



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 ASOCIACION DE
SUSCRIPTORES DEL ACUEDUCTO RURAL DE LA VEREDA DE PORTACHUELO**



**DEPARTAMENTO DE BOYACÁ
MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE VITERBO
2018**

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

CONTROL DE CAMBIOS

VERSIÓN ACTUAL	FECHA	NATURALEZA DEL CAMBIO
01	27/11/2018	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	8
1.3.1 Área de la cuenca – área aferente (a)	9
1.3.2 Perímetro	9
1.3.3 Pendiente media de la cuenca	9
1.3.4 Resumen parámetros morfométricos.....	10
2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	11
2.1 INFORMACIÓN RECOPIADA	13
2.1.1 Precipitación total	13
2.1.2 TEMPERATURA.....	14
3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO	16
3.1 METODOLOGÍA.....	16
3.1.1 Complementar datos	16
3.2 RECARGA POTENCIAL DEL ACUIFERO	16
3.3 BALANCE DE SUELOS	16
3.3.1 Fracción de lluvia interceptada por el follaje	16
3.3.2 COEFICIENTE DE infiltración	17
3.3.3 INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL	19
3.3.4 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	19
3.3.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	20
3.3.6 COEFICIENTE DE HUMEDAD ANTES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	20
3.3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL REAL TENTATIVA.....	21
3.3.8 Humedad disponible	22
3.3.9 Evapotranspiración real	22
3.3.10 Humedad del suelo al inicio y final de mes	23
3.3.11 Cálculo de recarga potencial del acuífero.....	23
4 RESULTADOS	25

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

CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27

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

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Localización general del proyecto.....	7
Figura 1-2 Delimitación de la cuenca Monterrucio	8
Figura 1-3 Mapas de pendientes de la cuenca Monterrucio.....	10
Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones	13
Figura 2-2 Valores de precipitación, estación Andalucía.....	14
Figura 2-3 Valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura	15

	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. Resumen parámetros morfométricos, cuenca Monterrucio	10
Tabla 2-1. Estaciones dentro del área de estudio	11
Tabla 2-2. Cantidad Total de series por variable	13
Tabla 3-1 Componentes del coeficiente de infiltración.....	18
Tabla 3-2 Componentes del coeficiente de infiltración.....	19
Tabla 3-3 Porcentaje de horas luz mensual con respecto al año.....	20
Tabla 3-4 Resumen de las propiedades físicas del suelo según texturas	21
Tabla 4-1 Resultados obtenidos para la recarga del Acuífero Monterrucio	25

	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 del acuífero fuente de captación actual, 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 la cuenca que converge al acuífero, mostrando la limitación de la misma con sus principales características.

En los CAPÍTULO 2 y 3, se muestra de forma metódica el análisis de los parámetros climatológicos y cálculos necesarios para realizar este estudio hidrológico, analizando 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.

Finalmente, en el CAPÍTULO 4 se mostraran los resultados obtenidos y se determinará teóricamente la viabilidad de la fuente para suministrar el recurso hídrico al acueducto que actualmente opera en el área de estudio y el horizonte de diseño.

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

1 ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto se desarrolla para el acueducto Asociación de suscriptores del acueducto rural de la Vereda de Portachuelo.

La bocatoma de captación se encuentra localizada en las coordenadas 5.927378 m. N y -72.985895 m. E, a una altura de 3646.6 m.s.n.m.

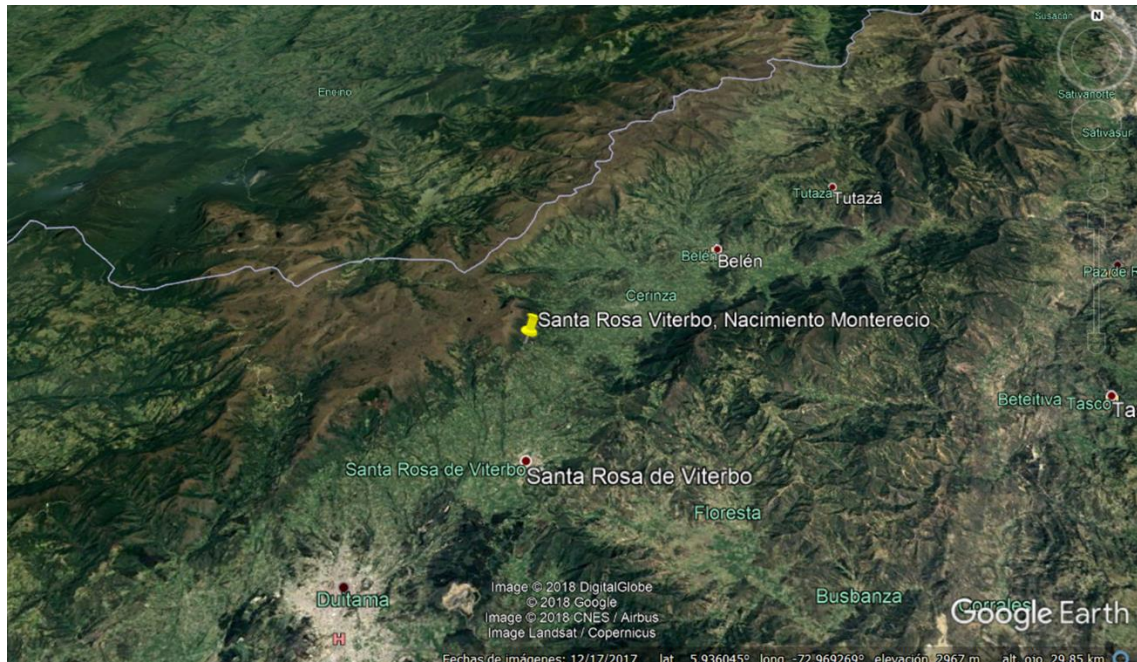


Figura 1-1 Localización general del proyecto

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 delimitó la cuenca dependiendo del punto de captación, esta se nombró 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 la figura 1-2.

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 y finalmente se realizó la delimitación de la cuenca.

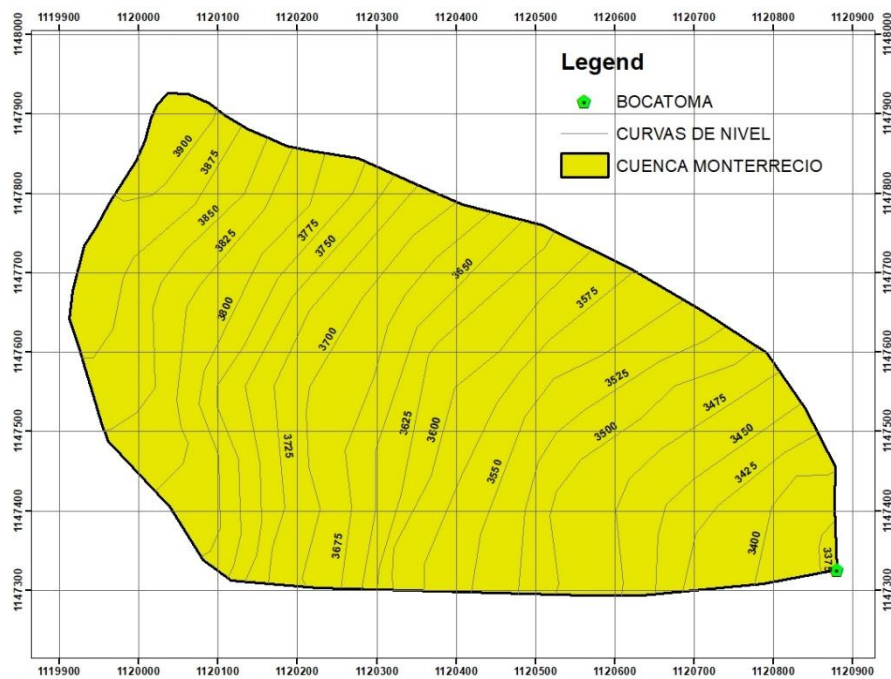


Figura 1-2 Delimitación de la cuenca Monterrecio

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

El área de la cuenca Monterrucio, es respectivamente de 0.42 Km², lo que la clasifica como una Unidad.

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).

El perímetro para la cuenca Monterrucio, es respectivamente de 2.61 km.

1.3.3 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

Se realizó el mapa de pendientes de la cuenca y a partir de esta se determinó la pendiente media de la cuenca.

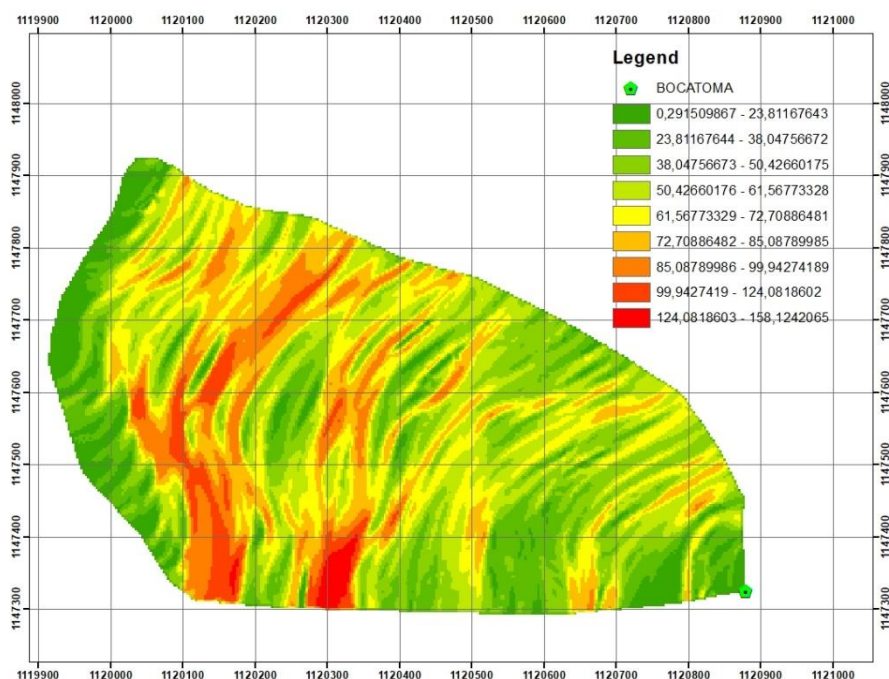


Figura 1-3 Mapas de pendientes de la cuenca Monterrecio
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

La pendiente media de la cuenca Monterrecio, es 58.02 % respectivamente.

1.3.4 RESUMEN PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

A continuación, se presenta un resumen de los parámetros morfométricos calculados para la(s) cuencas analizadas (Ver Anexo 1).

PARAMETRO	UNIDAD	CUENCAS
		MONTERRECIO
Area	km ²	0.42
Perimetro	km	2.61
Pendiente media de la cuenca	%	58.02
Altura Promedio	m.s.n.m	3646.6

Tabla 1-2. Resumen parámetros morfométricos, cuenca Monterrecio
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 identificó la siguiente estación con influencia en la zona de estudio:

CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	MUNICIPIO	ENTIDAD	TIPO
24035350	Andalucía	Surba	Duitama	IDEAM	CP

Tabla 2-1. Estaciones dentro del área 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.
- Estación Climatológica ordinaria (CO): miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas.

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

- 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.

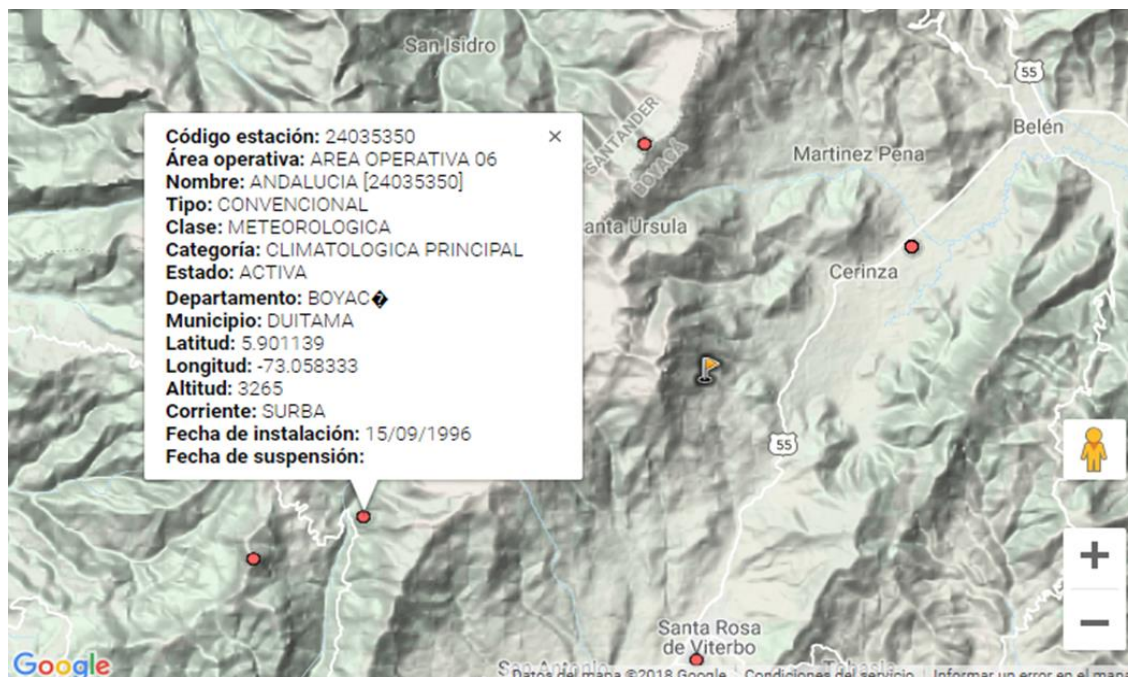


Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, IDEAM, 2018

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).

VARIABLE	SERIES
Precipitación total 24 horas	1
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 en el área es de 480.52 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 Febrero, Abril – Mayo y Agosto - Septiembre, los cuales tienen una precipitación acumulada de 303.50 mm que es un equivalente al 63.16 % del total, y en el segundo período, se presentan el 36.84 % con 177.02 mm, siendo este el periodo seco correspondiente a los meses restantes con precipitaciones máximas en 24 horas promedio de 33.93 mm.

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

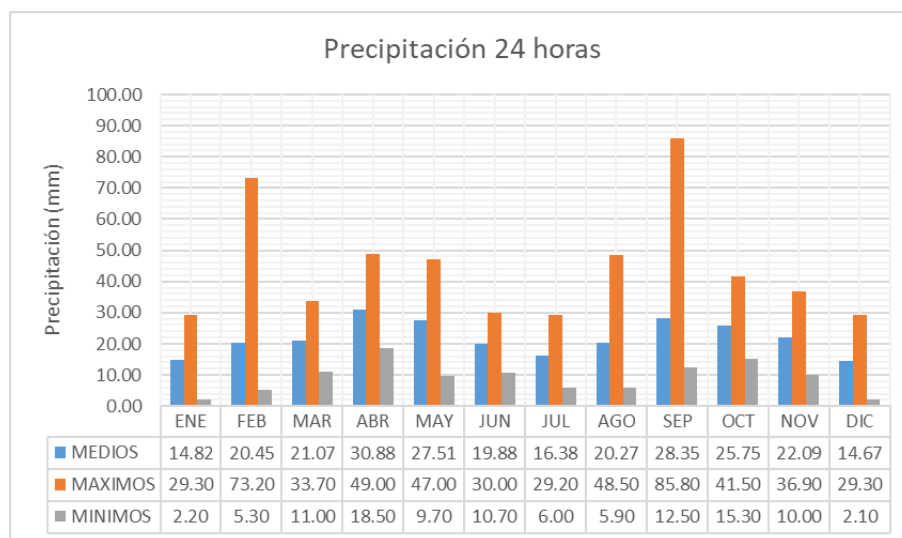


Figura 2-2 Valores de precipitación, estación Andalucía
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2.1.2 TEMPERATURA

Realizado el análisis de los datos de la temperatura máxima, media y mínima registrados en la estación Andalucía, se encontró que la zona presenta temperaturas constantes, lo cual demuestra que es una región con un ecosistema con equilibrio. La temperatura media es de 19.42 °C, la cual califica la zona como clima húmedo, según la clasificación climática de Lang.

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

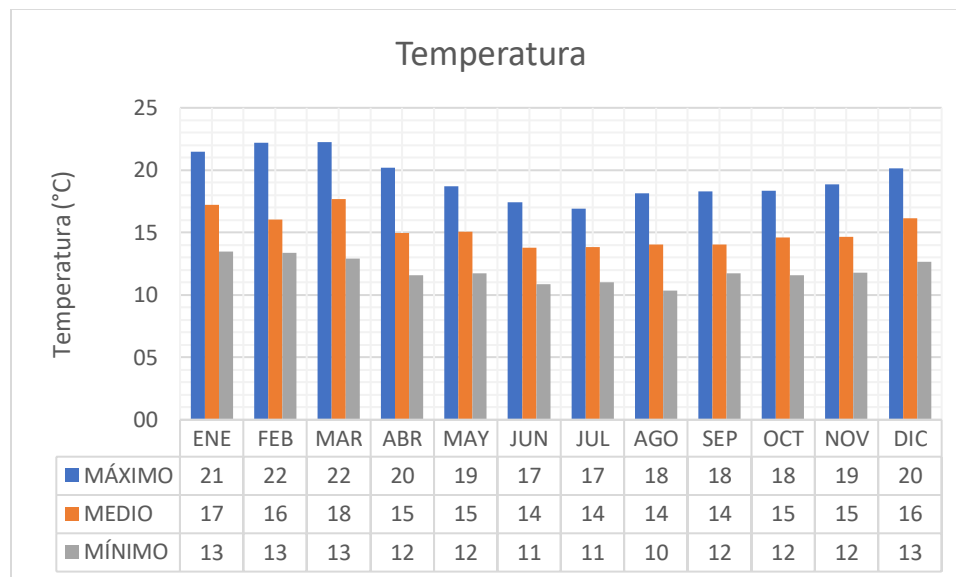


Figura 2-3 Valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura
Fuente. Consorcio Aguas de los andes, 2018

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

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

3.1 METODOLOGÍA

En este estudio se va a desarrollar una metodología y un modelo, con el propósito de estimar 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.

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_B, 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 RECARGA POTENCIAL DEL ACUIFERO

3.3 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.

3.3.1 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

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

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, $Ret = 5$.

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].

3.3.2 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 (kfc), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$Kfc = 0.26 \ln(fc) - 0.000154(fc) - 0.723$$

Donde:

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

- Si $k_p + k_v + k_{fc}$ es mayor de 1, $C_i = 1$.
- Si $k_p + k_v + k_{fc}$ es menor o igual a 1, entonces $C_i = k_p + k_v + k_{fc}$.

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

k_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional] (Tabla1).

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

k_{fc} = 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 3-1 Componentes del coeficiente de infiltración

Fuente. Schosinsky & Losilla, 2000

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

			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 3-2 Componentes del coeficiente de infiltración

Fuente. Schosinsky & Losilla, 2000

3.3.3 INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL

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

$$P_i = C_i * (P - Ret)$$

Donde:

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

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

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.

3.3.4 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.

3.3.5 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):

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

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes].

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

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

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

Fuente.

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

3.3.6 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 3-4 Resumen de las propiedades físicas del suelo según texturas

Fuente. Israelsen y Hansen 1979

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

$$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1)/(CC - PM)$$

$$ETR1 = C1 * ETP$$

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].

3.3.7 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;

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

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.

3.3.8 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:

$$Hd = Hsi + Pi - PM$$

Donde:

Hd = humedad disponible [mm/mes].

Hsi = humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

3.3.9 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:

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

- Si $((C1+C2)/2)ETP$ es menor o igual a H_d , $ETR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2)ETP$
- Si $((C1+C2)/2)ETP$ es mayor que H_d , $ETR \text{ (mm/mes)} = H_d$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].
 $C1$ = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional].

$C2$ = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con $C1$, [adimensional].

3.3.10 HUMEDAD DEL SUELO AL INICIO Y FINAL DE 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 $(H_d + PM - ETR)$ es menor que la capacidad de campo, $H_{sf} = H_d + PM - ETR$.
- Si $(H_d + PM - ETR)$ 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].

PM = Punto de marchitez [mm].

ETR= Evapotranspiración real [mm/mes].

CC = Capacidad de campo [mm].

Y finalmente, la Humedad al inicio de cada mes H_{si} , corresponderá a la H_{sf} del mes anterior.

3.3.11 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:

$$R_p = P_i + H_{si} - H_{sf} - ETR$$

Donde:

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

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 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados para la recarga potencial del acuífero Monterrucio (Ver anexo 4):

CONCEPTO	SÍMBOLO	UNIDADES	FUENTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Precipitación	P	mm	Estación 24035350	14.070	26.480	23.230	30.260	29.760	18.130	17.110	21.110	22.930	25.180	23.440	17.280	268.980
Retención de lluvia en follaje	Ret	mm/mes	Ecuación 1	5.000	5.296	5.000	6.052	5.952	5.000	5.000	5.000	5.000	5.036	5.000	5.000	62.336
Infiltración pluvial mensual	Pi	mm/mes	Ecuación 4	8.355	19.514	16.793	22.300	21.932	12.095	11.156	14.840	16.517	18.556	16.987	11.312	190.357
Escorrentía superficial	ESC	mm/mes	Ecuación 5	0.715	1.670	1.437	1.908	1.876	1.035	0.954	1.270	1.413	1.588	1.453	0.968	16.287
Temperatura	T	°C	Estación 24035350	21.460	22.200	22.260	20.200	18.720	17.440	16.910	18.160	18.280	18.360	18.880	20.160	233.030
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	212.065	217.913	220.075	210.443	203.877	196.693	193.719	199.089	198.106	196.893	198.061	205.008	2451.941
Coefficiente humedad antes de la evapotranspiración	C1	Adimensional	Ecuación 7	0.810	1.000	0.613	0.740	0.731	0.504	0.483	0.568	0.606	0.653	0.617	0.486	7.813
Evapotranspiración potencial real, considerando C1	ETR1	mm/mes	Ecuación 8	171.878	217.913	134.850	155.650	149.063	99.231	93.536	113.032	120.127	128.644	122.244	99.727	1605.895
Coefficiente 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	85.939	108.956	67.425	77.825	74.531	49.616	46.768	56.516	60.063	64.322	61.122	49.864	802.948
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	22.445	11.286	14.007	8.500	8.868	18.705	19.644	15.960	14.283	12.244	13.813	19.488	179.243
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	203.665	209.513	211.675	202.043	195.477	188.293	185.319	190.689	189.706	188.493	189.661	196.608	2351.141
Recarga potencial del acuífero (m³/s)	Rp	m³/s	-	0.00364	0.00183	0.00227	0.00138	0.00144	0.00303	0.00318	0.00259	0.00231	0.00198	0.00224	0.00316	0.029
Recarga potencial del acuífero (L/s)	Rp	L/s	-	3.637	1.829	2.270	1.377	1.437	3.031	3.183	2.586	2.314	1.984	2.238	3.158	29.044

Tabla 4-1 Resultados obtenidos para la recarga del Acuífero Monterrucio
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

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

CONCLUSIONES

- 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 Monterrucio:
 - ✓ Caudal encontrado: 29.044 L/s.
 - ✓ Recarga potencial mensual: 2.420 L/s.
 - ✓ Reducción estimada en épocas de verano (10%): 0.242 L/s.
 - ✓ Caudal disponible en época de verano: 2.178 L/s.
 - ✓ Caudal ecológico (30%): 0.726 L/s.
 - ✓ Caudal total disponible: 1.452 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 1.07 L/s, se puede concluir que la fuente de abastecimiento no es suficiente para la dotación de la población actual y futura.

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

BIBLIOGRAFÍA

- 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.