar y sus condiciones iniciales, en el caso de la ET se resalta el método de Turc (Turc, 1961) para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), el cual permite unos valores

más confiables del altiplano Cundiboyacense (IDEAM, 2017). Por otra parte, para el caso de la escorrentía superficial, la lectura de los niveles de los ríos permite dar una idea de la variación en escorrentía que se produce en las cuencas hidrográficas.

Las condiciones edafológicas y geotécnicas confieren las propiedades al terreno para la retención de agua y su almacenamiento, este varía de acuerdo a las características antecedentes y tienen un máximo de almacenamiento el cual se define como la capacidad de campo (CC), así mismo un porcentaje del agua que inicialmente se retuvo en el suelo puede pasar al plano subterráneo por percolación en estratos sólidos más porosos y en el cual su flujo es más restringido que el del flujo subsuperficial.

Las herramientas SIG permiten la identificación de los usos del suelo y la vegetación dentro del ecosistema o entorno analizado, en nuestro caso el de paramo, esto mediante algoritmos y análisis de colores de imágenes captadas satelitalmente, posterior a esto la creación de capas temáticas facilita la visualización de cambios progresivos en un periodo de estudio. El análisis de áreas y del uso del suelo mediante estas imágenes satelitales permite realizar correlaciones de las variables que componen el balance hídrico para intuir más fácilmente de los impactos que se generan por la dinámica antrópica.

El principal detonante del ciclo del agua es el sol el cual permite la dinámica del agua generando su estado gaseoso y líquido, en el estado gaseoso se da la evaporación que genera el movimiento de corrientes ascendentes hacia las capas superiores de la atmosfera, que a su vez llega a grandes altitudes y se condensa generando cúmulos de nubes y transportándose por el viento a distintas latitudes de la tierra, esta condensación y los aumentos de temperatura detonan la precipitación, la mayor parte del agua precipitada cae en los océanos dada su superioridad en superficie respecto al área continental.

En los grandes relieves la precipitación mediante gravedad genera la escorrentía superficial la cual llega a los afluentes como quebradas y ríos, esto genera una relación lluvia-escorrentía que varía en función a las características de cobertura y el suelo. En el caso de la infiltración el suelo alcanza a almacenar gran parte de la precipitación y otra es directamente almacenada en mantos rocosos porosos y más profundos. Las plantas logran tomar la humedad a poca profundidad adquirida por el suelo mediante sus raíces las cuales con el proceso de transpiración y la evaporación circundante en el suelo vuelven a generar una tributación en la atmosfera de agua en estado gaseoso para que el ciclo se repita.

Algunos programas de modelación hidrológica permiten incluir la precipitación, el área, condiciones edafológicas y geomorfología de la cuenca para realizar análisis de caudales esperados ayudando a dar una idea de las variaciones que se puedan dar multitemporalmente dentro de las diferentes cuencas adyacentes al paramo y así concluir como se ha dado la interacción de los cambios en la cobertura y los usos del suelo que las comunidades le han dado a algunos sectores del páramo cruz verde para que los parámetros hidrológicos cambien.

Método de Turc (Turc, 1961)

Esta metodología permite calcular la evapotranspiración potencial en mm para cada mes en función de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa.

$$ETP_i = C_i * K_i \left(\frac{T_i}{T_i + 15} \right) (R_i + 50) \quad (2)$$

C_i es un factor de corrección para zonas áridas, que depende de la humedad relativa del mes. Si la humedad relativa es mayor a 50%, el valor de C_i es igual a 1. En el caso contrario:

$$C_i = \left(\frac{1 + 50 - HRI}{70} \right) \quad (3)$$

Donde HRI es la humedad relativa media mensual en porcentaje. K_i es un factor de corrección mensual y sus valores son: 0.40 para meses de 30 y 31 días, 0.37 para febrero y 0.13 para periodos de 10 días. T_i es la temperatura media mensual del aire expresada en °C y R_i es la radiación global incidente o radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra, expresada en cal/cm²día. La radiación solar extraterrestre corresponde a R_{tt} y la insolación (n/N) que a su vez depende del brillo solar (n) y la duración del día (N). (Marin, 2010)

$$R_i = R_{tt} * \left(0.18 + 0.62 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0	885	915	925	900	850	820	830	870	905	910	890	875
10	780	840	900	925	915	900	905	915	905	865	800	760
20	660	750	850	920	960	965	960	935	875	785	685	630
30	520	630	775	895	975	1000	990	925	820	685	560	490
40	380	505	675	845	965	1020	985	895	740	565	415	335
50	225	360	555	750	930	1010	970	830	640	435	265	190
60	90	215	425	670	890	1000	945	770	510	285	120	60
70	0	70	275	565	855	1025	945	685	385	145	15	0
80	0	0	125	480	890	1075	995	660	255	25	0	0
90	0	0	40	470	900	1085	1010	670	170	0	0	0

Ilustración 2 Valores de R_{tt} en función a la latitud y mes. Fuente: Pontificia Universidad Javeriana (Marín, 2010)

Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos con representaciones simplificadas de un sistema real denominado “prototipo”, estos se hacen bajo forma física o matemática. De forma física, se representa generalmente una “cuenca hidrográfica” y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta forma, el modelo matemático permite tomar decisiones sobre hidrología, puesto que estos modelos muestran las entradas y salidas propias del balance hídrico, de esta manera se mide la representatividad de los modelos.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. El empleo de estos modelos se realiza para el análisis de y prevención de desastres, lo que permite la ordenación del territorio y el diseño de obras civiles para mitigar los impactos generados por eventos inesperados cuyo periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia pueden significar peligro.

Uno de los modelos ampliamente utilizado se realiza mediante el software HEC HMS, desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos. Los modelos que permite diseñar este programa corresponden a transformación lluvia-escorrentía. El modelo por HEC HMS requiere de tres componentes para su funcionamiento: Modelo de Cuenca, Modelo Meteorológico y Control de Especificaciones (Hämmerly, y otros, 2006).

4.1 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte es una revisión detallada de la bibliografía referente al tema de estudio que se está trabajando, en mayor detalle, revisión de autores que han tratado el tema del páramo de Cruz Verde, los impactos generados al mismo, los servicios ecosistémicos que estos ofrecen y entre otras características, con el fin de delimitar un área de estudio, definir una temporalidad de trabajo e identificar si las problemáticas tratadas por los diversos autores se siguen presentando y cómo los productos obtenidos resultado de sus labores, pueden aportar a este trabajo de investigación.

A continuación, se enlistarán y describirán los trabajos de los diferentes autores que trataron el tema del páramo de Cruz Verde, para facilitar la lectura de esta bibliografía, se tratarán los documentos en una tabla como se muestra en la siguiente ilustración:

Cant.	Título	Autor/es	Referencia	Formato	Resumen	Aporte teórico metodológico
1	"El estado del arte en la investigación en las ciencias sociales"	(Jiménez, A. 2004)	Jiménez, A. (2004). Las prácticas investigativas en las ciencias sociales. Bogotá: UPN Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de: http://biblioteca.clacso.edu.ar/Colombia/dcs-upn/20121130050742/estado.pdf	Capítulo de libro PDF	El texto desarrolla "una discusión en tres sentidos: en primer lugar, el estado del arte visto como una propuesta de apropiación del conocimiento; en segundo lugar, se discute el estado del arte como una propuesta de investigación de la investigación, y en tercer lugar, como punto de partida para establecer un nuevo recorrido que, como producto de lo dado, busca dar respuestas novedosas e inéditas que desde el presente generen posibilidades de un futuro amplio en el escenario investigativo..." (Jimenez, A. 2004:2)	Discusión teórica sobre el estado del arte. Estudio analítico con un aporte hermenéutico...

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3 Ejemplo organización bibliografía estado del arte. Fuente: <https://elsancarlistau.com/2018/03/21/como-se-presenta-un-estado-del-arte>

N°	Título	Autores	Referencia	Formato	Resumen	Aporte teórico
1	<i>The implications of Fire Management in the Andean Paramo: A Preliminary Assessment Using Satellite Remote Sensing</i>	Pasquale Borrelli, Dolores Armenteras, Panos Panagos, Sirio Modugno, Brigitta Schütt	Borrelli, P. (2015) <i>The implications of Fire Management in the Andean Paramo: A Preliminary Assessment Using Satellite Remote Sensing</i> , Open Access, remote sensing.	PDF	Los picos altos de los Andes del norte están caracterizados por unos ecosistemas neotropicales de gran altitud conocidos como páramos. Estos ecosistemas son reconocidos por la comunidad científica por su gran biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos brindan para la población humana local. Debido a su lejanía, su difícil acceso y sus	Uso de herramientas SIG para establecer áreas de páramos susceptibles a la formación de incendios forestales, y de esta manera proceder a establecer planes para prever, combatir y prevenir la formación de



					suelos altamente cargados de agua, los páramos son ecosistemas con alta probabilidad de sufrir incendios.	dichos incendios en los páramos de los Andes como el páramo de Cruz Verde-Sumapaz.
2	<i>Modelo para la estimación de la oferta hídrica que incorpora el agua subterránea en microcuencas sin información hidrológica</i>	Brenda T. Ochoa, Leidy J. Agudelo, Julián Lasso, Diego Paredes Cuervo	Ochoa, Brenda T. (2016) <i>Modelo para la estimación de la oferta hídrica que incorpora el agua subterránea en microcuencas sin información hidrológica</i>	PDF	El agua superficial y subterránea interactúan dentro del ciclo hidrológico según las características, tanto geomorfológicas como climáticas que configuran el paisaje, por lo tanto, los impactos que se generen en cualquiera de estos componentes afectan de manera inevitable la cantidad y la calidad del recurso.	Proponer un modelo basado en la ecuación fundamental del balance hídrico, utilizando como datos de entrada datos hidroclimáticos e hidrogeológicos.
3	<i>Metodología de balance hídrico y sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinú</i>	Paula Lizet Correa V., Jaime Ignacio Vélez U., Ricardo Agustín Smith Q., Andrés Julián Vélez, Adriana Elizabeth Barrientos, Jesús David Gómez.	Correa V. Paula Lizet (2006), <i>Metodología de balance hídrico y sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinú</i> , Universidad Nacional de Colombia, Medellín	PDF	Presentación de un modelo de balance hídrico en conjunto de un balance para sedimentos para la gestión integral de humedales en el complejo lagunar Bajo Sinú, cuya problemática actual es la alteración de la dinámica hídrica debido a la ganadería, la agricultura, el urbanismo y la construcción de vías.	Aplicación del modelo de balance hídrico teniendo en cuenta tres escenarios importantes para la evaluación de los impactos en la dinámica hídrica del complejo lagunar: Escenario sin intervención antrópica (Condiciones naturales), escenarios con intervención antrópica, y un último escenario con la puesta en marcha de una central hidroeléctrica.
4	<i>Caracterización socioeconómica y cultural del complejo de páramos Cruz Verde-Sumapaz en jurisdicción de la CAM, CAR,</i>	<i>Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt y la</i>	<i>Contrato de prestación No. 14-13-014-090CE Instituto Humboldt – Fundación Universidad</i>	PDF	<i>Caracterización territorial de todas las actividades económicas que se llevan a cabo en toda la extensión del complejo de Páramos Cruz Verde-Sumapaz,</i>	<i>Pone en contexto las características del páramo, lo que permite identificar la población</i>



	CORMACARENA, SDA y CORPORINOQUIA	Fundación Universidad Externado de Colombia.	Externado de Colombia		además de la descripción demográfica y particularidades generales del complejo en función de diferentes enfoques (paisajes, agua, historia, conflictos)	objetivo de la investigación en función con todas sus dinámicas, condiciones del territorio en diversos ejes (ambiental, económicos, social).
5	Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos	Leodán Andrés Otaya Burbano, Guillermo León Vásquez Velásquez, Guillermo de Jesús Bustamante Carmona.	Otaya B. Leodán A., Vásquez V. Guillermo L., Bustamante C. Guillermo J. (2008) Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín	PDF	Estudio realizado en el sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio Antioqueño, cuyo objetivo principal fue el de calcular la oferta ambiental de recurso hídrico que nace del ecosistema estratégico anteriormente mencionado, mediante la estimación de caudales medios mensuales y anuales y también caudales mínimos para diferentes periodos de retorno.	Utilización del procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge en conjunto con el método de regionalización de características medias para regiones estratégicas que no presentan gran cantidad de información.
6	Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from worldclim and chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Uraba Region-Colombia	Breiner Bastidas Osejo, Teresita Betancur Vargas, John Alejandro Martínez.	Osejo B. Breiner, Vargas B. Teresita, Martínez A, Jhon (2019) Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from worldclim and chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Uraba Region-Colombia, Universidad de Antioquia, Medellín	PDF	Evaluar la resolución de la información climática obtenida a través de imágenes satelitales provenientes de dos bases de datos globales llamadas Worldclim V 2.0 y Chelsa V 1.2, procesar dicha información para obtener datos de precipitación y temperatura. Posteriormente, obtener los datos correspondientes a evapotranspiración mediante las ecuaciones de Turc, Hargreaves y Thornthwaite y utilizar los datos obtenidos para la estimación del balance hídrico a nivel	Aplicación del tratamiento de imágenes satelitales y de información global para obtener datos climáticos y aplicarlos en la estimación de balance hídrico a nivel cuenca para cualquier región.

					cuenca en la región de Urabá.	
7	<i>The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin Los Pozos</i>	Carlos Andrés Caro Camargo, Jenny Esmeralda Velandia Tarazona	Camargo C. Carlos A, Velandia T. Jenny E. (2019) <i>The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin Los Pozos</i> , Universidad Santo Tomas, Tunja.	PDF	Implementación de modelación hidrológica SWAT (Soil Water Assessment Tools), en la subcuenca los Pozos, con el fin de cuantificar el efecto causado por los cambios de cobertura vegetal en la respuesta hidrológica del sistema. Se tuvieron en cuenta los instrumentos de planificación territorial y los escenarios de ampliación de frontera agrícola para evaluar el cambio de cobertura.	Aplicación de un modelo validado para diferentes periodos de tiempo teniendo en cuenta variables meteorológicas y un modelo digital de elevación para determinar el comportamiento hídrico de la sub cuenca.
8	<i>Análisis del cambio de cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de Chiles – Cumbal a través de la utilización de herramientas SIG</i>	Mary Luz Bedoya Álvarez, Javier Flavio Portillo Moreno, Hans Rene Sáenz Cortés	Bedoya A. Mary L., Portillo M. Javier F., Sáenz C. Hans R. (2016) <i>Análisis del cambio de cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de Chiles – Cumbal a través de la utilización de herramientas SIG</i> , Universidad de Manizales	PDF	Utilización de imágenes satelitales provenientes de Landsat para determinar la cobertura vegetal en diferentes periodos de tiempo. Estas imágenes fueron tratadas mediante clasificación supervisada por máxima probabilidad, tratamiento geométricos y realces de información. Posteriormente se identificaron y homogenizaron las coberturas mediante la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.	El tratamiento de imágenes satelitales para poder clasificar y diferenciar los diferentes tipos de cobertura existentes en el área de estudio y sus principales características.
9	<i>Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia</i>	Martha Constanza Daza Torres, Fanny Fernández Flores, Flor Alba Triana	Daza T. Martha C, Fernández F. Fanny, Triana Flor A. (2013) <i>Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia</i> , Revista Facultad de Agronomía, Medellín	PDF	Investigación realizada en los suelos del páramo destinados a diferentes usos, con el fin de determinar sus propiedades y características y evaluar el cambio en la capacidad de retención hídrica.	Determinación de métodos para estudiar y clasificar suelo basado en sus propiedades, características y usos en el páramo

Tabla 1 Referencias estado del arte. Fuente: Autores

Los resultados obtenidos en la investigación de fuentes de información demuestran que, a través de los años, se han realizado varias investigaciones en los páramos, puesto que son ecosistemas estratégicos clave para el abastecimiento hídrico, además de los servicios ecosistémicos de regulación climática y materias primas que estos brindan a las poblaciones aledañas a estos. Como lo mencionó Borelli (2015), los suelos de los páramos presentan condiciones de alta humedad, que favorecen la regulación hídrica de estos hidrosistemas, por otro lado, Otaya B. Leodán A., Vásquez V. Guillermo L., Bustamante C. Guillermo J. (2008), también mencionan que las condiciones características de estos ecosistemas estratégicos son clave para el abastecimiento hídrico de las regiones.

Por otra parte, en varios de los estudios mencionados en la tabla 1, se determinó el impacto generado por el cambio en la cobertura y uso del suelo de los páramos, estableciendo que estos cambios tienen incidencia directa en las características y capacidades de retención, regulación y abastecimiento hídrico de estos ecosistemas. Además de esto, en varias investigaciones se aplicaron modelos hidrológicos para establecer la disposición y la dinámica de los páramos en cuanto al ciclo hidrológico y su respectivo balance hídrico.

Cómo se pudo ver anteriormente, son varios los estudios que se han realizado en los páramos de Colombia, en cuanto a la determinación de los impactos generados por el cambio de cobertura, la identificación de sus principales características y los ciclos de regulación hídrica y dinámicas que se dan en estos territorios, pero son pocos los estudios con estas características que se han dado específicamente en el páramo de Cruz Verde, por ende, la investigación que se llevará puede identificar a las problemáticas que allí se presentan, dando respuesta a la pregunta de investigación del presente proyecto y utilizando y adaptando las metodologías que consultadas en el estado del arte.

5. METODOLOGÍA

5.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

5.1.1 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para poder delimitar de manera correcta la zona de estudio comprendida como el Páramo de Cruz Verde, se procedió en primera instancia a revisar la cartografía oficial del territorio con el fin de encontrar información pertinente a los páramos que han sido delimitados por los diferentes entes territoriales. Dentro de la base de datos oficial de ESRI para la aplicación ArcGIS, fue posible encontrar un archivo formato shape que incluye la delimitación oficial de los páramos de Colombia realizada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MINAMBIENTE. El área obtenida para la delimitación del complejo de Páramo se muestra en la siguiente ilustración.

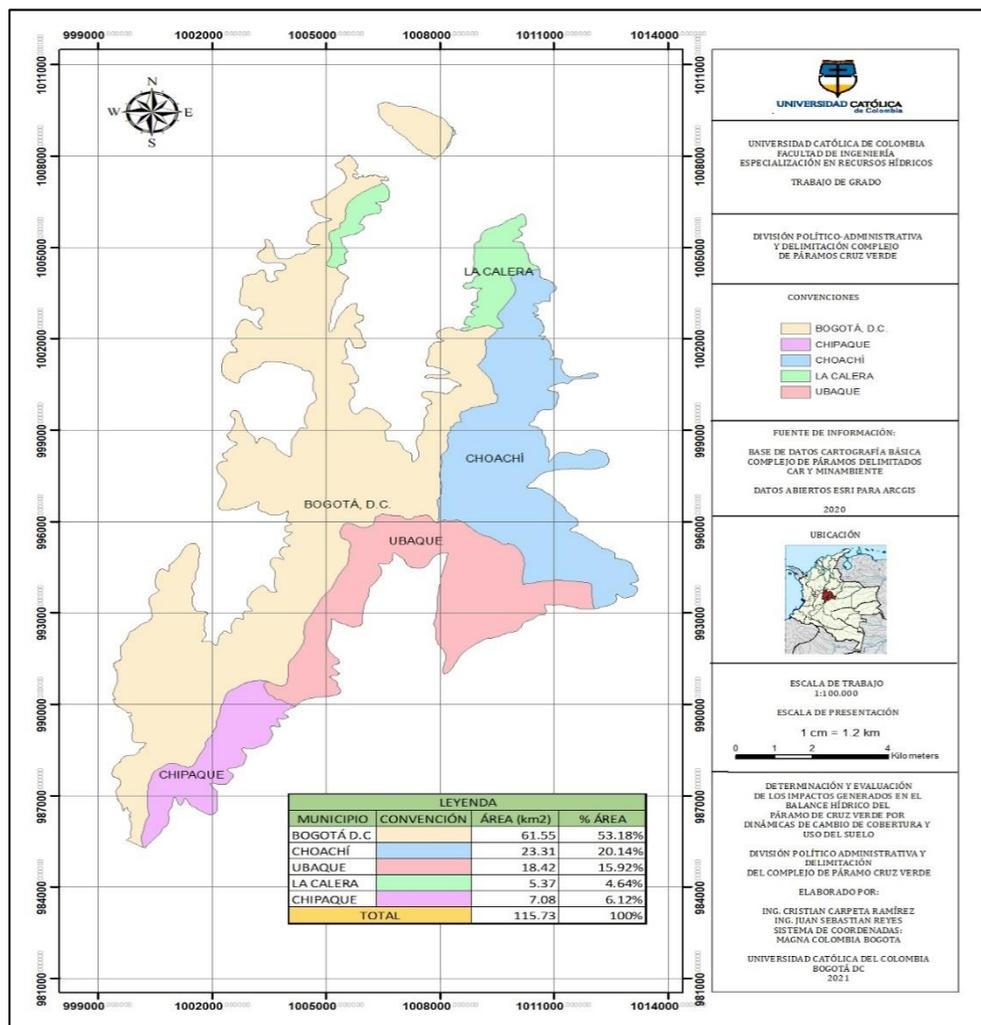


Ilustración 4 División político-administrativa complejo páramo de Cruz Verde. Fuente: autores

Como se puede observar en la anterior ilustración, el complejo de páramos en estudio se encuentra distribuido entre 5 municipios, de los cuales Bogotá se encuentra en un 53.181 % del área total de estudio. La relación total entre el páramo y los municipios se encuentra relacionada en la siguiente tabla:

LEYENDA			
MUNICIPIO	CONVENCIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA
BOGOTÁ D.C		61.55	53.18%
CHOACHÍ		23.31	20.14%
UBAQUE		18.42	15.92%
LA CALERA		5.37	4.64%
CHIPAQUE		7.08	6.12%
TOTAL		115.73	100%

Tabla 2 Relación municipios y páramos. Fuente: Autores

Respecto a la temperatura, según el estudio de suelos de Cundinamarca elaborado por el IGAC; esta se determinó para dar una idea del promedio de este parámetro climático en el complejo de páramo, el comportamiento y la distribución de la temperatura se muestra a continuación

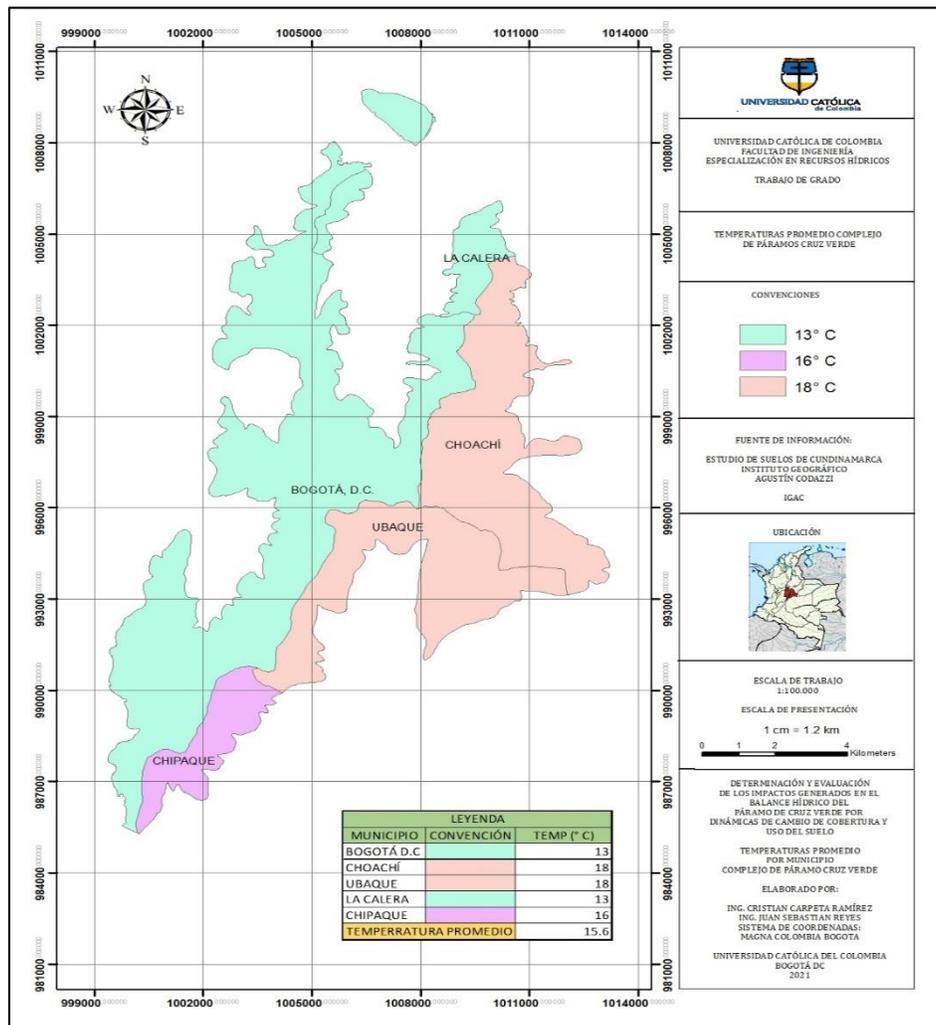


Ilustración 5 Temperatura por municipio. Fuente: autores.

Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio del complejo de páramos por municipio según el estudio de suelos es de 15.6° C. Como se muestra a continuación:

LEYENDA		
MUNICIPIO	CONVENCIÓN	TEMP (° C)
BOGOTÁ D.C	864	13
CHOACHÍ	872	18
UBAQUE	914	18
LA CALERA	864	13
CHIPAQUE	1000	16
TEMPERATURA PROMEDIO		15.6

Tabla 3 Temperatura por municipio. Fuente: autores.

Es importante resaltar que estos resultados obtenidos pueden diferir de la temperatura real del complejo, ya que este se trata de un piso térmico de páramo, cuya temperatura ronda entre los 5°C y 10° C, y en algunos lugares en donde la altura sobre el nivel del mar supera los 3500 msnm se pueden presentar temperaturas menores a los 2°C.

Para el parámetro de la precipitación, se tomó en cuenta el mismo estudio de suelos, aclarando que estos datos sólo se tomaron para dar una caracterización primaria, puesto que, para el objetivo principal del trabajo, se tomaron los datos procedentes de las estaciones climatológicas presentes cerca de la zona de estudio. El comportamiento de la precipitación se muestra en la siguiente ilustración.

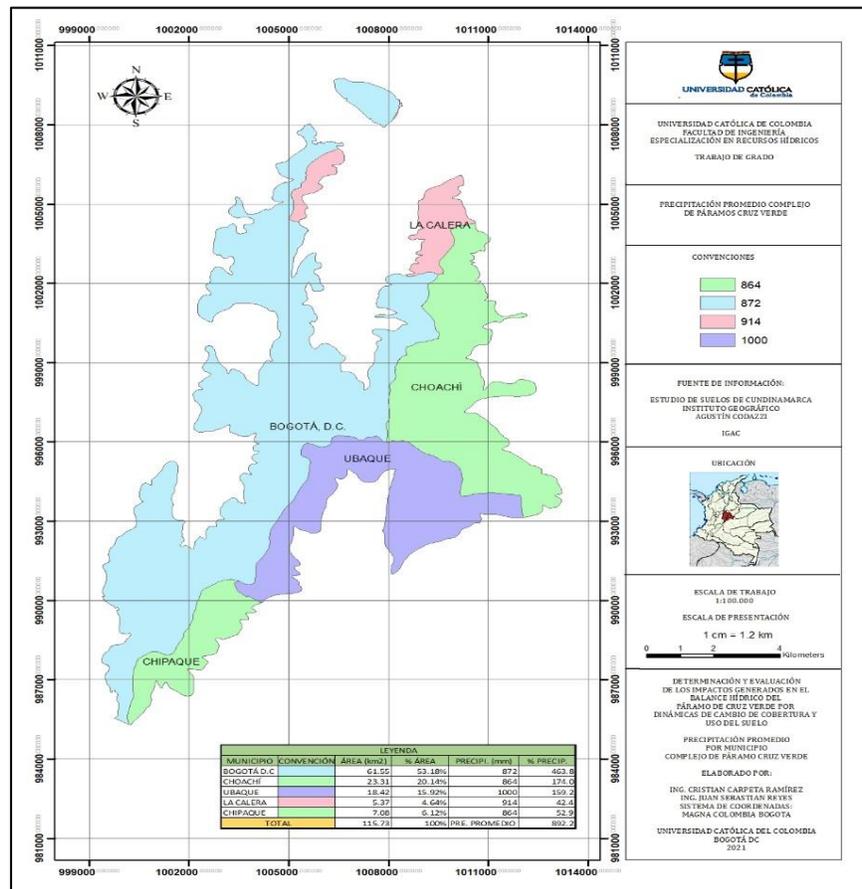


Ilustración 6 Precipitación por municipios. Fuente: autores.

Cómo se puede observar en la ilustración número 6, la precipitación supera los 800 mm/año en promedio anual para todos los municipios que hacen parte del complejo de páramo. Ejecutando un cálculo de promedio ponderado en conjunto con el área que

ocupa cada municipio dentro del complejo, se encuentra que el promedio de la precipitación es de 892.2 mm/año para el páramo de Cruz Verde, como se relaciona en la siguiente tabla.

LEYENDA					
MUNICIPIO	CONVENCIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA	PRECIPI. (mm)	% PRECIP.
BOGOTÁ D.C		61.55	53.18%	872	463.8
CHOACHÍ		23.31	20.14%	864	174.0
UBAQUE		18.42	15.92%	1000	159.2
LA CALERA		5.37	4.64%	914	42.4
CHIPAQUE		7.08	6.12%	864	52.9
TOTAL		115.73	100%	PRE. PROMEDIO	892.2

Tabla 4 Precipitación por municipio, Fuente: autores.

En cuanto a la clasificación de suelos que se encuentran en el páramo, se utilizó el estudio de suelos proporcionado por el instituto geográfico Agustín Codazzi, que incluye un archivo formato shape (.shp), el cual pasó por un tratamiento mediante el software ArcGIS para determinar las asociaciones de suelos que se encuentran dentro de la unidad delimitada del complejo de Páramo Cruz Verde. Los resultados y las condiciones de los perfiles se relacionan a continuación en la tabla 5 y la ilustración 7.

LEYENDA				
PERFIL	CONVENCIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA	PAISAJE
MEFg		11.14	9.63%	Montañoso
MGFf		34.82	30.09%	Montañoso
MGSg		10.58	9.14%	Montañoso
MGTd		30.91	26.71%	Montañoso
MKCF		0.62	0.54%	Montañoso
MLCd		11.68	10.09%	Montañoso
MLKd		4.57	3.95%	Montañoso
MLSg		9.35	8.08%	Montañoso
MLTd		0.04	0.03%	Montañoso
MLVF		2.02	1.75%	Montañoso
TOTAL		115.73	100%	

Tabla 5 Perfiles suelo complejo páramo Cruz Verde. Fuente: autores.

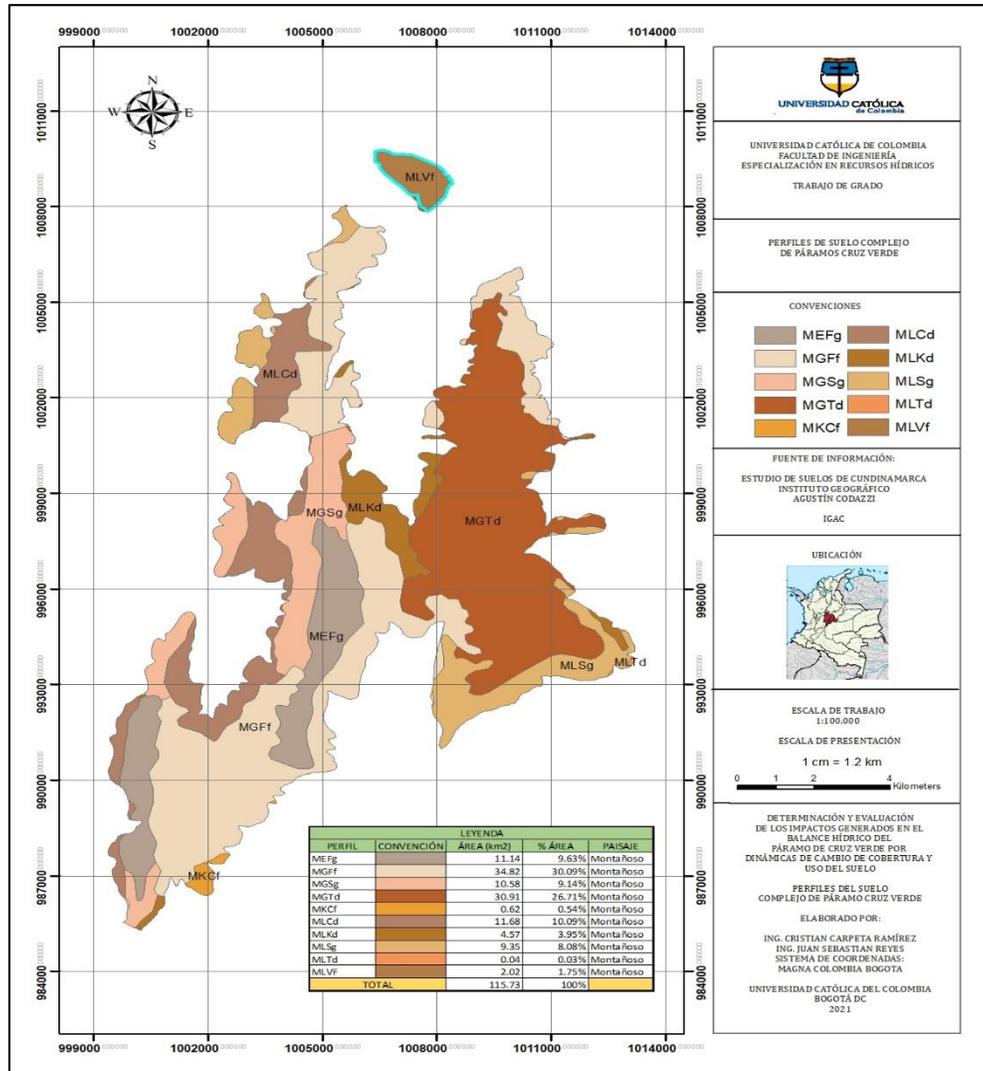


Ilustración 7 Perfiles de suelo complejo páramo Cruz Verde. Fuente: autores.

A partir de la caracterización de los suelos y del uso que se le da a este parámetro físico, se relacionan las características que serán descritas a continuación para cada perfil que permitirán establecer la *CAPACIDAD DE CAMPO*, que es una de las determinantes importantes a la hora de llevar a cabo el cálculo del balance hídrico, ya que esta permite determinar la cantidad de agua proveniente de la lluvia y de la escorrentía que se va a infiltrar y percolar.

✚ Perfil MEFg

Suelo descrito por H. Perdomo en el estudio de suelos de Cundinamarca cuyas características particulares suponen un clima extremadamente frío y húmedo con material parental de roca clástica arenosa, muy bien drenado por lo cual sólo posee en sus parámetros físicos una humedad aprovechable del 10%. Posee un paisaje montañoso y una profundidad efectiva superficial de 58 cm de crecimiento radicular. No posee uso agropecuario debido a las fuertes pendientes, bajas temperaturas y una densidad aparente de 0.9. A continuación se relaciona la descripción de los diferentes horizontes del perfil descrito.

0 - 36 cm A	Color en húmedo negro (7.5YR2/0); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, media y débil; consistencia en húmedo muy friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros gruesos; abundante actividad de macroorganismos; abundantes raíces finas y medias; límite abrupto y ondulado; pH: 4.5.
36 - 64 cm AC	Color en húmedo 60% negro (10YR2/1), 30% pardo grisáceo (10YR4/2) y 10% pardo amarillento (10YR5/4); textura arenosa franca con 68% de gravilla; sin estructura (suelta); consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros gruesos y medios; regular actividad de macroorganismos; regulares raíces medias; límite gradual y ondulado; pH: 4.8.
64 - 120 cm C	Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/4); textura franco arenosa con aproximadamente 30% de gravilla; pH: 4.9.

Ilustración 8 Descripción perfil MEFg. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC.

✚ Perfil MGFF

Perfil descrito por A. Parra en el estudio de suelos de Cundinamarca, posee un clima característico muy frío y húmedo con material parental de roca clástica arenosa al igual que el perfil anteriormente descrito. Sus horizontes están muy bien drenados por lo que posee un bajo porcentaje de humedad aprovechable (10%) y su profundidad efectiva es profunda con 106 cm para el crecimiento máximo de raíces. No está siendo utilizado para el uso agropecuario debido a las bajas temperaturas que se presentan en el perfil y los fuertes vientos. Presenta una densidad aparente de 0.9. A continuación se relaciona la descripción de los horizontes para este perfil.

00-22 cm A	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2), con regulares manchas de oxidación pequeñas, claras y contrastadas de color pardo rojizo y rojo amarillento (5YR5/4); textura franco arcillosa con 17% de gravilla; estructura en bloques subangulares mediana, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; regulares poros finos; abundantes raíces finas y medianas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.7.
22-38 cm Bw1	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2), combinado con un 30% de pardo amarillento (10YR5/4); textura arcillosa con 21% de gravilla; estructura prismática mediana y gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; abundantes raíces finas, regulares medianas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.8.
38-60 cm Bw2	Color en húmedo gris oscuro (10YR4/1), con abundantes manchas litocrómicas, pequeñas, claras y contrastadas de color rojo amarillento (5YR5/8); textura arcillosa con 20% de gravilla; estructura prismática gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa, muy plástica; abundantes poros finos; regulares raíces finas; poca actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.9.
60-88 cm BC	Color en húmedo gris claro a gris (5Y6/1), con abundantes manchas litocrómicas, claras y contrastadas de color rojo amarillento (5YR5/8) y amarillo pardusco (10YR6/8); textura arcillosa; estructura prismática gruesa y débil, con tendencia a masiva; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa, plástica; abundantes poros finos; regulares raíces finas; límite claro, plano; pH: 4.9.
88-150 cm C	Color en húmedo gris a gris claro (5Y6/1) con abundantes manchas litocrómicas, claras y contrastadas de color amarillo pardusco (10YR6/8); textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa, plástica; pocos poros finos; pH: 5.0.

Ilustración 9 Descripción perfil MGFF. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

✚ MGSg

Perfil descrito por L. Burgos en el estudio de suelos de Cundinamarca que posee un relieve fuertemente empinado con paisaje montañoso, un clima muy frío y húmedo con material parental de roca clástica limoarcillosa muy bien drenado por lo cual solo posee un porcentaje de humedad aprovechable equivalente al 10%. Posee una profundidad efectiva clasificada como profunda con 80 cm para el crecimiento de raíces y una densidad aparente de 0.9. Actualmente está destinado a la reforestación ya que las bajas temperaturas y fuertes vientos son limitantes para el uso agropecuario. A continuación, se muestra la descripción del perfil.

00 - 25 cm A1	Color en húmedo negro (10YR2/1); textura franco arenosa; estructura granular fina, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes raíces finas y muy finas; regular actividad de macroorganismos; reacción ligera al NaF; límite difuso; pH: 4.7.
25 - 60 cm A2	Color en húmedo negro (10YR2/1); textura franco arenosa con 19% de gravilla; estructura granular fina, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes raíces finas; regular actividad de macroorganismos; reacción ligera al NaF; límite gradual; pH: 4.7.
60 - 80 cm Bw1	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR4/4) con pocas manchas de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); textura franco arenosa con 15% de cascajo; estructura en bloques subangulares, fina y media, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros finos; abundantes raíces; límite claro, ondulado; pH: 4.8.
80 - 140 cm Bw2	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR4/4); textura franco arcillosa con 31% de cascajo; estructura en bloques subangulares fina y media, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; pocas raíces; pH: 4.8.

Ilustración 10 Descripción perfil MGSg. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

✚ MGTd

Perfil descrito por A. Parra en el estudio de suelos de Cundinamarca cuyas características principales radican en ser un perfil con una profundidad efectiva de 96 cm para el crecimiento de raíces, una temperatura muy fría y una condición muy húmeda. Está bien drenado internamente, sin embargo, posee una humedad aprovechable del 44.75% siendo este el segundo con más humedad aprovechable de los perfiles de suelos del páramo. Presenta un paisaje montañoso con un relieve fuertemente inclinado y una densidad aparente de 0.76. Su uso está destinado a ganadería extensiva y reforestación. Sus horizontes de describen en la siguiente ilustración.

00 - 45 cm Ap	Color en húmedo negro (10 YR 2/1); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, no plástica; pocos poros finos; formaciones especiales de crotovinas; abundantes raíces finas; abundante actividad de macroorganismos; reacción violenta al NaF; límite claro, plano; pH: 4.9.
45-60 cm AB	Color en húmedo negro (10 YR 2/1); textura arenosa franca; estructura en bloques subangulares, media, fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, no plástica; pocos poros finos; pocas raíces finas; abundante actividad de macroorganismos; reacción violenta al NaF; límite claro, plano; pH: 5.0.
60-87 cm Bw1	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); textura arenosa franca; estructura en bloques subangulares, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, no plástica; regulares poros finos; pocas raíces finas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, plano; reacción violenta al NaF; pH: 5.3.

87-112 cm Bw2	Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura arenosa franca; estructura en bloques subangulares, media, fuerte; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, no plástica; abundantes poros finos; abundantes raíces finas; límite abrupto, plano; pH: 5.1.
112-120 cm Bw3	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) mezclado con pardo oscuro (10 YR 3/3), con rellenos en los canales radiculares y poros con material de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, media, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; pocos poros finos; pocas raíces finas; poca actividad de macroorganismos; ligera reacción al NaF; pH: 4.8.

Ilustración 11 Descripción perfil MGTd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

 MKCf

Perfil descrito por C. Castro y J. Arévalo identificando un paisaje montañoso con un relieve fuertemente quebrado y un material parental de roca clástica limoarcillosa, presenta una temperatura fría y una condición muy húmeda, el perfil se encuentra bien drenado mostrando un porcentaje de humedad aprovechable del 13.06%. Este perfil presenta una profundidad efectiva de 120 cm (profunda, según la clasificación del estudio de suelos) para el crecimiento radicular, además de esto, presenta una densidad aparente de 1.03. Su uso está destinado al pastoreo extensivo y algunos cultivos frutales. Se relaciona su descripción en la siguiente ilustración.

0-20 cm Ap	Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura arcillo limosa; estructura granular media que parte a fina, moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado pegajosa, ligeramente plástica; muchos poros gruesos, frecuentes medianos; muchas raíces medias y gruesas, vivas; mucha actividad de macroorganismos; ligera reacción al NaF; límite abrupto y ondulado; pH: 5.7.
20-39 cm AB	Color en húmedo pardo amarillento (10 YR 5/6); textura franco arcillo limosa; estructura granular media, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, plástica; frecuentes poros finos y medianos; muchas raíces medias, vivas; mucha actividad de macroorganismos; ligera reacción al NaF; límite difuso y plano; pH: 5.2.
39-62 cm Bw	Color en húmedo amarillo pardusco (10 YR 6/6); textura arcillo limosa; estructura en bloques subangulares gruesa, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, plástica; pocos poros medianos; pocas raíces medias, vivas; poca actividad de macroorganismos; límite difuso e irregular; pH: 5.0.
62-97 cm C1	Color en húmedo amarillo pardusco (10 YR 6/6) mezclado con un 10% de pardo claro (7.5 YR 6/4); textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, plástica; pocos poros finos; pocas raíces medias, frecuentes finas, vivas; poca actividad de macroorganismos; límite gradual e irregular; pH: 5.0.
97-120 cm C2	Color en húmedo pardo claro (7.5 YR 6/4) mezclado con un 15% de pardo rojizo (5 YR 4/4); textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo muy firme, en mojado muy pegajosa, plástica; pocos poros finos; pocas raíces finas, vivas.

Ilustración 12 Descripción perfil MKCf. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

 MLCd

Perfil descrito por A. Parra en el estudio de suelos de Cundinamarca cuyas propiedades físicas muestran un porcentaje de humedad aprovechable del 10% teniendo en cuenta su drenaje natural moderadamente bueno. Presenta una temperatura fría y

es de carácter húmedo con un relieve moderadamente quebrado y un material parental de roca clástica limoarcillosa. Este perfil presenta una profundidad efectiva de 104 cm para el crecimiento radicular y una densidad relativa de 0.9. Su uso está destinado a la ganadería extensiva. Su descripción por horizontes se muestra a continuación.

00-22 cm Ap	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10 YR 3/1); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; pocos poros finos; abundantes raíces medias; regular actividad de macroorganismos; límite abrupto, plano; pH: 7.2.
22-31 cm AB	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2), con manchas litocrómicas pardo amarillentas (10 YR 5/8); textura arcillosa con gravilla; estructura en bloques subangulares, fina, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; pocos poros finos; pocas raíces medias; poca actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 6.9.
31-51 cm Bt1	Color en húmedo amarillo pardusco (10 YR 6/8); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares media, fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; pocos cutanes, delgados, argilanes localizados en las caras verticales; pocas raíces finas; límite abrupto, plano; pH: 5.3.
51-85 cm Bt2	Color en húmedo pardo amarillento (10 YR 6/8), con cutanes de color gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares media, fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; cutanes abundantes, delgados, argilanes localizados en las caras verticales de los pedos; pocas raíces finas; límite claro, plano; pH: 5.0.
85-142 cm C	Mezcla de colores en húmedo pardusco (10 YR 6/8) y gris claro (10 YR 3/2), con rellanos de color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa, plástica; pocas raíces finas; pH: 4.8.

Ilustración 13 Descripción perfil MLCd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

MLKd

Perfil descrito por C. Proaño en el estudio de suelos de Cundinamarca cuyas características físicas principales son su alta humedad aprovechable del 47.44% y una densidad aparente del 0.53. Presenta un paisaje montañoso con un relieve moderadamente quebrado con un drenaje interno intermedio que le permite retener agua y una profundidad efectiva de 153 cm para el crecimiento radicular. El material parental de este perfil es ceniza volcánica recubriendo roca clástica limoarcillosa, el clima ambiental del suelo es frío/húmedo y su uso actual está destinado a la ganadería extensiva y en algunos sectores cultivo de tubérculos. A continuación, se relaciona la descripción de sus horizontes.

00-27 cm Ap	Color en húmedo negro (2.5 Y 2/0); textura franco arenosa; estructura granular y localmente bloques subangulares, fina y media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros medianos; abundantes raíces finas y medias; abundante actividad de macroorganismos (lombriz); fuerte reacción al NaF; límite difuso; pH: 4.9.
27-50 cm A2	Color en húmedo negro (2.5 Y 2/0); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares media y fina, moderada a débil; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros medianos; abundantes raíces medianas y finas; poca actividad de macroorganismos (lombriz); fuerte reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH: 4.9.
50-82 cm Ab1	Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1) con 20% de manchas de color pardo oscuro en poca cantidad, medianas y contrastadas; textura arenosa franca; estructura en bloques subangulares medianos y finos, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros medianos; presencia de pedotúbulos de color pardo grisáceo muy oscuro y crotovinas; regulares raíces medianas y finas; poca actividad de macroorganismos (lombriz); límite claro, ondulado; pH: 5.1.

82-112 cm Ab2	Color en húmedo negro (2.5 Y 2/0); textura arenosa franca; estructura en bloques subangulares medianos y finos, moderada y débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros medianos; presencia de crotovinas; pocas raíces medianas; regular actividad de macroorganismos (lombriz); límite claro, ondulado; pH: 5.1.
112-180 cm Ab3	Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura arenosa; estructura en bloques subangulares medianos, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros medianos; presencia de pedotúbulos de color pardo grisáceo muy oscuro y crotovinas; pocas raíces medianas y finas, muertas; regular actividad de macroorganismos (lombriz); pH: 4.9.

Ilustración 14 Descripción perfil MLKd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

Perfil MLSg

Perfil descrito por el trabajo conjunto de H. Chaves y J. Arévalo; presenta un paisaje montañoso con un relieve fuertemente empinado y un clima ambiental frío y muy húmedo. Presenta un drenaje interno medio lo cual le brinda un porcentaje de humedad aprovechable del 41% y una profundidad efectiva de 101 cm para el crecimiento radicular, su densidad aparente es de 0.65. El material parental de este perfil es ceniza volcánica y su uso está previsto para la ganadería extensiva. Sus limitantes de uso son sus fuertes pendientes y presenta una vegetación natural de pasto. Su descripción por horizontes se relaciona a continuación.

00 - 32 cm Ap	Color en húmedo negro (10YR2/1); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares mediana que se descompone en fina, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, no plástica; muchos poros medianos; muchas raíces muy finas y finas, vivas; frecuente actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF; límite abrupto, plano; pH: 5.2.
32 - 45 cm AB	Color en húmedo gris muy oscuro (10YR3/1), con 30% de moteados medianos, diferenciables de color pardo oscuro (10YR3/3); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares gruesa, débil; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; frecuentes poros finos y medianos; pocas raíces finas, vivas; frecuente actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH: 5.6.
45 - 75 cm Bw1	Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/4), con 20% de moteados medianos, diferenciables de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares gruesa, débil; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; muchos poros finos y medianos; pocas raíces finas, muertas; frecuente actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH: 5.5.
75 - 105 cm Bw2	Color en húmedo pardo grisáceo (10 YR5/2), con 30% de moteados pequeños diferenciables de color pardo grisáceo oscuro (10YR4/2); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares gruesa que se descompone en media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, plástica; frecuentes poros finos y medianos; poca actividad de macroorganismos; límite abrupto, plano; pH: 5.4.
105-130 cm C	Color en húmedo pardo oscuro (7.5YR3/4); textura franca a franco arenosa, con muchos fragmentos subredondeados de guijarros medianamente alterados; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, no plástica; pocos poros finos; pH: 5.3.

Ilustración 15 Descripción perfil MLSd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

✚ MLTd

Perfil descrito por E. Ávila en el estudio de suelos de Cundinamarca, posee un paisaje montañoso con un relieve moderadamente quebrado, el material parental es de ceniza volcánica sobre roca clásica limoarcillosa y posee un clima ambiental frío y húmedo. Su drenaje natural interno es medio por lo cual posee un porcentaje de humedad aprovechable del 14.51%. Es un perfil con una profundidad efectiva de 130 cm y una densidad aparente de 1.18. Su descripción por horizontes de muestra a continuación.

00-30 cm Ap	Color en húmedo negro (10 YR 2/1); textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, gruesa, moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado no pegajosa, no plástica; frecuentes poros finos y medianos y pocos gruesos; muchas raíces muy finas y finas, y frecuentes medias y gruesas, vivas; mucha actividad de macroorganismos (lombriz, chiza y hormiga); reacción fuerte al NaF; límite difuso y plano; pH: 5.3.
30-45 cm A	Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura franco arcillo arenosa; frecuente cascajo (15%) subredondeado, alteración mediana a fuerte, naturaleza sedimentaria; estructura en bloques subangulares, fina y media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; frecuentes poros muy finos y finos y pocos medianos y gruesos; frecuentes raíces muy finas y finas y pocas medias, vivas; mucha actividad de macroorganismos (lombriz, chiza y hormiga); reacción fuerte al NaF; límite abrupto y plano; pH: 5.3.
45-85 cm Bw1	Color en húmedo pardo amarillento (10 YR 5/6); textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, plástica; muchos poros muy finos y finos y frecuentes medianos y gruesos; frecuentes raíces finas y medias, vivas; frecuente actividad de macroorganismos; reacción violenta al NaF; límite gradual y plano; pH: 5.3.
85-125 cm Bw2	Color en húmedo amarillo pardusco (10 YR 6/8); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; frecuentes poros muy finos y finos y pocos poros medianos; pocas raíces finas y medias, vivas; poca actividad de macroorganismos; reacción violenta al NaF; límite gradual y plano; pH: 5.2.
125-170 cm C	Color en húmedo amarillo oliva (2.5 Y 6/6); moteados color pardo fuerte (7.5 YR 5/6), pocos, pequeños, contrastados; textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa, muy plástica; frecuentes poros finos y medianos; pocas raíces finas, vivas; reacción fuerte al NaF; pH: 5.2.

Ilustración 16 Descripción perfil MLTd. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

✚ MLVf

Perfil descrito por C. Proaño, cuyas principales propiedades físicas son su paisaje montañoso y un relieve fuertemente quebrado con material parental de roca clásica limoarcillosa. Posee un drenaje interno rápido lo cual le brinda un porcentaje de humedad aprovechable del 10% y una densidad aparente de 0.9. Es un perfil con una profundidad efectiva de 68 cm para el crecimiento radicular. Está destinado al uso para la ganadería extensiva, sin embargo, sus limitantes de uso son sus fuertes pendientes y su poca profundidad efectiva. La descripción de sus horizontes se relaciona a continuación.

00-12 cm Ap	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR2/2); textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares fina, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, plástica; abundantes poros finos; pocas raíces gruesas, abundantes finas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, ondulado; pH: 5.6.
12-18 cm A2	Color en húmedo negro (10YR2/1); textura arcillosa, con poca gravilla; estructura en bloques subangulares mediana, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; abundantes poros finos; pocas raíces finas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, ondulado; pH: 5.7.
18-70 cm Bw	Color en húmedo gris pardusco claro (10YR6/2), con abundantes manchas litocrómicas, gruesas, claras de color gris (10YR5/1) y pardo fuerte (7.5YR5/8); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; regulares poros finos; pocas raíces finas; pH: 5.4.
70-120 cm R	Roca dura y coherente (lutita).

Ilustración 17 Descripción perfil MLVf. Fuente: Estudio de suelos de Cundinamarca. IGAC

5.1.2 DETERMINACIÓN CAPACIDAD DE CAMPO

A partir de los resultados obtenidos en el numeral anterior, se procedió a determinar la capacidad de campo el cual es un aspecto clave para llevar a cabo el cálculo del balance hídrico. Este parámetro físico permite conocer la lámina de agua que es capaz de retener el suelo teniendo en cuenta factores como la humedad aprovechable, la profundidad efectiva entendida como la profundidad máxima hasta la cual se permite el crecimiento de las raíces de la vegetación y la densidad aparente. Para llevar a cabo el cálculo de este parámetro, se utilizó el estudio de suelos de Cundinamarca, el software ArcGIS y la siguiente ecuación tomada de del trabajo llamado “Zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos”, elaborado por Carlos Castro del instituto geográfico Agustín Codazzi.

$$\text{Capacidad de campo (mm)} = \% \text{ humedad} \times \text{profundidad efectiva (mm)} \times \text{densidad aparente}$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se realizó el cálculo de la capacidad de campo, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 6 y en la ilustración

PERFIL	CONVENCIÓN	COMPOSICIÓN	% DE HUMEDAD	PROFUNDIDAD EFECTIVA (cm)	DENSIDAD APARENTE	LAMINA APROVECHABLE	ÁREA (km ²)	% ÁREA	LAMINA PROM
MKCF		AC-34/AC-33/CU-111	13.06	120	1.03	161.4	0.62	0.54 %	0.86
MGSg		CU-107/CU-108	10	80	0.9	72.0	10.58	9.14 %	6.58
MLTd		AC-69/AC-70	14.51	130	1.18	222.6	0.04	0.03 %	0.08
MLCd		CC-226/CC-228/CU-75/CU-123	10	104	0.9	93.6	11.68	10.09 %	9.45



MGTd		CC-284/MU-11/MU-12	44.75	96	0.76	326.5	30.91	26.71 %	87.20
MLVf		CC-307/CU-79/CC-308	10	68	0.9	61.2	2.02	1.75 %	1.07
MLSG		CC-94/MU-23	41	101	0.65	269.2	9.35	8.08 %	21.75
MEGf		CU-132/EB-23	10	58	0.9	52.2	11.14	9.63 %	5.02
MGFf		CU-149/CU-126/CC-210	10	106	0.9	95.4	34.82	30.09 %	28.70
MLKd		MU-9/N-16/CC-306	47.44	153	0.53	384.7	4.57	3.95 %	15.19
TOTAL							115.73	100%	175.9
									1

Tabla 6 Valores capacidad de campo. Fuente: Autores

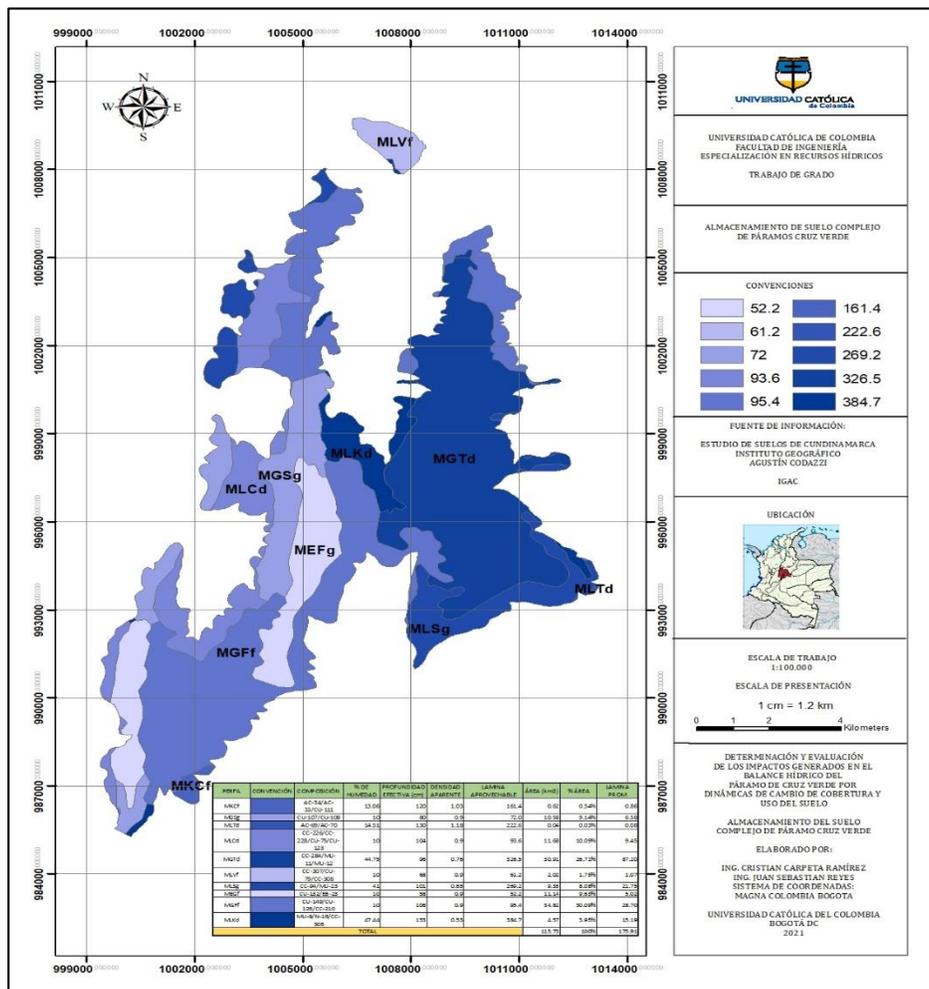


Ilustración 18 Capacidad de campo páramo. Fuente: Autores

5.1.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDROCLIMÁTICOS

Mediante el uso y tratamiento de la información recolectada procedente de las estaciones meteorológicas y climáticas presentes cerca la zona delimitada de estudio, se obtuvieron los promedios mensuales y anuales multianuales de la precipitación, el brillo solar y otros parámetros hidroclimáticos necesarios para el cálculo de los balances hídricos. Para el presente trabajo y para poder determinar el cambio a través de los años, se revisaron y calcularon los datos de los años 1998, 2001, 2011 y finalmente del 2018.

✚ Precipitación.

Para la obtención de este parámetro climático, se utilizaron las estaciones Torca, Santa Teresa, La casita, Doña Juana y el Bosque, todas pertenecientes a la corporación autónoma regional de Cundinamarca CAR, y como se evidencia en la siguiente ilustración

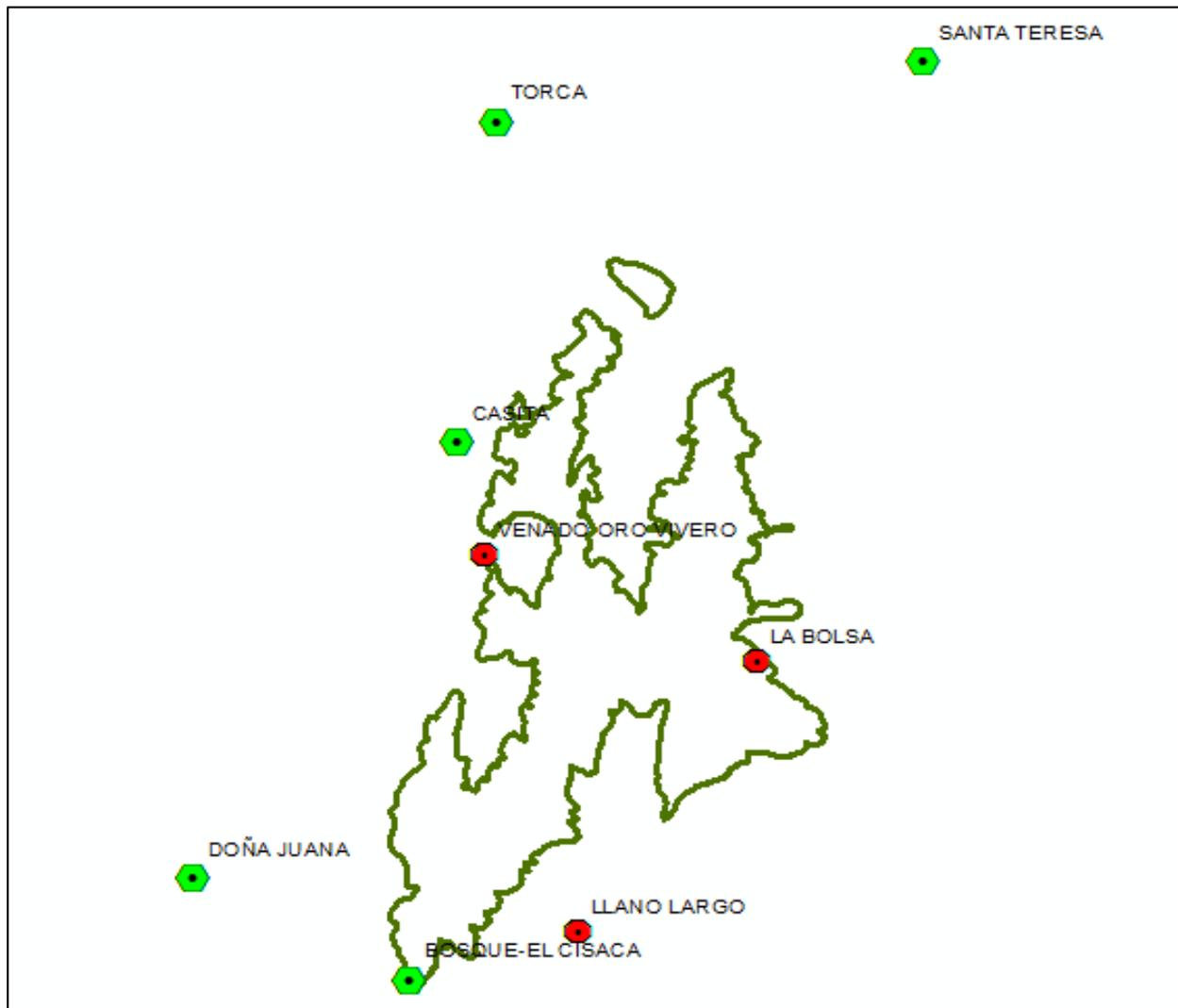


Ilustración 19 Ubicación estaciones meteorológicas. Fuente: Autores

Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones se muestran a continuación:



✓ Estación Torca complementada

1998		23.8	20.4	95.4	55.7	125.3	59.8	306	44	315.1	116.7	122.1	84.7	R A N G O A N A L I S I S
1999		70.7	76.7	136.9	116	89.9	130	18.1	40.2	128.2	128.6	85.3	29.7	
2000		46.4	121.6	89.3	76.5	65.2	51.1	61.3	52.5	102.4	128.9	37.9	22.3	
2001		20.4	53.9	30.7	45.1	58.2	44.1	26.4	57	75.9	47	80.6	34	
2002		41	20	54.1	127.5	127.7	132.7	56.6	41.5	49.69	81.83	35.12	43.9	
2003		43.9	86.7	69.7	208	50.6	91.4	27.5	46.5	118.5	330	195.1	40.7	
2004		26.8	75.1	50.8	157.9	78.1	78.8	73.64	84.63	49.83	145.80	61.86	47.39	
2005		42.94	43.10	36.06	100.47	230.49	62.63	68.74	50.83	76.26	240.62	166.63	0	
2006		162	124.6	128.1	139.9	131.9	44.2	9.7	24.7	34.2	154.5	124.04	82.7	
2007		25	22.2	15.6	38.2	51.6	21.6	34.5	94.5	70.5	222.6	151.5	191.4	
2008		52.7	66	112.5	108.4	219.7	110	114.4	97.4	66	123	164.3	92.60	
2009		59.5	87.1	110.5	90.1	71.7	82.7	46.7	17.4	8	281.8	68.2	30	
2010		1.2	30.6	26.6	234.9	210.2	125.1	161.6	66.2	124.9	168.4	192.4	96.7	
2011		118.5	161.5	185.4	184	175	59.8	33.9	40.8	134.3	193.9	473.5	143.5	
2012		204.8	68.8	133.1	242.1	82.8	85.8	116.9	68.5	43.6	171.6	110	101.7	
2013		13.2	165	78.2	147.7	133.8	20.3	46.4	53.2	20.2	107.8	205.9	75.5	
2014		101.2	62.2	115.1	39.6	53.9	48.2	31.6	31.7	83.3	76.5	135.5	102.9	
2015		66.3	76.5	50.7	37.7	61	97.4	68.3	52	32.9	21.3	31.8	4.9	
2016		33.3	31.8	165.2	90.9	168.4	30.1	71.6	75.5	73.6	91.8	154.2	64.8	
2017		47.2	33.4	205	75.6	58.6	38.7	12.1	61.8	30.7	56.9	187	51.6	
2018		88.2	83	137.4	87.8	144	88.6	93.9	74	43	35.4	139	5.7	

Tabla 7 Datos precipitación complementados estación Torca. Fuente: Autores

✓ Estación Santa Teresa complementada

1998		0	49.5	29.2	39.8	177	115	74.9	7.8	44.8	65.2	46.8	107.2	R A N G O A N A L I S I S
1999		35.8	27.5	51.5	84.6	0.8	73.1	75.7	82.1	89.5	129.8	91.7	72.4	
2000		107.8	84.1	62	38.3	124.1	88.4	96.6	94.5	111.2	71.6	86.8	83.4	
2001		0	69.5	83.4	51	98.8	119.1	18.7	58.4	82.7	111.6	81.2	46.9	
2002		25.7	13.8	61.4	111.8	151.6	164.1	67.5	79.8	56.8	26.2	57.2	33.2	
2003		3.8	34.9	81.1	121	94.8	62.43	49.7	60.7	72.4	95	85	39	
2004		30.2	67.3	92.1	92.7	144.3	203.3	151.5	116.2	72	137.3	60.30	54.99	
2005		32.83	21.2	31	138.2	149.1	71.9	87.7	80	100.6	155.8	134.8	24.5	
2006		58.1	42.3	130.3	83.4	125.2	170.2	100.9	12.5	72.3	144.6	124.1	63.3	
2007		0	89.4	164.4	164	115.3	194.9	73.8	152	72.6	175.5	86.6	56.1	
2008		36.3	17.8	86.8	59.3	121.2	125.6	163.9	125.1	79.3	100.1	126.6	66.6	
2009		68.5	73.7	95.3	72	83.6	108.4	96.5	75.8	39.4	87.4	46.9	2.4	
2010		4	20.1	34.6	170.6	141.7	104.5	161	75.3	75.2	105.2	161.6	62.4	
2011		45.7	124.3	135.6	250.7	150.6	74.7	82.3	36.2	65	176.7	208.5	73.7	
2012		59.4	51.7	99.1	227.8	67.1	81.3	130.3	69.7	56.1	92.8	57.8	45.1	
2013		4.2	59.1	42.3	105.2	142.5	57.6	75.6	55.4	29.4	75	133.8	55.1	
2014		14.4	22.3	82.3	48	60.1	132.7	103.1	68.8	40.9	65.6	77.3	25.3	
2015		10.8	28.2	28.5	38.54	59.4	172.5	102.6	135.3	46.4	24.7	90.6	25.2	
2016		48.7	9.4	97.9	136.1	118.8	98.5	105.8	117.2	98.4	91.2	146.4	61.5	
2017		88.7	71.7	162.1	63.9	170.2	172.9	142	84.6	59.8	61	97.8	60.5	
2018		38.9	32.5	111.4	173.2	173.9	153.4	139.4	110.4	53.2	86.2	130.8	3.2	

Tabla 8 Datos precipitación complementados estación Santa Teresa. Fuente: Autores



✓ Estación La casita complementada

1998		34	8	115.2	44	217	125	96	77	72	132	127	92	R A N G O A N A L I S I S
1999		98	151	89	143	42	87	39	42	57	144	252	81	
2000		110	119	67	71	87	57	77	97.3	127	97.9	98.1	26.5	
2001		0	132.7	83.4	38.4	87.6	66.7	70.2	57.7	59.6	96.2	121.8	80.8	
2002		37.1	6.9	85.7	173.7	115.1	100.1	61.2	89.9	45.6	114.5	28.4	33.9	
2003		33.8	26.3	180.7	106.6	63.5	58.1	38.2	49.5	51.5	154.5	82.6	84.3	
2004		44.9	179.7	120.9	133.2	136.6	128.2	66.4	96.1	16.5	125.6	106.9	49.7	
2005		77	62.9	41.6	124.3	300.8	65.2	58.1	48.6	35.9	234	286.9	44.6	
2006		54.6	49.3	197.7	254.8	93.6	109.1	47.96	59.5	17	140	125.1	142	
2007		4.5	51.9	51.4	181	68.8	119.1	63.2	75.9	16.7	236	80.8	181	
2008		27.6	94.5	194.5	41.9	256.8	64	108.5	90.5	96.2	146.5	265.7	141.1	
2009		78	47.4	85.3	129.6	31.1	146.7	51.3	59.6	70.8	136.9	119.4	12.1	
2010		1.2	14.2	22.5	282	194	110.3	118.8	82.5	73.2	230.8	221.9	74.2	
2011		40.2	134.9	223.2	251.5	195.4	95.4	90.1	49.7	45.1	180.7	322.6	117.3	
2012		83	37.4	138.7	184.7	65.5	69	103.1	40.3	21.5	218.7	84	187.8	
2013		23.5	129.3	68	78.2	166.8	24.4	127.2	76.5	43.9	59.7	246.1	75.5	
2014		15.8	3.3	82.6	39	20.2	99.1	38	33.4	38.9	64.8	11.9	73.8	
2015		60.2	40.3	56.2	43.3	45.8	112.7	71.2	69.3	56.8	10.6	64.8	7.2	
2016		10.3	31.8	47.5	137.4	82.6	39.2	65.4	62.8	24.5	80.9	263.3	26	
2017		101.3	54.2	243.2	46.6	239.1	268.4	212.1	61	29.9	30.8	123.9	176.4	
2018		20.5	34	180.6	306.1	139.3	114.3	82.5	84.3	47.2	64.1	31.3	17	

Tabla 9 Datos precipitación complementados estación La casita. Fuente: Autores

✓ Estación Doña Juana complementada

1998		3.9	10.5	55.6	20.7	166.6	56.8	69.5	45	27	56.2	58.6	122.2	R A N G O A N A L I S I S
1999		38.2	99.2	47.7	54.6	57.6	51.6	16.5	40.9	81.4	85.6	95.5	25.5	
2000		31.6	87.2	93.4	75.6	86.2	40.1	49.7	56.7	59.8	64.7	44.7	29.7	
2001		7.8	76.4	72.4	50.9	67.8	55.8	42.9	30.3	57.6	21.2	42.3	46.8	
2002		6.8	6.6	28.9	100.7	115.2	120.1	42.9	51.1	27.9	79.4	26.5	23.9	
2003		9.1	15.8	45.5	95.7	16.7	34.96	51.87	28.71	57.46	160.51	69.21	33.91	
2004		7.18	75.77	79.23	112.40	156.70	64.97	32.52	37.02	1.2	139.8	112.4	34	
2005		14.3	39.3	35.7	84.8	119.1	53.2	37	22	59	91.4	63.8	27.4	
2006		53.7	4.8	90.8	141.3	80.5	102.9	45.1	35.7	22.8	156.3	84	9.5	
2007		0	11.1	34.4	85.5	35.1	85	41.9	61.5	15.9	155.6	31.5	95.1	
2008		4.6	22.8	36.8	74.3	152.9	90.3	64.5	79.2	36.7	77.6	124.3	80.7	
2009		28.4	59.8	58	77.7	24.2	40.7	46.4	35.9	26.5	83.1	47.1	4.2	
2010		0.3	27.1	25.8	193.1	144.3	91.6	104.1	40.8	42.9	95.6	158.7	72.8	
2011		27.4	61.1	116.6	203.7	140.5	38.1	88.2	16	44.2	120.5	197.7	95.2	
2012		45.5	55.7	98.1	152.7	48.1	41.9	81.7	61.3	23.4	137.3	65.7	64.9	
2013		2.4	34.3	64.2	93	120.8	39.7	77.5	41.9	39.2	42.8	103.8	26.5	
2014		10.3	23.6	28.1	58.3	64.5	97.7	81.1	31	28.6	56	90.8	35.6	
2015		19.2	39.9	62.7	27.1	38.8	137.6	65.6	43.4	35.5	21.1	22.2	4.2	
2016		3.9	18.5	60	74.7	96	37.9	54.2	66	49.4	53.3	103.5	24.4	
2017		18.1	50.5	146.8	48.3	107.2	120.7	53.2	74.6	25	50.8	82.1	48.4	
2018		19.5	16.2	58	129.3	80.9	58.4	86.9	78.9	46.9	53.2	57.1	13.2	

Tabla 10 Datos precipitación complementados estación Doña Juana. Fuente: Autores.



✓ Estación El bosque complementada

1998		3.4	25.1	87.8	53.9	169.9	189.1	165.9	117.7	42.7	112.6	73.2	59.4	R A N G O A N A L I S I S
1999		52.6	3.5	38.7	141.7	103.7	119.6	83.6	85.1	97.2	190.8	169.9	69.3	
2000		61.8	100.4	79.2	78.8	176.6	45.8	89.5	73.2	61.8	51.5	84.8	50	
2001		54	59.6	86.5	43	42.5	17.4	29.2	13.3	14.3	46.9	119.7	88.8	
2002		16	4.8	78.3	76.4	36.3	81.1	32.2	40.7	34	110.1	50.5	29.1	
2003		3.2	8.1	41.5	51.4	85.7	38.15	50.01	329.3	310.5	296	198.8	154.3	
2004		0	58.6	66.1	111.5	174	1.7	79.8	45	11.96	137.78	114.57	35.57	
2005		22.76	43.22	35.86	89.30	112.6	21.9	64.8	9.7	16	15.2	15.2	1	
2006		90.2	2.8	82.1	97.8	106.8	113.3	156.9	42.3	16.2	77.2	86	24.2	
2007		0	32.7	95.4	128.2	88.3	223.7	57.9	128.2	58.5	147.8	77.3	127.2	
2008		47.8	55.3	64.89	68.66	147.70	87.25	70.56	79.71	43.98	93.81	138.87	90.83	
2009		35.17	38.7	56.5	96.1	52.5	113.1	147.8	87.7	66.7	106.1	40.6	28.5	
2010		0	29.1	40.5	130.6	133.1	134.3	93.9	63.7	67	155	154.2	99.6	
2011		29.3	55.9	141	234.5	220.2	110.8	126.1	59.2	87.4	194.8	175	112.3	
2012		50.9	66.6	174	223.4	135.1	156	206.7	142.5	94	153	54.3	87	
2013		24	108.4	57.3	126.7	174.7	83.9	196.5	87.4	45.3	73.8	102.5	65.4	
2014		24.7	17.8	109	131	128.5	288.5	219.1	114.5	63.1	83.7	158.2	58.5	
2015		21.6	77.8	86.9	93.9	102.3	255.8	170.3	104.7	81.4	44.2	83.5	37.3	
2016		5.8	34.9	51.3	142	178	139.9	161.6	184.2	128	89	123.6	80.4	
2017		119.1	57.8	210.7	66.6	170.8	189.5	190	132.8	52.2	140.4	92.7	102.5	
2018		50.8	19.3	99.1	193.1	224.6	216.8	228.2	134.5	75.1	100.5	62.4	43	

Tabla 11 Datos precipitación complementados estación El bosque. Fuente: Autores

✚ Evapotranspiración potencial

A partir de los datos obtenidos anteriormente y de los datos de temperatura media, brillo solar y humedad relativa obtenidos de las estaciones Venado de Oro y la Bolsa (pertenecientes al IDEAM) se calculó la ETP por medio del método de Turc, obteniendo los valores relacionados a continuación para los periodos 1998, 2001, 2011 y 2018.

año	mes	Humedad relativa (%)	Ci	Ki	temperatura media mensual (°c)	brillo solar (h)	n	duracion del día	Ri	ETP (MM)
1998	1	81.125	1	0.4	11.7	146.7	4.732258065	11.8	356.310381	71.2184489
1998	2	83.25	1	0.37	12.045	107	3.821428571	11.9	332.186059	62.9790905
1998	3	84.17	1	0.4	12.3	78	2.516129032	12	282.2271	59.8738949
1998	4	85.68	1	0.4	12.21	70.65	2.355	12.2	272.709098	57.9239705
1998	5	91.445	1	0.4	11.13	49	1.580645161	12.3	228.729351	47.4895933
1998	6	89.76	1	0.4	11.02	71.6	2.386666667	12.4	257.0525	52.0171952
1998	7	91.31	1	0.4	10.93	75.05	2.420967742	12.3	261.508817	52.5228133
1998	8	88.975	1	0.4	11.075	86.95	2.80483871	12.3	286.161848	57.1120608
1998	9	88.315	1	0.4	10.95	82.6	2.753333333	12.1	289.774601	57.3492389
1998	10	89.52	1	0.4	11.46	86.85	2.801612903	12.2	285.16829	58.0654362
1998	11	90.455	1	0.4	11.035	98.1	3.27	11.9	295.330164	58.5476222
1998	12	91.03	1	0.4	10.89	99.55	3.211290323	11.8	284.649894	56.3049416

Tabla 12 ETP método Turc año 1998. Fuente: Autores.



año	mes	Humedad relativa (%)	Ci	Ki	temperatura media mensual (°c)	brillo solar (h)	n	duracion del dia	Ri	ETP (MM)
2001	1	84.03	1	0.4	10.57	152.4	4.916129032	11.8	364.341102	68.5113093
2001	2	87.625	1	0.37	10.37	102.8	3.671428571	11.9	325.338055	56.7652576
2001	3	93.365	1	0.4	10.71	77.1	2.487096774	12	280.861485	55.1307119
2001	4	87.21	1	0.4	11.13	92.8	3.093333333	12.2	306.853989	60.7846986
2001	5	87.69	1	0.4	11.15	89	2.870967742	12.3	286.019107	57.3095686
2001	6	93.42	1	0.4	10.57	70.5	2.35	12.4	255.478125	50.5108139
2001	7	89.13	1	0.4	10.52	85.55	2.759677419	12.3	276.29128	53.8022613
2001	8	88.92	1	0.4	10.59	88.3	2.848387097	12.3	288.116407	55.9540694
2001	9	90.2	1	0.4	10.635	99.8	3.326666667	12.1	316.28713	60.7836135
2001	10	88.90	1	0.4	11.26	101.45	3.272580645	12.2	306.340205	61.1179087
2001	11	88.84	1	0.4	11.12	81.3	2.71	11.9	270.737025	54.6186175
2001	12	91.29	1	0.4	11.19	83.9	2.706451613	11.8	262.998517	53.479296

Tabla 13 ETP método de Turc año 2001. Fuente: Autores.

año	mes	Humedad relativa (%)	Ci	Ki	temperatura media mensual (°c)	brillo solar (h)	n	duracion del dia	Ri	ETP (MM)
2011	1	86.64	1	0.4	11.11	200.5	6.467741935	11.8	432.10911	82.0351912
2011	2	89.10	1	0.37	11.18	66.2	2.364285714	11.9	265.66259	49.8766184
2011	3	90.95	1	0.4	10.85	58.25	1.879032258	12	252.259438	50.7468456
2011	4	91.12	1	0.4	11.29	47.35	1.578333333	12.2	236.791448	49.251535
2011	5	90.71	1	0.4	11.38	76.4	2.464516129	12.3	267.972834	54.8540813
2011	6	89.90	1	0.4	11.40	75.55	2.518333333	12.4	262.705938	54.0128438
2011	7	90.98	1	0.4	10.92	90.6	2.922580645	12.3	283.400941	56.1842327
2011	8	89.29	1	0.4	11.06	132	4.258064516	12.3	351.38619	68.1401575
2011	9	90.38	1	0.4	11.06	73.8	2.46	12.1	276.209752	55.3636355
2011	10	88.52	1	0.4	11.17	78	2.516129032	12.2	272.33463	55.0321408
2011	11	89.59	1	0.4	11.46	49.15	1.638333333	11.9	223.67337	47.4001656
2011	12	92.14	1	0.4	11.40	65	2.096774194	11.8	236.850847	49.534615

Tabla 14 ETP método de Turc año 2011. Fuente: Autores.

año	mes	Humedad relativa (%)	Ci	Ki	temperatura media mensual (°c)	brillo solar (h)	n	duracion del dia	Ri	ETP (MM)
2018	1	85.10	1	0.4	11.58	92.55	2.985483871	11.8	280.018538	57.5111313
2018	2	82.90	1	0.37	12.025	86.1	3.075	11.9	298.109086	57.3107993
2018	3	83.88	1	0.4	11.985	76.8	2.477419355	12	280.40628	58.6980806
2018	4	86.22	1	0.4	11.61	17	0.566666667	12.2	190.006011	41.8860547
2018	5	86.70	1	0.4	11.77	26.3	0.848387097	12.3	196.217415	43.3018897
2018	6	88.05	1	0.4	11.445	18.4	0.613333333	12.4	180.91	39.9737561
2018	7	86.63	1	0.4	11.44	21.4	0.690322581	12.3	185.977468	40.840881
2018	8	86.20	1	0.4	11.425	82.9	2.674193548	12.3	280.298172	57.1225221
2018	9	85.21	1	0.4	11.835	70.2	2.34	12.1	270.660496	56.568168
2018	10	84.73	1	0.4	11.865	72.8	2.348387097	12.2	264.793948	55.6118398
2018	11	84.72	1	0.4	11.99	82.9	2.763333333	11.9	273.079229	57.4097067
2018	12	83.06	1	0.4	11.78	135.25	4.362903226	11.8	334.039936	67.5726729

Tabla 15 ETP método de Turc año 2018. Fuente: Autores.

Los datos obtenidos por el método de Turc relacionados en las tablas anteriores se calcularon con los siguientes parámetros propios del método:

mes	Ki	No días mes	N		Rtt	
			latitud norte	S	latitud norte	S
1	0.4	31				
2	0.37	28	1	11.8	1	831.25
3	0.4	31	2	11.9	2	876.25
4	0.4	30	3	12	3	910.41
5	0.4	31	4	12.2	4	910
6	0.4	30	5	12.3	5	880.83
7	0.4	31	6	12.4	6	858.75
8	0.4	31	7	12.3	7	865.83
9	0.4	30	8	12.3	8	890.41
10	0.4	31	9	12.1	9	902.5
11	0.4	30	10	12.2	10	884.58
12	0.4	31	11	11.9	11	842.91
			12	11.8	12	816.25

Tabla 16 Parámetros método Turc. Fuente: Autores

5.1.4 CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS, USOS DEL SUELO Y CN POR EL MÉTODO SCS (Soil Conservation Service)

Grupos hidrológicos.

Utilizando el shape de suelos procedente del estudio de suelos de Cundinamarca y su respectivo anexo explicativo de los diferentes perfiles que se encuentran dentro del estudio, se determinó el grupo hidrológico siguiendo las directrices establecidas por el SCS. El resultado se relaciona a continuación en la ilustración y en la tabla

LEYENDA				
PERFIL	CONVENCIÓN	ÁREA (km2)	% ÁREA	GRUPO HIDROLÓGICO
MEFg		11.14	9.63%	D
MGff		34.82	30.09%	A
MGSg		10.58	9.14%	D
MGTd		30.91	26.71%	A
MKcf		0.62	0.54%	D
MLCd		11.68	10.09%	D
MLKd		4.57	3.95%	A
MLSg		9.35	8.08%	D
MLTd		0.04	0.03%	C
MLVF		2.02	1.75%	C
TOTAL		115.73	100%	

Tabla 17 Grupos hidrológicos páramo. Fuente: Autores

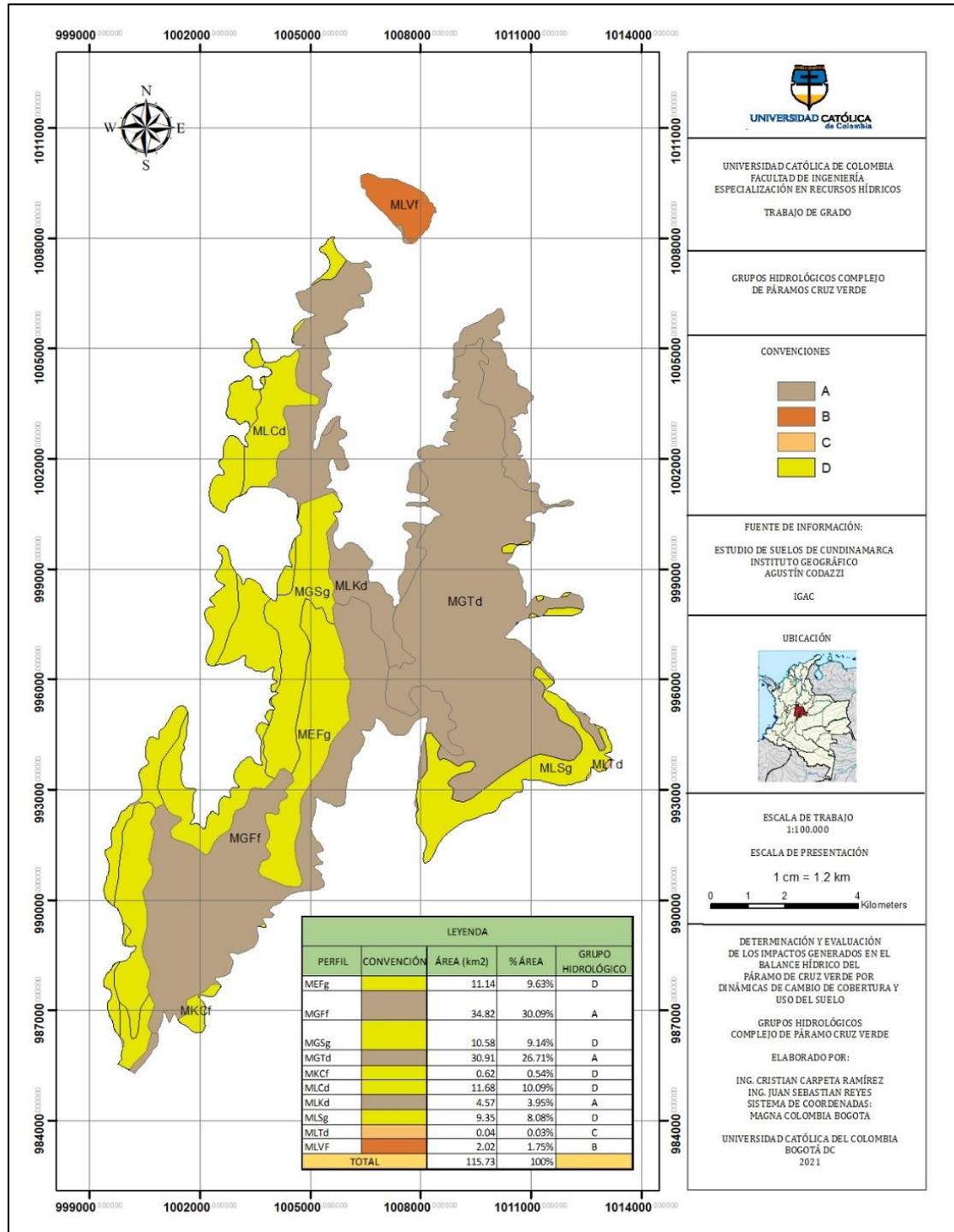


Ilustración 20 Grupos hidrológicos páramo. Fuente: Autores

✚ Determinación número de curva (CN SCS)

Para la obtención del número de curva, se realizó el tratamiento de las imágenes satelitales combinando los diferentes números de banda para así poder obtener una clasificación multitemporal de coberturas. Como se mencionó anteriormente, los periodos a analizar fueron los años 1998, 2001, 2011 y 2018. A continuación, se relacionan las coberturas obtenidas para cada año.

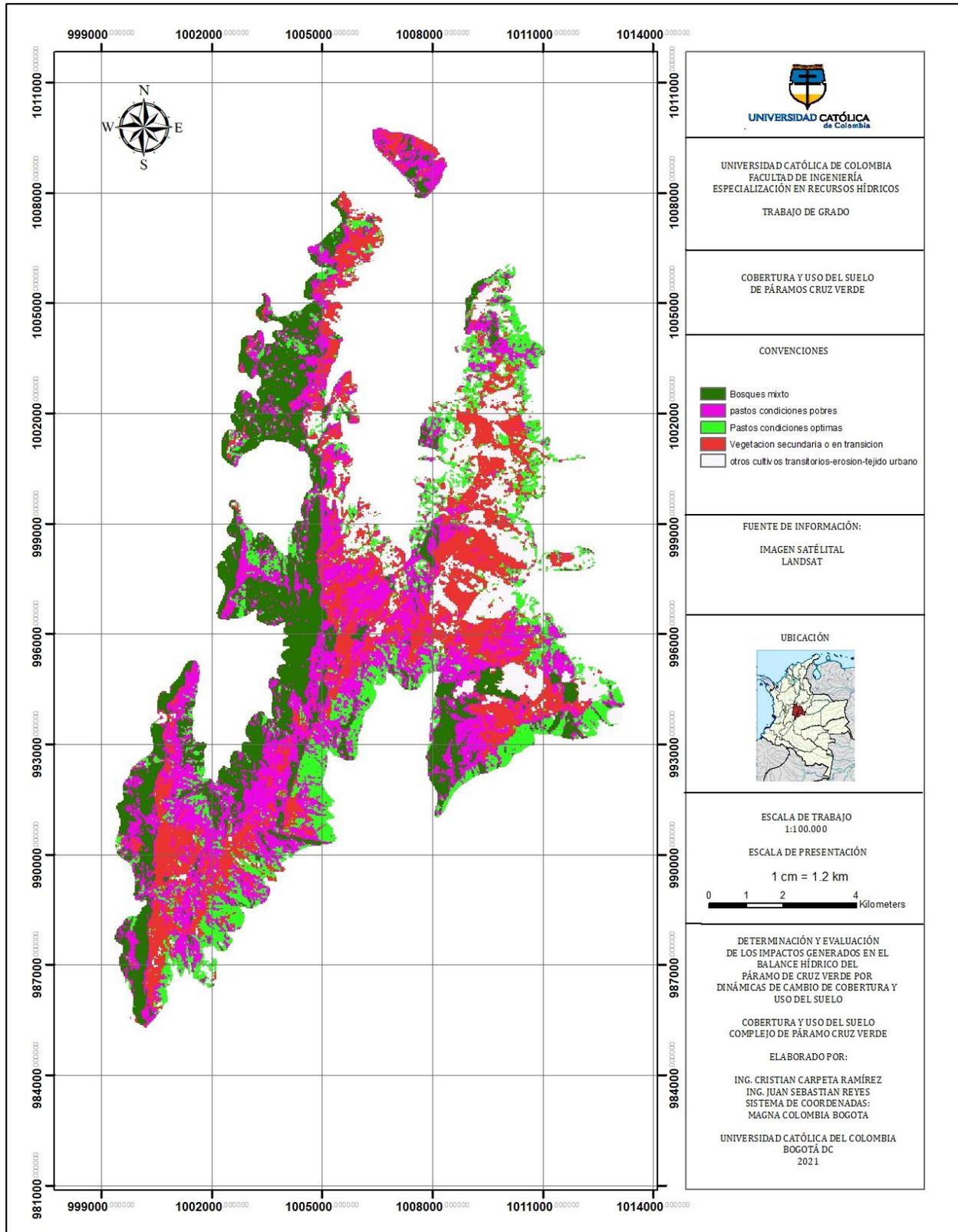


Ilustración 21 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 1998. Fuente: Autores

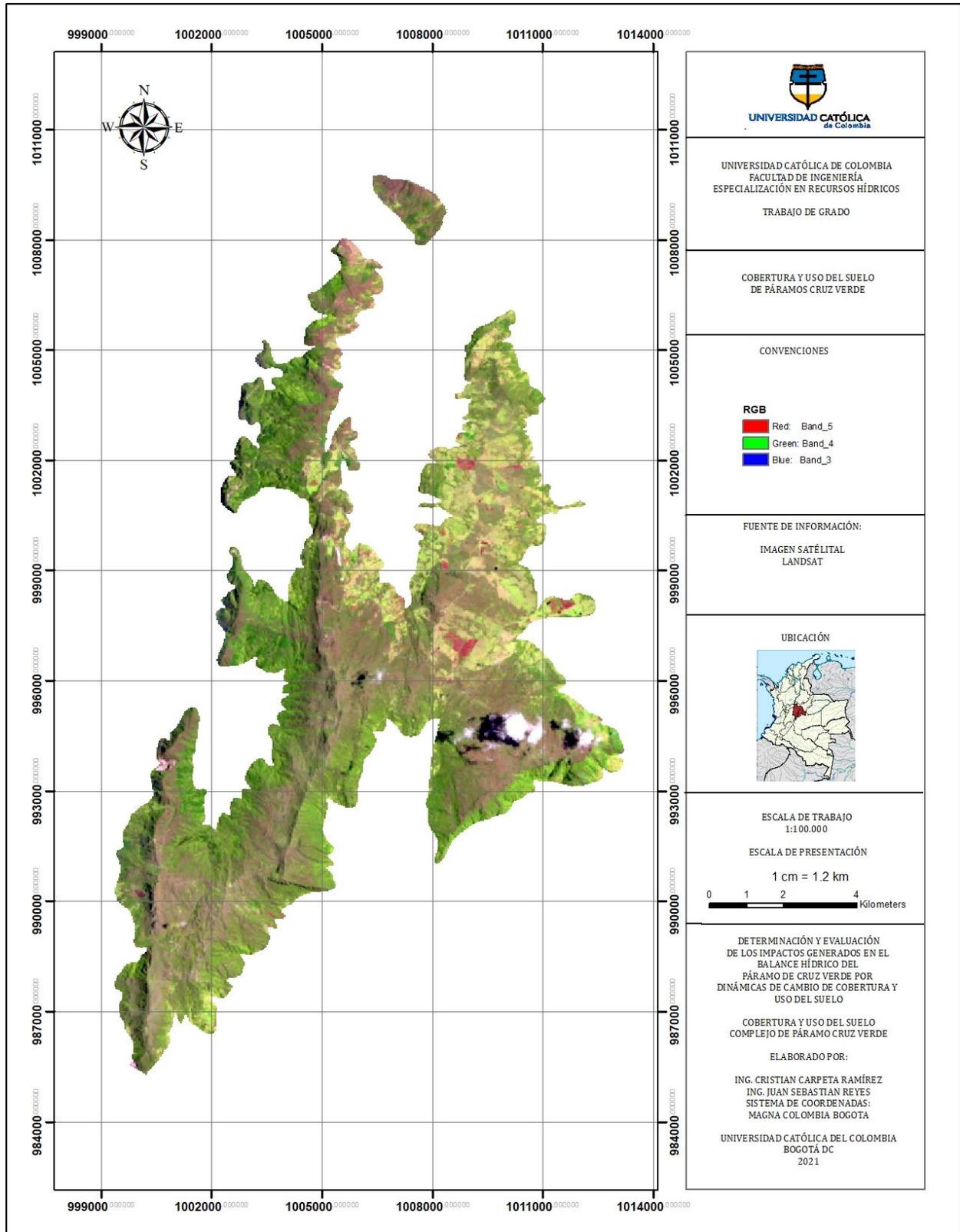


Ilustración 22 Cobertura y uso del suelo, ejemplo banda 5/4/3 año 1998. Fuente: Autores

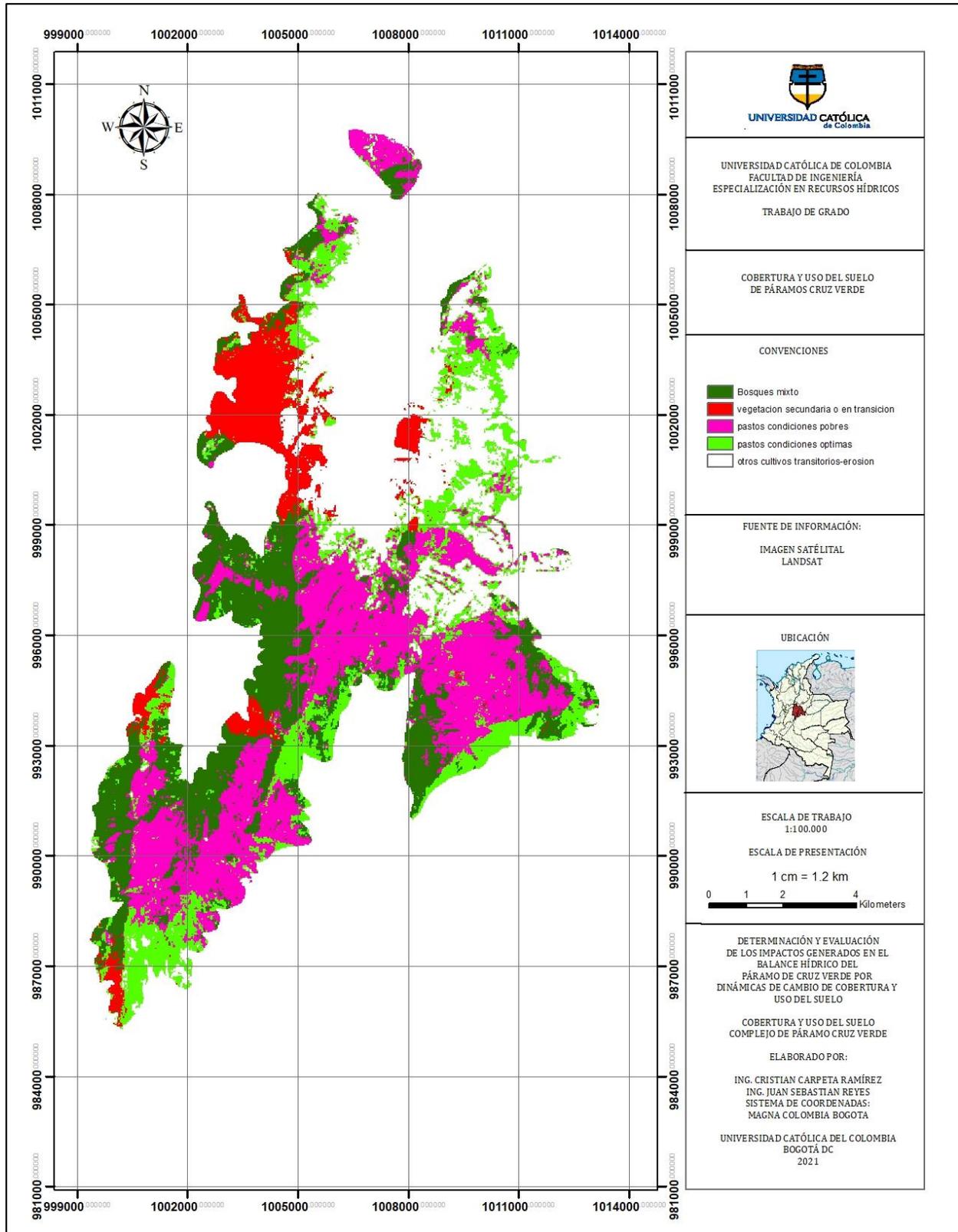


Ilustración 23 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2001. Fuente: Autores

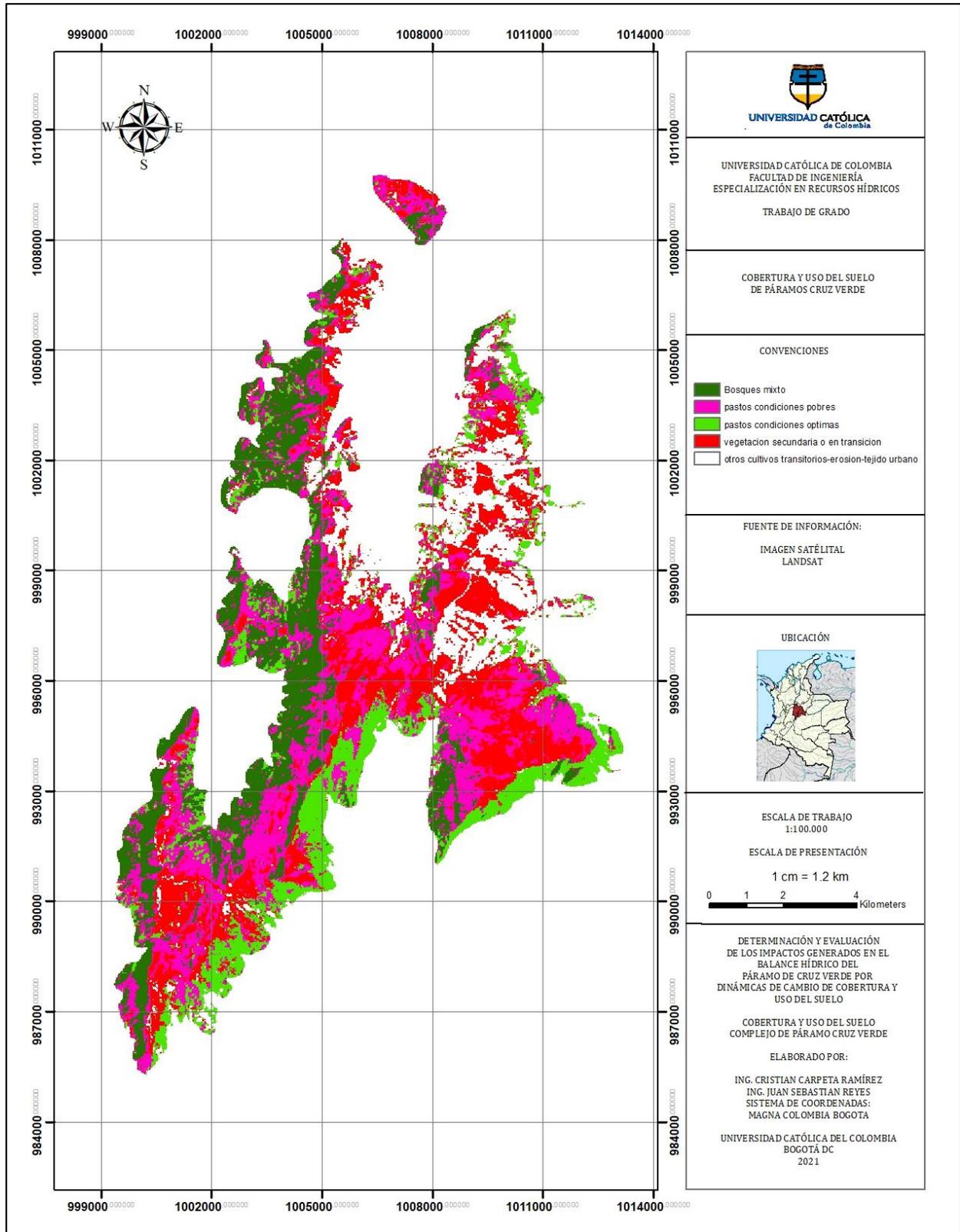


Ilustración 24 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2011. Fuente: Autores

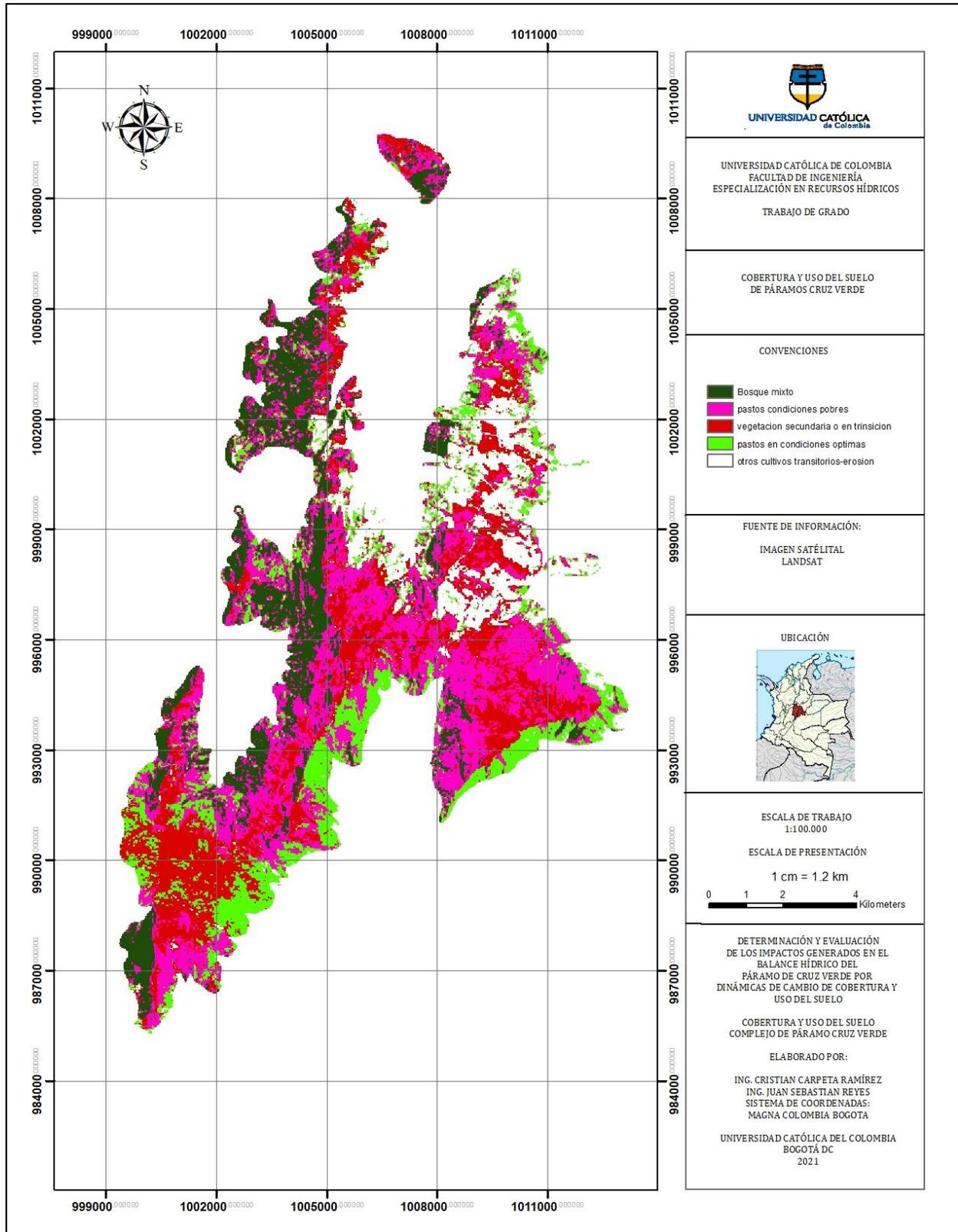


Ilustración 25 Cobertura y uso del suelo por imagen satelital año 2018. Fuente; Autores

Teniendo como punto de partida los mapas ráster obtenidos anteriormente, se realizó la combinación de la capa del grupo hidrológico (de acuerdo a la guía del suelo departamental y el archivo formato shape), de esta manera se generaron 7412 elementos con las siguientes características

CN_PONDERADO98						
ID	DESCRIPCION	TIPO SUELO	GRUPO	AREA (KM2)	VALOR CN	CNi*Ai
1	MLVf	4	C	0.000897	76	0.068172

Ilustración 26 Ejemplo características. Fuente: Autores

Mediante esta metodología se le asignaba a cada elemento un valor de multiplicación de número de curva por el área que ocupaba en el SHAPE.

Cuenca_Suelo			
	FID	CARACTERIS	TipoSuelo
▶	0	Franco arenosos	A
	1	Franco arcillo - arenosos	C
	2	Franco arcillosos	D
	3	Franco limosos	B
	4	Franco arcillo - arenosos	C

Ilustración 27 Ejemplo asignación tipo de suelo. Fuente: Autores

De esta manera, se obtuvieron los resultados del número de curva ponderado para los años en estudio. A continuación, se relacionan los datos obtenidos.

✓ 1998

	GRUPO	AREA (KM2)
	A	51.27
	B	0.08
	C	11.42
	D	53.32
USO SUELO		AREA (KM2)
1	Bosques mixto	24.51
2	pastos condiciones pobres	33.20
3	pastos condiciones optimas	18.14
4	vegetacion secundaria	25.13
5	otros cultivos-erosion-tejido urbano discontinuo (erosion antropica)	15.10

Ilustración 28 Áreas obtenidas para el año 1998. Fuente: Autores

CN PROMEDIO PARAMO:	70.11
ALMACENAMIENTO (mm):	108.27

Ilustración 29 CN ponderado y almacenamiento año 1998. Fuente: Autores

✓ 2001

	GRUPO	AREA (KM2)
	A	51.08
	B	0.08
	C	12.61
	D	52.31
USO SUELO		AREA (KM2)
1	Bosques mixto	22.85
2	pastos condiciones pobres	29.70
3	pastos condiciones optimas	17.22
4	vegetacion secundaria	28.75
5	otros cultivos-erosion-tejido urbano discontinuo (erosion antropica)	17.57

Ilustración 30 Áreas obtenidas para el año 2001. Fuente: Autores

CN PROMEDIO PARAMO:	70.70
ALMACENAMIENTO (mm):	105.28

Ilustración 31 CN ponderado y almacenamiento año 2001. Fuente: Autores

✓ 2011

	GRUPO	AREA (KM2)
	A	41.99
	B	0.09
	C	12.55
	D	61.45
USO SUELO		AREA (KM2)
1	Bosques mixto	35.82
2	vegetacion secundaria	3.97
3	pastos condiciones pobres	35.76
4	pastos condiciones optimas	22.51
5	otros cultivos-erosion-tejido urbano discontinuo (erosion antropica)	18.02

Ilustración 32 Áreas obtenidas para el año 2011. Fuente: Autores

CN PROMEDIO PARAMO:	72.54
ALMACENAMIENTO (mm):	96.17

Ilustración 33 CN ponderado y almacenamiento año 2011. Fuente: Autores

✓ 2018

	GRUPO	AREA (KM2)
	A	52.36
	B	0.08
	C	12.23
	D	51.41
USO SUELO		AREA (KM2)
1	Bosques mixto	20.25
2	pastos condiciones pobres	35.36
3	vegetacion secundaria	27.22
4	pastos condiciones optimas	18.03
5	otros cultivos-erosion-tejido urbano discontinuo (erosion antropica)	15.22

Ilustración 34 Áreas obtenidas para el año 2018. Fuente: Autores.

CN PROMEDIO PARAMO:	71.13
ALMACENAMIENTO (mm):	103.11

Ilustración 35 CN ponderado y almacenamiento año 2018. Fuente: Autores.

Es importante resaltar que el almacenamiento por el método del SCS se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1,000}{CN} - 10$$

De esta manera, se van a comparar los resultados que se obtengan tanto para el cálculo del almacenamiento por el método del SCS y el almacenamiento obtenido mediante el estudio de las propiedades físicas del suelo determinadas por el estudio de suelos de Cundinamarca.

5.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

- ✚ ARGIS DESKTOP 10.5: análisis de coberturas en imágenes satelitales de la zona de estudio.
- ✚ Microsoft Office: Excel para cálculos matemáticos.

5.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

El proyecto no presenta una población específica ya que se basa en un análisis de cambio de cobertura y uso del suelo que relaciona los asentamientos dispersos en un área circundante de paramo, por lo cual se tendrá en cuenta la variación en la ocupación de terrenos para agricultura y demás dinámicas antrópicas que se identifique.

5.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Mediante la determinación de los parámetros del balance hídrico para cada año se espera visualizar una correlación respecto a los cambios de cobertura y uso del suelo de todo el periodo con la oferta hídrica. La precipitación acumulada mensual registrada en las estaciones cercanas al paramo Cruz Verde, cálculo de evapotranspiración potencial mediante ecuación de Turc, y el análisis anual de imágenes en ArcGIS para el cambio de cobertura vegetal, permitirá generar un análisis de correlación para el aumento o la disminución de la oferta hídrica en el periodo de estudio. Se destaca la limitante por el fenómeno de cambio climático y calentamiento global dentro del análisis multianual de los parámetros hidrológicos, así como datos faltantes que existan en las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de los datos obtenidos en la metodología, se procedió a realizar el cálculo de los balances hídricos para los años 1998, 2001, 2011 y 2018. Para llevar a cabo este cálculo, se tomaron los datos de precipitación, evapotranspiración potencial obtenida por el método de Turc, los datos de escorrentía y almacenamientos determinados tanto por el método del SCS como por el método de parámetros físicos y cálculo de lámina de agua disponible. Los balances se determinaron para cada año y para los doce meses con el objetivo de establecer los meses donde se presenta mayor uso de almacenamiento, déficit hídrico, percolación y entre otros parámetros de interés. También con el objetivo de establecer el cambio a nivel multitemporal y evaluar los efectos y consecuencias de estos y determinar las posibles causas que dieron origen a estos cambios.

A continuación, se muestran los balances calculados para cada uno de los años de estudio:

6.1 AÑO 1998

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 1998 - METODO SCS												
108.27													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	17.53	17.40	91.11	44.59	184.25	127.02	132.39	76.36	79.66	109.81	95.85	86.80	1062.77
ETP (mm)	71.21	62.97	59.87	57.92	47.48	52.01	52.52	57.11	57.34	58.06	58.54	56.30	691.33
ESCORRENTIA (mm)	0.16	0.17	27.14	4.01	97.60	51.97	55.99	18.36	20.24	39.56	30.17	24.47	369.86
P-ETP-ESC	-53.84	-45.74	4.10	-17.34	39.17	23.04	23.88	0.89	2.08	12.19	7.14	6.03	1.58
ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	4.10	0.00	39.17	62.21	86.09	86.98	89.06	101.25	108.27	108.27	108.27
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	6.03	6.14
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	4.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.10
DEFICIT	53.84	45.74	0.00	13.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	112.83
ETR	17.37	17.23	59.87	44.68	47.48	52.01	52.52	57.11	57.34	58.06	58.54	56.30	578.50

Tabla 18 Balance hídrico 1998 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 1998 - METODO PROPIEDADES FÍSICAS												
175.91													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	17.53	17.40	91.11	44.59	184.25	127.02	132.39	76.36	79.66	109.81	95.85	86.80	1062.77
ETP (mm)	71.21	62.97	59.87	57.92	47.48	52.01	52.52	57.11	57.34	58.06	58.54	56.30	691.33
ESCORRENTIA (mm)	0.16	0.17	27.14	4.01	97.60	51.97	55.99	18.36	20.24	39.56	30.17	24.47	369.86
P-ETP-ESC	-53.84	-45.74	4.10	-17.34	39.17	23.04	23.88	0.89	2.08	12.19	7.14	6.03	1.58
ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.04	46.92	47.81	49.89	62.08	69.22	75.25	75.25
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	53.84	45.74	0.00	17.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	116.93
ETR	17.37	17.23	59.87	40.58	47.48	52.01	52.52	57.11	57.34	58.06	58.54	56.30	574.40

Tabla 19 Balance hídrico 1998 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores

Como se mencionó anteriormente, se realizó el cálculo del balance hídrico para el año de 1998 haciendo un cambio en el valor del almacenamiento obtenido por el método SCS y por el método de la lámina de agua a partir de las propiedades físicas del suelo. Los resultados fueron los siguientes:

Cómo se puede observar en las tablas 18 y 19, para ambos casos, el mes con mayor déficit es en enero, seguido de los meses de febrero y abril, a partir de junio, se evidencia el cambio a condición de superávit y también un incremento en el almacenamiento, sin embargo, comparando los métodos utilizados, se puede evidenciar que se dispone de un menor almacenamiento para el método de la lámina de agua comparado con el método del SCS. En cuanto a este último, se evidencia percolación de 6.03 mm, condición que no ocurre en el método de la lámina de agua, esto se explica gracias a que los valores de escorrentía se ven influenciados en el cálculo por los valores de almacenamiento del suelo, y estos difieren de acuerdo a las metodologías utilizadas.

En cuanto al método del almacenamiento por el SCS, se obtuvieron los siguientes resultados relacionados en la tabla 20 para el páramo de Cruz Verde. Es importante resaltar que para dar una idea de las condiciones del balance y de los resultados, se realizó una reclasificación a criterio propio en seis niveles de acuerdo con los valores obtenidos, partiendo desde los valores negativos comprendidos como déficit y los valores positivos comprendidos como superávit.

Para el año de 1998, se observa que el 50.43% del área del páramo presenta déficit hídrico, siendo el segundo año con mayor porcentaje de área bajo esta condición de los 4 años que fueron analizados, esto se debe a los bajos regímenes de precipitación, como se evidencia en la ilustración 36 y 37, los mayores valores de este parámetro están determinados por las estaciones que se encuentran al norte del páramo, donde presentan valores superiores a los 1000mm/año de lluvia acumulada, este valor supera en el balance a las salidas generadas por la evapotranspiración y la escorrentía superficial.

LEYENDA			
BALANCE	CONVENCIÓN	ÁREA (km2)	% ÁREA
Superávit Alto		15.96	13.79%
Superávit Medio		17.95	15.51%
Superávit Bajo		23.46	20.27%
Déficit Bajo		24.71	21.35%
Déficit Medio		25.84	22.33%
Déficit Alto		7.81	6.75%
TOTAL		115.73	100.00%

Tabla 20 Áreas balance año 1998 método SCS. Fuente: Autores

Para el método del SCS, se obtuvo el siguiente comportamiento del balance para el páramo de Cruz Verde

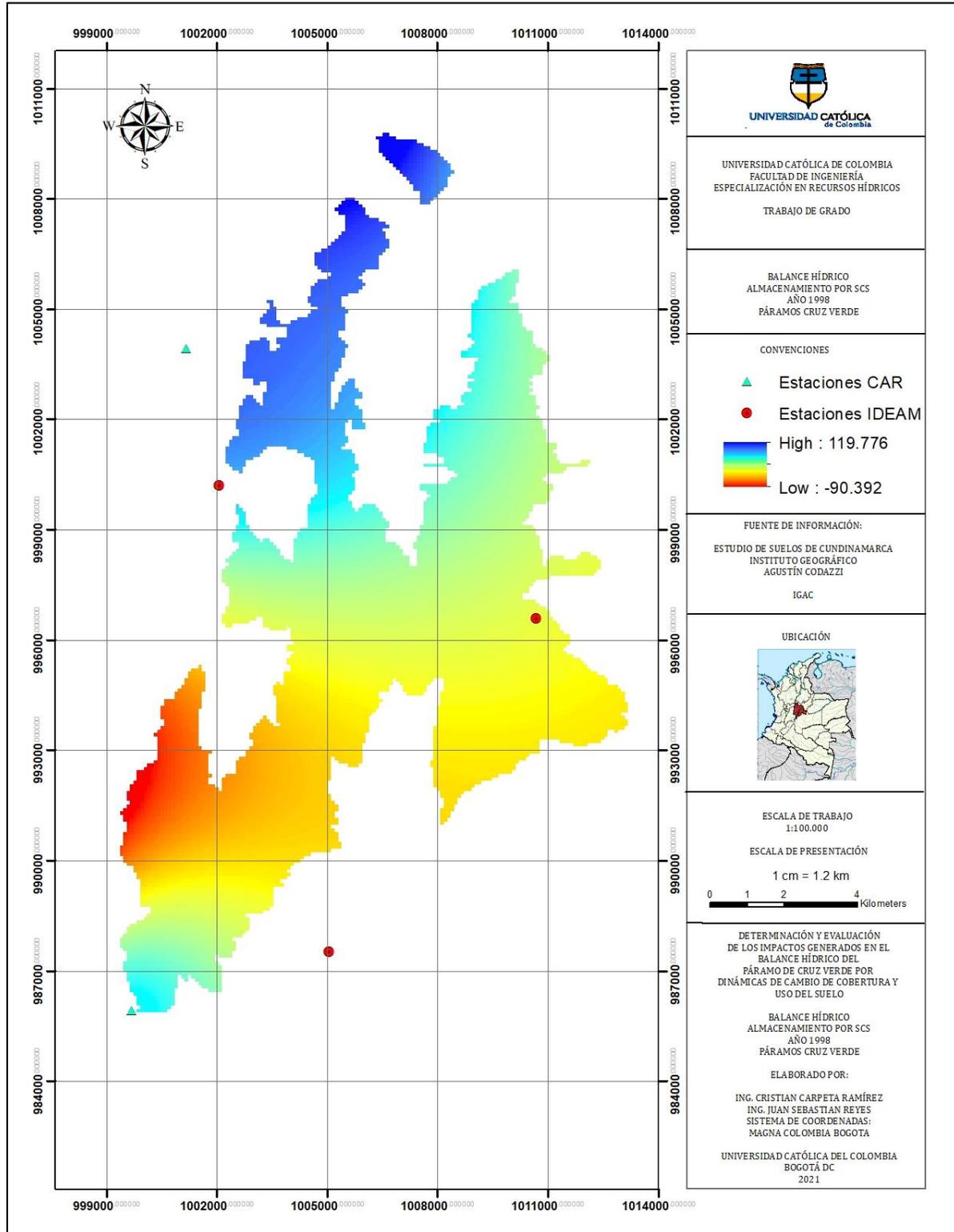
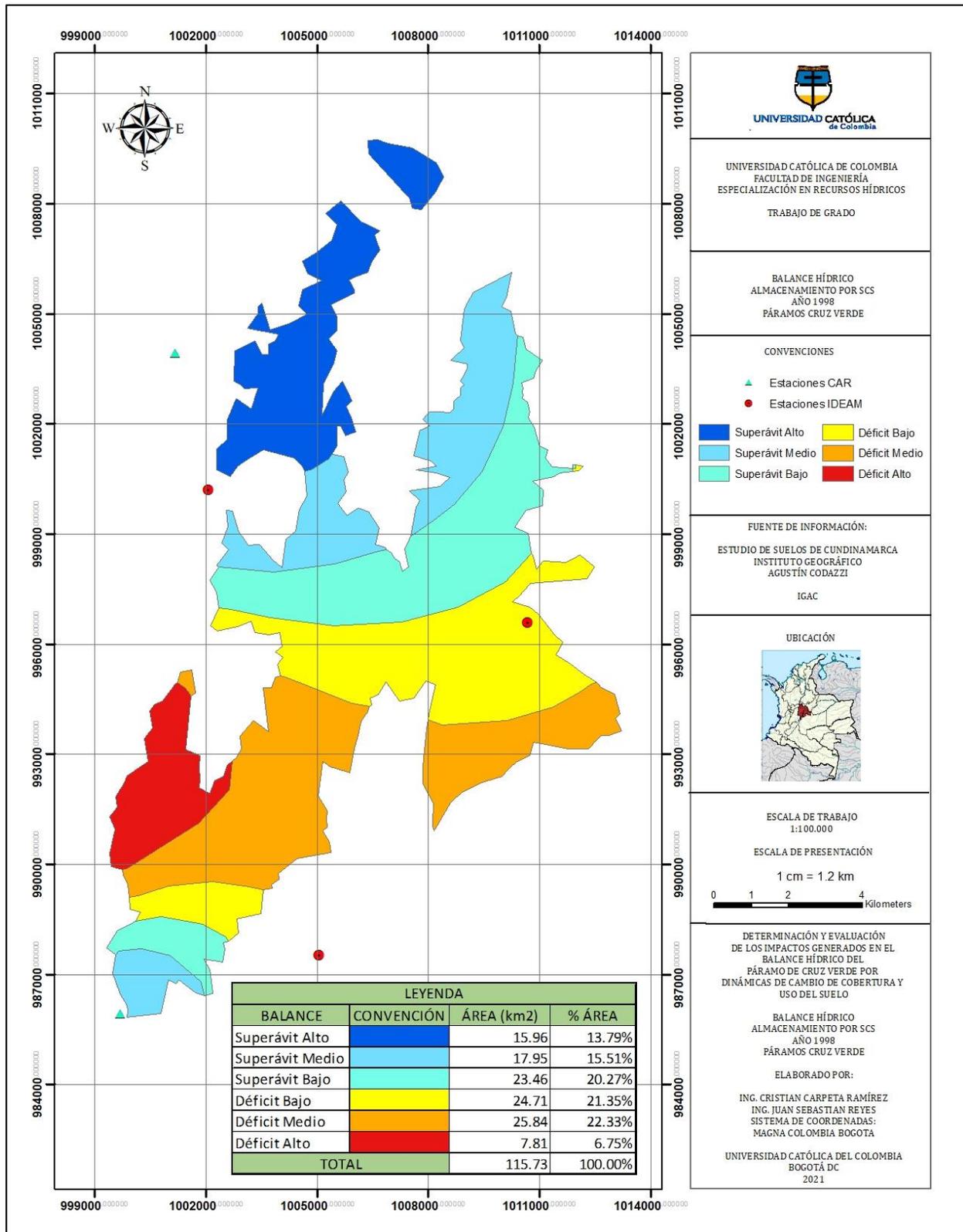


Ilustración 36 Balance hídrico año 1998 método SCS. Fuente: Autores



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

TRABAJO DE GRADO

BALANCE HÍDRICO
ALMACENAMIENTO POR SCS
AÑO 1998
PÁRAMOS CRUZ VERDE

CONVENIONES

- Estaciones CAR
- Estaciones IDEAM

Superávit Alto Déficit Bajo
 Superávit Medio Déficit Medio
 Superávit Bajo Déficit Alto

FUENTE DE INFORMACIÓN:

ESTUDIO DE SUELOS DE CUNDINAMARCA
INSTITUTO GEOGRÁFICO
AGUSTÍN CODAZZI

IGAC

UBICACIÓN

ESCALA DE TRABAJO
1:100.000

ESCALA DE PRESENTACIÓN
1 cm = 1.2 km

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS GENERADOS EN EL BALANCE HÍDRICO DEL PÁRAMO DE CRUZ VERDE POR DINÁMICAS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO

BALANCE HÍDRICO
ALMACENAMIENTO POR SCS
AÑO 1998
PÁRAMOS CRUZ VERDE

ELABORADO POR:

ING. CRISTIAN CARPETA RAMÍREZ
ING. JUAN SEBASTIAN REYES
SISTEMA DE COORDENADAS:
MAGNA COLOMBIA BOGOTÁ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL COLOMBIA
BOGOTÁ DC
2021

Ilustración 37 Mapa balance hídrico año 1998. Fuente: Autores

6.2 AÑO 2001

Se realizó el cálculo del balance hídrico para el año 2001 haciendo un cambio en el valor del almacenamiento obtenido por el método SCS y por el método de la lámina de agua a partir de las propiedades físicas del suelo. Los resultados fueron los siguientes:

ALMACENAMIENTO (mm)	105.28					BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2001 - METODO SCS							
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	18.82	91.22	77.43	42.97	69.41	51.98	46.46	40.86	49.18	67.54	103.36	71.40	730.63
ETP (mm)	68.51	56.77	55.13	60.78	57.31	50.51	53.80	55.95	60.78	61.12	54.62	53.48	688.77
ESCORRENTIA (mm)	0.05	28.06	19.66	3.78	15.22	7.02	4.94	3.14	5.93	14.24	36.11	16.29	154.42
P-ETP-ESC	-49.74	6.39	2.64	-21.59	-3.12	-5.55	-12.28	-18.23	-17.53	-7.82	12.63	1.63	-112.56
ALMACENAMIENTO	0.00	6.39	9.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.63	14.26	14.26
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	9.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.03
DEFICIT	49.74	0.00	0.00	12.56	3.12	5.55	12.28	18.23	17.53	7.82	0.00	0.00	126.82
ETR	18.77	56.77	55.13	48.23	54.19	44.96	41.52	37.72	43.25	53.30	54.62	53.48	561.94

Tabla 21 Balance hídrico 2001 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores

ALMACENAMIENTO (mm)	175.91					BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2001 - METODO PROPIEDADES FÍSICAS							
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	18.82	91.22	77.43	42.97	69.41	51.98	46.46	40.86	49.18	67.54	103.36	71.40	730.63
ETP (mm)	68.51	56.77	55.13	60.78	57.31	50.51	53.80	55.95	60.78	61.12	54.62	53.48	688.77
ESCORRENTIA (mm)	0.05	28.06	19.66	3.78	15.22	7.02	4.94	3.14	5.93	14.24	36.11	16.29	154.42
P-ETP-ESC	-49.74	6.39	2.64	-21.59	-3.12	-5.55	-12.28	-18.23	-17.53	-7.82	12.63	1.63	-112.56
ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	2.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.63	1.63
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	2.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.64
DEFICIT	49.74	0.00	0.00	18.95	3.12	5.55	12.28	18.23	17.53	7.82	0.00	0.00	133.22
ETR	18.77	56.77	55.13	41.83	54.19	44.96	41.52	37.72	43.25	53.30	54.62	53.48	555.55

Tabla 22 Balance hídrico 2001 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores

Para el año 2001 al igual que para el año 1998 se presenta un déficit preliminar y más alto para el mes de enero, seguido por los meses de abril y septiembre, sin embargo, es importante resaltar que para este año el parámetro de la precipitación disminuyó en un 31.26% en comparación al año 1998, por otra parte el parámetro de la evapotranspiración potencial también disminuyó pero en menor medida, mientras que la escorrentía también decreció a una tasa del 58.2%, trayendo consigo cambios significativos en los valores obtenidos para el balance del año en estudio.

También es importante resaltar que para este año no se presentó percolación, por ende, no existió recarga de acuíferos según los datos obtenidos en las tablas 21 y 22. Así mismo, el uso del almacenamiento fue muy bajo en comparación al año 1998. Al igual que para el año anteriormente estudiado, se realizó una reclasificación a criterio propio en seis niveles de acuerdo con los valores obtenidos, partiendo desde los valores negativos comprendidos como déficit y los valores positivos comprendidos como superávit. Los resultados se relacionan a continuación:

Observando la tabla 23, se evidencia que el 63.99% del área de páramo se encuentra en déficit hídrico, siendo este año el que mayor presenta este comportamiento, esto se debe a que este año fue el que presentó los menores registros de precipitación como se explicó anteriormente, también se debe a que la condición de almacenamiento tuvo una baja de aproximadamente 3mm.

Las salidas cartográficas del balance realizado para el año 2001 se muestra en las ilustraciones 38 y 39. En donde se puede evidenciar que, dentro de la unidad de páramo de estudio, las áreas que más porcentaje ocupan son aquella con un superávit y un déficit de nivel medio.

LEYENDA			
BALANCE	CONVENCIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Superávit Alto		6.88	5.94%
Superávit Medio		32.67	28.23%
Superávit Bajo		2.13	1.84%
Déficit Bajo		20.21	17.46%
Déficit Medio		22.57	19.50%
Déficit Alto		31.27	27.02%
TOTAL		115.73	100.00%

Tabla 23 Áreas balance año 2001 método SCS. Fuente: Autores

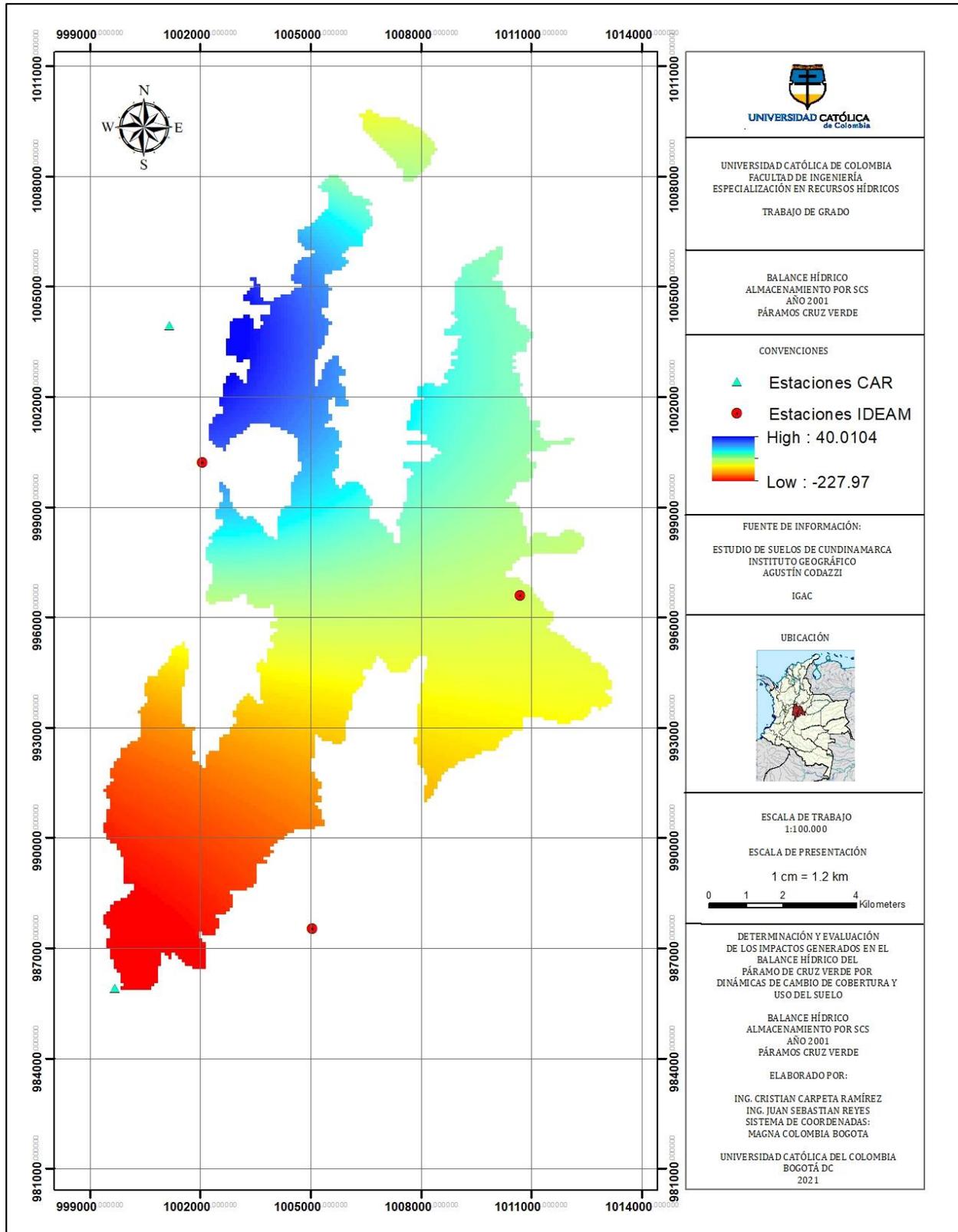


Ilustración 38 Balance hídrico año 2001 método SCS. Fuente: Autores

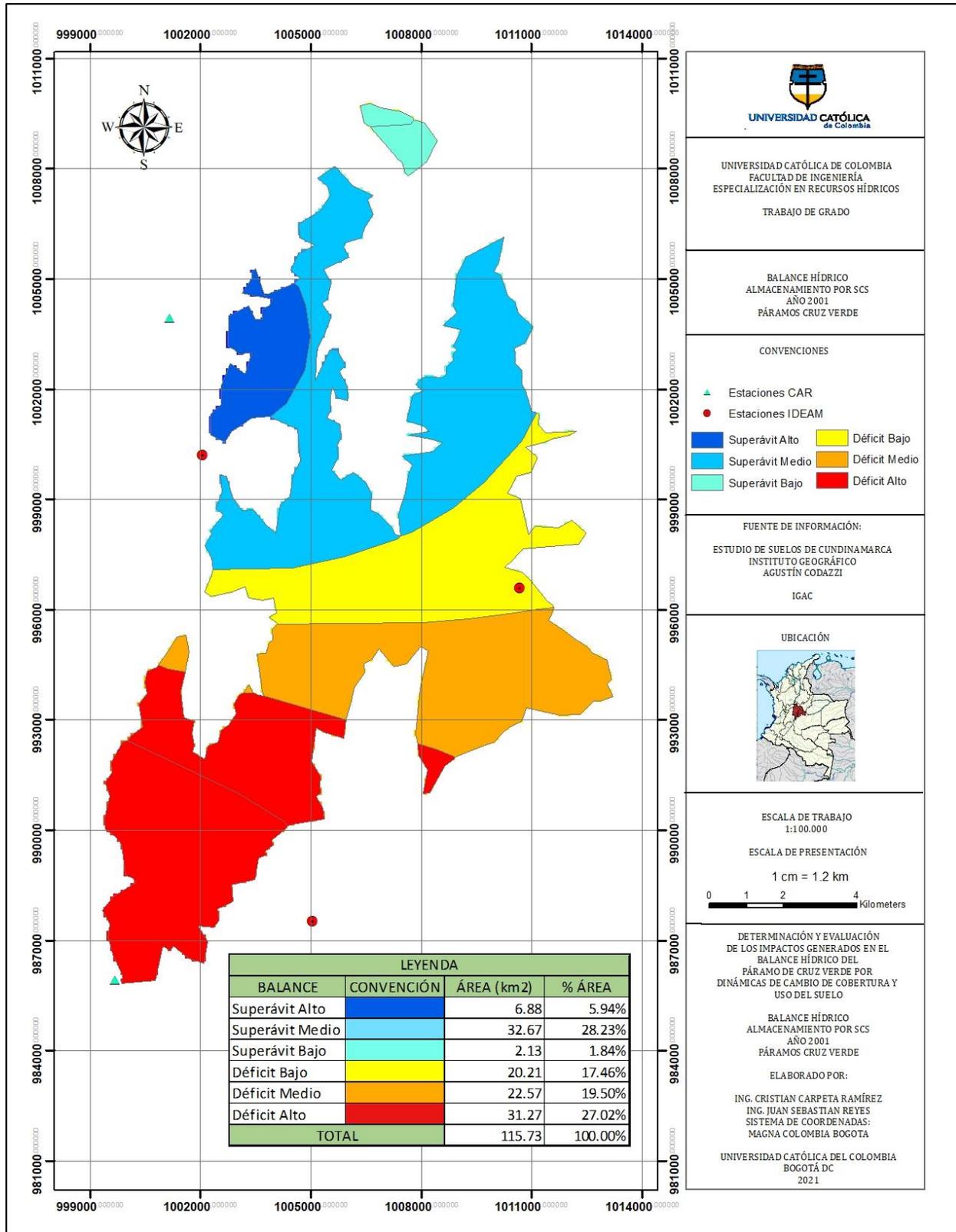


Ilustración 39 Mapa balance hídrico año 2001. Fuente: Autores

6.3 AÑO 2011

Se realizó el cálculo del balance hídrico para el año 2011 haciendo un cambio en el valor del almacenamiento obtenido por el método SCS y por el método de la lámina de agua a partir de las propiedades físicas del suelo. Los resultados fueron los siguientes:

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2011 - METODO SCS												
96.17													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	43.44	103.50	174.65	233.07	189.98	87.02	94.05	46.03	67.62	177.63	269.40	112.45	1598.84
ETP (mm)	82.04	49.88	50.75	49.25	54.85	54.01	56.18	68.14	55.36	55.03	47.40	49.53	672.43
ESCORRENTIA (mm)	4.87	39.35	96.01	147.50	109.23	28.03	32.74	5.84	16.20	98.56	180.70	45.88	804.89
P-ETP-ESC	-43.46	14.27	27.90	36.32	25.90	4.98	5.13	-27.95	-3.94	24.04	41.30	17.03	121.52
ALMACENAMIENTO	0.00	14.27	42.17	78.48	96.17	96.17	96.17	68.22	64.28	88.32	96.17	96.17	96.17
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	8.21	4.98	5.13	0.00	0.00	0.00	33.45	17.03	68.81
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.95	3.94	0.00	0.00	0.00	31.89
DEFICIT	43.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.46
ETR	38.57	49.88	50.75	49.25	54.85	54.01	56.18	68.14	55.36	55.03	47.40	49.53	628.97

Tabla 24 Balance hídrico 2011 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2011 - METODO SCS												
175.91													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	43.44	103.50	174.65	233.07	189.98	87.02	94.05	46.03	67.62	177.63	269.40	112.45	1598.84
ETP (mm)	82.04	49.88	50.75	49.25	54.85	54.01	56.18	68.14	55.36	55.03	47.40	49.53	672.43
ESCORRENTIA (mm)	0.37	19.11	61.68	104.76	72.46	11.80	14.76	0.63	5.05	63.74	133.76	23.58	511.69
P-ETP-ESC	-38.97	34.51	62.23	79.06	62.67	21.21	23.11	-22.74	7.21	58.86	88.24	39.33	414.71
ALMACENAMIENTO	0.00	34.51	96.74	175.80	175.91	175.91	175.91	153.17	7.21	66.07	154.31	175.91	175.91
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	62.55	21.21	23.11	0.00	0.00	0.00	0.00	17.73	124.60
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.74	0.00	0.00	0.00	0.00	22.74
DEFICIT	38.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.97
ETR	43.07	49.88	50.75	49.25	54.85	54.01	56.18	68.14	55.36	55.03	47.40	49.53	633.47

Tabla 25 Balance hídrico 2011 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores

Cómo se ha visto a lo largo del trabajo, el mes de enero representa un déficit para los balances realizados debido a la baja intensidad de las precipitaciones efectivas en el mes. A comparación de los años anteriores, este año presenta en la mayoría de sus meses condición de superávit debido al incremento de las lluvias en un 54.3% en comparación al año 1998 y de un 33.5% al año 2001. El cuánto al parámetro de la evapotranspiración, este mantuvo una tasa de cambio muy baja en comparación a los años anteriormente estudiados.

Este año en particular presenta el mayor aporte de percolación con un total de 68.81 mm para la recarga de acuíferos para el método SCS y de 124.60 mm para el método de la lámina de agua disponible por propiedades físicas del suelo, por esto mismo, se evidencia que en varios meses del año se llegó a la capacidad de campo del suelo en el páramo en ambos métodos de cálculo. El parámetro de escorrentía presentó un crecimiento elevado en comparación a los años anteriores, pasando de datos superiores a los 150 mm a datos calculados con cifras mayores a 800 mm para el método SCS y de 500 mm para el método de lámina de agua disponible.

El 96.96% de la superficie del páramo delimitada y estudiada presenta superávit de recurso hídrico o cual representa un área de 112.21 Km². Esta condición máxima de superávit dada en comparación a los otros años estudiados se debe principalmente a que durante en transcurso de los años 2010/2011 se presentó el fenómeno de la niña, cuyo principal efecto generado fue un aumento de las precipitaciones. Así mismo, la disminución en la capacidad de almacenamiento del suelo influyó directamente en la escorrentía, disminuyendo sus valores permitiendo que el régimen de precipitación sea mucho mayor a la hora de hacer la relación de entradas y salidas del balance

Se realizó una reclasificación a criterio propio de acuerdo con los valores obtenidos, partiendo desde los valores negativos comprendidos como déficit y los valores positivos comprendidos como superávit. Los resultados se relacionan a continuación:

LEYENDA			
BALANCE	CONVENCIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Superávit Alto		66.82	57.74%
Superávit Medio		24.85	21.47%
Superávit Bajo		20.54	17.75%
Déficit Bajo		3.52	3.04%
TOTAL		115.73	100.00%

Tabla 26 Áreas balance año 2011 método SCS. Fuente: Autores

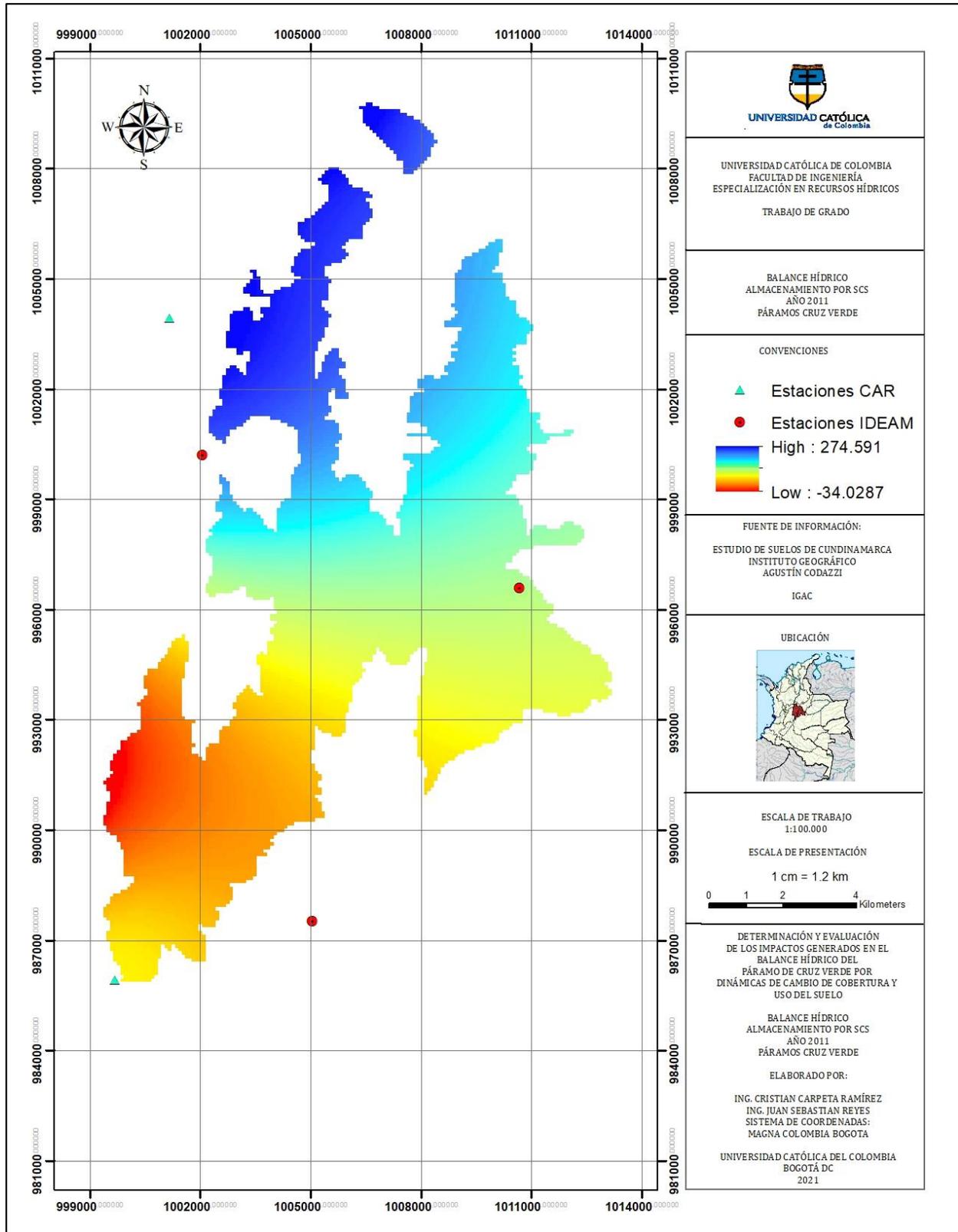


Ilustración 40 Balance hídrico año 2011 método SCS. Fuente: Autores

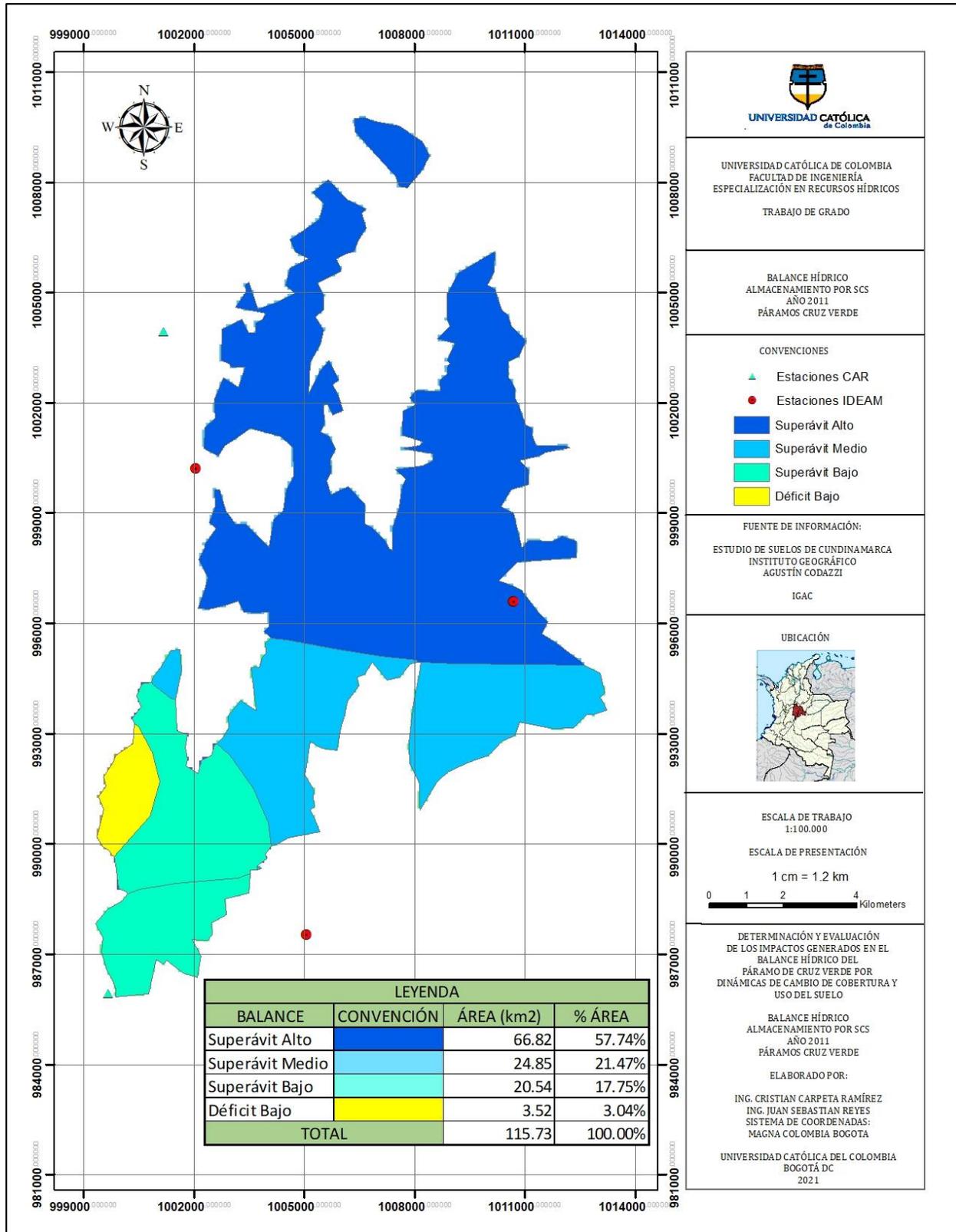


Ilustración 41 Mapa balance hídrico año 2011. Fuente: Autores

6.4 AÑO 2018

Se realizó el cálculo del balance hídrico para el año 2018 haciendo un cambio en el valor del almacenamiento obtenido por el método SCS y por el método de la lámina de agua a partir de las propiedades físicas del suelo. Los resultados fueron los siguientes

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2018 - METODO SCS												
103.11													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	37.24	32.03	130.78	217.57	158.99	136.56	130.51	98.90	55.25	71.79	61.45	21.94	1153.01
ETP (mm)	57.51	57.31	58.70	41.89	43.30	39.97	40.84	57.12	56.57	55.61	57.41	67.57	633.81
ESCORRENTIA (mm)	2.31	1.14	56.90	129.27	79.29	61.36	56.69	33.78	8.71	16.97	11.58	0.02	458.01
P-ETP-ESC	-22.58	-26.42	15.18	46.41	36.40	35.22	32.98	8.00	-10.02	-0.79	-7.54	-45.65	61.19
ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	15.18	61.60	98.00	103.11	103.11	103.11	93.09	92.29	84.75	39.10	39.10
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.11	32.98	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.08
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.02	0.79	7.54	45.65	64.01
DEFICIT	22.58	26.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.99
ETR	34.93	30.89	58.70	41.89	43.30	39.97	40.84	57.12	56.57	55.61	57.41	67.57	584.81

Tabla 28 Balance hídrico 2018 almacenamiento método SCS. Fuente: Autores

ALMACENAMIENTO (mm)	BALANCE HIDRICO PARAMO CRUZ VERDE 2018 - METODO SCS												
175.91													
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT	NOV	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION (mm)	37.24	32.03	130.78	217.57	158.99	136.56	130.51	98.90	55.25	71.79	61.45	21.94	1153.01
ETP (mm)	57.51	57.31	58.70	41.89	43.30	39.97	40.84	57.12	56.57	55.61	57.41	67.57	633.81
ESCORRENTIA (mm)	0.02	0.06	33.66	92.84	51.14	37.06	33.50	16.94	2.05	6.31	3.41	1.08	278.09
P-ETP-ESC	-20.29	-25.34	38.42	82.84	64.55	59.52	56.17	24.83	-3.37	9.87	0.63	-46.71	241.11
ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	38.42	121.26	175.91	175.91	175.91	175.91	172.54	182.41	175.91	129.20	129.20
PERCOLACION (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.90	59.52	56.17	24.83	0.00	0.00	7.13	0.00	157.55
UTILIZACION ALMACENAMIENTO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.37	0.00	0.00	46.71	50.08
DEFICIT	20.29	25.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.63
ETR	37.22	31.97	58.70	41.89	43.30	39.97	40.84	57.12	56.57	55.61	57.41	67.57	588.17

Tabla 27 Balance hídrico 2018 almacenamiento método lámina de agua. Fuente: Autores

Como se pudo observar a lo largo de los resultados, el mes de enero es un mes de déficit para el páramo de Cruz Verde debido a la baja intensidad de la lluvia y el alto nivel de la evapotranspiración potencial.

En el mes de febrero ocurre lo mismo como se puede evidenciar en las tablas 27 y 28, donde se muestran los resultados para los métodos de cálculo del almacenamiento realizados. Sin embargo, se observa que, durante este año, según los datos reportados, existe percolación para la recarga de acuíferos durante los meses de mayo a agosto con valores que oscilan los 71 mm para el método SCS y los 157mm para el método de la lámina de agua, a partir de esto se llega a capacidad de campo para el complejo del páramo de Cruz Verde.

Para este año de estudio, el 49.35% del área del páramo presenta un superávit medio, seguido por un 40.68% de superávit bajo, a comparación de los años anteriormente analizados, el año 2018 presenta el menor porcentaje de déficit bajo con tan solo un 0.74% de área que equivale a 0.86 Km², condición que se evidencia en la parte norte del páramo. Se realizó una reclasificación a criterio propio de acuerdo con los valores obtenidos, partiendo desde los valores negativos comprendidos como déficit y los valores positivos comprendidos como superávit. Los resultados se relacionan a continuación

LEYENDA			
BALANCE	CONVENCIÓN	ÁREA (km2)	% ÁREA
Superávit Alto		10.68	9.23%
Superávit Medio		57.11	49.35%
Superávit Bajo		47.08	40.68%
Déficit Bajo		0.86	0.74%
TOTAL		115.73	100.00%

Tabla 29 Áreas balance año 2018 método SCS. Fuente: Autores

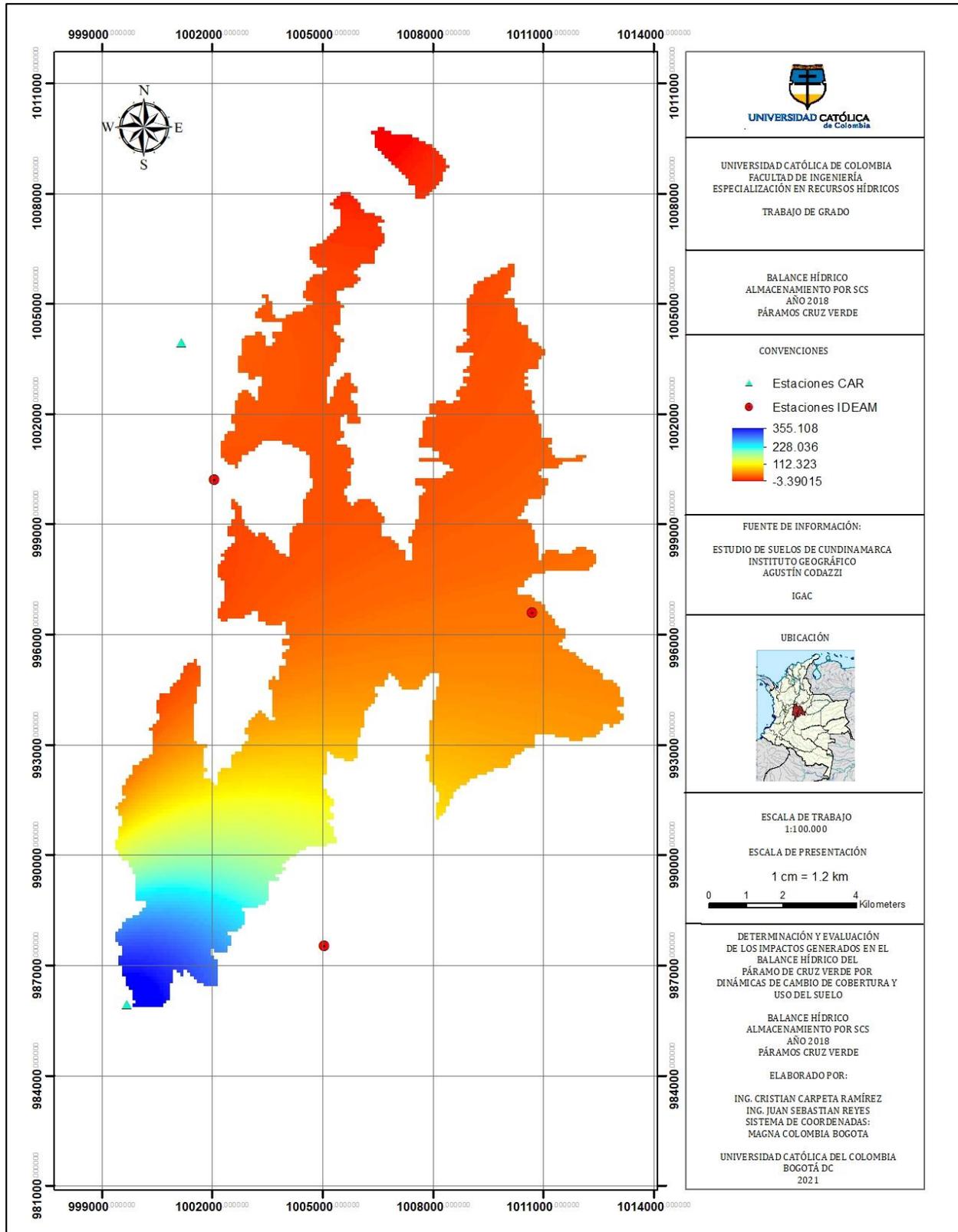


Ilustración 42 Balance hídrico año 2018 método SCS. Fuente: Autores

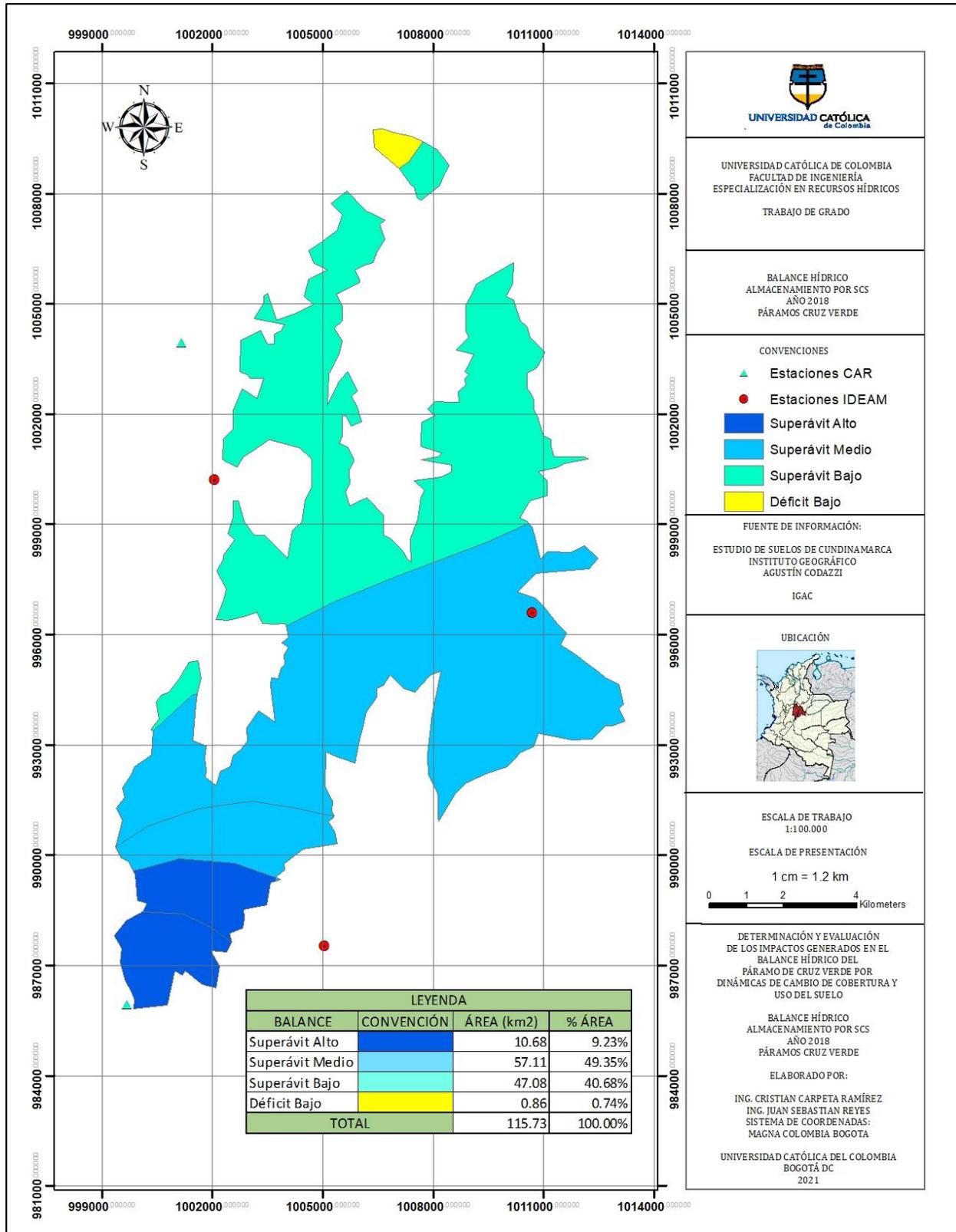


Ilustración 43 Mapa balance hídrico año 2018. Fuente: Autores

En el periodo de 1998-2018 se identificó una pérdida en el almacenamiento de cerca del 5%, siendo el periodo de 1998 a 2011 el que presentó la mayor tasa de pérdida de almacenamiento a razón de 1 mm por año aproximadamente, y un sostenimiento en el área de intervención urbana y erosión por cultivos de entre 15 y 18 km². el área de bosque (entre estos frailejones) presento una pérdida de cerca de 4 km². La evapotranspiración potencial varía entre los 600 y 700 mm para el páramo Cruz Verde.

6.5 CAUDALES

COMPARACION DE CAUDALES BALANCE HIDRICO VS ESTACION LLANO LARGO							
AÑO	MES	DATOS BALANCE HIDRICO MULTITEMPORAL				DATOS IDEAM ESTACION LLANO LARGO	
		ESCORRENTIA (mm)	CUENCA	AREA CUENCA (m ²)	CAUDAL (m ³ /s)	CAUDAL (m ³ /S)	CAPACIDAD DE CAMPO
1998	MARZO	27.14	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.03126895	0	SI
1998	ABRIL	4.01	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.004774064	0	NO
1998	MAYO	97.6	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.112448398	0.2	SI
1998	JUNIO	51.97	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.06187235	0.2	SI
1998	JULIO	55.99	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.064508052	0.2	SI
1998	AGOSTO	18.36	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.021153203	0.1	SI
1998	SEPTIEMBRE	20.24	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.024096524	0	SI
1998	OCTUBRE	39.56	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.04557847	0	SI
1998	NOVIEMBRE	30.17	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO	3085879	0.035918584	0	SI



			HASTA ESTACION LLANO LARGO				
1998	DICIEMBRE	24.47	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.028192749	0	SI
2001	MARZO	19.66	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.022650979	0.022	SI
2001	ABRIL	3.78	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.00450024	0.013	NO
2001	MAYO	15.22	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.017535498	0.018	NO
2001	JUNIO	7.02	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.008357589	0.031	NO
2001	JULIO	4.94	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.005691548	0.058	NO
2001	AGOSTO	3.14	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.003617705	0.208	NO
2001	SEPTIEMBRE	5.93	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.007059901	0.17	NO
2001	OCTUBRE	14.24	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.016406406	0.123	NO
2001	NOVIEMBRE	36.11	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.04299039	0.105	SI
2001	DICIEMBRE	16.29	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.018768283	0.094	SI
2011	MARZO	96.01	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.110616503	0.104	SI



2011	ABRIL	147.5	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.175604611	0.118	SI
2011	MAYO	109.23	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.125847731	0.121	SI
2011	JUNIO	28.03	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.033370829	0.089	SI
2011	JULIO	32.74	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.037720907	0.085	SI
2011	AGOSTO	5.84	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.00672847	0.072	SI
2011	SEPTIEMBRE	16.2	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.019286744	0.052	SI
2011	OCTUBRE	98.56	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.113554448	0.055	SI
2011	NOVIEMBRE	180.7	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.215130531	0.119	SI
2011	DICIEMBRE	45.88	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.052859964	0.07	SI
2018	MARZO	56.9	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.065556495	0.055	SI
2018	ABRIL	129.27	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.153901072	0.112	SI
2018	MAYO	79.29	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.091352802	0.149	SI
2018	JUNIO	61.36	SUB-CUENCA PALMAR- BRAZO HASTA ESTACION LLANO LARGO	3085879	0.073051518	0.136	SI

Se realizó análisis de caudales reales de la estación LLANO LARGO respecto al balance hídrico obtenido para el periodo de estudio, donde se obtuvo las siguientes graficas:

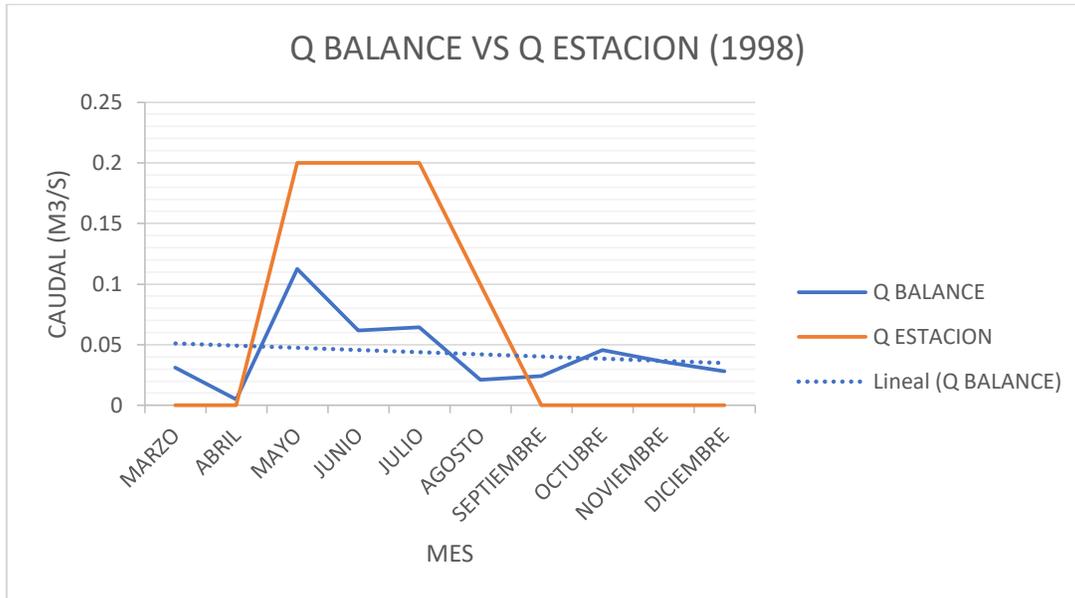


Ilustración 44 Comparación caudales medidos 1998

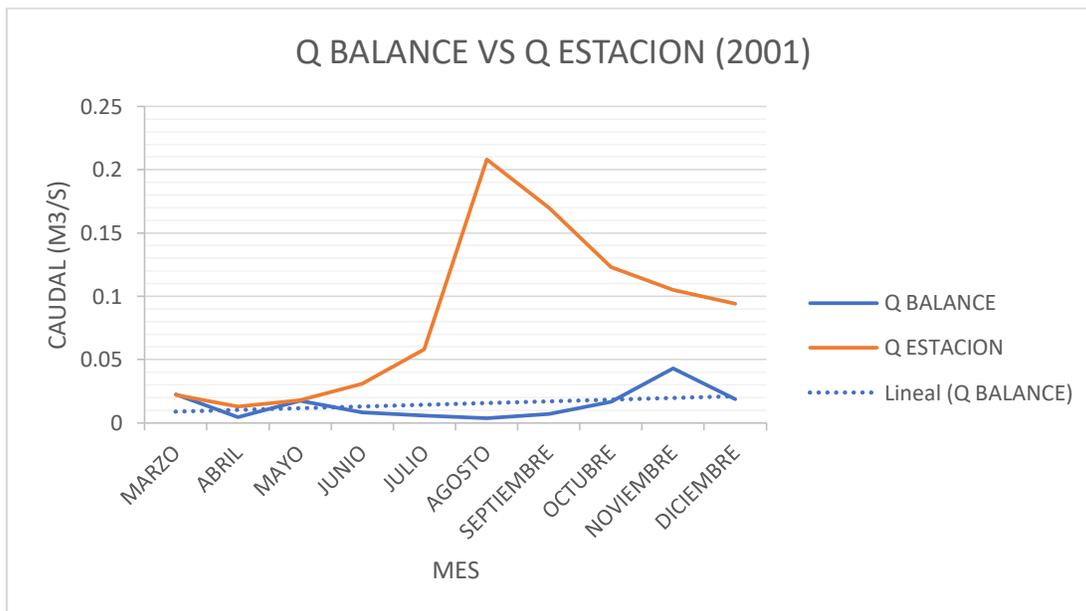


Ilustración 45 Comparación caudales medidos 2001

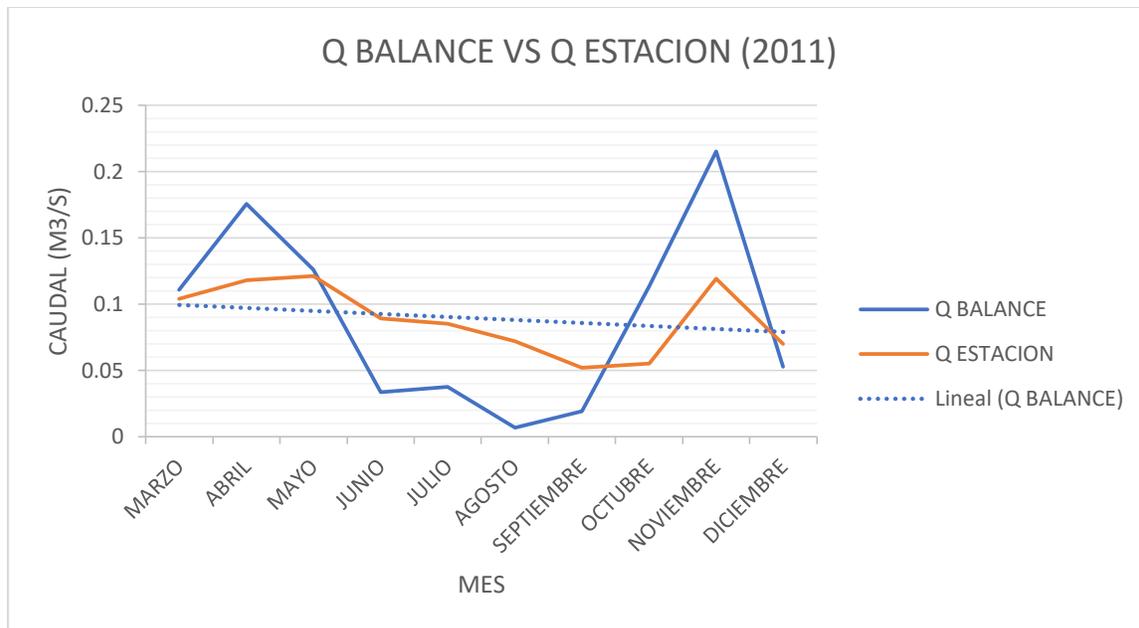


Ilustración 46 Comparación caudales medido 2011

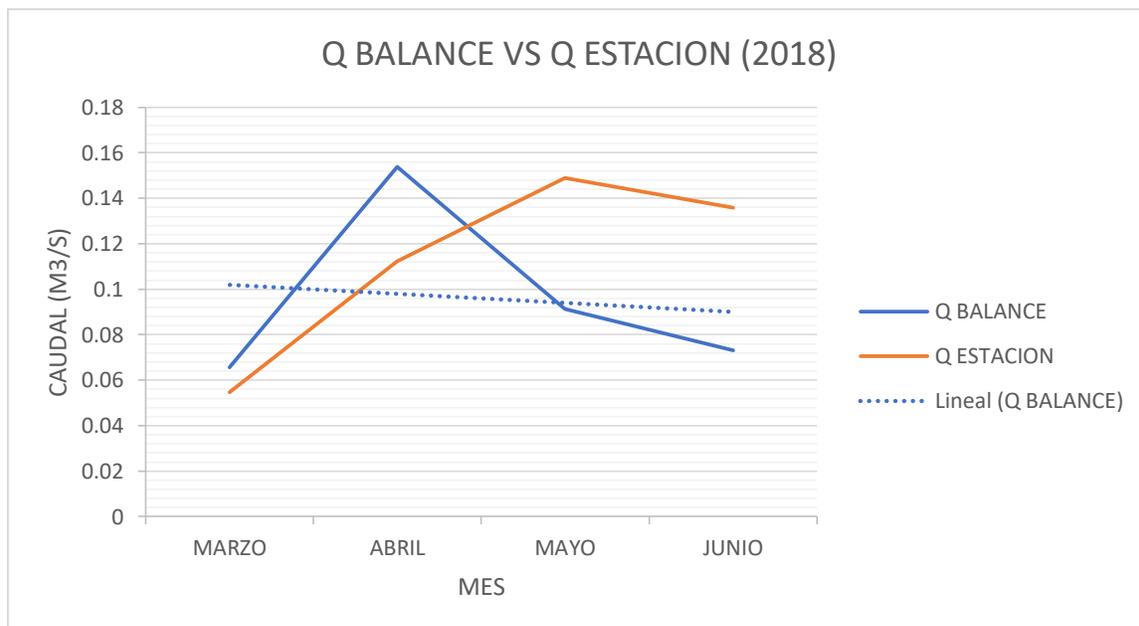


Ilustración 47 Comparación caudales medidos 2018

Cómo se puede observar en las ilustraciones 44-45, los caudales medidos por la estación superan a los caudales obtenidos por el balance, esto se debe a que estos años presentaron el mayor grado de déficit hídrico debido a las bajas precipitaciones registradas para el complejo de páramo. Cómo se mencionó anteriormente, el año 2011 presenta los mayores datos de precipitación y de caudal debido al efecto del incremento producido por el fenómeno de la niña.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✦ El cambio en los parámetros climáticos tales como la lluvia, que tuvo oscilaciones entre los 900 mm/año hasta los 1500mm/año aproximadamente, tuvieron gran influencia en los resultados de los balances hídricos obtenidos, tomando como punto de partida los años 1998 y 2001 que presentaron los niveles más bajos en cuanto a los regímenes de precipitación y, por ende, durante estos años, se presentaron los mayores índices de déficit para los 4 años que fueron estudiados. Se pudo identificar una variación de la ETP entre 600 y 700mm.
- ✦ Los cambios de cobertura identificados, como la pérdida de bosques de aproximadamente 4 Km², la variación de la cantidad de pastos óptimos que pasaron a ser pastos pobres, el cambio en algunos parámetros físicos del suelo y la pérdida de cobertura vegetal han afectado directamente la capacidad de retención hídrica de los suelos del páramo, generando una pérdida a una tasa de 1mm de almacenamiento/año, es decir, del 3% por año transcurrido de estudio.
- ✦ El en periodo 1998-2018 se identificó mediante el análisis con el método de la SCS una reducción de aproximadamente 5% del almacenamiento en el páramo, donde las áreas urbanas y de cultivos se mantuvo entre los 15 y 18 km².
- ✦ El año 2011 presentó los mayores valores de precipitación y de factor de superávit de agua disponible en el páramo y por ende, de recarga de acuíferos en la zona de estudio, con un porcentaje de área bajo la condición de oferta positiva hídrica del 96%, siendo la más alta de los años de estudio, esto se debe al fenómeno de la niña transcurrido en el mismo periodo de tiempo.
- ✦ Según los valores obtenidos para los balances, se obtiene que el páramo presenta en promedio, una oferta disponible de 17 mm/año, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para los años de estudio y el déficit de agua presentado en el año 2001 y la recuperación a condición de superávit desde este año hasta los años 2011 y el 2018.
- ✦ En las gráficas comparativas de caudal del balance y de la estación Llano largo que media los caudales de una de las quebradas que tributaban al río palmar, se visualizó un ajuste de tendencia a los resultados de caudal calculado mediante el balance hídrico, lo cual permite evaluar que la precipitación efectiva promedio calculada en el páramo es cercana al comportamiento real de la escorrentía.
- ✦ A pesar de la disminución de la capacidad de almacenamiento del páramo, se evidencia que, por el contrario, el balance hídrico presenta superávit creciente en los años estudiados, inclusive, se puede observar incremento en la recarga de acuíferos en los últimos 10 años.
- ✦ Debido a la ausencia de estaciones medidoras de caudal, se hace complicado poder determinar un cambio a nivel multitemporal en todo el complejo del páramo, ya que sólo fue posible hacer comparaciones con una estación de medición, para futuros trabajos, se recomienda contar con al menos 3 estaciones de caudal.
- ✦ Una limitación para el trabajo es la cantidad de nubes presentes en las imágenes satelitales utilizadas, esto no permite realizar un análisis multitemporal de más años debido a que se hace imposible poder reconocer las coberturas, pues en algunos casos, las nubes ocupan más del 50% de las imágenes.
- ✦ La ausencia de estaciones que midan parámetros como el brillo solar dificulta la modelación de variables importantes como la evapotranspiración potencial para todo el páramo, para futuros proyectos, se recomienda tener más estaciones que midan estos parámetros y así dar una mejor idea de la situación climática de las áreas a estudiar.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Otaya L., Vásquez G., Bustamante G. (2008). *Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas Estratégicos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Daza M., Hernández F., Triana F. (2013). *Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Fundación Universidad Externado de Colombia (2014). *Caracterización socioeconómica y cultural del complejo de páramos Cruz verde-Sumapaz en jurisdicción de la CAM, CAR, CORMACARENA, SDA Y CORPORINOQUIA*. Bogotá: Instituto Humboldt.
- ✓ Universidad De Manizales (2015). *Análisis Del Cambio De La Cobertura Entre 1999 Y 2015 Del Páramo De Chiles - Cumbal A Través De La Utilización De Herramientas Sig*. Manizales.
- ✓ Servicio Geológico de los Estados Unidos (2007). *Water Budgets: Foundations for*
- ✓ *Effective Water-Resources and Environmental Management*. Reston: USGS
- ✓ Universidad De Manizales (2015). *Análisis Del Cambio De La Cobertura Entre 1999 Y 2015 Del Páramo De Chiles - Cumbal A Través De La Utilización De Herramientas Sig*. Manizales.
- ✓ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- ✓ Marín V. (2010). *Evaluación De La Relación Entre La Evapotranspiración Potencial Teórica Y La Evaporación Registrada En Los Departamentos De Cundinamarca Y Valle Del Cauca*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- ✓ Puello, A. M., & Männich, L. (2018). *Integralidad étnico-territorial indígena en lugares sagrados de Alta Montaña*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Hämmerly, R. d., Tordivo, R., Giacosa, R. H., Paoli, C. U., Cacik, P. A., & Inglese, C. A. (2006). *Modelación Hidrológica con SIG Contribuciones en su difusión y aplicación*. Santa fe - Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- ✓ Borrelli, P. (2015) *The implications of Fire Management in the Andean Paramo: A Preliminary Assessment Using Satellite Remote Sensing*, Open Access, remote sensing.
- ✓ Ochoa, Brenda T. (2016) *Modelo para la estimación de la oferta hídrica que incorpora el agua subterránea en microcuencas sin información hidrológica*
- ✓ Correa V. Paula Lizet (2006), *Metodología de balance hídrico y sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinú*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín
- ✓ Contrato de prestación No. 14-13-014-090CE Instituto Humboldt – Fundación Universidad Externado de Colombia
- ✓ Otaya B. Leodán A., Vásquez V. Guillermo L., Bustamante C. Guillermo J. (2008) *Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín
- ✓ Osejo B. Breiner, Vargas B. Teresita, Martínez A, Jhon (2019) *Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from worldclim and chelsea datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Uraba Region-Colombia*, Universidad de Antioquia, Medellín
- ✓ Camargo C. Carlos A, Velandia T. Jenny E. (2019) *The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin Los Pozos*, Universidad Santo Tomas, Tunja.
- ✓ Bedoya A. Mary L., Portillo M. Javier F., Sáenz C. Hans R. (2016) *Análisis del cambio de cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de Chiles – Cumbal a través de la utilización de herramientas SIG*, Universidad de Manizales
- ✓ Daza T. Martha C, Fernández F. Fanny, Triana Flor A. (2013) *Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia*, Revista Facultad de Agronomía, Medellín
- ✓ Hämmerly, R. d., Tordivo, R., Giacosa, R. H., Paoli, C. U., Cacik, P. A., & Inglese, C. A. (2006). *Modelación Hidrológica con SIG Contribuciones en su difusión y aplicación*. Santa fe - Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- ✓ Ortiz, D., & Vásquez, P. (2006). *Investigaciones biofísicas en el Páramo*. Quito: Abya Yala.
- ✓ Puello, A. M., & Männich, L. (2018). *Integralidad étnico-territorial indígena en lugares sagrados de Alta Montaña*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Romero, L. D. (12 de Febrero de 2015). *Minería Amenaza el Páramos de Cruz Verde*. *El Espectador*.
- ✓ WWAP, T. U. (2018). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París: UNESCO.
- ✓ IGAC. Subdirección de hidrología (2000) *Estudio de suelos de Cundinamarca*, anexos PDF y formatos shape.
- ✓ Fuente obtención de imágenes satelitales (2021) <https://earthexplorer.usgs.gov/>

- ✓ Fuente obtención de parámetros hidrometeorológicos (2021) <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- ✓ Villegas, P. (22 de Enero de 2017). Agua y SIG. Obtenido de Agua y SIG: <https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arcgis/>
- ✓ Chow, V. T. (2010). Hidrología Aplicada. Nueva York: McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering
- ✓ Ecoforest Ltda. (2013). Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, Subcuenca Río Teusaca. Bogotá: Planeación Ecológica Ltda.