

**“PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA OFERTA HÍDRICA
SUPERFICIAL POR MÉTODO RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA, CASO
DE ESTUDIO CUENCA DE LA QUEBRADA APAUTA PARA EL AÑO 2015”**

Autor:

DIEGO ANDRES SALAZAR CARMONA 3101329

Tutor:

Ing. LUIS GIOVANNY CARVAJAL



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA – POSGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA**

2016

PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL POR MÉTODO RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA, CASO DE ESTUDIO CUENCA DE LA QUEBRADA APAUTA PARA EL AÑO 2015

PROCEDURE FOR CALCULATING THE SURFACE WATER SUPPLY BY METHOD RELATIONSHIP RAIN-RUNOFF, CASE STUDY OF THE APAUTA RAVINE BASIN FOR THE YEAR 2015

Diego Andres Salazar Carmona
Ingeniero Catastral y Geodesta

RESUMEN

Actualmente en Colombia se realizan cálculos de oferta hídrica para aguas superficiales, a través de la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, sin embargo, dicha legislación es muy limitada en el componente espacial, no detalla la obtención y el procesamiento que deberían tener las variables regionalizadas; surge así la necesidad de generar un procedimiento metodológico enmarcado normativamente, pero que en su desarrollo se precise el tratamiento de la información espacial.

El método elegido para aplicar los conceptos y herramientas desde la geomática, y así lograr determinar la oferta hídrica, corresponde al de la relación lluvia-escorrentía, implementado sobre la cuenca hidrográfica de la quebrada Apauta, localizada en Jurisdicción de los municipios de Guataquí, Nariño, Tocaima y Jerusalén, en el departamento de Cundinamarca; el estudio esta soportado con datos meteorológicos de precipitación para el año 2015.

Palabras clave: Escorrentía, número de curva, precipitación, interpolación, oferta hídrica superficial.

ABSTRACT

Currently in Colombia water supply calculations are made for surface waters, through Resolution 865 of 2004 of the Ministry of the Environment and Sustainable Development, however, that legislation is very limited in the spatial component, does not detail the obtaining and processing that should have the regionalized variables; hence the need to generate a methodological procedure

framed normatively, but that in their development is explained the treatment of spatial information.

The method chosen to implement the concepts and tools from the geomatics and thus achieve determine the water supply, corresponds to the relationship rain-runoff, implemented on the hydrographic basin of the Apauta ravine, located in the jurisdiction of the municipalities of Guataquí, Nariño, Tocaima and Jerusalén, in the department of Cundinamarca; the study will be supported with meteorological data for precipitation for the year 2015.

Keywords: Runoff, curve number, precipitation, interpolation, Surface water supply.

INTRODUCCIÓN

Las herramientas teóricas y tecnológicas que incorpora la geomática a través de diferentes disciplinas, como teledetección, cartografía, geoestadística y los sistemas de información geográfica entre otros, ofrecen un nuevo panorama de análisis, al abordar fenómenos y/o temas investigativos de diverso origen científico y social, desde la óptica espacial; los recursos medioambientales no son la excepción, y gracias a estos avances técnicos, se pueden estudiar con mayor grado de objetividad, desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Este estudio corresponde a la aplicación de herramientas geomáticas para obtener un factor de escorrentía, a partir del cual se puede inferir sobre la oferta hídrica o caudal sobre la cuenca hidrográfica de la quebrada Apauta; el método teórico para llegar a este propósito corresponde al de relación lluvia-escorrentía desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

1. METODOLOGÍA

Para obtener la oferta hídrica sobre la cuenca del río Apauta, a través de la aplicación del número de curva CN asociado a la relación lluvia-escorrentía, fue necesario obtener y preparar los insumos espaciales y alfanuméricos, con ayuda de conocimientos y herramientas tecnológicas dentro del campo de la geomática; sin embargo en primera instancia se hizo preciso exponer de forma clara la teoría concerniente al método desarrollado.

1.1. RELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

Este método normativamente para Colombia encuentra su campo de aplicación a través del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1076 de 2015, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su artículo 2.2.9.6.1.21. (Metodologías para el cálculo del índice de escasez); referencia la Resolución 865 de 2004, que expone tres metodologías de cálculo de oferta hídrica sobre el territorio colombiano.

El tercer método descrito en dicha resolución habla del cálculo de la oferta hídrica superficial a través de la relación lluvia-escorrentía, aplicable para cuencas con superficies inferiores a los 250 Km², y que además no son susceptibles a procesos de ordenación, como si sucede con las cuencas de segundo orden, también denominadas subzonas hidrográficas, y en cuyo caso el área promedio sobre el territorio colombiano supera los 3600 Km².

La metodología se basa en el número de curva de escorrentía (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norteamérica, el cual combina información de suelos, de cubierta vegetal bajo un escenario de humedad antecedente al fenómeno de lluvias, traduciendo todo en un índice o valor numérico que se aplica a las precipitaciones, y así poder determinar el volumen de agua superficial que transita sobre la cuenca hasta su desembocadura, López et al [1].

El número de curva es un parámetro adimensional con valores entre 0 y 100, donde 0 indica un 0% de escurrimiento, es decir que toda la entrada de agua a la cuenca por precipitación se infiltra en el suelo, en la práctica no es posible este escenario; mientras que un valor de 100, traduce 100% de escurrimiento y 0% de infiltración por precipitaciones, como sucede sobre los cuerpos de agua, donde la precipitación se convierte directamente en escorrentía, Ferrer et al [2].

1.2. PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para desarrollar el método de curva de escorrentía sobre la cuenca hidrográfica de la quebrada Apauta, fue necesario contar con los siguientes insumos:

- Capa espacial con la delimitación de la cuenca.
- Topografía de la cuenca en vector o raster.
- Capa espacial de cobertura vegetal.
- Capa espacial de unidades de suelos.
- Estaciones meteorológicas con datos de precipitación 2015.

Toda la información espacial que se empleó para realización de este estudio, se apoyó en el sistema de referencia oficial para Colombia, Magna Sirgas, adoptado mediante resolución 68 de enero de 2005 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, con origen de coordenadas Bogotá.

1.2.1. Obtención de la delimitación definitiva de la cuenca

La delimitación presuntiva de la cuenca se obtuvo gracias a la consulta dirigida a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, autoridad ambiental sobre la cual se localiza la cuenca; esta entidad adoptó mediante el Acuerdo 38 de 2006, una división hidrográfica sobre su territorio, cada división representa una Unidad Hidrológica de Análisis o UHA.

La cuenca se localiza al sur occidente del departamento de Cundinamarca, sobre los municipios de Guataquí, Nariño, Tocaima y Jerusalén (fuente de la división

territorial, IGAC, escala 1:100.000), siendo este último municipio aquel donde la cuenca tiene mayor presencia (ver Figura 1 y Tabla 1).

Tabla 1. Relación municipios sobre cuenca quebrada Apauta.

Municipio	Área del municipio (Km ²)	Área sobre la cuenca (Km ²)	Porcentaje
Guataquí	85,34	0,97	1,31%
Jerusalén	222,57	69,76	94,68%
Nariño	51,94	2,07	2,81%
Tocaima	248,55	0,89	1,20%
Total		73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.



Figura 1. Localización cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Luego de cargar la información espacial en software SIG, se identificó la cuenca de estudio como la UHA 2123-02-04, Q. Apauta o Agua Pauta, con un área aproximada de 72 Km². La codificación de la cuenca guarda conformidad con la zonificación hidrográfica establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, mediante la Resolución 104 de 2003, que aplicado al código arrojó los siguientes datos:

- Primer carácter: 2, que corresponde al Área Hidrográfica de Magdalena-Cauca.
- Primeros dos caracteres: 21, lo que significa que pertenece a la Zona Hidrográfica del Alto Magdalena.
- Primeros cuatro caracteres: 2123, es decir que la cuenca se localiza sobre la Subzona Hidrográfica o cuenca de segundo orden, denominada río Magdalena (río Seco y otros directos Magdalena).

- Primeros siete caracteres: 2123-02, aduciendo que la cuenca de tercer orden donde se ubica la cuenca objeto de interés, se identifica como río Seco.
- Código completo de 10 caracteres: 2123-02-04, que traduce la división de la cuenca del río Seco en cinco hoyas hidrográficas, y la división número 04 denota la cuenca de estudio, cuenca de cuarto orden quebrada Apauta.

La dependencia que tiene bajo su responsabilidad el manejo y administración de la información espacial dentro de la CAR, se llama Dirección de Monitoreo, Modelamiento y Laboratorio Ambiental DMMLA, y, por indagación directa ante esta Dirección, se conocieron detalles de cómo se obtuvo la delimitación de las UHA en su momento, para aquel entonces se trabajó para su construcción con cartografía básica del IGAC en escala 1:25.000 del año 1997.

Dentro de la recopilación de información para realizar el estudio, se logró disponer de cartografía básica en formato vector sobre el área de la cuenca en escala 1:10.000 (planchas topográficas IGAC 245-II-B-1, 245-II-B-2, 245-II-B-3, 245-II-B-4, 245-II-C-2, 245IID1 y 245IID3), topografía resultado del proceso de restitución fotogramétrica sobre modelos estereoscópicos, Pérez [3], con fuente de fotografías aéreas con resolución espacial de 50 cm, año 2009 (Figura 2).

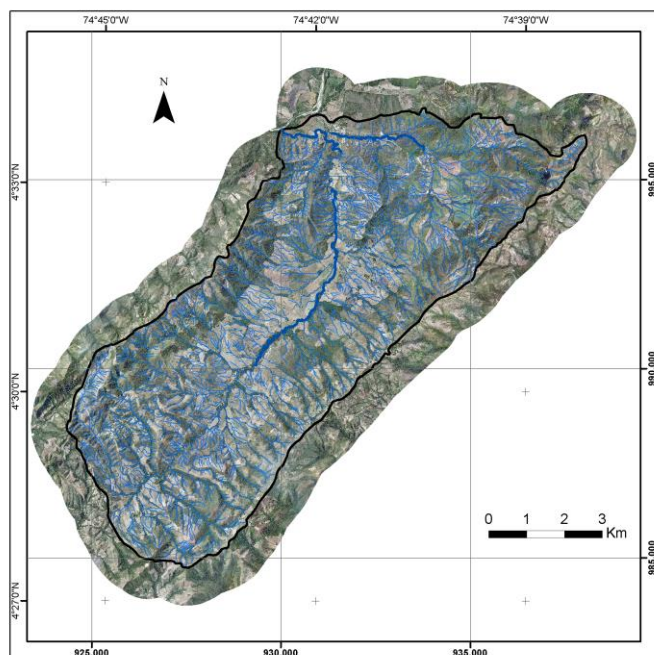


Figura 2. Raster fuente y cartografía básica sobre la cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Se decidió entonces ajustar los límites de la cuenca, aprovechando la disponibilidad de información de mejor resolución y más cercana en el tiempo; para ello se construyó el modelo digital de elevación utilizando tanto las curvas de nivel como la red hidrográfica.

Por medio del DEM confeccionado a partir de la delimitación certera de la cuenca de la quebrada Apauta (Figura 3), se determinaron características espaciales

mediante software SIG; se añadieron atributos para caracterizar la cuenca, como la altura máxima de 1050 y mínima de 280 metros sobre el nivel medio del mar, la longitud de su cauce principal es de 15.600 metros, con un ancho promedio de 5.000 metros aproximadamente.

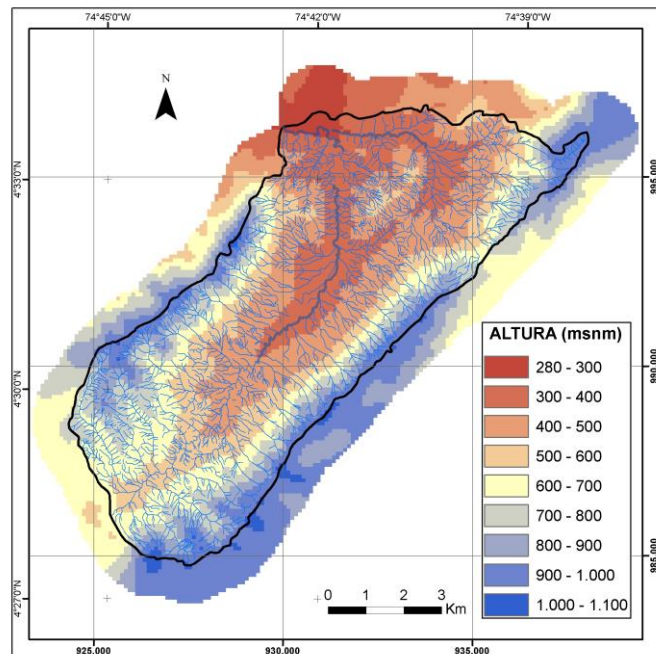


Figura 3. Modelo Digital de Elevación DEM sobre la cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

1.2.2. Obtención de la capa de cobertura vegetal

La capa de cobertura vegetal se obtuvo mediante el procesamiento de la imagen digital denominada ortofomosaico plancha 245 en escala 1:10.000 del IGAC, constituido por fotografías aéreas del año 2009 del sensor Vexcel UltracamD, con 50 cm de resolución espacial y tres bandas espectrales.

Este raster fue objeto de múltiples operaciones con el fin de obtener un insumo que respondiera a las necesidades del proyecto, en primera instancia fue preciso seccionar la imagen acoplándola para el área de estudio, ya que debido a sus bondades en resolución y cubrimiento, el raster demandaba mucho recurso en hardware para su procesamiento.

La imagen se llevó a un software especializado en tratamiento de datos raster, PCI, realizando una clasificación no supervisada en composición RGB color natural, Arango et al [4], la elección de la composición fue limitada por la cantidad de canales de la fuente, en este caso tres bandas espectrales.

Se corrieron numerosas pruebas, respecto a la cantidad de clases a utilizar, ya que permitiendo varias clases (más de diez), el software al no considerar patrones espaciales sino espectrales, devolvía conglomerados de píxeles muy pequeños, que dificultaban la tarea de identificación. Por el contrario, utilizando

pocas clases (menos de cinco), el algoritmo retornaba zonas sin clasificar, y áreas donde una clase podía estar comprendida por más de una cobertura.

Se determinó entonces, correr el algoritmo con siete clases (Figura 4), siendo esta la mejor elección de procesamiento, generando áreas conformes con la interpretación visual, apoyada en características pictoricomorfológicas como color, forma, tamaño, textura, asociación y contexto, Serrato [5].

El resultado de la clasificación fueron siete clases, representando cuatro coberturas terrestres; dos tipos de bosque (el primero asociado a grandes parches de bosque, y el segundo relacionado a los bosques de galería que acompañan generalmente cursos de agua), dos tipos de pasto (diferenciados entre sí por su tonalidad).

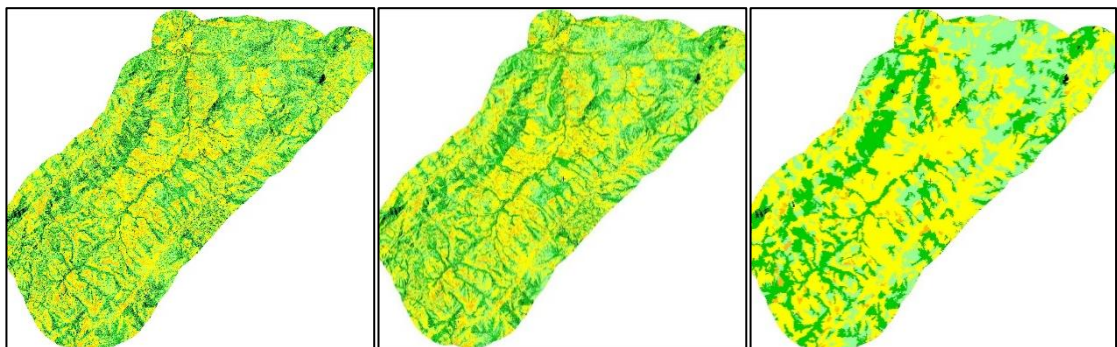


Figura 4. Clasificación no supervisada sobre cuenca quebrada Apauta, de izquierda a derecha: Clasificación con siete clases, filtro de mediana de 5x5 y agregación de píxeles.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Se obtuvo una clase denominada rastrojo (barbecho o pajonal), y dos tipos de suelo desnudo que tenían la respuesta espectral más fuerte de todas las clases por su alta reflectividad, diferenciadas entre sí por su intensidad o brillantez (el algoritmo trato de asociar las áreas urbanas a estas categorías).

Las clases fueron generalizadas en las cuatro coberturas insignia descritas; luego de obtener la clasificación, se corrió sobre ella un filtro de paso bajo de mediana, Pérez [6] con una ventana de 5x5, con el propósito de limpiar, suavizar y eliminar el moteado resultante (Figura 4), muy evidente en las coberturas de grandes extensiones como pastizales y bosques.

Luego se realizó una agregación de píxeles para conformar los clúster que definirán las coberturas definitivas, para ello se empleó con un factor de 5.000 píxeles, que aplicado a la resolución espacial de 50 cm de la fuente, significó que se generarán áreas de 2.500 m² aproximadamente (Figura 4). Este factor se determinó con base en la resolución del formato vector que se viene utilizando, de 1:10.000, para el caso, se estableció como área mínima cartografiada, López [7] de 5 mm a esta escala, es decir 2.500 m².

La clasificación en formato raster fue llevada a vector, para continuar construyendo este insumo desde un software SIG más amigable con este formato, como ArcGIS; habían cuatro tipos de cobertura que aun cuando estaban

presentes en la imagen, el algoritmo en su momento no logró discriminar, y que debían incluirse en el estudio, ellas eran cultivos, superficies de agua, vías y áreas urbanas.

Para adicionar las nuevas coberturas, fue preciso trabajar fotointerpretando sobre la imagen, Pacheco et al [8]; el área urbana presente, correspondiente a la cabecera municipal de Jerusalén, se delineó con una escala de trabajo de 1:500; los cuerpos de agua se actualizaron desde la cartografía básica.

Las vías se trabajaron por medio de áreas de influencia sobre el eje vial, donde, dependiendo el tipo de vía se podía asociar un ancho mínimo; esta cobertura en particular, se unió a la de suelo desnudo, por cuanto las únicas vías pavimentadas se localizaban sobre el área urbana, donde se priorizó la cobertura urbana sobre la de vías.

Habían pocos cultivos identificables en la imagen, y los detectados fue gracias al patrón y a la textura, sin embargo, todos tenían superficies muy pequeñas, se podía inferir que correspondían a cultivos de pancoger o de subsistencia y, teniendo en cuenta la condición de área mínima cartografiable preestablecida, no se incluyó esta cobertura, ya que ningún cultivo supero el umbral por área.

Las seis clases sufrieron un tratamiento cartográfico para suavizar los bordes y darle mejor apariencia a los polígonos, sin poner en riesgo todo el tratamiento recibido a priori (ver Figura 5 y Tabla 2). Se realizó un control de calidad de las coberturas en varias zonas representativas de la imagen, asegurando la conformidad de la capa vectorial obtenida versus el raster fuente.

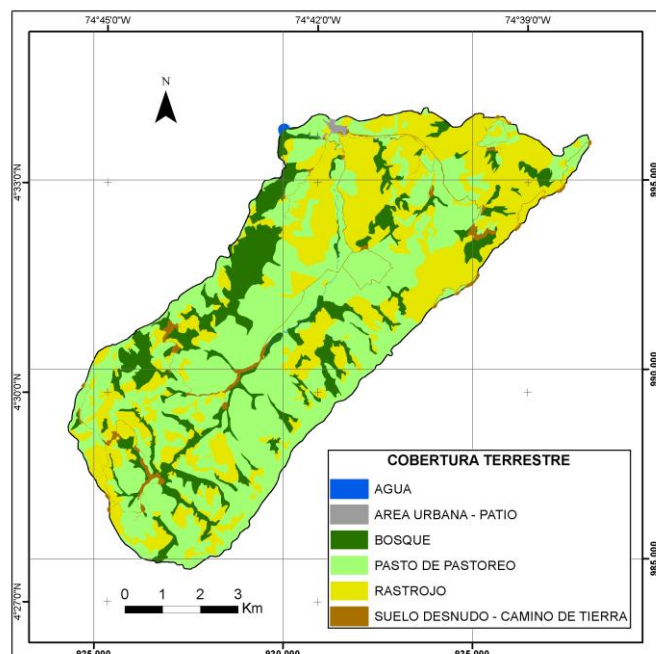


Figura 5. Insumo de coberturas terrestres en formato vector, cuenca quebrada Apauta. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Tabla 2. Relación coberturas terrestres sobre cuenca quebrada Apauta.

Cobertura	Área sobre la cuenca (Km ²)	Porcentaje
Agua	0,10	0,14%
Área urbana - Patio	0,16	0,22%
Bosque	12,37	16,79%
Suelo desnudo - Camino de Tierra	0,48	0,65%
Pasto de pastoreo	35,09	47,62%
Rastrojo	25,47	34,57%
Total	73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.

1.2.3. Obtención de las unidades de suelos

La capa de suelos fuente se obtuvo también mediante consulta directa realizada a la dependencia encargada de custodiar la información geográfica de la CAR, la DMMLA; se recibió un archivo vector, resultado del estudio de suelos sobre el departamento de Cundinamarca, realizado en el año 2001, en escala 1:100.000, producto del convenio interadministrativo celebrado entre el IGAC y la CAR.

Esta capa de suelos venía únicamente con el identificador taxonómico, además de presentar inconvenientes en sus relaciones espaciales o topológicas; fue necesario corregir errores de vacíos y de superposición de información sobre el área de interés, obteniendo una delimitación de suelos ajustada cartográficamente sobre la cuenca de interés.

Pero este insumo para ser incorporado en el modelo, se debía caracterizar por su composición granulométrica (arena, limo y arcilla), Malagón [9], además de esto, tenía que relacionarse espacialmente con la capa de pendientes, para darle una mayor interpretación a cada unidad; el DEM previamente elaborado, fue el insumo para elaborar las pendientes del terreno sobre la cuenca.

El resultado de la investigación para caracterizar las unidades, así como la incorporación de la pendiente a través del último carácter del identificador (a: 0-3%, b: 3-7%, c: 7-12%, d: 12-25%, e: 25-50%, f: 50-75% y g: >75%), gracias al cruce espacial de las capas vectoriales de suelos y pendientes se ve reflejado en la Tabla 3 y en la Figura 6.

Tabla 3. Relación unidades de suelos cuenca quebrada Apauta.

Suelo	Paisaje	Tipo de relieve	Material parental	Clima	Área (Km ²)	Porcentaje
MWCd	Montaña	Loma	Rocas clásticas arenosas y químicas carbonatadas	Cálido -seco	18,99	25,78%
MWFe		Espinazo	Rocas clásticas arenosas, limo arcillosas y químicas carbonatadas		1,49	2,02%
MWFF		Vallecitos coluvio-aluviales	Depósitos clásticos hidrogénicos y gravigénicos		5,18	7,03%
MWNa					7,30	9,91%

MWSg		Crestas y escarpes mayores	Rocas clásticas arenosas y limoarcillosas	24,94	33,85%
MWVe		Crestones	Rocas clásticas limoarcillosas	12,89	17,49%
MWVf				2,11	2,86%
VWOa	Valle	Plano de inundación	Depósitos clásticos hidrogénicos	0,18	0,24%
VWQa		Terrazas	Depósitos clásticos hidrogénicos	0,61	0,83%
Total				73,68	100,00%

Fuente: Adaptación del estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca, escala 1:100.000, IGAC [10], 2001.

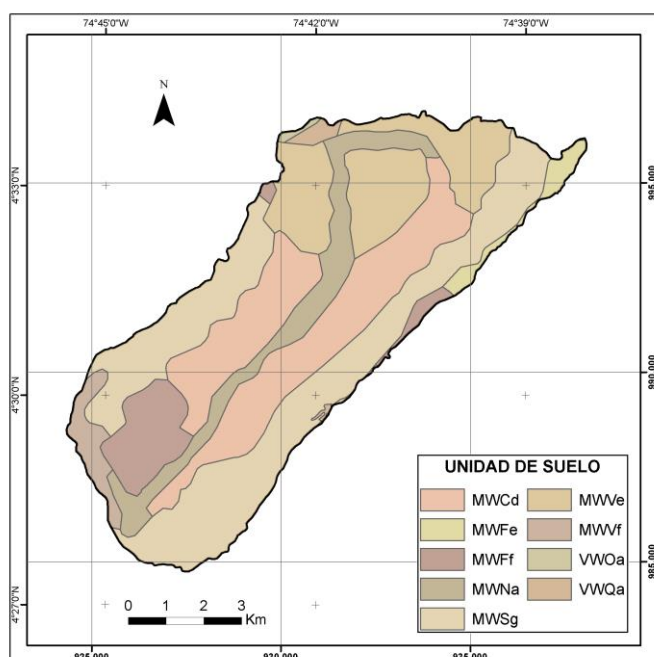


Figura 6. Unidades de suelos sobre la cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Con los atributos añadidos a cada unidad de suelos (composición y pendiente), se podía inferir la capacidad de infiltración para cada suelo, caracterizando ahora cada división desde el punto de vista hidrológico, como lo plantea la metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos CSC; que agrupa todos los suelos en cuatro únicas categorías:

- Categoría A: Caracterizado por su composición granulométrica de arenas y limos de gran tamaño, corresponde a suelos profundos, con bajo potencial de escurrimiento o alto potencial de infiltración.
- Categoría B: Suelos medianamente profundos, compuesto por arenas y limos principalmente, con texturas finas permitiendo una infiltración moderada, bajo condiciones precedentes de humedad.
- Categoría C: Suelos poco profundos, con composición granulométrica de limos y arcillas en mayor medida, su capacidad de infiltración es baja y su potencial de escurrimiento alto.

- Categoría D: Suelos superficiales que se expanden cuando están húmedos, con alto contenido de arcilla, su capacidad de infiltración es muy baja, a diferencia de su alta capacidad de escurrimiento.

Con estas categorías definidas, se asoció a cada unidad de suelos la categoría correspondiente, obteniendo el insumo de unidades de suelos que requería la metodología (ver Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación unidades de suelos por grupo hidrológico, cuenca quebrada Apauta.

Suelo	Grupo Hidrológico	Área (Km ²)	Porcentaje
MWCd	B	18,99	25,78%
MWFe	C	1,49	2,02%
MWFf	C	5,18	7,03%
MWNa	B	7,30	9,91%
MWSg	C	24,94	33,85%
MWVe	C	12,89	17,49%
MWVf	C	2,11	2,86%
VWOa	B	0,18	0,24%
VWQa	B	0,61	0,83%
Total		73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.

La clasificación de los suelos desde el punto de vista hidrológico como lo demanda la metodología, significó agrupar los suelos de la cuenca en las categorías B y C, con 36,75% y 63,25% de representatividad sobre la cuenca; la Figura 7 refleja el insumo obtenido.

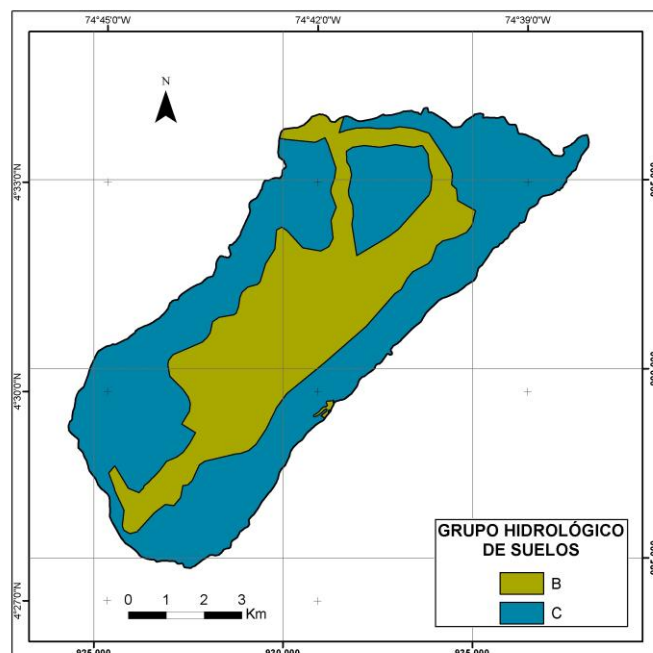


Figura 7. Insumo grupo hidrológico de suelos sobre la cuenca quebrada Apauta.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

1.2.4. Obtención de información hidrometeorológica

La recopilación de datos de precipitación, se realizó para aquellas estaciones circundantes a la cuenca de la quebrada Apauta, para ello fue necesario establecer la localización de las estaciones cercanas a la cuenca, en total se consideraron ocho estaciones (Figura 8), cuatro a cargo del IDEAM y cuatro de la CAR, que en promedio se distanciaban de la cuenca diez kilómetros.

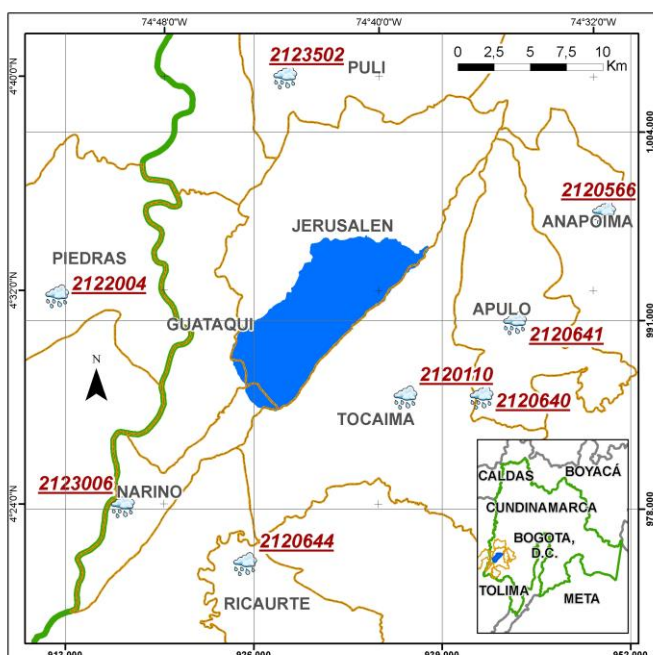


Figura 8. Localización estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

La información de precipitación se obtuvo directamente por solicitud al IDEAM y a la CAR, a través de las plataformas virtuales y medios digitales que emplean para su libre distribución; para realizar el análisis del año 2015, fue necesario sumar las precipitaciones efectivas por mes; la relación de las estaciones con la data obtenida se resume en la Tabla 5 y en la Figura 9:

Tabla 5. Precipitación (mm) para las estaciones consideradas para el año 2015.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Año 2015
2120640	108	54,5	96,3	83,8	39,8	38,1	9,3	0	41,4	160	122	10,7	764
2123502	47,1	85,3	112	137	88,3	29,1	10,6	0	88,3	175	131	0	904
2120644	69,4	33	170	120	100	9,7	8,3	0,5	38,3	200	85,8	3,3	839
2123006	178	52,3	115	102	115	11,4	12,2	15,2	78,5	161	104	11	956
2120110	103	21,2	126	79,9	58,2	15,6	7,2	1	81,2	122	80,9	0	695
2120566	97,9	49,9	121	51,6	30,8	15,6	15,7	11,1	77	132	121	0,2	724
2120641	144	96,8	143	146	28,3	27,7	20,1	5,5	30,6	149	122	6,9	920
2122004	92,7	60,5	98,3	185	121	7	25,4	10	74,7	115	131	3,1	924
Total	840	454	981	906	582	154	109	43,3	510	1214	897	35,2	6725

Fuente: IDEAM y CAR, 2016.

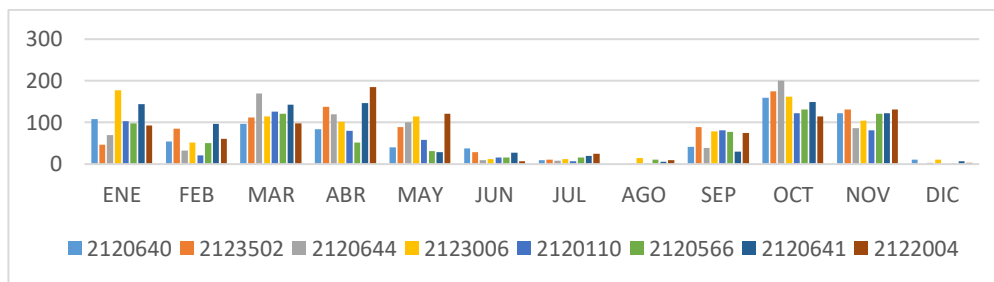


Figura 9. Distribución de la precipitación (mm) mes a mes año 2015.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

La precipitación media de las ocho estaciones consideradas para el año 2015 fue de 840,56 mm con una desviación estándar de 94,17 mm, en un rango de 260,1 mm, siendo la estación identificada como 2123006, ubicada en el suroccidente de la cuenca, la que mayor precipitación presentó con un valor de 955,5 mm y, por su parte, la estación 2120110 localizada al suroriente de la cuenca, registro el valor mínimo de precipitación con 695,4 mm.

Los datos sufrieron un tratamiento estadístico (Figura 10) para verificar su distribución, esto fue necesario para garantizar que la variable precipitación se pudiera inferir desde el punto de vista estadístico, Díaz et al [11], sobre el área de la cuenca a partir de otros procedimientos como la interpolación, para ello se empleó el software R, almacenando la data en el orden de la Tabla 5.

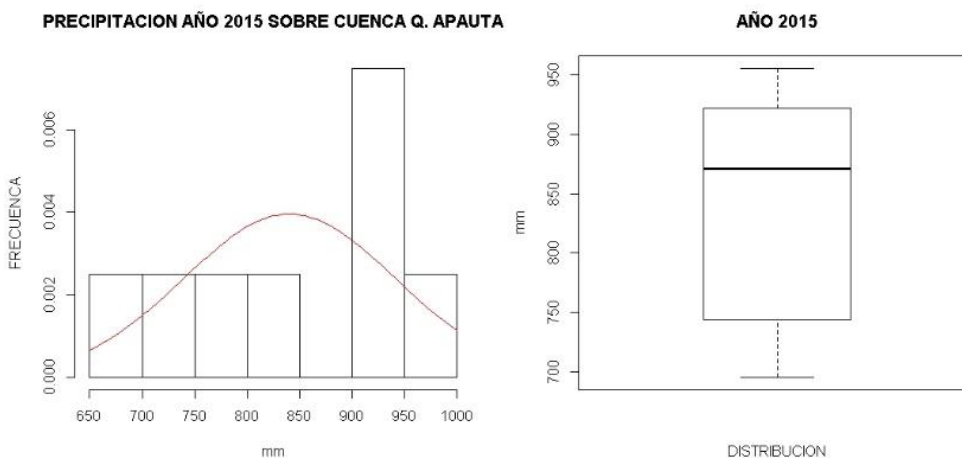


Figura 10. Estadísticos en R, izquierda: histograma de frecuencias por número de estaciones (con curva de distribución normal), derecha: gráfico de caja y bigotes.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Con el histograma se logró apreciar de acuerdo a la cantidad de estaciones, la precipitación presentada según los intervalos definidos por el software, para el caso cada 50 mm.

La gráfica de caja y bigotes, Palladino [12], donde los extremos de la caja representan los percentiles 25 (inferior) y 75 (superior), de donde además se desprenden los bigotes, reflejó homogeneidad de los datos, debido a sus longitudes similares, sin embargo, la línea al interior de la caja, que representa la mediana, resultó más cercana al percentil 75 con un valor de 875 mm.

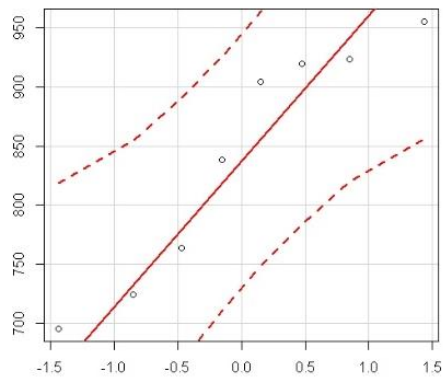


Figura 11. Estadístico Q-Q en R.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

El estadístico Q-Q, Kelmansky [13] comparó la distribución teórica, con la distribución real de la muestra (Figura 11), para el caso los datos anuales de lluvias para ocho estaciones, evidenciaron una distribución normal, debido a la cercanía de los datos a la curva normal, y a que ninguno se salió de los límites.

Para asegurar la normalidad de la distribución de los datos se practicaron seis pruebas sobre la herramienta computacional (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Pruebas de distribución normal para la muestra de datos de precipitación sobre las ocho estaciones alrededor de la cuenca quebrada Apauta.

Prueba	Valor	Prueba	Valor	Prueba	Valor
Shapiro-Wilk	0,2424	Cramer-Von Mises	0,2503	Pearson	0,3679
Anderson-Darling	0,2459	Kolmogorov-Smirnov	0,2107	Shapiro-Francia	0,3407

Fuente: Elaboración propia, 2016.

La hipótesis nula es que los datos se distribuyen normalmente, para ello se debe superar el umbral de 5% o 0,05; como se aprecia en la Tabla 6, todas las pruebas superaron este margen, por lo que se terminó aceptando la hipótesis de que los datos provienen de una población que tiene una distribución normal. Luego se representaron los datos de forma espacial (ver Figura 12).

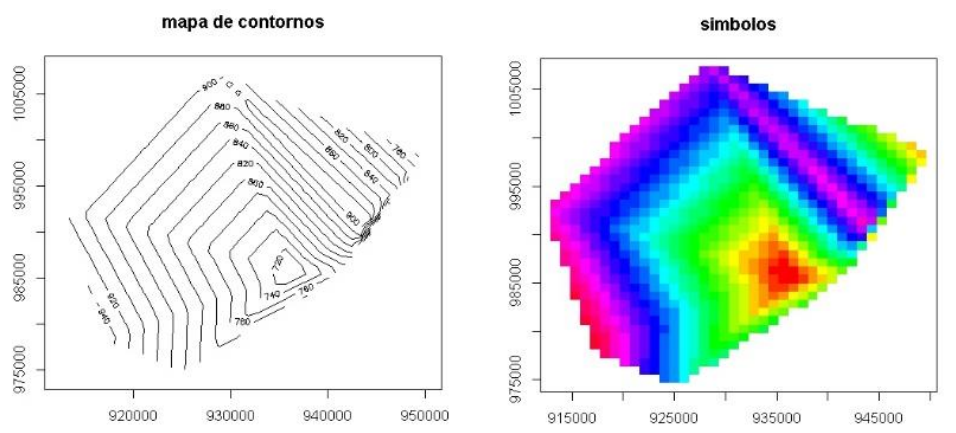


Figura 12. Representación espacial de los datos en R, izquierda: mapa de contornos, derecha: mapa de símbolos.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Con las gráficas espaciales se logró determinar un patrón de aumento de precipitación a partir de tres estaciones, concentradas en la región comprendida por las coordenadas 935000 y 945000 del Este, y los 985000 y 990000 del Norte. Luego del análisis estadístico y de garantizar la distribución normal de los datos, se dio inicio a la interpolación de la variable precipitación.

Se utilizaron varios métodos, como el polígono de Thiessen (Figura 13) que emplea como principio la distancia euclidiana, Sánchez [14], trazando mediatrices a partir de las estaciones, generando áreas cuyo perímetro fue equidistante entre los puntos, al aplicarlo sobre las estaciones, la cuenca fue homogenizada casi en toda su superficie, con el valor de precipitación anual de la estación más próxima a la hoya hidrográfica.

También se corrió el modelo IDW o distancia inversa ponderada por su traducción del inglés, Marco [15], que devolvió un modelo de precipitación donde a cada estación se le atribuyó un área de influencia que disminuía con la distancia hacia el objetivo, en este caso, la cuenca hidrográfica (Figura 13).

Además de lo anterior, el algoritmo promedió zonas sobre la superficie de la cuenca, utilizando únicamente las estaciones con influencia sobre esa área, dejando por fuera del análisis las demás estaciones, al darles pesos insignificantes por su lejanía.

Se utilizó además el modelo de interpolación por Kriging (Figura 14), que considera una autocorrelación entre la ubicación de las estaciones, y la forma como se organizan en conjunto alrededor de la cuenca; para la elección del modelo con el cual se regionalizará la variable precipitación, se tuvo en cuenta el de menor desviación estándar, siendo Kriging el más ajustado con un valor de 2,17 mm, en comparación con el IDW que fue menos preciso, obteniendo una desviación estándar de 19,23 mm.

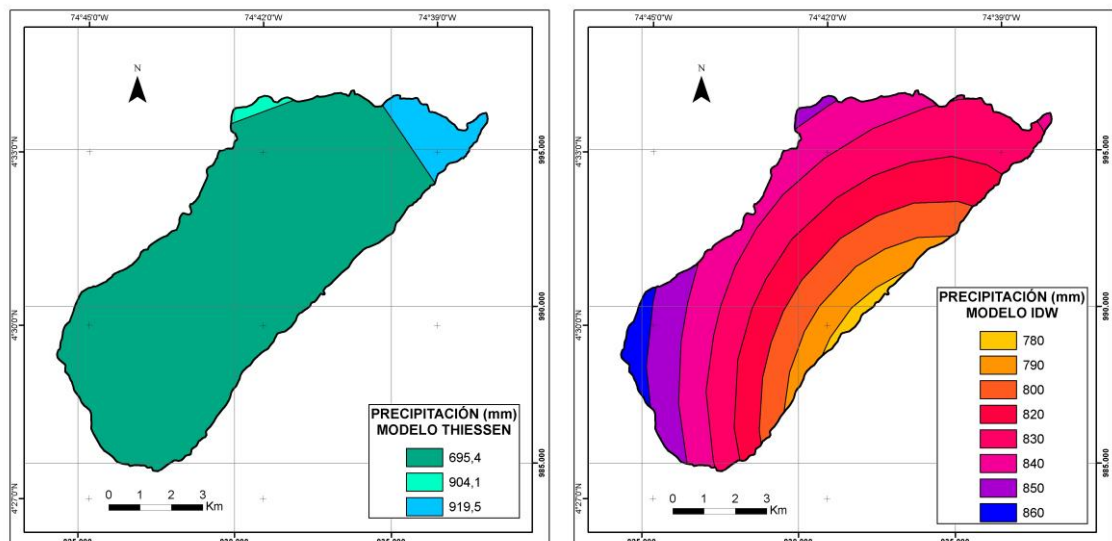


Figura 13. Modelos de precipitación sobre cuenca quebrada Apauta, izquierda: Polígonos de Thiessen, derecha: modelo IDW.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

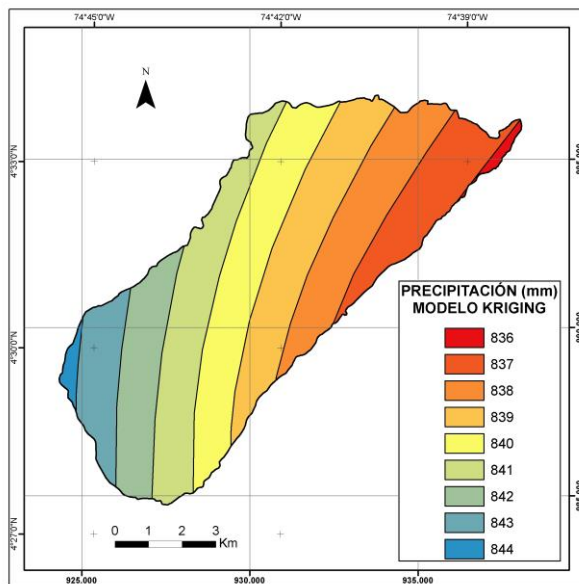


Figura 14. Modelo Kriging de precipitación sobre cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Una vez regionalizada la variable de entrada del modelo, se procedió a reclasificar a valores discretos, para luego ser convertida a formato vector, y finalmente relacionarla a la superficie de la cuenca, la Tabla 7 refleja el resultado final del procesamiento.

Tabla 7. Precipitación regionalizada sobre la cuenca quebrada Apauta por modelo Kriging.

Precipitación (mm)	Área (Km ²)	Porcentaje
836	0,48	0,65%
837	8,22	11,16%
838	11,14	15,11%
839	12,75	17,30%
840	14,15	19,20%
841	12,56	17,04%
842	8,10	10,99%
843	5,54	7,52%
844	0,75	1,01%
Total	73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.

1.3. PROCESAMIENTO AUTOMATIZADO DE LOS INSUMOS

Con los insumos de unidades de suelos clasificados hidrológicamente y de coberturas vegetales generalizadas en grandes grupos, ambos obtenidos gracias a la aplicación de herramientas y conceptos geomáticos, continúo el procesamiento a través de la herramienta computacional HEC-Geo HMS, US Army Corps of Engineers [16], la cual devolverá en respuesta el parámetro CN.

Para el primer insumo se cruzaron las capas espaciales de suelos y coberturas, luego se adecuó esta capa, de tal forma que conservará una descripción de la cobertura, asignándole a demás un código identificador para cada una; la relación con los suelos se dio a través de cinco columnas, una que asociaba la letra correspondiente al grupo de suelo al cual pertenecía y, cuatro columnas adicionales que denotaban el porcentaje de completitud para cada uno de los grupos de suelos, en la Tabla 8 se presenta como se organizó la capa.

Tabla 8. Organización capa espacial con cruce de coberturas terrestres y unidades de suelos sobre la cuenca quebrada Apauta.

Descripción	LUvalue	PctA	PctB	PctC	PctD	LUCode	Área (Km ²)	Porcentaje
AGUA	1	0	0	100	0	C	0,00	0,00%
		0	100	0	0	B	0,10	0,14%
AREA URBANA - PATIO	2	0	0	100	0	C	0,03	0,04%
		0	100	0	0	B	0,13	0,18%
BOSQUE	3	0	0	100	0	C	9,21	12,49%
		0	100	0	0	B	3,17	4,30%
PASTO DE PASTOREO	4	0	0	100	0	C	17,10	23,20%
		0	100	0	0	B	17,99	24,42%
RASTROJO	5	0	0	100	0	C	20,00	27,14%
		0	100	0	0	B	5,47	7,43%
SUELO DESNUDO - CAMINO DE TIERRA	6	0	0	100	0	C	0,27	0,36%
		0	100	0	0	B	0,21	0,29%
Total							73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.

El otro insumo que solicitó el software, fue un modelo digital de elevación sin vacíos, para lo cual fue necesario realizar un llenado desde la herramienta SIG. Aunque los suelos fueron caracterizados también desde el punto de vista topográfico a través de las pendientes, la herramienta requirió nuevamente la representación del terreno, para asegurarse de asignar un número de curva que infiriera la escorrentía acorde a la topografía de la cuenca.

El tercer y último insumo que requirió la aplicación, fue una tabla denominada CNLookUp (Tabla 9), que es una relación construida a partir de las tablas de la del número de curva, Martínez et al [17], valorizando cada posible cobertura presente en la cuenca, con cada uno de los cuatro grandes grupos de suelos que expone el método de curva de escorrentía.

Tabla 9. Tabla CNLookUp con cruce de coberturas terrestres y unidades de suelos sobre la cuenca quebrada Apauta.

Rowid	LUvalue	Descripción	A	B	C	D
1	1	AGUA	100	100	100	100
2	2	AREA URBANA - PATIO	59	74	82	86
3	3	BOSQUE	36	60	73	79
4	4	PASTO DE PASTOREO	49	69	79	84
5	5	RASTROJO	77	86	91	94
6	6	SUELO DESNUDO - CAMINO DE TIERRA	72	82	87	89

Fuente: Elaboración propia, 2016.

La metodología exigía una condición antecedente de humedad en el suelo llamada AMC, existiendo tres posibles escenarios, el primero bajo una condición seca, el segundo bajo condiciones normales, y el tercero, asocia una condición de humedad en el suelo antecedente a las precipitaciones.

El estudio se realizó para determinar una oferta hídrica para el año 2015, para lo cual fue necesario analizar los datos meteorológicos a nivel local y dentro del contexto regional, donde se logró examinar en dimensiones espacio-temporales la presencia del fenómeno del Niño, Comité ERFEN [18].

La cuenca de la quebrada Apauta, localizada sobre la región Andina, se analizó a partir de los datos de lluvias mensuales, evidenciando la época seca del Niño desde mayo hasta septiembre, a diferencia de otras áreas, donde llegó primero el fenómeno, o que tardó más en regresar la época de lluvias.

Pero también se demostró que durante los primeros cuatro meses del año 2015, sobre la cuenca de la quebrada Apauta, hubo un incremento de lluvias comparado con la data histórica, de igual forma, los meses de octubre y noviembre tuvieron aumentos inusuales en sus valores de precipitación.

Por todo este análisis, se determinó que la condición de humedad antecedente sobre la cuenca, representativa para el año 2015, era AMC II, es decir bajo condiciones normales, ya que existieron meses donde los suelos estuvieron secos y otros que, por el contrario, estaban húmedos antes de las lluvias.

2. RESULTADOS

El procesamiento a través de la herramienta computacional arrojó un raster con el CN y, sobre la capa vectorial ingresada, apareció la columna denominada CN con valores del parámetro de escurrimiento (ver Figura 15).

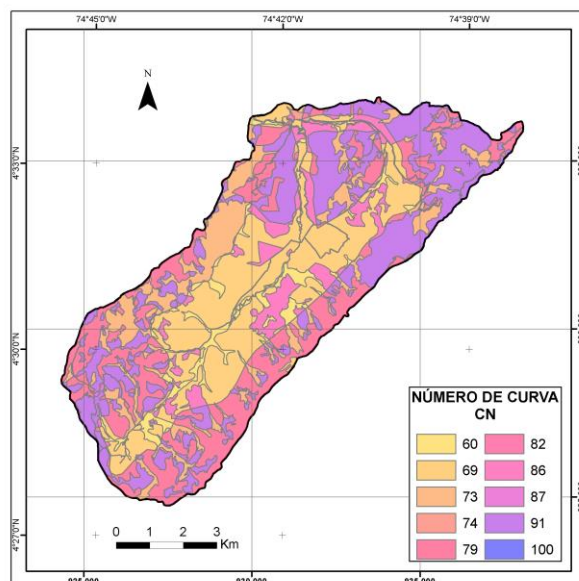


Figura 15. Número de curva de escurrimiento CN sobre la cuenca quebrada Apauta.
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Primero se ponderó la capa vectorial de precipitación obtenida por geoestadística, a través del modelo de interpolación Kriging, para ello, se calcularon los porcentajes de área (Tabla 7) para cada polígono de precipitación respecto el área de la cuenca, para luego multiplicarlos por cada valor de precipitación, obteniendo un único valor de precipitación ponderado sobre la cuenca de 839,82 mm, este valor en adelante será el valor de P .

De forma similar se calculó el valor ponderado de CN para la cuenca, a través de los diez valores de CN resultantes (Tabla 10), representados cada uno por una superficie sobre la cuenca, luego de aplicar el porcentaje de área por el número de curva, se obtuvo el parámetro de escorrentía sobre la cuenca de la quebrada Apauta en 78,82, que en adelante corresponderá al valor CN .

Tabla 10. Número de curva o CN obtenido para la cuenca quebrada Apauta.

CN	Área (Km ²)	Porcentaje
60	3,17	4,30%
69	17,99	24,42%
73	9,21	12,49%
74	0,13	0,18%
79	17,10	23,20%
82	0,24	0,33%
86	5,47	7,43%
87	0,27	0,36%
91	20,00	27,14%
100	0,10	0,14%
Total	73,68	100,00%

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Con estos dos valores se dio inicio al desarrollo de la formulación que contempla la metodología de relación lluvia-escorrentía “(1)”.

$$S = 25,4 \left[\frac{1000}{CN} - 10 \right] \quad (1)$$

Este valor de S representa la diferencia máxima potencial, entre la precipitación efectiva del periodo de cálculo o P , y la escorrentía superficial directa Q , López et al [1]. Para el caso el valor de S obtenido, fue de 68,25 mm.

Ahora mediante la siguiente fórmula “(2)” se calculó la escorrentía directa o Q .

$$Q = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{(P + 0,8 \times S)} \quad (2)$$

Para la cuenca de la quebrada Apauta, el valor Q fue de 763,12 mm año. Este valor Q o escorrentía directa, se transformó a unidades de caudal, obteniendo un valor de 1,782 m³ por segundo. Este valor, de acuerdo a la Resolución 865

de 2004, representa la oferta hídrica total, a cual se le deben aplicar dos factores, para obtener la oferta hídrica neta disponible, estos factores son:

a- Reducción por calidad de agua: Corresponde a la alteración de la calidad del agua, por presencia de materia orgánica y químicos. Sobre la cuenca de la quebrada Apauta, se destacan contaminantes con origen de aguas residuales domésticas y aguas escurridas de zonas ganaderas; de acuerdo a la norma, la oferta hídrica total obtenida se debe afectar por un porcentaje de 25%.

b- Reducción por caudal ecológico: Representa el caudal mínimo requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna; se adoptó normativamente un factor de 25% para aplicarlo sobre la oferta hídrica total.

Se determinó finalmente que la oferta hídrica neta disponible sobre la cuenca de la quebrada Apauta, era de 0,891 m³ por segundo u 89,1 litros por segundo.

Este dato fue objeto de comparación con los cálculos que elabora la CAR año tras año, para calcular la oferta hídrica sobre sus cuencas, ellos emplean el modelo Pamplona, CAR [19], con el cual se obtienen caudales a través de calibraciones anuales, apoyados en series históricas; este modelo arrojó un valor para el año 2015, de 87 litros por segundo sobre la cuenca estudiada.

La diferencia redondeada entre ambos cálculos fue de 2 litros por segundo, lo que reflejó una buena aproximación del cálculo respecto a valores oficiales.

Con la oferta hídrica calculada se procedió a calcular el índice de escasez de la cuenca, requiriendo para ello la demanda hídrica; se consultó a la Dirección de Evaluación, Seguimiento y Control Ambiental DESCA de la CAR, obteniendo un inventario de 27 captaciones superficiales sobre la UHA indagada, para el año 2015 (Figura 16), totalizando un caudal de 4,05 litros por segundo.

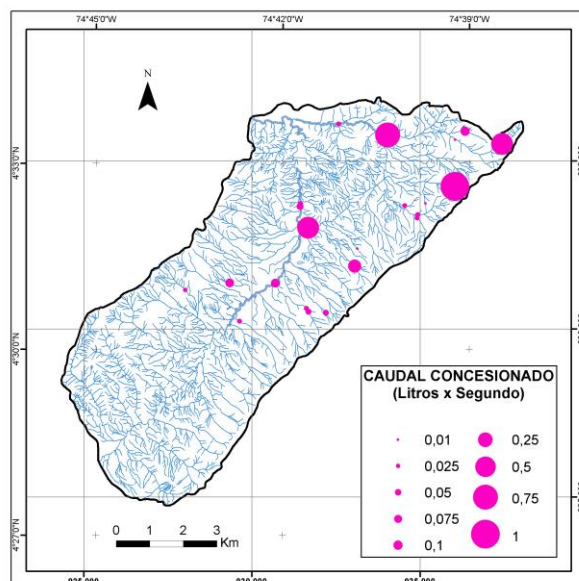


Figura 16. Demanda hídrica, concesiones de aguas sobre la cuenca quebrada Apauta, 2015. Fuente: Datos de la CAR y elaboración propia, 2016.

Con estos datos se realizó el cálculo anual presuntivo del índice de escasez sobre la cuenca de la quebrada Apauta, arrojando un valor de 0,045 o 4,5% (categoría mínima o demanda muy baja), que aplicado al Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1076 de 2015, se convierte en un coeficiente de escasez de 0, por ser inferior al umbral de 10%.

Todo esto se traduce que para el año 2015, la cuenca estuvo bien drenada, la demanda existente no amenazó la disponibilidad del recurso, lo que significa que los captadores del recurso hídrico para este territorio, se verán beneficiados económicamente al pagar muy poco por la captación de las aguas, gracias a la notable diferencia entre demanda y oferta hídrica sobre su cuenca hidrográfica.

3. CONCLUSIONES

Se calculó la oferta hídrica superficial para la cuenca de la quebrada Apauta, a través de la metodología relación lluvia-escorrentía, la cual puede ser aplicada en cuencas similares en magnitud.

La obtención de cada uno de los insumos para desarrollar la metodología, derivó en la aplicación de conceptos teóricos de varias ramas incluidas dentro de la geomática, como cartografía, geoestadística, sensores remotos; de igual forma se emplearon varias herramientas especializadas en el tratamiento de información espacial, como el procesamiento realizado sobre la imagen fuente, o como la rectificación topológica recibida sobre los datos vector a través de software SIG.

De forma general, se presentó el alcance en el componente espacial para el cálculo de la oferta hídrica, que la normatividad colombiana no desarrolla y que por lo tanto, da por entendida a las distintas autoridades ambientales; entidades que a su vez, les compete administrar el recurso hídrico de manera sostenible, apoyadas en datos técnicos que se deben calcular objetivamente sobre sus territorios, especialmente índices de escasez para periodos determinados, el dato obtenido comparado con información oficial fue similar.

Como la temática desarrollada involucraba el tema hidrográfico, fue importante caracterizar la cuenca espacialmente, a partir de la instancia responsable en organizar y dividir el territorio colombiano en áreas hidrográficas, como lo es el IDEAM, de esta forma fue más sencillo la identificación plena del código aplicado a la cuenca de la quebrada Apauta, partiendo de lo general a lo específico, por medio de la zonificación hidrográfica colombiana.

Fue vital tener certeza al adoptar una condición de humedad antecedente AMC, para correr el modelo por curva de escorrentía, para el caso de estudio, surgió la necesidad de examinar la precipitación mes a mes de cada una de las estaciones con influencia sobre la cuenca hidrográfica, verificando que el escenario elegido estuviera en armonía con las lluvias presentadas durante el

año 2015, pero también se le dio un contexto general a la zona de interés, respecto a situaciones variables en el tiempo como lo fue el fenómeno del Niño.

El dato insignia obtenido a través del estudio fue el número de curva o CN, para lo cual fue necesario generar y/o preparar varios insumos espaciales, contemplados en la metodología, pero para los cuales no existen normativamente, unas características técnicas mínimas en términos cualitativos y cuantitativos, así como la explicación en cuanto a su adquisición y procesamiento.

Para el caso de la cuenca de la quebrada Apauta, el índice de escasez fue muy bajo, indicando una brecha amplia entre la oferta y la demanda hídrica, esto es un indicador que ofrece un panorama ambiental positivo sobre la cuenca, particularmente en lo que se refiere a la administración del recurso hídrico, gracias a información histórica, se logró determinar este comportamiento como algo habitual sobre el territorio estudiado, lo que puede garantizar su sostenibilidad ambiental para futuras generaciones, en lo concerniente a abastecimiento hídrico.

REFERENCIAS

- [1] López, J. y Delgado, P. (2009, septiembre). "Caracterización Paramétrica de las Cuencas". Presentado en *Jornadas sobre Hidrología de Superficie en Tenerife*, Santa Cruz de Tenerife, España.
- [2] Ferrer, M., Rodríguez, J. y Estrela T. (1995). Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del Agua*, volumen (2), pp. 43-58.
- [3] Pérez, J.A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*. Mérida, España: Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, 217 p.
- [4] Arango, M., Branch, J.W. y Botero, V. (2004). Clasificación No Supervisada de Coberturas Vegetales sobre Imágenes Digitales de Sensores Remotos. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*, volumen (58), pp.2611-2634.
- [5] Serrato, P.K. (2016, marzo). "Interpretación visual de Imágenes de Sensores Remotos". Presentado en Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica - CIAF, grupo de Percepción Remota, Bogotá, Colombia.
- [6] Pérez, M.L. (2001). *Sistema Radarsat*. Bogotá: Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico UDFJC, 242 p.
- [7] López, M.A. (2012). *Unidad Mínima Cartografiada*. En: <http://es.slideshare.net/leugimxw/unidad-mnima-cartografiada> (octubre de 2016).

[8] Pacheco, C.E. y Pozzobon, E.N. (2006). *Manual de Ejercicios de Laboratorio Fotogrametría y Fotointerpretación*. Bogotá: Publicaciones Vicerrectorado Académico CODEPRE Universidad de Los Andes, 86 p.

[9] Malagón, D. (2002). *Los Suelos de Colombia*. En: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf> (octubre de 2016).

[10] Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2001). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca*. Bogotá: IGAC.

[11] Díaz, P. y Fernández, P. (2001). *La Distribución Normal*. En: https://www.fisterra.com/mbe/investiga/distr_normal/distr_normal2.pdf (octubre de 2016).

[12] Palladino, A. (2011). *Gráfico de Caja*. En: <http://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GR%C3%81FICO%20DE%20CAJA.pdf> (octubre de 2016).

[13] Kelmansky, D. (2008). *Gráficos Cuantil-Cuantil (Q-Q plots)*. En: http://www.dm.uba.ar/materias/analisis_de_datos/2008/1/teoricas/Teor5.pdf (octubre de 2016).

[14] Sánchez, F.J. (2007). *Cálculo de la Precipitación Areal mediante Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Escuela de Organización Industrial EOI, Master en Ingeniería y Gestión del Agua, 28 p.

[15] Marco, P.P. (2011, octubre). "Métodos de Interpolación en Arcgis 10". Presentado en *UNAM Geografía*, Ciudad de México, México.

[16] US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2013). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. En: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf (octubre de 2016).

[17] Martínez, A., Mongil J. y del Río, J. (2003). *Pequeña Guía de Uso del Modelo MODIPÉ*. En: <http://www.oasification.com/archivos/Pequeña%20guía%20de%20uso%20del%20modelo%20MODIPÉ.pdf> (octubre de 2016).

[18] Comité Técnico Nacional Estudio Fenómeno El Niño ERFEN. (2015). *Seguimiento del Fenómeno El Niño 2014-2015*. En: <http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/dircient/erfen/noticias/COMUNICADO-NACIONAL-CTN-ERFEN-AGOSTO-2015.pdf> (octubre de 2016).

[19] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. (2010). *Actualización de la Oferta Hídrica Superficial para las Cuencas hasta de Quinto Orden para la Jurisdicción de la CAR*. Bogotá: CAR.