



**Creemos
en Boyacá**



EMPRESA DEPARTAMENTAL DE
SERVICIOS PÚBLICOS DE BOYACÁ S.A. ESP
PAP - PDA

**GOBERNACIÓN DE BOYACÁ
EMPRESA DEPARTAMENTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS DE BOYACÁ S.A. ESP
NIT. 900.297.725-0**

**CONSULTOR
AGUAS DE LOS ANDES
NIT. 901.152.609-5**



CONTRATO DE CONSULTORÍA No. 01 DE 2018

**“CONSULTORÍA PARA REALIZAR ESTUDIOS Y DISEÑOS DE DETALLE PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA EN 48 ACUEDUCTOS RURALES
INVIABLES SANITARIAMENTE Y EN RIESGO ALTO DEL DEPARTAMENTO DE
BOYACÁ”**

**ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA EL ACUEDUCTO DE LA JUNTA
ADMINISTRADORA DEL ACUEDUCTO DE LA VEREDA COMUNIDAD PARTE
CORAZÓN, SECTOR PEÑA DE AGUILA**



**DEPARTAMENTO DE BOYACÁ
MUNICIPIO DE PESCA
2018**

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

CONTROL DE CAMBIOS

VERSIÓN ACTUAL	FECHA	NATURALEZA DEL CAMBIO
01	28/11/2018	Versión inicial

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	6
1 ÁREA DE ESTUDIO	7
1.1 MORFOMETRÍA.....	7
1.2 CUENCA HIDROGRÁFICA	7
1.2.1 Delimitación de cuencas.....	8
1.3 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	9
1.3.1 Área de la cuenca – área aferente (a)	9
1.3.2 Perímetro	9
1.3.3 Longitud del cauce principal (l_t)	10
1.3.4 Ancho medio de la cuenca (b)	10
1.3.5 Factor de forma (f)	10
1.3.6 Coeficiente de compacidad (k_c) o índice de gravelius	11
1.3.7 Índice de alargamiento (i_a)	12
1.3.8 Altura del cauce principal (H_{CAUCE})	12
1.3.9 Pendiente del cauce principal (I_{CAUCE})	12
1.3.10 Curva hipsométrica.....	13
1.3.11 Resumen parámetros morfométricos.....	15
2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	16
2.1 INFORMACIÓN RECOPIADA	19
2.1.1 Precipitación total	19
2.1.2 TEMPERATURA.....	21
3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO MODELO HMS.....	22
3.1 METODOLOGÍA.....	22
3.1.1 Complementar datos	22
3.2 ESTIMACION DE CAUDALES	22
3.3 CAUDALES MÁXIMOS.....	22
3.3.1.1 Metodo lluvia-escurrentia – Soil Conservation Service (SCS).....	23
3.4 CAUDALES MEDIOS.....	36
3.4.1 Resultados.....	36

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

3.4.1.1	Evapotranspiración Real por método balance hídrico a largo plazo.	37
3.4.1.2	Caudales medios Cuenca Quebrada PEÑA DE ÁGUILA	37
3.5	CAUDAL ECOLOGICO.....	39
3.5.1	Caudales mínimos Cuenca Quebrada Peña de águila.	39
3.5.1.1	Análisis de frecuencia	40
4	ANÁLISIS HIDROLÓGICO MODELO SCHOSINSKY	50
4.1	METODOLOGÍA.....	50
4.2	RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO	50
4.2.1	Balance de suelos	50
4.2.1.1	Fracción de lluvia interceptada por el follaje	50
4.2.1.2	Coeficiente de infiltración	51
4.2.1.3	Infiltración pluvial mensual	52
4.2.1.4	Escorrentía superficial.....	53
4.2.1.5	Evapotranspiración potencial	53
4.2.1.6	Coeficiente de humedad antes de la evapotranspiración.....	54
4.2.1.7	Evapotranspiración potencial real tentativa.....	55
4.2.1.8	Humedad disponible	55
4.2.1.9	Evapotranspiración real.....	56
4.2.1.10	Humedad del suelo al inicio y al final del mes.....	56
4.2.1.11	Cálculo de recarga potencial del acuífero	57
4.2.1.12	resultados.....	1
	CONCLUSIONES	1
	BIBLIOGRAFÍA	3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Localización general del proyecto.....	7
Figura 1-2 Delimitación de la cuenca Peña de águila	8
Figura 1-3 Delimitación de la cuenca La Toma	9
Figura 1-4 Curva Hipsométrica	14
Figura 1-5 Resumen parámetros morfométricos, cuenca Peña de águila	15
Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones para la cuenca Peña de águila	18
Figura 2-2 Distribución espacial de las estaciones para la cuenca La Toma	18
Figura 2-3 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación	20
Figura 2-4 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación	20
Figura 2-5 Valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura	21
Figura 3-1 Mapa de regionalización Curvas regionalizadas	28
Figura 3-2 Curvas IDF, estación Pesca.....	29
Figura 3-3 Hietograma e hidrograma de descarga 1 hora de tormenta	30
Figura 3-4 Hietograma e hidrograma de descarga 2 horas de tormenta.....	31
Figura 3-5 Hietograma e hidrograma de descarga 3 horas de tormenta.....	31
Figura 3-6 Hietograma e hidrograma de descarga 6 horas de tormenta.....	32
Figura 3-7 Hietograma e hidrograma de descarga 12 horas de tormenta.....	32
Figura 3-8 Hietograma e hidrograma de descarga 24 horas de tormenta.....	33
Figura 3-9 Cuenca Peña de águila, HEC-HMS.....	34
Figura 3-10 Hidrograma y curva de caudal	35
Figura 3-11 Caudal máximo.....	35
Figura 3-13 Evapotranspiración Real estimada para la cuenca Peña de águila	37
Figura 3-14 Caudales medios estimados	38
Figura 3-15 Curva de caudales medios estimados	38
Figura 3-16 Valores de Caudales mínimos	40
Figura 3-17 Distribución Normal	42
Figura 3-18 Distribución Log Normal.	43
Figura 3-19 Distribución Pearson tipo III Fuente: http://slideplayer.es/slide/4099819/ ..	45
Figura 3-20 Distribución Gumbel	46
Figura 3-21 Análisis estadístico, ajustes de distribuciones extremos.....	49

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica	9
Tabla 1-2. Clasificación de cuenca de la FAO	11
Tabla 1-3 Datos de la curva hipsométrica.....	14
Tabla 1-4. Resumen parámetros morfométricos, cuenca La Toma.....	15
Tabla 2-1. Estaciones dentro de las áreas de estudio.....	16
Tabla 2-2. Cantidad Total de series por variable.....	19
Tabla 3-1. Números de curva CN recomendados	23
Tabla 3-2. Área(s) de las cuencas.....	25
Tabla 3-3. Tiempos de concentración	27
Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia.	28
Tabla 3-5 Resultados de caudales de excedencia 50% y 95%.....	39
Tabla 3-6 Caudal ecológico cuenca Peña de águila	39
Tabla 3-7. Datos estadísticos para las distribuciones y ajustes	49
Tabla 4-1 Componentes del coeficiente de infiltración.....	52
Tabla 4-2 Componentes del coeficiente de infiltración.....	52
Tabla 4-3 Porcentaje de horas luz mensual con respecto al año.....	54
Tabla 4-4 Resumen de las propiedades físicas del suelo según texturas	54
Tabla 4-5 Resultados obtenidos para la recarga del Acuífero La Toma	1

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

INTRODUCCIÓN

En el presente informe se documentan los procedimientos y cálculos del componente hidrológico con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en el contrato de consultoría No. 01 de 2018. De igual manera, se evidencian los estudio y resultados obtenidos de los estudios hidrológicos de la(s) fuentes de captación actuales, esto con el fin de identificar la disponibilidad del recurso hídrico para las demandas estimadas en el sistema de acueducto para el cual se está realizando el análisis.

En el CAPÍTULO 1, se realiza la descripción general de la zona y el estudio morfológico objeto del contrato, al igual que una representación de las cuencas, mostrando la limitación de las mismas con sus principales características.

En los CAPÍTULO 2, se muestra de forma metódica el análisis de los parámetros climatológicos y cálculos necesarios para realizar este estudio hidrológico.

En el CAPÍTULO 3, se analizará las diferentes características de las cuenca en estudio, manejando la información disponible aplicando el método computacional del HEC – HMS, para la fuente superficial.

En el CAPÍTULO 4, se analizará las diferentes características de la cuenca en estudio, manejando la información disponible aplicando el método del cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante un balance hidrológico de suelos de Gunter Schosinsky, para la fuente subterránea.

Finalmente, se hará un examen de las fuentes de abastecimiento para revisar la viabilidad para suministrar el recurso hídrico al acueducto que actualmente opera en el área de estudio y el horizonte de diseño.

1 ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto se desarrolla en el acueducto de la Junta administradora del acueducto de la Vereda de Comunidad parte corazón, sector Peña de águila.

La fuente de abastecimiento superficial se encuentra localizada en las coordenadas 5.572527 m. N y -73.088780 m. E, a una altura de 3330.0 m.s.n.m., y la fuente de abastecimiento subterránea se encuentra localizada en las coordenadas 5.587516 m. N y -73.101689 m. E, a una altura de 3542.9 m.s.n.m.

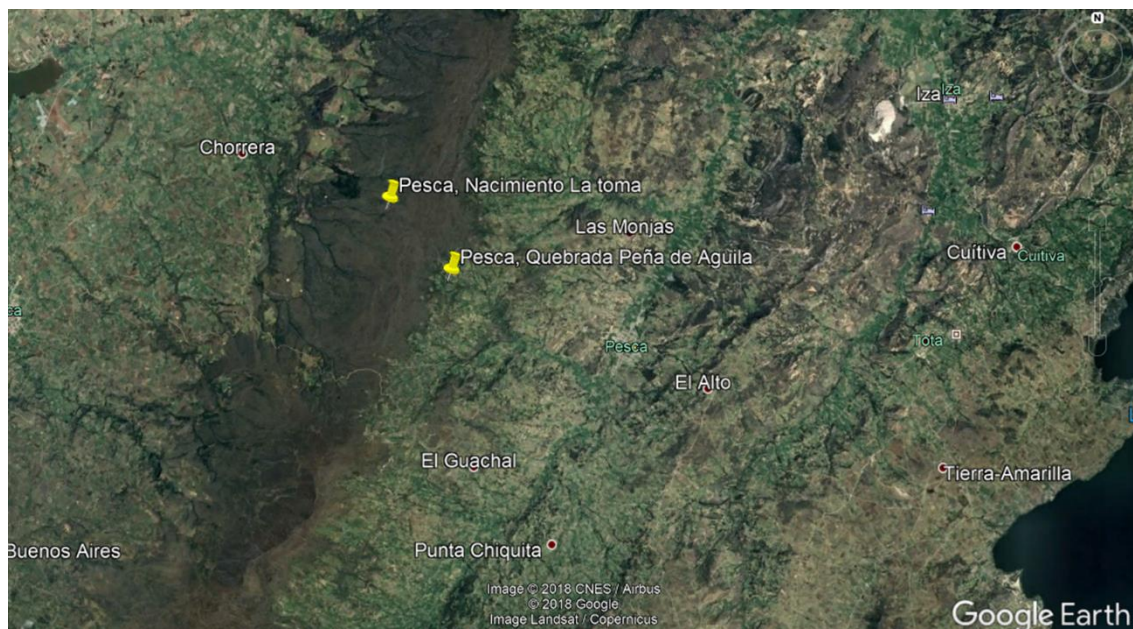


Figura 1-1 Localización general del proyecto
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, Google Earth, 2018

Para la evaluación del proyecto se tuvieron en cuenta el punto de ubicación de la bocatoma, la cual se identificó en las visitas de campo que se realizaron en el área de estudio y la topografía respectivamente.

1.1 MORFOMETRÍA

1.2 CUENCA HIDROGRÁFICA

La WMO y la UNESCO definen el concepto general de cuenca como “área de drenaje de un curso de agua, río o lago” (UNESCO & WMO, 2012). De acuerdo al HIMAT, ahora IDEAM, ...“La cuenca es un espacio geográfico limitado por divisorias de agua donde se expresa el ciclo hidrológico en un volumen de control que permite, a partir del agua precipitada que entra a este dominio, determinar la parte que escurre a lo largo de

las laderas y que puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, la fracción que se evapora o infiltra y finalmente la cantidad que fluye a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial”... (HIMAT, 1985).

1.2.1 DELIMITACIÓN DE CUENCAS

Para la zona de estudio se delimitaron las cuencas dependiendo del punto de captación, estas se nombraron de acuerdo a los nombre regionales, a razón de lo establecido en el contrato y manejo adecuado de los habitantes de la zona como se puede apreciar en las figuras 1-2 y 1-3.

La delimitación se realizó con el software ArcGis, a partir de las curvas de nivel generando un TIN y posteriormente un Raster tipo Grid; a partir del Raster mediante las herramientas de hidrología se eliminaron las imperfecciones (huecos y sumideros) del ráster, se determinó la dirección, acumulación del flujo y por ultimo con la localización de la bocatoma se realizó la delimitación de la cuenca.

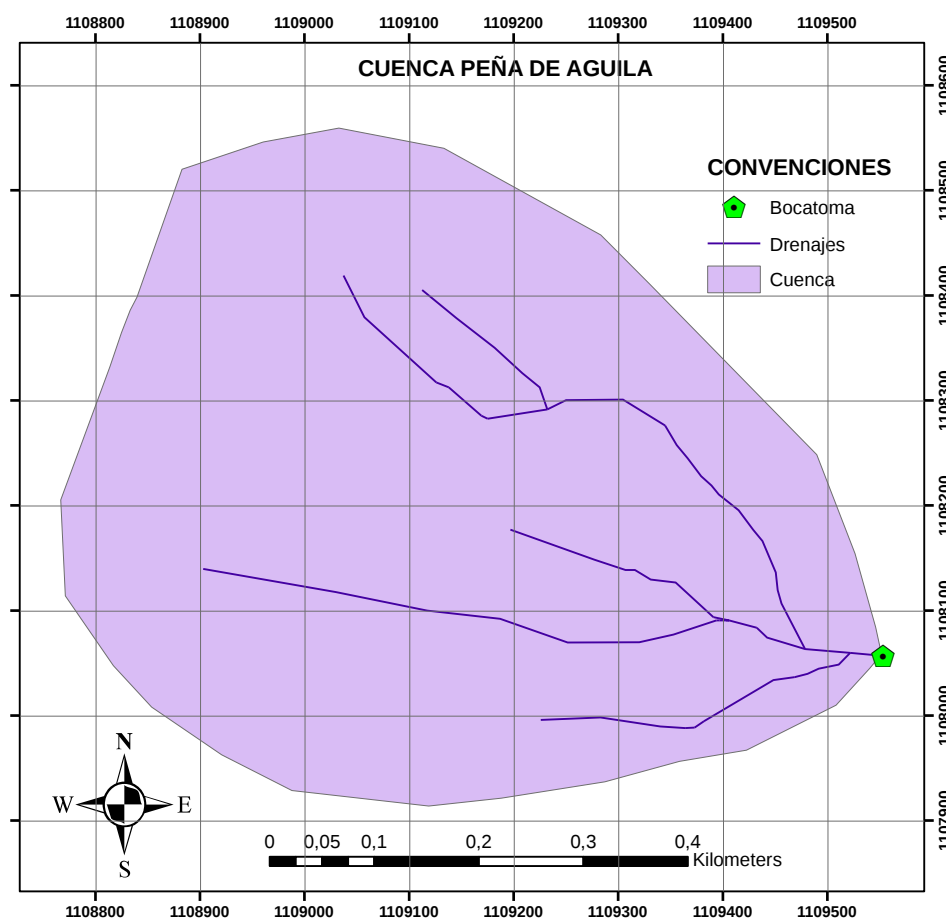


Figura 1-2 Delimitación de la cuenca Peña de águila
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

PONER IMAGEN DE LA DELIMITACION DE LA CUENCA ARCGIS

Figura 1-3 Delimitación de la cuenca La Toma

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

1.3 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

De acuerdo con lo anterior, las características de una cuenca y de las corrientes que forman el sistema hidrográfico pueden representarse cuantitativamente mediante índices de forma y relieve de la cuenca y de la conexión con la red fluvial; muchos de los índices son razones matemáticas, por lo que pueden utilizarse para caracterizar y comparar cuencas de diferentes tamaños (Domínguez, 2010). A continuación se muestran los parámetros más importantes en un análisis morfométrico como se encuentran en el Anexo 1:

1.3.1 ÁREA DE LA CUENCA – ÁREA AFERENTE (A)

Este parámetro probablemente resulta ser el más importante ya que está directamente relacionado con los procesos hidrológicos que se dan al interior de la cuenca; está definida como la proyección ortogonal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Reyes T. et al., 2010). Así mismo, el mismo autor propone una clasificación en función del área de la unidad hidrográfica, y se muestra a continuación:

ÁREA (Km ²)	UNIDAD HIDROLÓGICA
<5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Microcuenca
100-300	Subcuenca
>300	Cuenca

Tabla 1-1. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica

Fuente. Jiménez E. & Materón M., 1986

Las áreas de las cuencas Peña de águila y La Toma son respectivamente de 0,36 y 0,29 Km² lo que las clasifica como un Sector.

1.3.2 PERÍMETRO

El perímetro se estima mediante plataformas CAD y/o GIS, y se calcula una vez se ha delimitado la cuenca bajo un sistema de geo-referenciación. Este parámetro junto al área permite inferir sobre la forma de la cuenca (Reyes T. et al., 2010).

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

El perímetro para las cuencas Peña de águila y La Toma, son de 2.24 y 2.61km respectivamente.

1.3.3 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L_T)

Es la distancia del recorrido que hace el cauce principal desde su nacimiento hasta su desembocadura medida en kilómetros. Usualmente la longitud del cauce principal L_t , presenta un grado de sinuosidad, el cual se representa a través del coeficiente de sinuosidad K_s y que constituye la relación entre la distancia total configurada por el recorrido de la corriente L_t , sobre la distancia lineal desde el nacimiento hasta la desembocadura L_l (Domínguez, 2010), de la siguiente manera:

$$K_s = \frac{L_t}{L_l}$$

Dicho lo anterior, los cauces con índice de sinuosidad mayores a 1.5 son considerados corrientes meándricas, las cuales tienden a presentar pendientes suaves y mayor tiempo de tránsito hidrológico.

La longitud del cauce principal de la cuenca Peña de águila es de 0,71 km respectivamente.

1.3.4 ANCHO MEDIO DE LA CUENCA (B)

Se determina cómo el cociente entre el área de la cuenca y la longitud lineal de la corriente principal:

$$B = \frac{A}{L_l}$$

El ancho medio para las cuencas Peña de águila y La Toma son de 0.5 y 0.3 km respectivamente.

1.3.5 FACTOR DE FORMA (F)

Esta variable relaciona el área de la cuenca (A) con el cuadrado de la longitud total del cauce principal (L_t), en casos donde la cuenca es perfectamente cuadrada el factor de forma es igual a la unidad, mientras cuando se trate de cuencas alargadas el factor de forma tomara valores inferiores a la unidad (Jardí, 1985).

$$F = \frac{A}{L_t^2}$$

Este parámetro adimensional mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas muy intensas a lentas sostenidas; un valor de F superior a la unidad, dará el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto, por consiguiente con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (Reyes T. et al., 2010).

Para la cuenca Peña de águila, el factor de forma es de 0,7 respectivamente.

1.3.6 COEFICIENTE DE COMPACIDAD (K_c) O ÍNDICE DE GRAVELIUS

Es la relación entre la longitud del perímetro de la cuenca P_{cuenca} y el perímetro de un círculo con área equivalente a la de la cuenca $P_{\text{círculo}}$, de esta manera:

$$k_c = \frac{P_{\text{cuenca}}}{P_{\text{círculo}}} = \frac{P_{\text{cuenca}}}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P_{\text{cuenca}}}{\sqrt{A}}$$

Así, la clasificación de cuencas en función del índice de compacidad según la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO), las cuencas con valores de compacidad superiores a 1.5, tienden a tener un tránsito más largo de sus crecientes y por lo tanto atenuación de los hidrogramas disminuyendo el riesgo de inundación.

TIPO	RANGO	DESCRIPCIÓN
KC ₁	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda
KC ₂	1.26 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga
KC ₃	1.51 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
KC ₄	> 1.75	rectangular oblonga

Tabla 1-2. Clasificación de cuenca de la FAO

Fuente. FAO, 1985

El índice de compacidad para las cuencas Peña de águila y La Toma son de 1.05 y 1.34 respectivamente; lo cual las clasifica como Redonda a oval redonda y oval redonda a oval oblonga respectivamente.

1.3.7 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO (IA)

El índice de alargamiento propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medido perpendicularmente a la dimensión anterior; cuando el IA, toma valores mayores a 1, se trata seguramente de cuencas alargadas, mientras que para valores cercanos a 1, se trata de una cuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y se puede asumir que posee un río principal corto; así mismo este parámetro adimensional, permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre (Reyes T. et al., 2010).

$$IA = \frac{L_t}{B}$$

Para la cuenca Peña de águila, el índice de alargamiento es de 1,58 respectivamente; que corresponde a una cuenca alargada.

1.3.8 ALTURA DEL CAUCE PRINCIPAL (H_{CAUCE})

Se calcula como la altura promedio de los tramos característicos utilizados en la construcción del perfil longitudinal del cauce principal. Para las corrientes con muchos cambios de altura en el recorrido del cauce principal se calcula la pendiente promedio ponderada con base en las frecuencias relativas producto de la agrupación en clases (usualmente entre 8 a 12 clases) de los valores de altura tomados en los tramos característicos (Domínguez, 2010):

$$H_{cauce} = H_1 f_1 + H_2 f_2 + \dots + H_n f_n$$

Donde:

H_i = es la cota de altura en la mitad del intervalo de cada clase y,

F_i = es la frecuencia que le corresponde a ese intervalo.

La altura ponderada del cauce principal de la cuenca Peña de águila es de 3330 msnm respectivamente.

1.3.9 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL (I_{CAUCE})

Por pendiente se entiende el cociente entre los incrementos de alturas (cotas) y los incrementos de longitud de la corriente para un tramo determinado. Se distingue la pendiente promedio y pendiente promedio ponderada. La pendiente promedio I_{cauce} es el cociente entre la caída de alturas ΔH sobre la longitud del tramo ΔL en la que esta caída ocurre (Domínguez, 2010), así:

$$I_{cauce} = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Para las corrientes con muchos cambios de pendiente se calcula la pendiente promedio ponderada. Ésta utiliza las frecuencias relativas producto de la agrupación en clases (usualmente entre 8 a 12 clases) para ponderar los valores de pendiente calculados (Domínguez, 2010):

$$I_{\text{cauce}} = I_1 f_1 + I_2 f_2 + \dots + I_n f_n$$

Donde:

I_i = es la pendiente en la mitad del intervalo de cada clase y,
 F_i = es la frecuencia que le corresponde a ese intervalo.

La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua. En los tramos de pendiente fuerte superiores al 5 % las velocidades de flujo resultan tan altas que pueden mover como carga de fondo sedimentos de diámetros mayores de 5 centímetros, además de los sólidos que ruedan por desequilibrio gracias al efecto de lubricación producido por el agua (Reyes T. et al., 2010).

La pendiente ponderada del cauce principal de la cuenca Peña de águila es de 23 % respectivamente.

1.3.10 CURVA HIPSOMÉTRICA

Esta curva muestra una interpretación clara de la distribución de las áreas de la cuenca contenidas en distintas zonas con respecto a su pendiente. También son un indicativo a los patrones evolutivos de las cuencas (Strahler, 1952); Las ...“cuencas con mayor parte del área con elevación por encima de los valores medios de la misma, son consideradas cuencas con gran potencial erosivo (cuencas inmaduras), de lo contrario son consideradas cuencas maduras o sedimentarias”... (Strahler, 1952). Para cuencas donde esta relación: área relativa cuenca – elevación ponderada, se consideran como cuencas en equilibrio.

Para construirla se determinan de 8 a 12 zonas altitudinales y de acuerdo con la información del modelo digital de terreno, se calcula el porcentaje de área contenido en cada una de ellas. En el eje horizontal se gráfica el porcentaje de área de la cuenca cubierto por cada zona altitudinal y en el vertical los intervalos de clase de cada zona altitudinal (Domínguez, 2010).

A continuación, se muestra la curva hipsométrica para la cuenca Peña de Águila.

No.	COTAS		PROMEDIO	AREA ENTRE CURVAS	% AREA ENTRE CURVAS	AREA ACUMULADA	% AREA ACUMULADA
	Min	Max					
1	3246.7	3258.9	3252.8	13986.0	3.8%	364608	100.0%
2	3258.9	3271.0	3264.9	29232.0	8.0%	350622	96.2%
3	3271.0	3283.2	3277.1	32670.0	9.0%	321390	88.1%
4	3283.2	3295.4	3289.3	23499.0	6.4%	288720	79.2%
5	3295.4	3307.5	3301.4	16083.0	4.4%	265221	72.7%
6	3307.5	3319.7	3313.6	14481.0	4.0%	249138	68.3%
7	3319.7	3331.9	3325.8	15156.0	4.2%	234657	64.4%
8	3331.9	3344.0	3337.9	13932.0	3.8%	219501	60.2%
9	3344.0	3356.2	3350.1	12789.0	3.5%	205569	56.4%
10	3356.2	3368.3	3362.3	13878.0	3.8%	192780	52.9%
11	3368.4	3380.5	3374.4	16479.0	4.5%	178902	49.1%
12	3380.5	3392.7	3386.6	16839.0	4.6%	162423	44.5%
13	3392.7	3404.8	3398.8	17568.0	4.8%	145584	39.9%
14	3404.8	3417.0	3410.9	19521.0	5.4%	128016	35.1%
15	3417.0	3429.2	3423.1	22716.0	6.2%	108495	29.8%
16	3429.2	3441.3	3435.2	23031.0	6.3%	85779	23.5%
17	3441.3	3453.5	3447.4	18351.0	5.0%	62748	17.2%
18	3453.5	3465.7	3459.6	15687.0	4.3%	44397	12.2%
19	3465.7	3477.8	3471.7	15633.0	4.3%	28710	7.9%
20	3477.8	3490.0	3483.9	13077.0	3.6%	13077	3.6%

Tabla 1-3 Datos de la curva hipsométrica
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

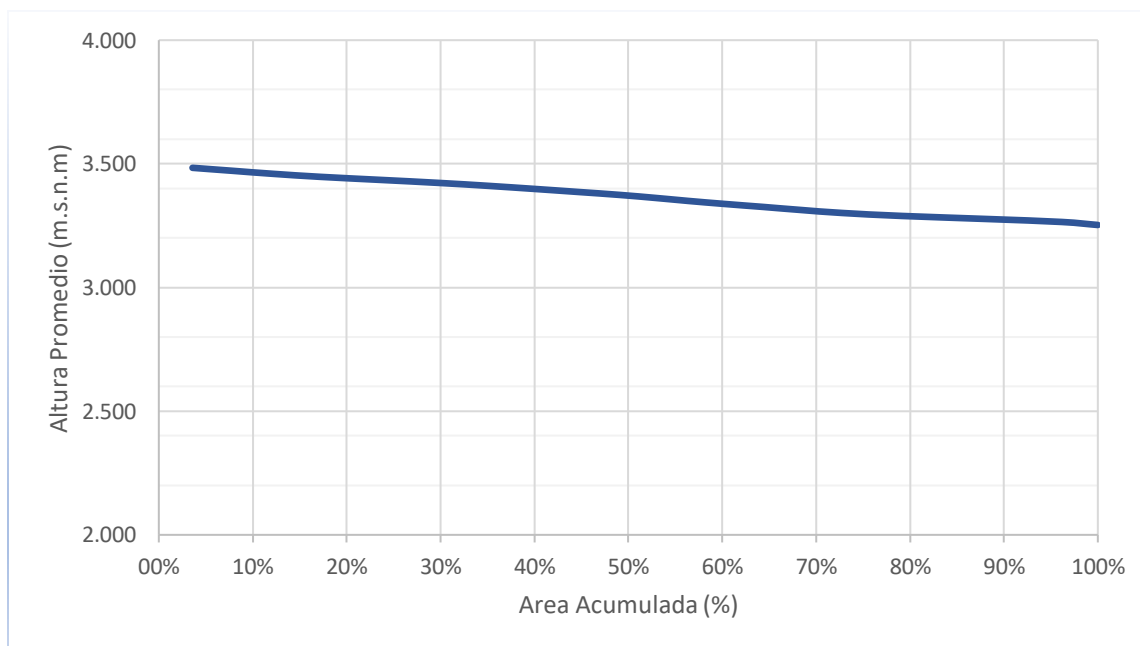


Figura 1-4 Curva Hipsométrica
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

1.3.11 RESUMEN PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

A continuación, se presenta un resumen de los parámetros morfométricos calculados para las cuencas analizadas.

PARAMETRO	UNIDAD	CUENCAS
		NACIMIENTO LA TOMA
Area	km ²	0.29
Perimetro	km	2.61
Longitud	km	0.90
Ancho medio de la cuenca	km	0.3
Coeficiente compacidad	Adimensional	1.34
Pendiente media de la cuenca	%	29.14
X centroide	m	1109364.564
Y centroide	m	1108609.649
Altura Promedio	m.s.n.m	3542.9

Tabla 1-4. Resumen parámetros morfométricos, cuenca La Toma
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

PARAMETRO	UNIDAD	CUENCAS
		PEÑA DE AGUILA
Area	km ²	0.36
Perimetro	km	2.24
Longitud	km	0.80
Longitud Cauce Principal	km	0.71
Ancho medio de la cuenca	km	0.5
Factor de Forma	Adimensional	0.71
Coeficiente compacidad	Adimensional	1.05
Índice de alargamiento	Adimensional	1.58
Altura inicio cauce principal	m.s.n.m	3412
Altura salida cauce principal	m.s.n.m	3248
Pendiente del cauce principal	%	23%
Pendiente media de la cuenca	%	35.05
Longitud total de drenaje	km	2.02
Densidad de drenaje	km/km ²	5.61
Tiempo concentración promedio	minutos	11.50
Tiempo de Retardo	minutos	6.90
X centroide	m	1109131.981
Y centroide	m	1108210.643
CN	Adimensional	65
Rb	Adimensional	1.50
Altura Promedio	m.s.n.m	3330.00

Figura 1-5 Resumen parámetros morfométricos, cuenca Peña de águila
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La variabilidad del sistema climático se usa para denotar las desviaciones de las estadísticas en el clima a través de un período de tiempo, para ello se debe comparar dicho periodo con estadísticas más antiguas del mismo periodo calendario, en este sentido, la variabilidad climática es medida como estas desviaciones de las medidas centrales que se denominan como anomalías dentro del sistema (WMO, 1999).

Para la caracterización climática del proyecto, se buscaron estaciones hidrometeorológicas en el catálogo de estaciones del IDEAM, para el presente estudio se identificaron las siguientes estaciones con influencia en la(s) cuencas:

CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	MUNICIPIO	ENTIDAD	TIPO
24030120	Pesca	Pesca	Pesca	IDEAM	PG
24035040	La copa	Tuta	Toca	IDEAM	CO

Tabla 2-1. Estaciones dentro de las áreas de estudio

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Se entiende como estación meteorológica al equipo de medición con el que se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos en un sitio determinado, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio.

A continuación, se da una descripción detallada de los tipos de estaciones meteorológicas basada en normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial, (OMM) y en los criterios del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

- Estación Pluviométrica (PM): permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas.
- Estación Pluviográfica (PG): Registra en forma mecánica y continúa la precipitación, y permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia.
- Estación Climatológica principal (CP): se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

- Estación Climatológica ordinaria (CO): miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas.
- Estación Sinóptica principal (SP): se efectúan observaciones de los principales elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitación, temperaturas extremas, capas significativas de nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. Esta información se codifica y se intercambia a través de los centros mundiales, con el fin de alimentar los modelos globales y locales de pronóstico y para el servicio de la aviación.
- Estación Sinóptica secundaria (SS): Al igual que en la estación anterior, las observaciones se realizan a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire y viento.
- Estación Agrometeorológica (AM): se realizan observaciones meteorológicas y otras observaciones que ayudan a determinar las relaciones entre el clima, por una parte, y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo).

En la siguiente figura, se puede observar la distribución espacial de las estaciones que tienen influencia en el área de trabajo definida.

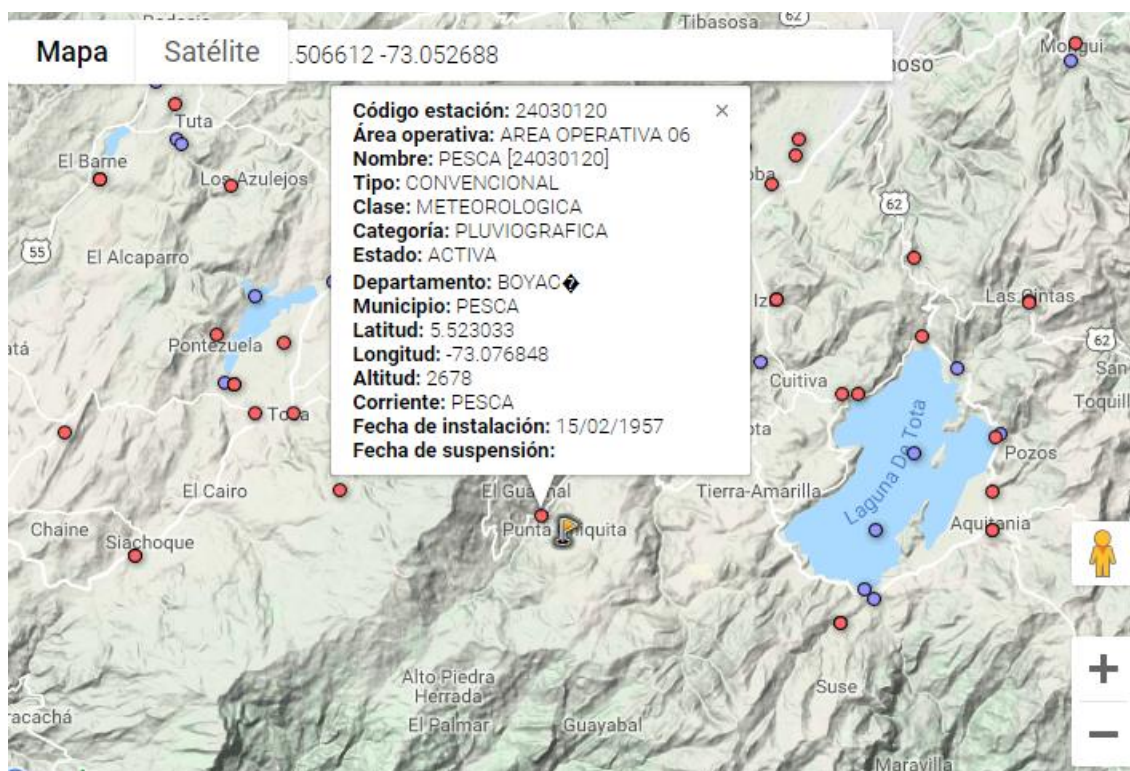


Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones para la cuenca Peña de águila
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, IDEAM, 2018

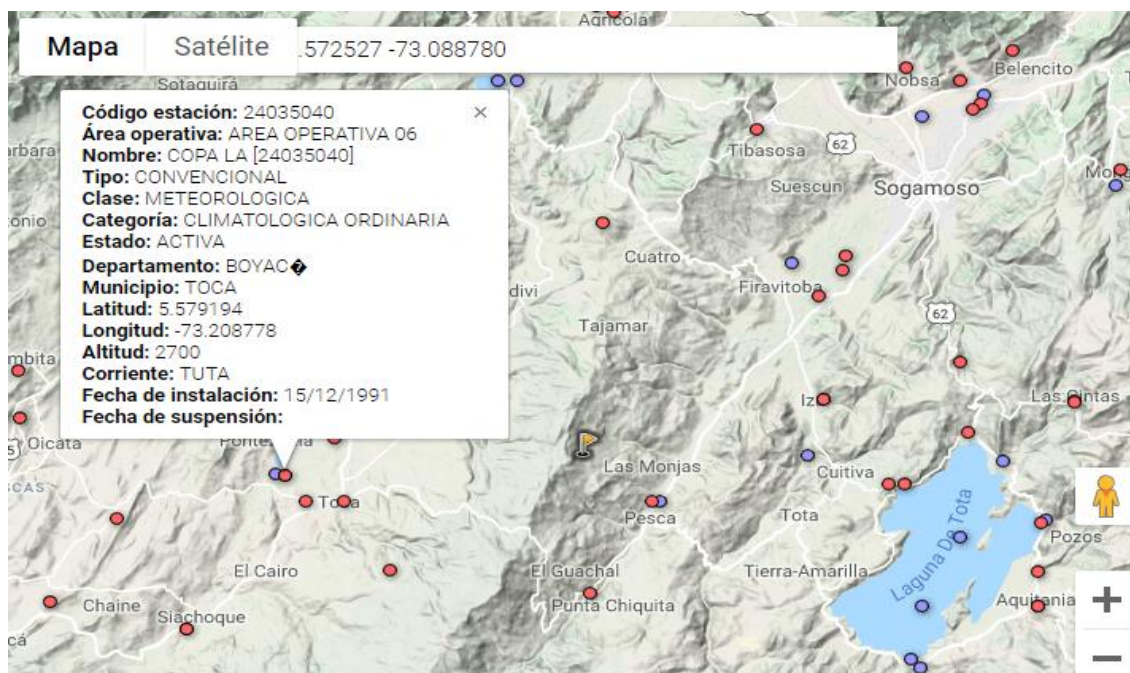


Figura 2-2 Distribución espacial de las estaciones para la cuenca La Toma
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, IDEAM, 2018

2.1 INFORMACIÓN RECOPIADA

La noción de recolección refiere al proceso y el resultado de recolectar (reunir, recoger o almacenar) un dato, una información que permite generar un cierto conocimiento; para realizar la caracterización climática, se obtuvo información a resolución diaria de las siguientes variables (Ver Anexo 2 y 8).

VARIABLE	SERIES
Precipitación total 24 horas	2
Temperatura	1

Tabla 2-2. Cantidad Total de series por variable

Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2.1.1 PRECIPITACIÓN TOTAL

La precipitación se constituye en el componente principal del ciclo hidrológico, pues es en general, la principal fuente de abastecimiento de agua para una región. Los estudios de la precipitación analizan el régimen de lluvias en la región a partir de los datos de estaciones climatológicas, pluviométricas y/o pluviográficas.

La Precipitación media para la cuenca Peña de águila es de 229.4 mm/año, con una distribución bimodal donde se identifican dos períodos bien definidos a lo largo del año, los períodos de máxima precipitación correspondientes a los meses de Marzo - Julio y Septiembre - Noviembre, los cuales tienen una precipitación acumulada de 153.3 mm que es un equivalente al 66.84 % del total, y en el segundo período, se presentan el 33.16 % con 76.1 mm, siendo este el periodo seco correspondiente a los meses de Enero, Febrero, Agosto y Diciembre, con precipitaciones máximas en 24 horas promedio de 12.5 mm.

A continuación, se presentan los valores de precipitación máximos, medios y mínimos, para la(s) estaciones influyentes en el área de estudio (Ver Anexo 3).

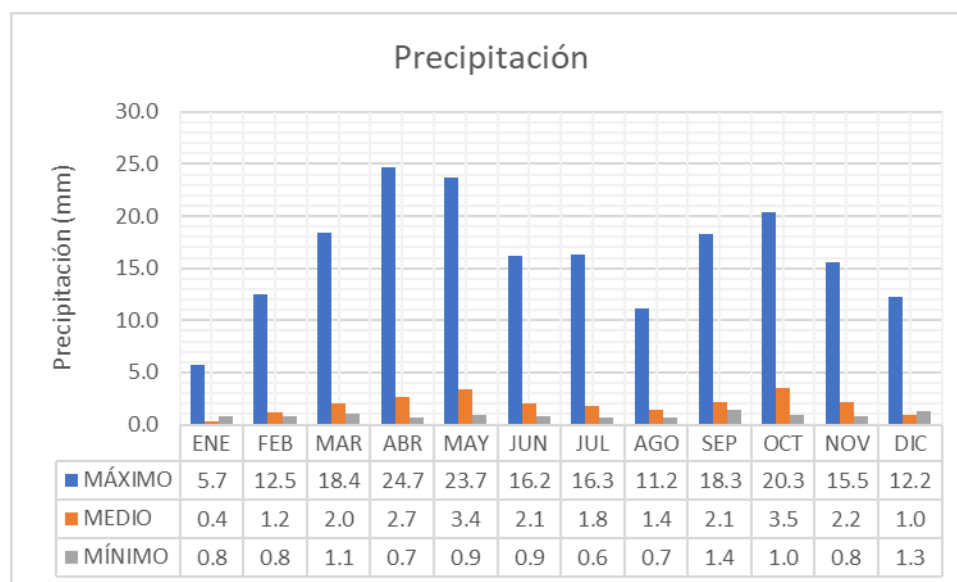


Figura 2-3 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

La Precipitación media para la cuenca La Toma es de 232.9 mm/año, con una distribución bimodal donde se identifican dos períodos bien definidos a lo largo del año, los períodos de máxima precipitación correspondientes a los meses de Enero, Marzo – Mayo, Octubre y Noviembre, los cuales tienen una precipitación acumulada de 125.1 mm que es un equivalente al 53.69 % del total, y en el segundo período, se presentan el 46.31 % con 107.9 mm, siendo este el periodo seco correspondiente a los meses de Febrero, Junio – Septiembre y Diciembre, con precipitaciones máximas en 24 horas promedio de 15.0 mm (Ver anexo 8.3).

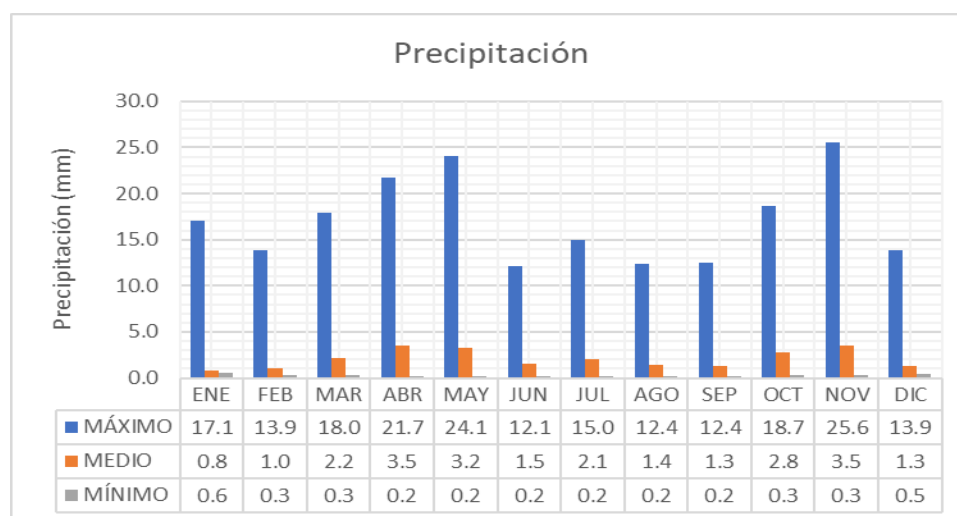


Figura 2-4 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2.1.2 TEMPERATURA

Realizado el análisis de los datos de la temperatura máxima, media y mínima registrados en la estación La Pola, se encontró que la zona presenta temperaturas constantes, lo cual demuestra que es una región con un ecosistema con equilibrio y una temperatura media es de 12.8 °C.

A continuación, se muestran los valores correspondientes a los valores medios, máximos y mínimos de la temperatura registradas en la estaciones relevante en la zona de influencia del proyecto.

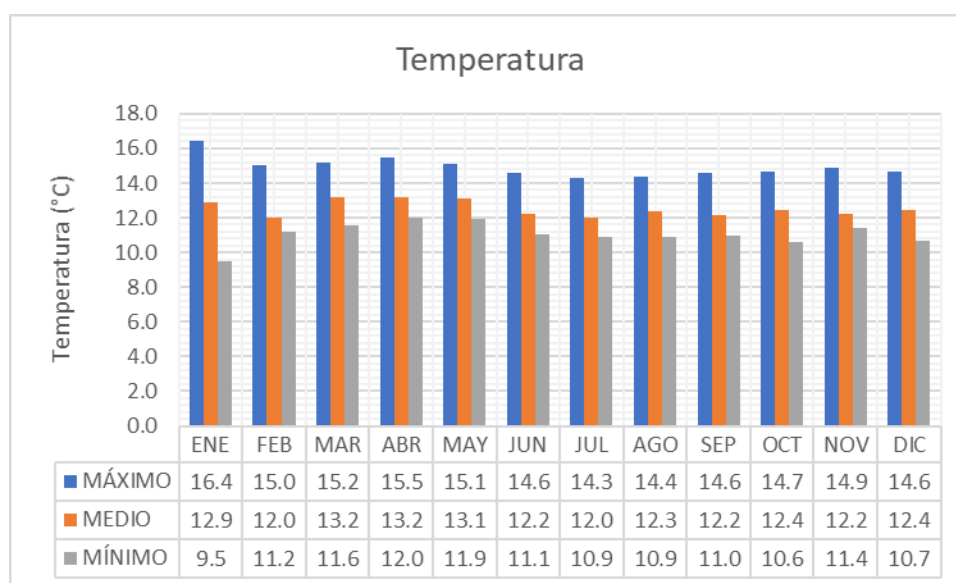


Figura 2-5 Valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura
Fuente. Consorcio Aguas de los andes, 2018

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO MODELO HMS

3.1 METODOLOGÍA

Como primer paso se debe realizar un análisis de la(s) variables climatológicas para caracterizar la zona de captación; posteriormente, para el cálculo de cada uno de los escenarios de caudal se utilizará la metodología de lluvia – escorrentía, utilizando el modelo computacional HEC – HMS.

Posteriormente, se obtienen los hidrogramas con base a los registros históricos de las precipitaciones obtenidas de la(s) estaciones influyentes en la zona del proyecto; y finalmente, se desarrolla la metodología, con el fin de simular el proceso de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento para lograr obtener el caudal de diseño además de obtener una visión general de la cuenca.

3.1.1 COMPLEMENTAR DATOS

Como las estaciones son simétricas con respecto a las de referencia en los años faltantes se utiliza el método de razón de valores normales, que se utiliza cuando falta el valor faltante se puede completar con estaciones que tienen las mismas características fisiográficas y climatológicas.

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\frac{N_x P_A}{N_A} + \frac{N_x P_B}{N_B} + \frac{N_x P_C}{N_C} \right]$$

Donde n es el número de estaciones de referencia, x es la estación que no se conoce el dato, A, B, C son las estaciones de referencia, N_x, N_A, N_C es la media aritmética de las estaciones y P_A, P_B, P_C es el valor conocido de las estaciones referencias del periodo que hace falta de la estación x .

3.2 ESTIMACION DE CAUDALES

3.3 CAUDALES MÁXIMOS

Para realizar la obtención de los hidrogramas con base a los registros históricos de las precipitaciones obtenidas de la(s) estaciones a partir de precipitaciones, se implementó el modelo de lluvia-escorrentía desarrollado por el National Resource Conservation Service del USDA (United States Department of Agriculture).

3.3.1.1 METODO LLUVIA-ESCORRENTIA – SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

El modelo lluvia-escorrentía desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), representa las hidrográficas de respuesta de las áreas de drenaje; este concepto de diseño se basa en la estimación de la precipitación efectiva o escorrentía directa, esto es, la fracción de la lluvia que aparece como escorrentía. Para los modelos lluvia-escorrentía en general y para el modelo del SCS, en particular, el área aportante se divide en dos: un área impermeable, de la cual no se restan pérdidas iniciales o pérdidas por infiltración, y un área que es capaz de infiltrar una fracción de la lluvia y en la cual se pueden presentar pérdidas iniciales.

3.3.1.1.1 Curva numero

El número de curva (CN) es una medida del potencial de escorrentía del suelo en cuestión. Suelos con alto potencial de generación de escorrentía tienen valores de CN más altos. La definición de este factor está en función del tipo de suelo, la impermeabilidad de la zona y del tipo de cobertura presente en el terreno, y en principio no varían de tormenta a tormenta. Estas características determinan la fracción de lluvia que efectivamente se convertirá en escorrentía.

USO DE LA TIERRA	COBERTURA TRATAMIENTO O PRACTICA	CONDICION HIDROLOGICA	GRUPO DE SUELOS			
			A	B	C	D
1.Rastrojo	Hileras Rectas	-----	77	86	91	94
	Hileras Rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras Rectas	Buena	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas de Nivel	Buena	65	75	82	86
2.Cultivos en Hileras	CutNiv y Terrazas	Mala	66	74	80	82
	CutNiv y Terrazas	Buena	62	71	78	81
	Hileras Rectas	Mala	65	76	84	86
	Hileras Rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Mala	63	74	82	85
3.Cultivos en Hileras Estrechas	Curvas de Nivel	Buena	61	73	81	84
	CutNiv y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	CutNiv y Terrazas	Buena	59	70	78	81
	Hileras Rectas	Mala	66	77	85	89
	Hileras Rectas	Buena	58	72	81	85
4.Leguminosas en Hileras Estrechas o Forraje en Rotación	Curvas de Nivel	Mala	64	75	83	86
	1/ Curvas de Nivel	Buena	55	69	78	83
	CutNiv y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	CutNiv y Terrazas	Buena	51	67	76	80
	Curvas de Nivel	Mala	68	79	86	89
5.Pastos de Pastoreo	Curvas de Nivel	Regular	49	69	79	84
	Curvas de Nivel	Buena	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas de Nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de Nivel	Buena	6	35	70	79
6.Pastos de Corte	Curvas de Nivel	Buena	30	58	71	78
	Curvas de Nivel	Mala	45	66	77	83
	Curvas de Nivel	Regular	36	60	73	79
7.Bosque	Curvas de Nivel	Buena	25	55	70	77
	Curvas de Nivel	Mala	59	74	82	86
	Curvas de Nivel	Regular	72	82	87	89
8.Patios		-----	59	74	82	86
9.Caminos de Tierra 2/		-----	72	82	87	89
10.Pavimentos		-----	74	84	90	92

Tabla 3-1. Números de curva CN recomendados

Fuente. Resolución 865 de 2004

- Bajo potencial de escorrentía (A): Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas, estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

- Moderadamente bajo potencial de escorrentía (B): Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.
- Moderadamente alto potencial de escorrentía (C): Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).
- Alto potencial de escorrentía (D): Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Los tipos de suelo A, B, C y D son una clasificación hidrológica basada en el potencial de escorrentía del suelo, donde típicamente los suelos tipo A presentan el potencial de escorrentía más bajo y los suelos tipo D presentan el potencial de escorrentía más alto.

3.3.1.1.2 Método SCS para abstracciones

Según el Título D, 4.4.2.2, del RAS 2000, el valor de la abstracción final S se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde:

CN: Valor del número de curva

Teniendo en cuenta lo anterior, según Ven te Chow, al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica para calcular la abstracción inicial, la cual se muestra a continuación:

$$I_a = 0.2 S$$

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

3.3.1.1.3 Área de drenaje

Corresponde al área de las cuencas a analizar, a continuación se muestra dicho valor para la cuencas respectivas.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	QUEBRADA PEÑA DE ÁGUILA
Área	A	Km ²	0.36
		m ²	360000
		Ha	36

Tabla 3-2. Área(s) de las cuencas

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.4 Tiempos de concentración (T_c)

Es el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo, siendo esta la definición que aparece reseñada en la literatura con mayor frecuencia. Sin embargo, otros autores reportan el tiempo de concentración como el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de excesos y el punto de inflexión sobre la curva de recesión del hidrograma de escurrimiento directo.

Además, se puede definir como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. Existen una serie de fórmulas que permiten el cálculo de este tiempo desarrolladas por diversos autores. Algunas de las fórmulas que se emplean para el cálculo de este indicador se encuentran, Kirpich, Temez, Giandotti, Bransby-Williams, Dirección General Carreteras (DGC). Sus ecuaciones se muestran a continuación:

➤ Kirpich

$$T_c = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud del cauce principal en (m)

S = pendiente del cauce principal (m/m)

➤ Témez

$$T_c = 0.3 * \left[\frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.75}$$

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Donde:

T_c = tiempo de concentración (horas)
 L = longitud del cauce principal en (km)
 S = pendiente del cauce principal (m/m)

➤ **California Culverts Practica**

$$T_c = 60 \left[0.87 * \frac{L}{H} \right]^{0.385}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (min)
 L = longitud del cauce principal en (Km)
 H = diferencia de alturas del cauce principal (m)

➤ **Bransby-Williams**

$$T_c = \frac{L}{1.5D} \sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (Horas)
 L = longitud del cauce principal en (Km)
 A = área de la cuenca (km²)
 S = pendiente media del cauce principal (%)
 D = diámetro del círculo de área equivalente a la superficie de la cuenca (km)

➤ **Dirección general de carreteras**

$$T_c = 0.3 \left[\frac{L}{J^{0.25}} \right]^{0.76}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (Horas)
 L = longitud del cauce principal en (Km)
 J = pendiente media del cauce principal (H/L)

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	--	---

H = diferencia de nivel entre el punto de salida y el punto hidrológicamente más cercano (m)

A continuación, se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración por diferentes metodologías.

PEÑA DE AGUILA						
PARAMETROS CAUCE PRINCIPAL		METODOS PARA CALCULO TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc en Min)				PROMEDIO
LONGITUD (m)	PENDIENTE m/m	KIRPICH	TEMEZ	CALIFORNIA	VEN TE CHOW	
710	0.231	5.51	18.33	7.00	15.17	11.50

Tabla 3-3. Tiempos de concentración

Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.5 Curvas sintéticas IDF

La metodología simplificada de cálculo de las curvas intensidad – duración –frecuencia se debe llevar a cabo siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración. Para Colombia se propone el método de curvas sintéticas (Vargas y Granados, 1998), en este estudio se dedujeron curvas intensidad-duración - frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación.

La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas en una estación, y es la que se propone para los estudios, además de que es la más sencilla de utilizar.

La expresión resultante está dada por:

$$I = \frac{axT^b x M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T = periodo de retorno, en años.

M = precipitación máxima promedio anual en 24 hrs a nivel multianual

t = Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d = parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la siguiente figura sus valores se presentan en la siguiente tabla.

REGIÓN	A	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia.
Fuente. Manual de carreteras INVIAS

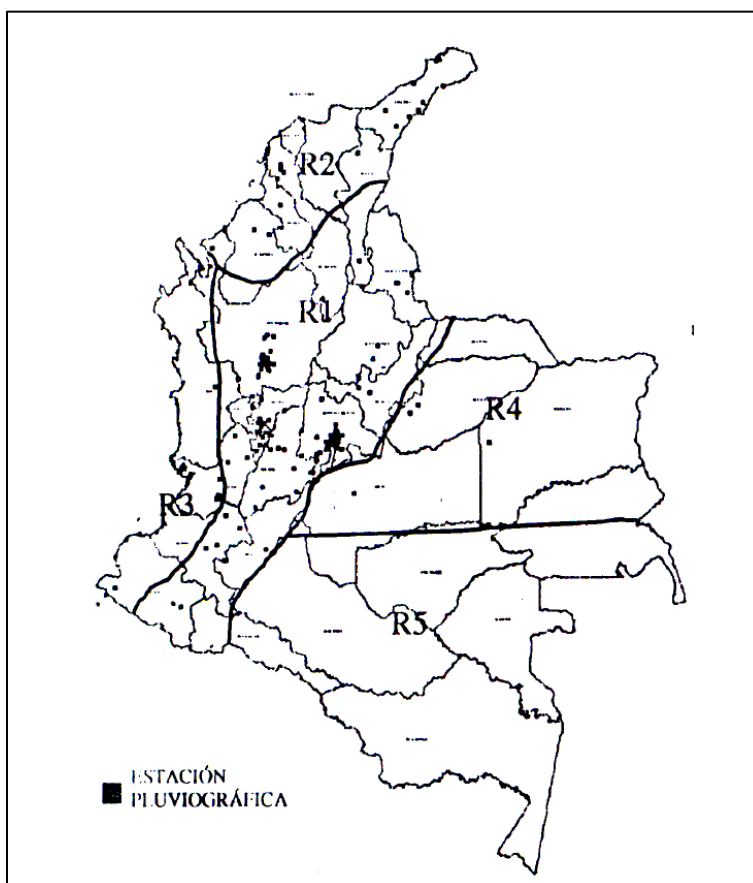


Figura 3-1 Mapa de regionalización Curvas regionalizadas
Fuente. Manual de carreteras INVIAS

A continuación, se muestran los valores obtenidos, por cada periodo de retorno de acuerdo a la precipitación máxima media multianual representativa de la cuenca, $P_{max24hrs} = 16.20$ mm (Ver Anexo 4).

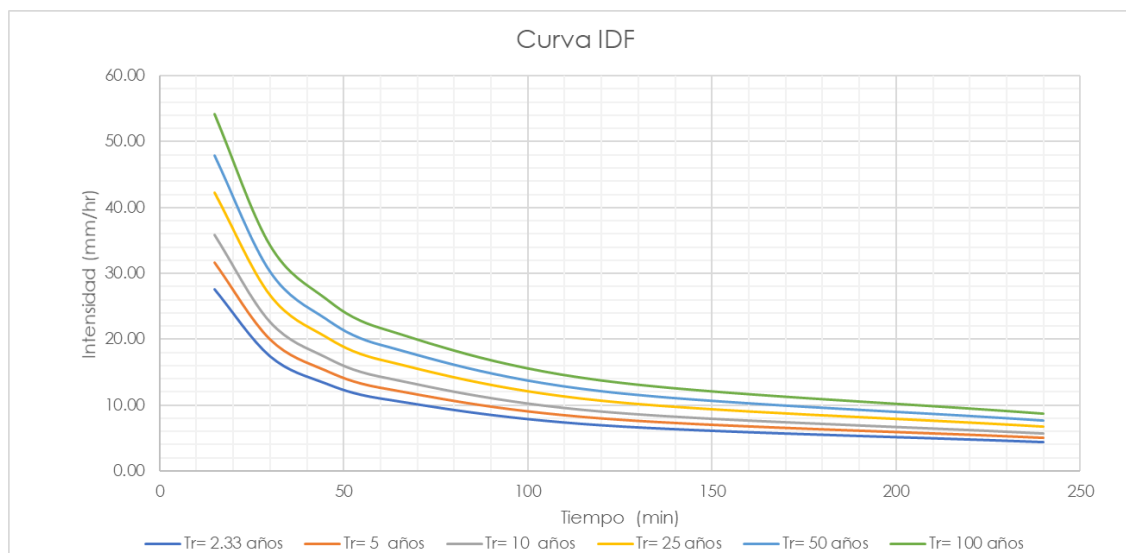


Figura 3-2 Curvas IDF, estación Pesca
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.6 Modelo HEC HMS

El HEC-HMS, siglas que provienen de su nombre en inglés Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System, está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentía de una cuenca. Este programa posee una vasta gama de modelos matemáticos para simular la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la transformación de la precipitación neta, el flujo base y el tránsito hidráulico en canales abiertos.

Según Joo *et al.* (2013), el HEC-HMS se puede categorizar como un modelo conceptual agrupado, ya que representa el proceso de escorrentía de una cuenca por medio de un modelo de pérdidas agrupado el cual combina con un hidrograma unitario principalmente. Además, al ser un modelo conceptual, éste posee menos parámetros y menos solicitudes en lo que a información de entrada respecta, en comparación con los modelos físicos totalmente distribuidos (Jan Seibert & Vis, 2012).

Se recomienda abrir los archivos del Anexo 5 con la versión 4.2.1 del HEC-HMS¹.

3.3.1.1.7 Pérdidas SCS

El modelo del número de curva del SCS, es un modelo que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el cual se basa en un número adimensional denominado número de curva. Este número es un parámetro empírico definido para la estandarización de curvas de escorrentía directa acumulada

¹ <http://www.hec.usace.army.mil/software/heh-hms/>

en función de la precipitación, para muchas cuencas experimentales, confeccionadas por el Servicio de Conservación de Suelos.

El número de curva varía entre 0 y 100, dependiendo del uso del suelo y la condición hidrológica de la cuenca, asignando 100 para un cuerpo de agua. En general, el método CN-SCS estima la precipitación neta como una función de la precipitación acumulada, la cobertura vegetal, uso de suelo y la condición de humedad antecedente del suelo.

3.3.1.1.8 Hidrogramas de descargas

En hidrología se denomina hidrograma a la representación gráfica de la variación del caudal en relación con el tiempo en determinado punto de una cuenca; en esencia, el hidrograma contiene el comportamiento determinado por un patrón de precipitación sobre unas condiciones fisiográficas y la relación lluvia – escorrentía de la cuenca.

A continuación se generan los hidrogramas de descarga asociados a las tormentas con recurrencia de 100 años y duraciones de 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas como lo establece el contrato (Ver anexo 4).

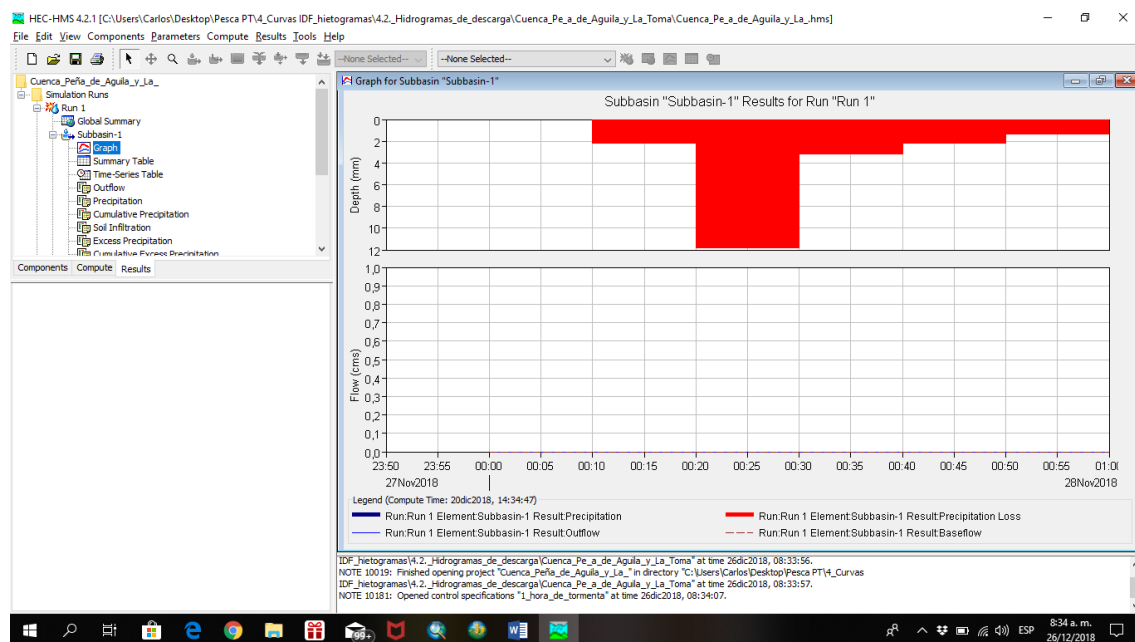


Figura 3-3 Hietograma e hidrograma de descarga 1 hora de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

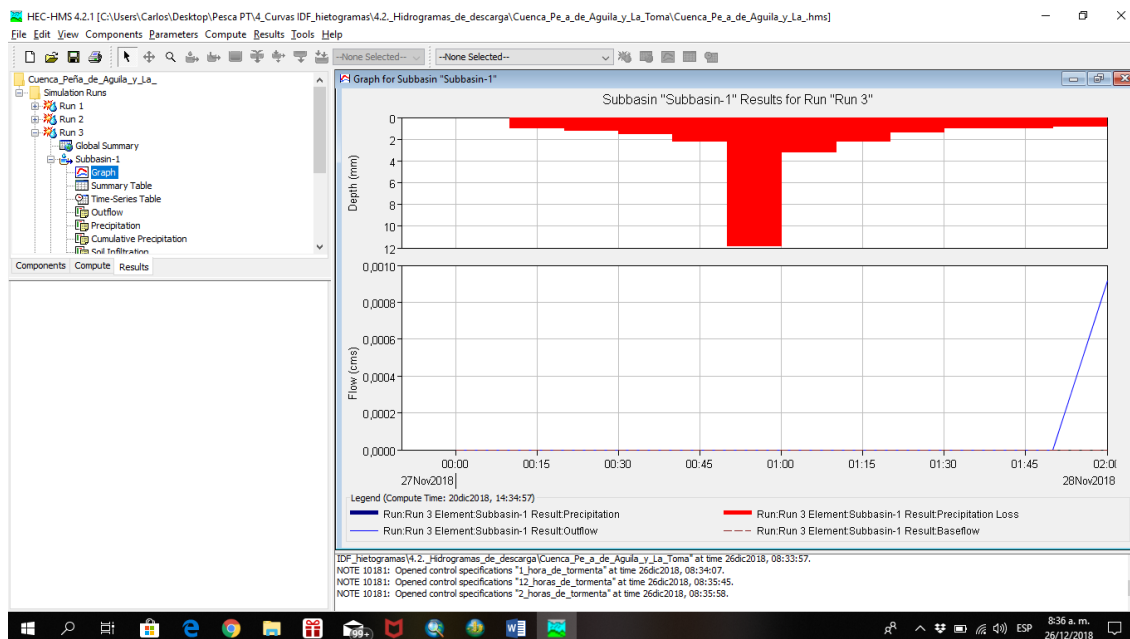


Figura 3-4 Hietograma e hidrograma de descarga 2 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

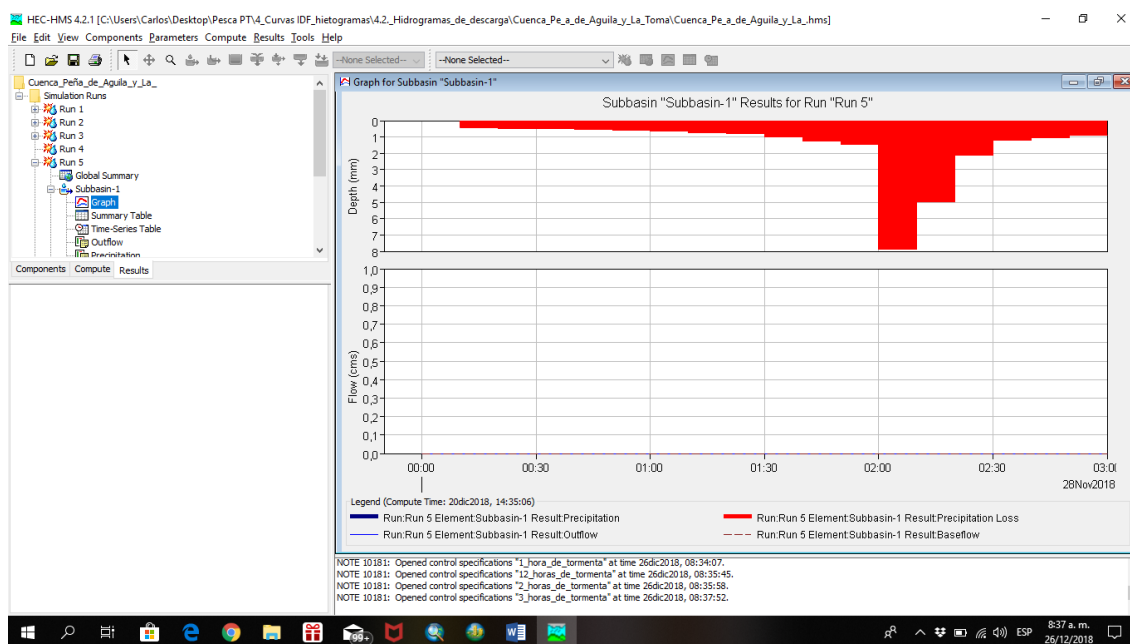


Figura 3-5 Hietograma e hidrograma de descarga 3 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

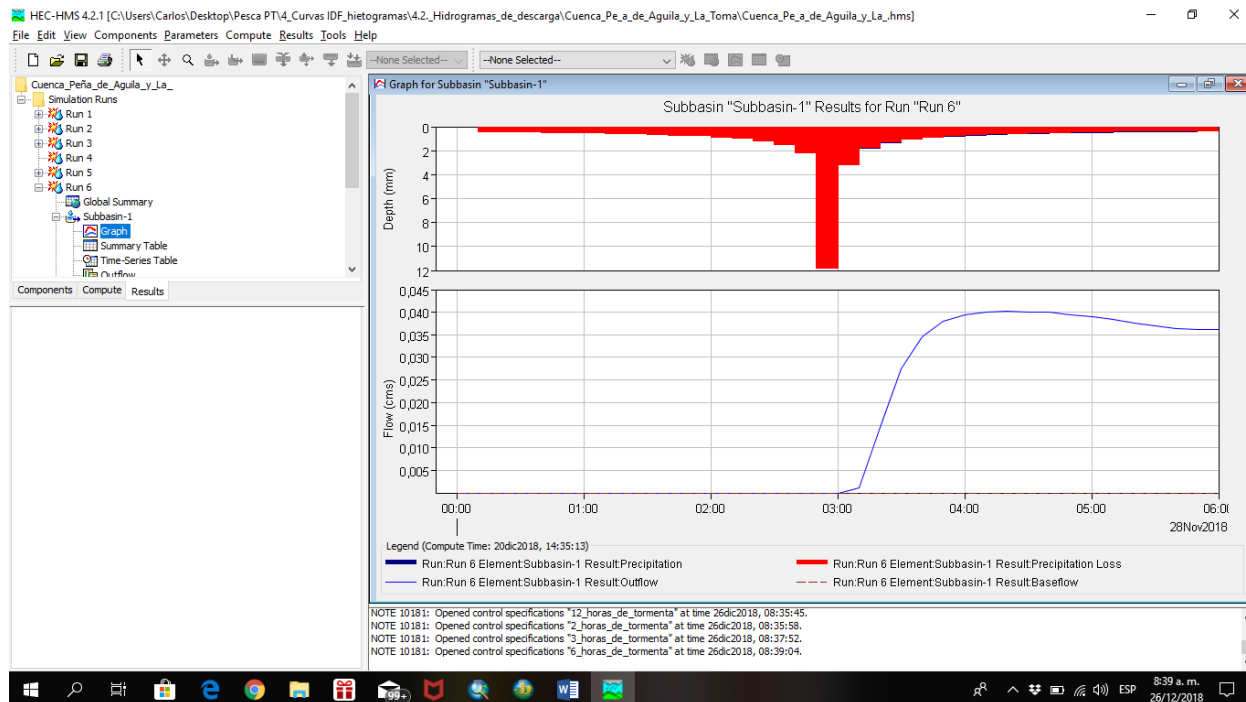


Figura 3-6 Hietograma e hidrograma de descarga 6 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

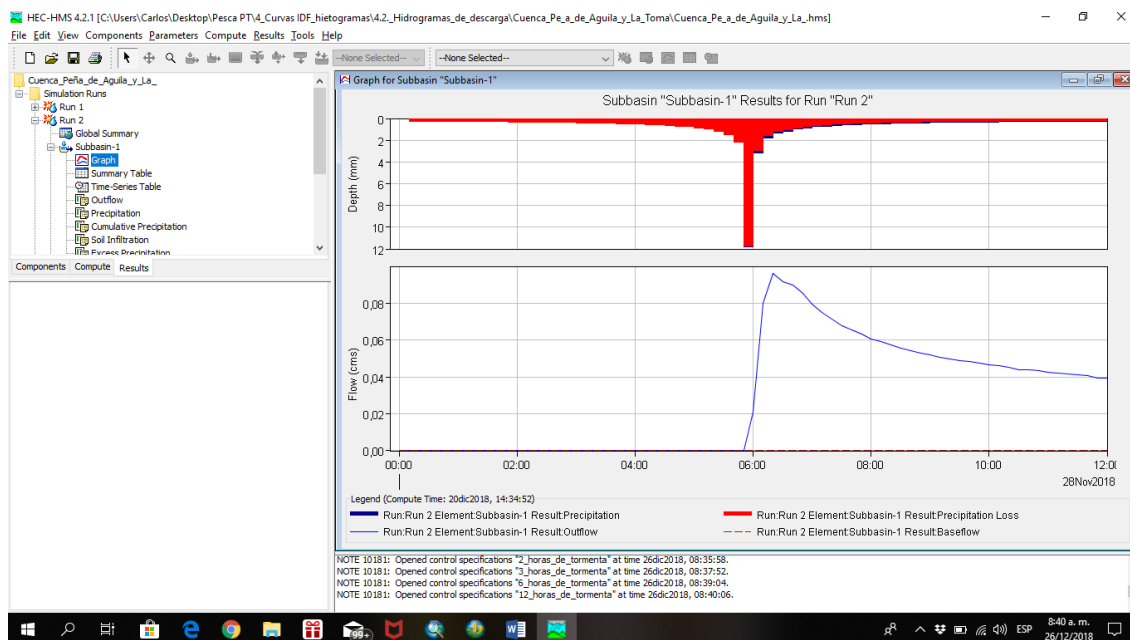


Figura 3-7 Hietograma e hidrograma de descarga 12 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

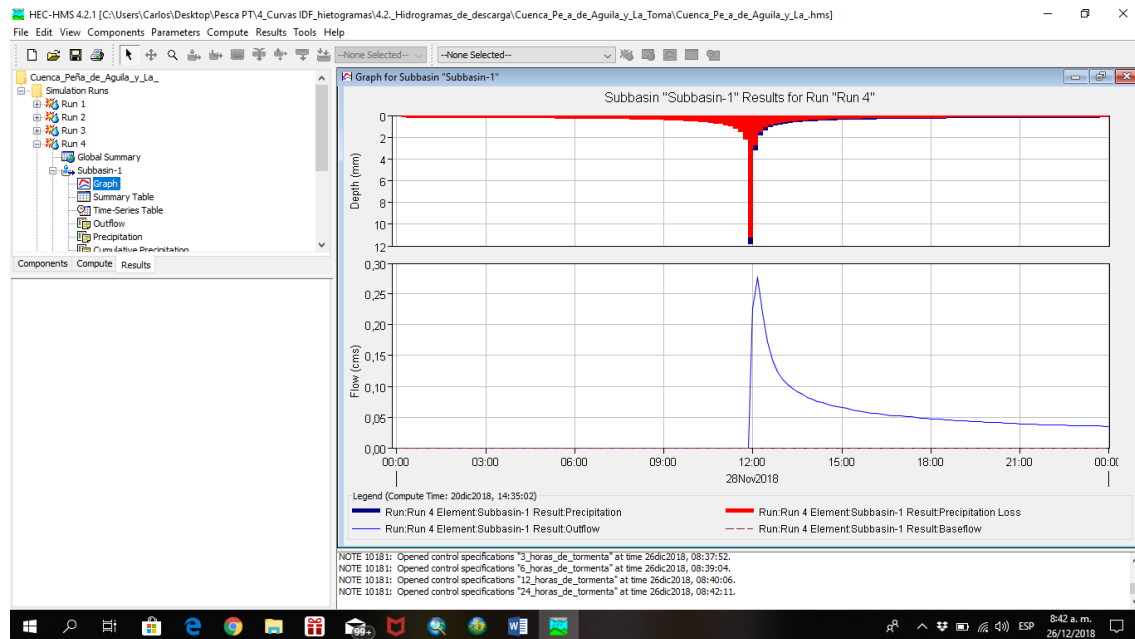


Figura 3-8 Hietograma e hidrograma de descarga 24 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.1 Caudal máximo

Para la obtención del hidrograma y el caudal máximo se empleó el software HEC-HMS, el cual permite realizar modelos lluvia - escorrentía para la obtención de caudales a partir de precipitaciones, ingresando al mismo los parámetros antes descritos.

En primera instancia se creó el proyecto y se adicionó el Shape de la(s) cuencas de la zona de estudio y el Shape de sus drenajes, una vez identificada la subcuenca se asignan los nodos, es este caso el punto de captación, como se muestra en la siguiente figura:

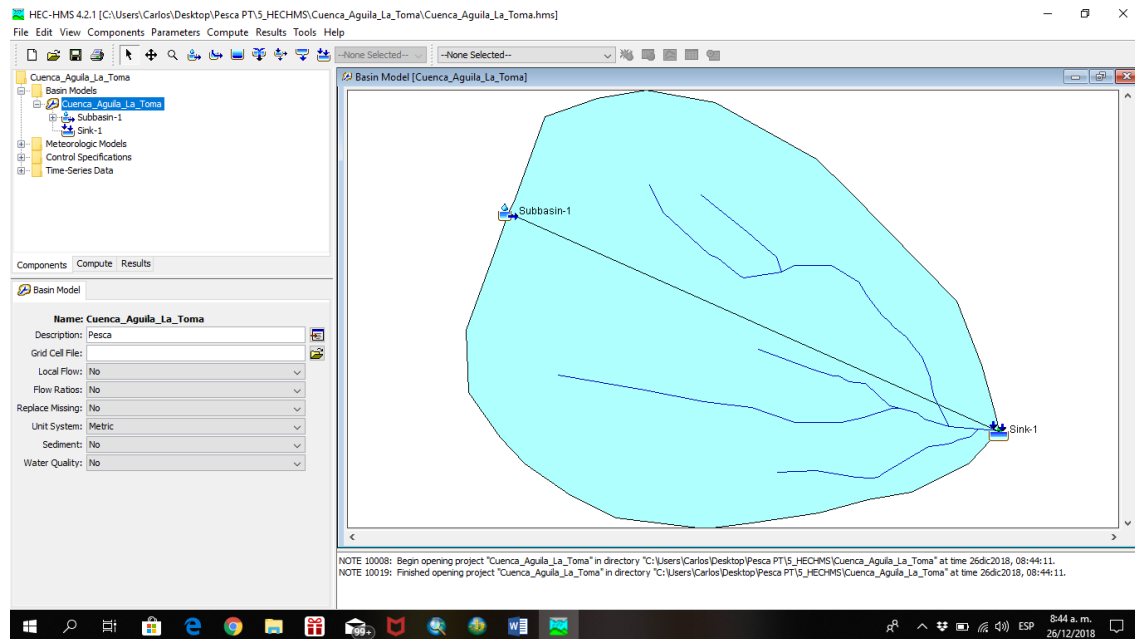


Figura 3-9 Cuenca Peña de águila, HEC-HMS
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Una vez definidos los nodos se ingresaron los parámetros antes calculados, como tiempo de concentración, y parámetros morfológicos como área y curva número.

El modelo de lluvia - escorrentía implementado, corresponde al SCS (Soil conservation service), el cual tiene en cuenta las perdidas por infiltración. Y finalmente, se muestran los hidrogramas generados para la cuenca.

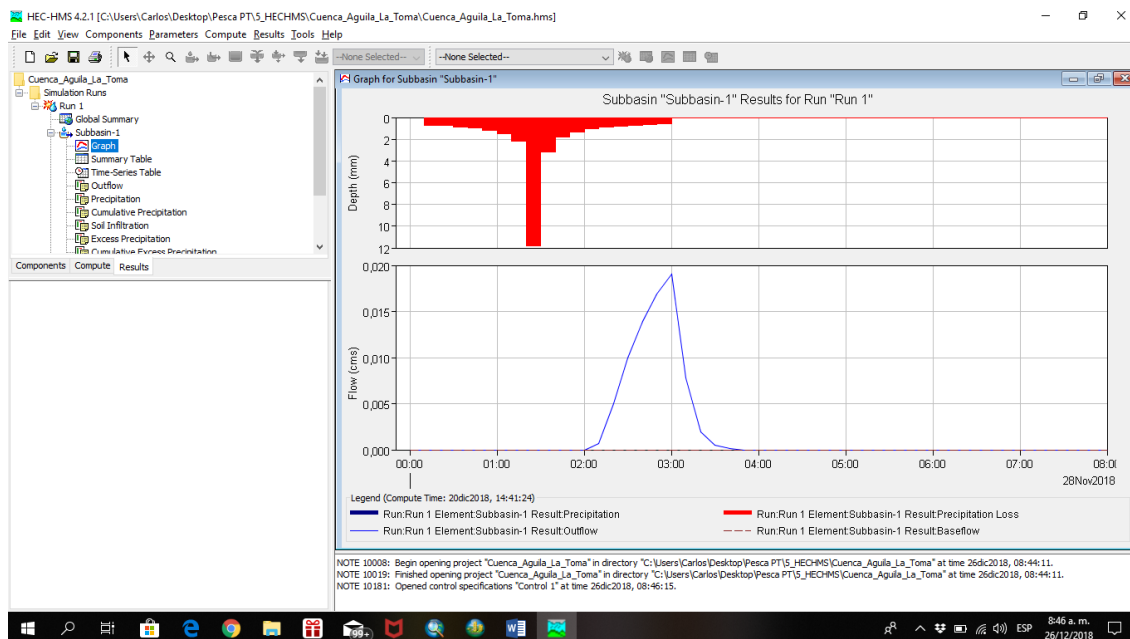


Figura 3-10 Hidrograma y curva de caudal
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

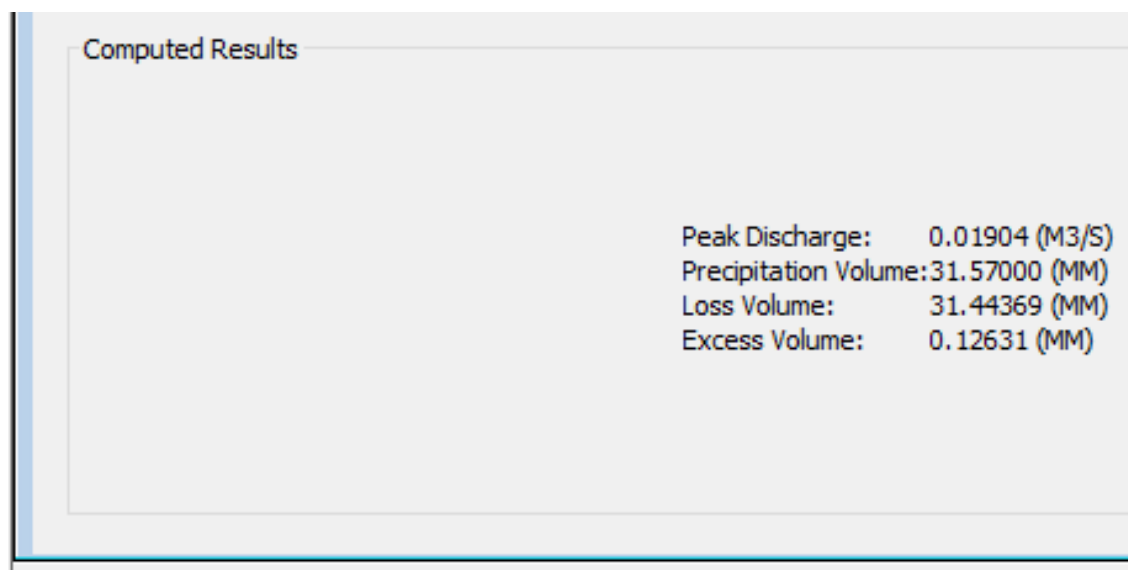


Figura 3-11 Caudal máximo
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

El resultado obtenido para el caudal máximo en la cuenca, es un estimado de 0.01904 m³/s o 19.04 L/s.

3.4 CAUDALES MEDIOS

La evapotranspiración potencial puede ser calculada mediante fórmulas, siendo una de las más precisas la de Penman – Monteith (Allen et al., 1998); para la zona andina de Colombia se ha adoptado una fórmula basada en la relación de la evapotranspiración potencial por la fórmula de Penman – Monteith y la altura sobre el nivel del mar, cuya expresión es la siguiente:

$$ETP = 4.568 * EXP(-0.0002 * h)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial y,
h = altura de la estación sobre el nivel del mar

Posteriormente, la evapotranspiración potencial se transforma a evapotranspiración real mediante la ecuación de Budyko (Budyko, 1974):

$$ETR = \left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{1/2}$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real
ETP = evapotranspiración potencial
P = precipitación 24 horas promedio y,

Después de obtener el caudal medio, también se calculó el caudal mínimo multianual por medio de la metodología del estudio “Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia” Realizado por Germán Poveda; Jaime I. Vélez; Oscar J. Mesa; et al. Estos valores de los caudales mínimos promedios mensuales multianuales estimados fueron sometidos al proceso de análisis estadístico de frecuencias para diferentes modelos de distribución de valores extremos para encontrar el caudal mínimo de modelación a con periodo de retorno 100 años (Ver Anexos 6 y 7).

$$Q_{min} = 0.4168 * Q_{med}^{1.058}$$

3.4.1 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada una de las variables necesarias para el cálculo de los caudales medios:

3.4.1.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL POR MÉTODO BALANCE HÍDRICO A LARGO PLAZO.

Entendiendo la evapotranspiración como la pérdida de humedad de una superficie por la evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación y mediante las ecuaciones anteriormente definidas, se encontró los siguientes resultados para la estación en estudio y en defecto para la zona de estudio.

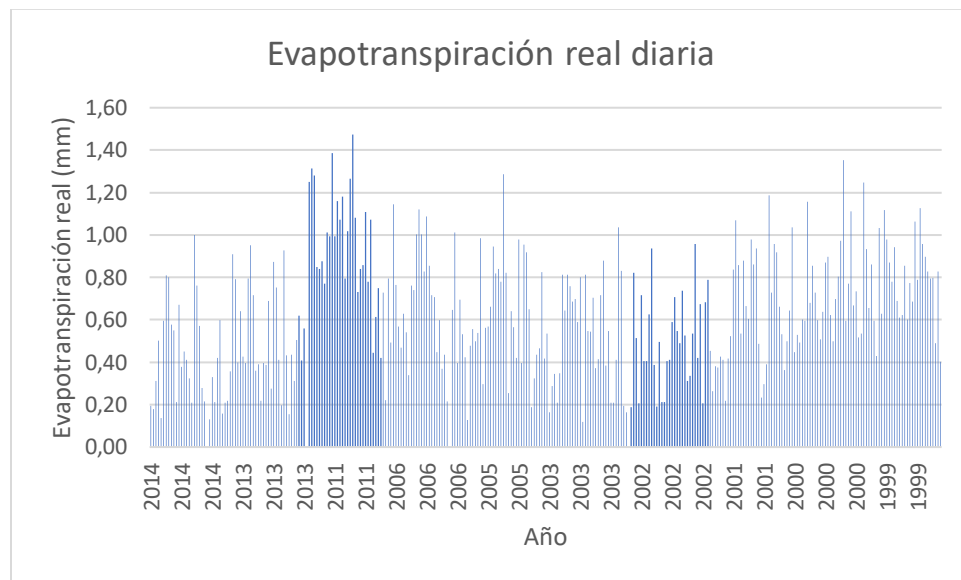


Figura 3-12 Evapotranspiración Real estimada para la cuenca Peña de águila

Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.4.1.2 CAUDALES MEDIOS CUENCA QUEBRADA PEÑA DE ÁGUILA

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros de precipitación y evapotranspiración, para el cálculo de los caudales medios para la cuenca de la Quebrada Peña de águila, se realiza la aplicación de la siguiente ecuación:

$$Q_{med} = (P - E) * A$$

Donde:

P = precipitación

E = evapotranspiración

A = área

A razón de lo anterior, y teniendo un área de cuenca de 0,36 Km², los resultados obtenidos fueron los siguientes.

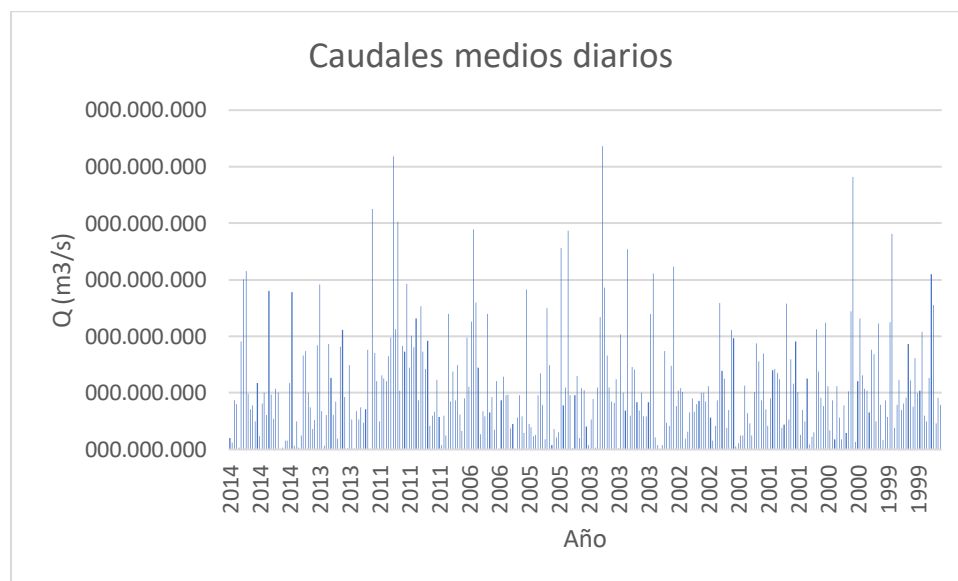


Figura 3-13 Caudales medios estimados
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Mediante el cálculo de una curva de duración de caudales se encontró que el caudal con excedencia del 50%.

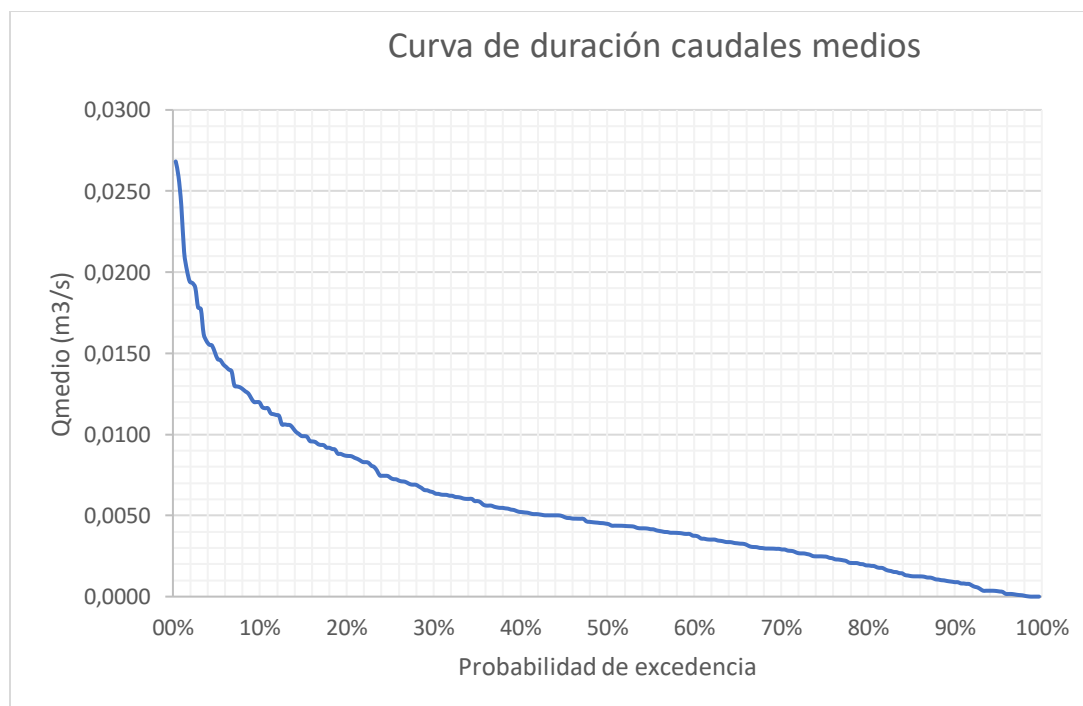


Figura 3-14 Curva de caudales medios estimados
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

	m ³ /s	L/s
Q50%	0.00449595	4.49595215
Q95%	0.00033992	0.33991587

Tabla 3-5 Resultados de caudales de excedencia 50% y 95%

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.5 CAUDAL ECOLOGICO²

El caudal mínimo, ecológico o caudal mínimo remanente es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua. Existen diversas metodologías para conocer los caudales ecológicos:

- **Hidrológicas:** Se basan en el comportamiento de los caudales en los sitios de interés, para lo cual es necesario el conocimiento de series históricas de caudales.
- **Hidráulicas:** Consideran la conservación del funcionamiento o dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río, es decir que el caudal de reserva que se deje en los distintos tramos permita que el río siga comportándose como tal.
- **Simulación de los hábitats:** Estiman el caudal necesario para la supervivencia de una especie en cierto estado de desarrollo.
- **Mínimo histórico:** El Estudio Nacional del Agua (2.000) a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.
- **Porcentaje de Descuento:** El IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

	m ³ /s	L/s
Qeco (IDEAM)	0.00000476	0.00475823

Tabla 3-6 Caudal ecológico cuenca Peña de águila

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.5.1 CAUDALES MÍNIMOS CUENCA QUEBRADA PEÑA DE ÁGUILA.

A partir de los valores encontrados de caudales medios para la cuenca de la Quebrada Peña de águila, y haciendo uso de la ecuación descrita anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados (Ver anexo 7).

² RESOLUCION 865 DE 2004, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Prueba No.	X ²	Tipo de distribución				
1	63.9633	Normal				
2	4884.1545	Gumbel				
3	12.6232	Gumbel Infinito				
4	4855.74	Log Gumbel				
5	2.13492887	Pearson III				
6	81.2407	Log Pearson III				
7	46.94	Log Normal				

Figura 3-15 Valores de Caudales mínimos

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

A partir de estos datos se realiza un análisis de frecuencia para encontrar el caudal mínimo a un periodo de retorno (Tr) de 100 años.

La teoría se encuentra a continuación:

3.5.1.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Para realizar un análisis de frecuencia para los caudales mínimos se deberá realizar un análisis y ajustes a modelos de valores extremos para encontrar cual es la lluvia que tiene más probabilidad de llegar en un periodo de ocurrencia (tiempo de retorno).

Esté análisis se va a realizar en los datos de caudal mínimo encontrados en el capítulo anterior.

3.5.1.1.1 Procedimiento

Los modelos de valores extremos con que se va hacer una correlación de los datos registrados son los siguientes:

- Distribución normal
- Log Normal
- Gumbel Corregido.
- Gumbel Infinito.
- Log. Gumbel
- Pearson III
- Log. Pearson III
- EV3

En cada uno de los métodos se realizó las pruebas de bondad de ajuste de Chi Cuadrado y de Distributivas Acumulativas Kolmogorov-Smirnov para revisar cual es la distribución de valor extremo de cada cuenca.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

El procedimiento para realizar y saber cuál es el modelo de valores extremos característico de la cuenca, es el siguiente:

1. Se toman los datos calculados.
2. De los datos se saca el caudal promedio multianual.
3. Se organiza de menor a mayor.
4. En cada uno de los métodos de valores extremos, se obtienen las variables que se requieren para ajustar a los modelos.
5. Se realizan las pruebas de ajuste: Chi-Cuadrado- Distributivas Acumulativas Kolmogorov-Smirnov. *Análisis de Frecuencia*.
6. Se escoge el método que más se acople de acuerdo a lo que se valora en el método de ajustes.
7. Escogido el método se presenta los resultados de los Caudales Mínimos. .

3.5.1.1.2 Funciones de Distribución de Probabilidad.

El comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas se describe con la ayuda de Distribuciones de Probabilidad. La variable se designa por mayúscula y un valor específico de ella por minúscula.

3.5.1.1.2.1 Distribución Normal

La función Normal es el modelo más utilizado y con mayor importancia en el campo de la estadística (Varas y Bois, 1998). Sin embargo, su uso es muy limitado en hidrología, dado que las variables raramente se comportan de esta forma. Linsley et al., (1988) señalan que el uso de esta función, en términos hidrológicos, debe reducirse a zonas húmedas donde el valor medio es alto, no siendo recomendable para valores extremos. Función de distribución de probabilidad normal:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Donde:

x = variable aleatoria

μ = media de la población

σ = desviación estándar de la población.

Para resolver esta función se recurren a métodos numéricos para evaluarla, y para hacer esto más sencillo se le ha asignado una variable estandarizada, cuya expresión es la siguiente:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

La cual está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar unitaria. Así, la función principal queda como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$$

La función normal presenta la siguiente tendencia:

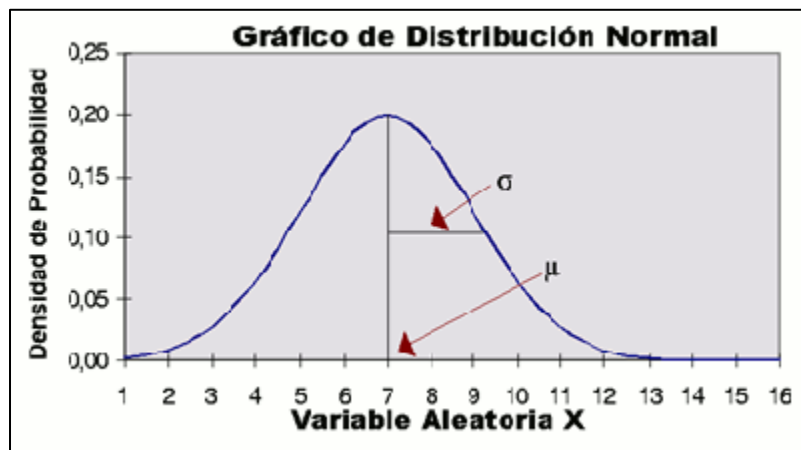


Figura 3-16 Distribución Normal

Fuente: <http://www.matematicasypoesia.com.es/Estadist/ManualCPE04.htm>

3.5.1.1.2 Distribución Logarítmico-Normal

Las variables físicas de interés en Hidrología (precipitación, caudal, evaporación y otras) son generalmente positivas, por lo cual es usual que presenten distribuciones asimétricas. Así, se ha propuesto aplicar una transformación logarítmica (Varas y Bois, 1998), donde $Y = \ln X$, está normalmente distribuida; luego X está distribuida en forma Normal, y su función de densidad de probabilidad es

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2}$$

Donde los parámetros de la función son α y β , que son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, y están definidos como sigue:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

La función de distribución de probabilidad entonces, sigue la siguiente tendencia:

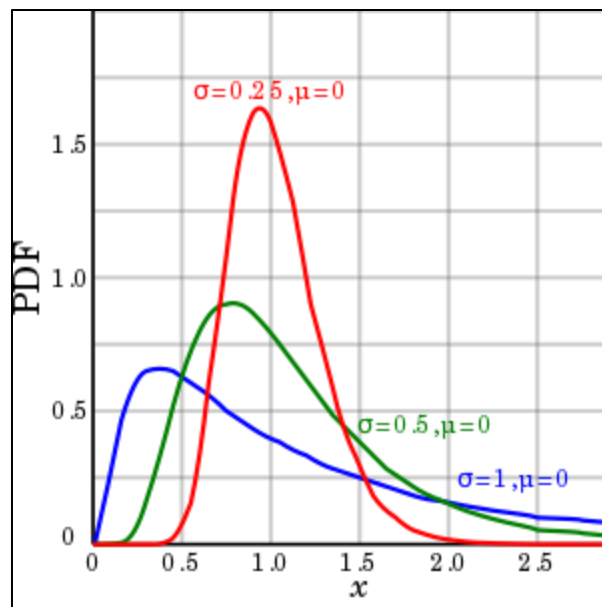


Figura 3-17 Distribución Log Normal.

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution

Estudios realizados por Poblete et al., (2002), identifican a la función Log-Normal, entre otras funciones, como la que presenta mejor bondad de ajuste a series de caudales anuales, por sobre un 90% para el test de Kolmogorov-Smirnov y ji cuadrado.

3.5.1.1.2.3 Distribución Pearson Tipo III

Chow et al., (1994), señalan que esta distribución posee una gran flexibilidad y diversidad de forma, dependiendo de los valores de sus parámetros, asimilando su utilización para precipitaciones o caudales máximos o mínimos anuales. La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x-\delta}{\alpha} \right\}^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}}$$

Donde α, β, δ son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma. Los α, β, δ . Los parámetros α, β, δ se evalúan a partir de n datos medidos. Asimismo, los parámetros de la distribución pueden ser estimados en función del promedio ($\bar{x}$) y de la desviación estándar (S) de la muestra, por medio de las expresiones:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}; \beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2; \delta = \bar{x} - \alpha\beta$$

Donde:

γ = Coeficiente de sesgo
 e = Constante de Neper

El coeficiente de sesgo, se define como:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{S^3}}{n}$$

La función de distribución de este modelo es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx$$

Entonces, sustituyendo se alcanza la siguiente expresión:

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1}$$

Finalmente, la ecuación queda como:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta_1-1} e^{-y} dy$$

Siendo la anterior una función ji cuadrada con $2\beta_1$, grados de libertad y $\chi^2 = 2y$

$$F(y) = F(\chi^2 | \nu) = F_{\chi^2}(2y | 2\beta_1)$$

Los resultados del estudio realizados por Kroll y Vogel 2002, en 1.505 estaciones en los Estados Unidos, determinan que la función de Pearson Tipo III, es la que mejor representa a las series de caudales mínimos intermitentes, donde se presentan descargas con valores cero. Asimismo, las series de caudales mínimos permanentes se ven reflejadas en la función Log- Normal de tres parámetros.

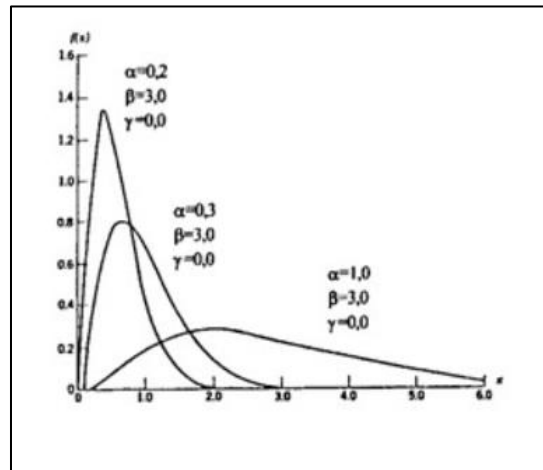


Figura 3-18 Distribución Pearson tipo III

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4099819/>

3.5.1.1.2.4 Distribución Gumbel

Según Aparicio, 1997, si se tienen N muestras, cada una de las cuales contienen n eventos y si se selecciona el máximo de x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad \text{Para } -\infty \leq x \leq \infty$$

Donde:

x = representa el valor asumir por la variable aleatoria
e = Constante de Neper

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito, tienden a los siguientes valores, en base a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra:

$$d = \frac{1}{0.7779696 \cdot S}; \quad \mu = \bar{x} - 0.450047 \cdot S$$

La función de Gumbel sigue la siguiente tendencia:

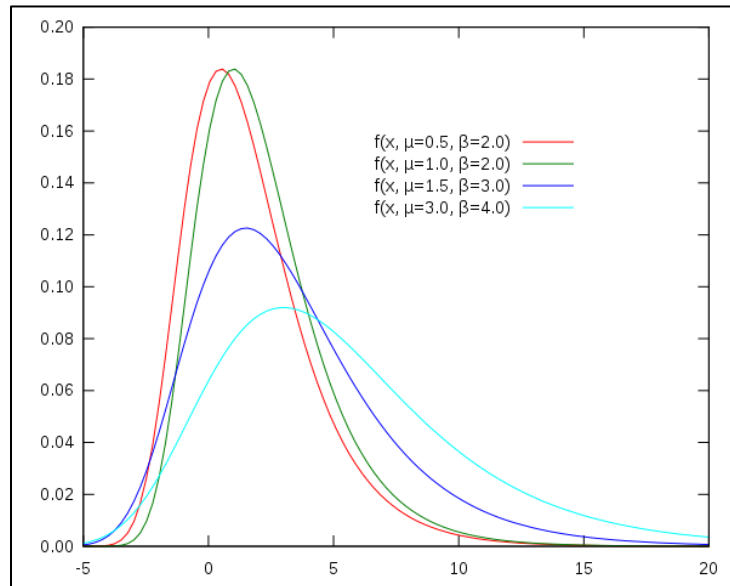


Figura 3-19 Distribución Gumbel

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_Gumbel

3.5.1.1.2.5 Distribución EV3. Weibull Tipo III.

La distribución acumulativa de Weibull es una función distribuida que esta representaba de la siguiente forma:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

Esta se puede expresar en forma lineal de la siguiente forma:

$$\ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(x)} \right] \right] = \beta \ln x - \beta \ln \alpha$$

Esta forma sirve para saber si esta distribución cumple con los datos de Caudal mínimo.

3.5.1.1.3 Determinación de bondad de ajuste

Se entiende por bondad de ajuste, a la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible predecir el comportamiento de la variable en estudio (Pizarro, 1986).

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Para determinar la calidad del ajuste, se realizó una contrastación para cada dato que se obtenga en la frecuencia acumulada y en la frecuencia teórica acumulada; para ello se utilizarán métodos cuantitativos, como el Chi cuadrado y el test de Kolmogorov-Smirnov.

3.5.1.1.3.1 TEST DE CHI-CUADRADO³

La prueba de Chi-cuadrado se utiliza para comprobar si una muestra de datos procede de una población con una distribución específica. Una característica atractiva de la bondad de Chi cuadrado es que se puede aplicar a cualquier distribución univariante para los que se pueda calcular la función de distribución acumulada.

El test Chi-cuadrado de bondad de ajuste se aplica a los datos desechados. Sin embargo, el valor de la estadística de Chi-cuadrado depende de cómo estén ordenados los datos. Otra desventaja de la prueba de Chicuadrado es que se requiere un tamaño de muestra suficiente para que la aproximación Chi-cuadrado para ser válida.

La prueba de Chi-cuadrado es una alternativa a la de Anderson-Darling y la de Kolmogorov-Smirnov.

El test Chi-cuadrado de bondad de la prueba puede ser aplicado a distribuciones discretas, como la binomial y la de Poisson. Los test de Kolmogorov-Smirnov y de Anderson-Darling se limitan a distribuciones continuas.

La prueba de Chi-cuadrado se define para las hipótesis:

H0 = los datos siguen una distribución especificada.

H1 = los datos no siguen la distribución especificada.

Estadístico:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{F(x)_i}$$

Donde:

$F_n(X)_i$ = frecuencia observada

$F(X)_i$ = frecuencia teórica.

³ Conde García, Jose Andino. Análisis de distribuciones estadísticas y alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en las distribuciones hidrológicas. 23.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Cuanto mayor sea el valor de χ^2 , menos verosímil es que la hipótesis sea correcta. De la misma forma, cuanto más se aproxima a cero el valor de Chi-cuadrado, más ajustadas están ambas distribuciones

3.5.1.1.3.2 Test de Kolmogorov-Smirnov

Este procedimiento es un test no paramétrico que permite probar si dos muestras provienen del mismo modelo probabilístico (Varas y Bois, 1998). Así mismo, Pizarro (1988), hace referencia a que es necesario determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada; una vez determinadas ambas frecuencias, se obtiene el supremo de las diferencias entre ambas.

Este test es válido para distribuciones continuas y sirve tanto para muestras grandes como para muestras pequeñas (Pizarro et al, 1986).

Para la aplicación de este test, se necesita en primer lugar determinar la frecuencia observada acumulada.

$$F(x) = \frac{n}{N+1}$$

Donde:

$F_n(x)$ = frecuencia observada acumulada.

n = número de orden de los datos

N = Número total de datos.

Luego se debe calcular la frecuencia teórica acumulada $F(x)$, determinada para cada una de las funciones. Una vez obtenidas ambas frecuencias, se procede a calcular el valor supremo de las diferencias entre ambas, en la i -ésima posición de orden, que se denomina D_c

$$D_c = \sup |F_n(x)_i - F(x)_i|$$

Si la diferencia suprema es menor que la diferencia tabulada por tabla, definida en base al tamaño de la muestra, se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de confianza asumido. Si esta comparación revela una diferencia suficientemente grande entre las funciones de distribución muestral y la distribución propuesta, entonces se rechaza (Canavos, 1988).

3.5.1.1.4 Resultados

Realizando los pasos descritos anteriormente se analizaron las distribuciones y se encontraron las siguientes variables (Ver anexo 7):

n	310		
Media	0.0021		
Mediana	0.0016		
DesvEst	0.0018		
CoefAsim	1.7345		
CoefCurt	1.7345	CoefAsim	0.4902
Ln X _{Media}	-6.5933	Log X _{Media}	-2.8634
Ln S _{Media}	1.3619	Log S _{Media}	0.5914

Tabla 3-7. Datos estadísticos para las distribuciones y ajustes

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Por cada método, posteriormente, se realizaron las pruebas de bondad de ajuste para todas las distribuciones de probabilidad (Ver anexo 7).

Según los resultados generados de la prueba de ajustes de Kolmogorov-Smirnov y Chi cuadrado el mejor modelo de distribución es Pearson III.

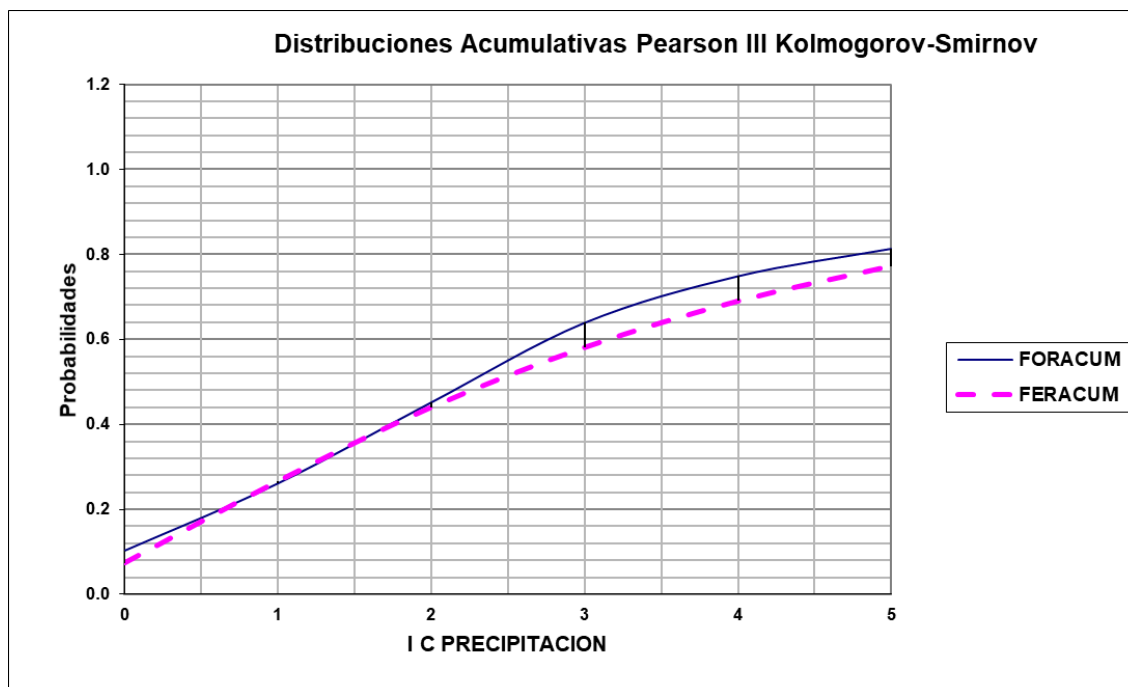


Figura 3-20 Análisis estadístico, ajustes de distribuciones extremos.

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO MODELO SCHOSINSKY

4.1 METODOLOGÍA

En este estudio se va a desarrollar una metodología y un modelo, con el propósito de determinar la recarga potencial al acuífero mediante un balance de suelos. Una de las ventajas de dicha metodología es que considera varias variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración de los suelos y sus características, la cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno. La metodología descrita ha sido bastante utilizada, generando un error de recarga menor del ochenta por ciento, en los casos que se ha podido comprobar, en forma confiable, los valores de dicha recarga.

4.2 RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO

4.2.1 BALANCE DE SUELOS

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la precipitación e infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos.

4.2.1.1 FRACCIÓN DE LLUVIA INTERCEPTADA POR EL FOLLAJE

La estimación de la interceptación por coberturas vegetales se ha abordado tradicionalmente como un porcentaje constante de la precipitación. Las pérdidas por interceptación dependen directamente de la duración e intensidad de la lluvia, la estructura de la vegetación y de las condiciones climatológicas que controlan la evaporación durante y después de la lluvia (Rutter, et al, 1971; Rutter et al, 1975; Xiao et al, 2000); además, el agua sobre el follaje de la vegetación es un importante factor ecológico que condiciona los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre las superficies foliares (Jaramillo, 2003).

Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicará la siguiente ecuación:

- Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$.
- Si el producto $(P)(Cfo)$ es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret = (P)(Cfo)$.
- Si P es mayor de 5mm/mes y el producto $(P)(Cfo)$ menor de 5, $Ret = 5$.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Donde:

P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret = Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

Cfo = Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos Cfo = 0,20, otros Cfo = 0,12 [adimensional].

4.2.1.2 COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. Así, uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (k_{fc}), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$K_{fc} = 0.26 \ln(fc) - 0.000154(fc) - 0.723$$

Donde:

k_{fc} [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo);

fc [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Para aplicar la ecuación anterior, el rango de fc ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día. Para valores de fc menores a 16 mm/día, $k_{fc} = 0,0148fc/16$. Para valores de fc mayor a 1568 mm/día, $k_{fc} = 1$. Con las observaciones mencionadas en el párrafo anterior, el cálculo del coeficiente de infiltración por textura del suelo, se representa en la siguiente ecuación:

- Si fc se encuentra entre 16 y 1568 mm/día, $k_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$;
- Si fc es menor a 16 mm/día $k_{fc} = 0,0148fc/16$.
- Si fc es mayor de 1568 mm/día $k_{fc} = 1$

Sin embargo; El valor de k_{fc} , fue derivado para los valores de lluvia mensual. Por lo tanto, la fracción que infiltra debido a la textura del suelo, nos permite obtener la infiltración mensual debido a este concepto. Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influye la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (C_i), basado en la siguiente ecuación (ONU, 1972):

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	--	---

- Si $k_p + k_v + k_f$ es mayor de 1, $C_i = 1$.
- Si $k_p + k_v + k_f$ es menor o igual a 1, entonces $C_i = k_p + k_v + k_f$.

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

k_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional] (Tabla 1).

k_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional] (Tabla 2).

k_f = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional].

				Kp
0.02% - 0.06%			Muy plana	0.30
0.3% - 0.4%			Plana	0.20
1% - 2%			Algo Plana	0.15
2% - 7%			Promedio	0.10
> 7%			Fuerte	0.06

Tabla 4-1 Componentes del coeficiente de infiltración

Fuente. Schosinsky & Losilla, 2000

				Kv
Cobertura con hierba menos del 50%				0.09
Terrenos cultivados				0.10
Cobertura con pastizal				0.18
Bosques				0.20
Cobertura con hierba más del 75%				0.21

Tabla 4-2 Componentes del coeficiente de infiltración

Fuente. Schosinsky & Losilla, 2000

4.2.1.3 INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente (P_i) al suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = C_i * (P - R_{et})$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes]; y

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

En ningún caso el coeficiente de infiltración (C_i) ha de ser mayor de 1, si es así, se le asignara el valor de 1.

4.2.1.4 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida; normalmente se considera como la precipitación, menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.

P = Precipitación en mm/mes.

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

4.2.1.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

El concepto de evapotranspiración potencial fue definido por Thornthwaite (1948). Thornthwaite definió el concepto de evapotranspiración potencial como el máximo de evapotranspiración que depende únicamente del clima. Según Thornthwaite no hay ninguna restricción de agua en el suelo y su magnitud depende exclusivamente del clima, y para su evaluación no se definió la superficie evaporante. Penman (1956) define la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua transpirada por un cultivo corto de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin ninguna falta de agua. Papadakis (1980) define la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua que se necesita para obtener una vegetación o un rendimiento cercano al óptimo.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren una serie de datos, que pocas estaciones meteorológicas los tienen. Por este motivo, se utilizará la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972):

$$ETP = (8,10 + 0,46T) * P_s$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes].

T = Temperatura media mensual en [grados centígrados], y

P_s = Porcentaje de horas de luz solar mensual con respecto al año [%] (Tabla 3).

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Coordenada Norte para Colombia 4°												
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
%	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8

Tabla 4-3 Porcentaje de horas luz mensual con respecto al año

Fuente.

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex%202.%20meteorological%20tables>

4.2.1.6 COEFICIENTE DE HUMEDAD ANTES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (Hsi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C1) (Schosinsky, 2000):

$$C1 = (Hsi - PM + Pi) / (CC - PM)$$

Donde:

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

Hsi = humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en [mm].

PM = Punto de marchitez en [mm] (Tabla 4).

Pi = Precipitación que infiltra en [mm/mes].

CC = Capacidad de campo en [mm] (Tabla 4).

Textura	Porosid. total (%)	DA (g cm ⁻³)	CC (%)	CMP (%)	Agua disponible		
					H% p.s.	H% vol	H mm 10 cm ⁻¹
Arenoso	38	1.65	9	4	5	8	8
	(32-42)	(1.55-1.8)	(6-12)	(2-6)	(4-6)	(6-10)	(7-10)
Franco-arenoso	43	1.5	14	6	8	12	12
	(40-47)	(1.4-1.60)	(10-18)	(4-8)	(6-10)	(9-15)	(9-15)
Franco	47	1.4	22	10	12	17	17
	(43-49)	(1.35-1.5)	(18-26)	(6-10)	(10-14)	(14-20)	(14-19)
Franco-arcilloso	49	1.33	27	13	14	19	19
	(47-51)	(1.3-1.4)	(23-31)	(12-15)	(12-16)	(16-22)	(17-22)
Arcillo-Arenoso	51	1.3	31	15	16	21	21
	(49-53)	(1.25-1.35)	(27-35)	(14-18)	(14-18)	(18-23)	(18-23)
Arcilloso	53	1.25	36	17	18	23	23
	(51-55)	(1.2-1.3)	(31-39)	(16-20)	(16-20)	(20-25)	(20-25)

Tabla 4-4 Resumen de las propiedades físicas del suelo según texturas

Fuente. Israelsen y Hansen 1979

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Ahora bien, si consideramos la evapotranspiración el coeficiente de humedad al final del mes (C2), será:

$$C2 = (H_{si} - PM + P_i - ETR1)/(CC - PM)$$

$$ETR1 = C1 * ETP$$

Donde:

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1 = Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

4.2.1.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL REAL TENTATIVA

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea, $(C1+C2)/2$; esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es (Schosinsky, 2000):

$$ETPR = ((C1 + C2)/2) * ETP$$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes]

Ninguno de los coeficientes de humedad, C1 y C2, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que C1 o C2, sea mayor de 1, se tomará igual a 1. Si C1 o C2 son negativos se tomarán con valor de 0.

4.2.1.8 HUMEDAD DISPONIBLE

La capacidad de campo y el punto de marchitez determinan los límites máximo y mínimo de la humedad del suelo que puede ser utilizada por los cultivos. La cantidad de agua comprendida entre estos dos valores se define como agua útil o humedad disponible. La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

$$H_d = H_{si} + P_i - P_M$$

Donde:

H_d = humedad disponible [mm/mes].

H_{si} = humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [mm].

P_i = Precipitación que infiltra [mm/mes].

P_M = Punto de marchitez [mm].

4.2.1.9 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

La evapotranspiración real es la cantidad de agua, expresada en mm/día, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal. En general cuando se aborda el punto de la evapotranspiración real se hace referencia a la que se obtiene en un balance de humedad en el suelo (De Juan Valero y Martín de Santa Olalla, 1992). La evapotranspiración real será:

- Si $((C_1+C_2)/2)ETP$ es menor o igual a H_d , ETR (mm/mes) = $((C_1+C_2)/2)ETP$
- Si $((C_1+C_2)/2)ETP$ es mayor que H_d , ETR (mm/mes) = H_d

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].
 C_1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional].

C_2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C_1 , [adimensional].

4.2.1.10 HUMEDAD DEL SUELO AL INICIO Y AL FINAL DEL MES

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad de suelo final H_{sf} , la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación (Schosinsky, 2000):

- Si $(H_d + P_M - ETR)$ es menor que la capacidad de campo, $H_{sf} = H_d + P_M - ETR$.
- Si $(H_d + P_M - ETR)$ es mayor o igual que la capacidad de campo, $H_{sf} = CC$

Donde:

H_{sf} = humedad del suelo final (final de mes) [mm].

H_d = humedad disponible [mm/mes].

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

PM = Punto de marchitez [mm].
ETR= Evapotranspiración real [mm/mes].
CC = Capacidad de campo [mm].

Y finalmente, la Humedad al inicio de cada mes Hsi, corresponderá a la Hsf del mes anterior.

4.2.1.11 CÁLCULO DE RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR$$

Donde:

Rp = Recarga potencial mensual en mm/mes.
Pi = Precipitación que infiltra en mm/mes.
Hsi = humedad del suelo al final del mes en mm.
Hsf = humedad del suelo al final del mes en mm.
ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

Para obtener la recarga potencial de la cuenca, en otras palabras el volumen de agua que recarga al acuífero estará dado por la siguiente ecuación:

$$V = Rp * A$$

Donde:

V = Volumen de recarga [m3/mes ó m3/año].
Rp = Recarga potencial al acuífero [m/mes o m/año].
A = Área donde se genera la recarga potencial [m2].

4.2.1.12 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados para la recarga potencial del acuífero La Toma (Ver anexo 8):

CONCEPTO	SÍMBOLO	UNIDADES	FUENTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Precipitación	P	mm	Estación 24035040	17.050	13.910	17.950	21.670	24.120	12.110	14.950	12.430	12.440	18.680	25.580	13.870	204.760
Retención de lluvia en follaje	Ret	mm/mes	Ecuación 1	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.116	5.000	60.116
Infiltración pluvial mensual	Pi	mm/mes	Ecuación 4	11.100	8.208	11.929	15.356	17.613	6.550	9.166	6.844	6.854	12.602	18.851	8.171	133.244
Escorrentía superficial	ESC	mm/mes	Ecuación 5	0.950	0.702	1.021	1.314	1.507	0.560	0.784	0.586	0.586	1.078	1.613	0.699	11.400
Temperatura	T	°C	Estación 24035040	16.430	15.020	15.170	15.490	15.120	14.580	14.300	14.370	14.580	14.680	14.870	14.640	179.250
Porcentaje de hora luz solar	Ps	%	Dato 4	11.800	11.900	12.000	12.100	12.200	12.200	12.200	12.100	12.000	11.900	11.800	11.800	144.000
Evapotranspiración potencial	ETP	mm/mes	Ecuación 6	184.762	178.609	180.938	184.227	183.673	180.643	179.072	177.993	177.682	176.748	176.294	175.046	2155.689
Coficiente humedad antes de la evapotranspiración	C1	Adimensional	Ecuación 7	0.933	1.000	0.501	0.580	0.632	0.377	0.437	0.384	0.384	0.516	0.660	0.414	6.816
Evapotranspiración potencial real, considerando C1	ETR1	mm/mes	Ecuación 8	172.392	178.609	90.591	106.784	116.015	68.052	78.254	68.262	68.181	91.232	116.383	72.482	1227.239
Coficiente humedad después de la evapotranspiración	C2	Adimensional	Ecuación 8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Humedad disponible	HD	mm/mes	Ecuación 9	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	369.600
Evapotranspiración real tentativa	ETPR	mm/mes	Ecuación 10	86.196	89.305	45.296	53.392	58.007	34.026	39.127	34.131	34.090	45.616	58.192	36.241	613.619
Evapotranspiración real	ETR	mm/mes	Ecuación 11	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	30.800	369.600
Humedad del suelo final	Hsf	mm	Ecuación 12	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	252.000
Humedad del suelo inicial	Hsi	mm	Igual Hsf del mes anterior	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	252.000
Recarga potencial del acuífero	Rp	mm/mes	Ecuación 13	19.700	22.592	18.871	15.444	13.187	24.250	21.634	23.956	23.946	18.198	11.949	22.629	236.356
Déficit de capacidad de campo	DCC	mm	Ecuación 14	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	22.400	268.800
Necesidad de Riego	NR	mm/mes	Ecuación 15	176.362	170.209	172.538	175.827	175.273	172.243	170.672	169.593	169.282	168.348	167.894	166.646	2054.889
Recarga potencial del acuífero (m³/s)	Rp	m³/s	-	0.00220	0.00253	0.00211	0.00173	0.00148	0.00271	0.00242	0.00268	0.00268	0.00204	0.00134	0.00253	0.026
Recarga potencial del acuífero (L/s)	Rp	L/s	-	2.204	2.528	2.111	1.728	1.475	2.713	2.420	2.680	2.679	2.036	1.337	2.532	26.444

Tabla 4-5 Resultados obtenidos para la recarga del Acuífero La Toma
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

CONCLUSIONES

- A pesar de que la Quebrada Peña de águila no está instrumentada con estaciones limnigráficas o limnimétricas, la metodología de balance hídrico a largo plazo permitió estimar los caudales medios, ecológico y mínimo.
- También se logró estimar los caudales máximos con la ayuda del programa HEC HMS de la US Army Corps of Engineers.
- Los caudales estimados mediante las metodologías aplicadas fueron:
 - Caudal mínimo = 2.135 L/s,
 - Caudal ecológico = 0.00476 L/s,
 - Caudal de excedencia del 50% = 4.496 L/s
 - Caudal de excedencia del 95% = 0.339 L/s y,
 - Caudal máximo = 19.04 L/s
- La recarga potencial de un acuífero está íntimamente relacionado con la infiltración y la escorrentía, debido a que el agua que penetra a través de la superficie del terreno se dice que se ha infiltrado; sin embargo, una parte es retenida por el suelo, hasta alcanzar el valor máximo que puede retener el suelo, es decir, la capacidad de campo, y una vez superada esta retención máxima, el resto del agua escurre por gravedad hasta el nivel freático, es decir hasta la zona saturada generando la recarga.
- Este estudio hidrológico “NO” muestra la recarga real del acuífero, pues para tomar decisiones con certeza de la explotación de aguas subterráneas se deben realizar proyectos con objetivos específicos y que intervengan todas las disciplinas requeridas por el estudio, esta será la única manera de conocer la hidrogeología de la zona estudiada de los tipos de abastecimientos posibles para la población.
- Se recomienda no extraer un caudal mayor que la recarga potencial; teniendo en cuenta, que se debe de dejar un caudal ecológico, para el flujo base de los ríos, considerando la biodiversidad existente.
- Datos obtenidos sobre la recarga potencial del Acuífero La Toma:
 - ✓ Caudal encontrado: 2.204 L/s.
 - ✓ Reducción estimada en épocas de verano (10%): 0.2204 L/s.
 - ✓ Caudal disponible en época de verano: 1.9836 L/s.
 - ✓ Caudal ecológico (30%): 0.6612 L/s.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

✓ Caudal total disponible: 1.3716 L/s.

- Los caudales estimados en el presente documento, se utilizaron para la modelación de abastecimiento de agua del acueducto en estudio y teniendo en cuenta el Art 49 de la resolución 0330 del 2017, capacidad de la fuente superficial ...”*El caudal correspondiente al 95% de tiempo de excedencia en la curva de duración de caudales diarios, debe ser superior al caudal máximo diario (QMD) más el caudal ecológico...*”, y con un QMD de 1.347 L/s, se puede concluir que las fuentes de abastecimiento no son suficientes para la dotación de la población actual y futura, por lo que se recomienda la búsqueda y concesión de una nueva fuente de abastecimiento la cual cumpla con todos los requisitos y pueda abastecer la población actual y futura con calidad y continuidad.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T. (1994). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology*, 22(3), 239–252.
<https://doi.org/10.1007/BF00889887>
- Domínguez, E. (2010). *Cálculo de parámetros morfométricos*. Bogotá, D.C.
- FAO. (1985). Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales Unasylva. In *IX Congreso forestal mundial México*. México.
- Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 14. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In *Developments in Soil Science* (Vol. 33, pp. 171–194). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-X)
- HIMAT. (1985). Inventario de cuencas hidrográficas en Colombia. In *III Congreso de Cuencas Hidrográficas*. Cali, Colombia.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41–68.
- Jiménez E., H., & Materón M., H. (1986). *Hidrología Básica Tomo III*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Nardi, F., Vivoni, E. R., & Grimaldi, S. (2006). Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resources Research*, 42(9). <https://doi.org/10.1029/2005WR004155>
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. In *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications* (Vol. 33, pp. 3–30). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
- Reyes T., A., Barroso, F., & Carvajal E., Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Primera Ed). Cali, Colombia: Editorial Universidad del Valle.
- Roberts, B. D. W., Dowling, T. I., & Walker, J. (1997). *FLAG : A Fuzzy Landscape Analysis GIS Method for Dryland Salinity Assessment*.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, 63, 1117–1142.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company (Vol. 1). Retrieved from <https://www.amazon.com/exec/obidos/ASIN/B0007347RW/ref=nosim/ericstrea suretro>
- UNESCO, & WMO. (2012). *International glossary of hydrology*.
- Velasco, A. N. (2016). *Integración del concepto de variabilidad hidroclimática en pronósticos de largo plazo de resolución mensual en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.
- WMO. (1999). Introduction. In *Weather, climate and health* (1st ed., pp. 13–15). Geneva, Switzerland: WMO.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

- WMO. (2011). *Guía de Prácticas Climatológicas*.
- BUTLER, S. (1957). *Engineering Hydrology*. EE.UU.: Prentice Hall INC.
- CALVO, J. (1999). *Principios de hidrología forestal tropical*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico e Costa Rica.
- GRASSI, C. (1976). *Resumen de propiedades físicas del Suelo, metodos de riego*. Merida, Venezuela: CIDIAT.
- HERAS, R. (1972). *Manual de hidrología, hidrologí agrícola*. Madrid, España.
- LINSLEY, R. K. (1958). *Hydrology for engineers*. New York: McGraw Hill.
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKY N., G. (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. *Revista Geológica de América Central*, 13-30.
- SCHOSINSKY, G. &. (2000). *Modelo analítico para determinar la infiltracion con base en la lluvia mensual*. *Revista Geológica de América Central*, 43-45.