

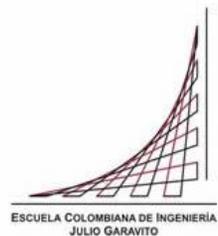
**ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO
AMBIENTE**

**ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES
EN FUENTES NO INSTRUMENTADAS**

Alba Cecilia Guerrero Cuadros

Javier Ignacio Ojeda López

Bogotá, D.C., 14 de marzo de 2016



ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES EN FUENTES NO INSTRUMENTADAS

**Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos
Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Germán Acero Riveros
Director**

Bogotá, D.C., 14 de marzo de 2016



El trabajo de grado titulado “ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES EN FUENTES NO INSTRUMENTADAS”, presentado por Alba Cecilia Guerrero Cuadros y Javier Ignacio Ojeda López, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ing. Germán Acero Riveros

Bogotá, D.C., 14 de marzo de 2016

Dedicatoria

A nuestros respectivos cónyuges, porque han sido motivo de inspiración en el ámbito laboral y personal. Por su apoyo incondicional, su amor, su inteligencia, su paciencia y por estar siempre al lado mío aún en los momentos más difíciles.

A nuestros hijos, quienes nos impulsan a seguir adelante cada día.

Agradecimientos

A nuestra familia e hijos que con su paciencia nos apoyaron y ayudaron a desarrollar el presente trabajo.

Resumen

La viabilidad técnica de un sistema de acueducto o de riego, se fundamenta en el conocimiento de los caudales medios diarios y extremos máximos con los que se determina si la fuente de abastecimiento escogida posee el recurso suficiente para suplir adecuadamente la demanda requerida del sistema y las obras necesarias para que su construcción sea confiable y perdure en el tiempo.

Debido a que la mayoría, por no decir que la totalidad, de las pequeñas fuentes superficiales, empleadas en los proyectos de acueducto y/o riego, no poseen información hidrometeorológica o si la tienen la longitud de sus registros es muy corta y poco confiable, es necesario, para conocer estos dos caudales, recurrir a una gran variedad de métodos que varían, desde simples aforos puntuales en la fuente hasta complicados métodos estadísticos, ninguno de ellos poseedor de la verdad absoluta ni de aceptación universal para los especialistas de la materia.

El presente trabajo de grado recopila métodos de proyección estadística aplicados por diversos autores para el conocimiento de los caudales en pequeñas fuentes superficiales colombianas y después de su conocimiento y estudio los aplica a la determinación de caudales en otra fuente previamente escogida e instrumentada de la cual se conocen la serie de caudales medidos recogidos diariamente por una entidad oficial especializada en la toma de estos registros.

La comparación de los resultados de los diferentes métodos estadísticos con los datos medidos en campo, deben proporcionar a los autores criterios para determinar, no solamente cuál de los métodos de cálculo utilizados refleja de mejor manera el comportamiento de los caudales de la fuente escogida, sino que también debe permitir evaluar las condiciones que hacen que sus resultados se desvíen o acerquen a la realidad.

Tras la aplicación de cinco métodos al estudio de caudales de la fuente seleccionada y su comparación con los datos leídos en la estación Santa Marta sobre la Quebrada El Granadillo, los autores de este trabajo concluyen que en general los métodos utilizados subestiman la capacidad de la fuente en la producción de caudales medios diarios.

Por ser este estudio practicado en una única fuente, sus resultados no se pueden generalizar y mucho menos servir para desestimar alguno de los métodos empleados, pero si pueden ser útiles para ser empleados en futuros trabajos del mismo tópico o para cuestionar a los ingenieros sobre la exactitud de los resultados obtenidos y criterios con los que se acepta o rechaza una fuente de abastecimiento.

Indice general

Introducción	17
Capitulo 1. Generalidades	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Organización del documento	18
1.3 Objetivo general	19
1.4 Objetivos Específicos	19
Capitulo 2. Localización y selección de una fuente para el estudio	21
2.1 Estación La Iberia	22
2.2 Estación Cadillal	22
2.3 Estación Santa Marta	22
Capitulo 3. Recopilación de Información Existente	24
3.1 Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAG	25
3.2 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR	25
3.3 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM	26
3.3.1 Estación SILOS.	28
3.4 Estudios De hidrología analizados y seleccionados	28
3.4.1 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N1 en Cundinamarca.	29
3.4.2 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N2 en Cundinamarca.	29

3.4.3	Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N3 en Boyacá.	29
3.4.4	Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N4 en Boyacá.	29
3.4.5	Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N5 en Boyacá.	30
	Capitulo 4. Descripción de Las metodologías usadas	31
4.1	Informe de Hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano Municipio N1 – Cundinamarca	31
4.1.1	Descripción del proyecto.	31
4.1.2	Información disponible.	31
4.1.3	Metodología empleada.	32
4.1.4	Resultados obtenidos con esta metodología.	41
4.2	Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano Municipio N2 – Cundinamarca	41
4.2.1	Descripción del proyecto.	41
4.2.2	Información disponible.	41
4.3	Informe de Hidrología y climatología casco urbano Municipio N3– Boyacá	57
4.3.1	Descripción del proyecto.	57
4.3.2	Información disponible.	58
4.3.3	Metodología empleada.	58
4.3.4	Información de la cuenca.	59
4.4	Estudios hidrológicos abastecimiento del acueducto del Municipio N4 – Boyacá	75

4.4.1	Descripción del proyecto.	75
4.4.2	Información disponible.	75
4.4.3	Metodología empleada.	76
4.4.3.2	Cálculo del caudal mínimo.	76
4.5	Estudios hidrológicos para el distrito de riego 1 Municipio N5 - Cundinamarca.	80
4.5.1	Descripción del proyecto.	80
4.5.2	Información disponible.	80
4.5.3	Metodología empleada.	80
Capitulo 5. Estudio de Hidrología para la fuente instrumentada		107
5.1	Localización y selección de una fuente para el estudio	107
5.2	Selección de la estación pluviométrica	107
5.2.1	Series de datos de la estación pluviométrica.	109
5.3	Selección de la estación climatológica	109
5.3.1	Series de datos de la estación climatológica.	110
Capitulo 6. Caracterización de la cuenca de la fuente seleccionada		111
6.1	Estimación de las características morfológicas de la cuenca	111
6.1.1	Cálculo del área de la cuenca	111
6.1.2	Cálculo de la longitud del cauce principal	113
6.1.3	Cálculo de las pendientes del cauce	114
Capitulo 7. Caracterización de la cuenca de la fuente seleccionada		118
7.1	Desarrollo de las metodologías	118

7.1.1	Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N1 en Cundinamarca.	118
7.1.2	Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N2 en Cundinamarca	118
7.1.3	Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N3 en Cundinamarca.	151
7.1.4	Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N4 en Cundinamarca.	163
7.1.5	Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N5 en Cundinamarca.	169
	Capitulo 8. Conclusiones, observaciones y recomendaciones	175
8.1	Conclusiones	175
8.2	Observaciones	179
8.3	Recomendaciones	185
	Capitulo 9. Referencias bibliográficas	187

Índice de tablas

Tabla 1. Datos planchas cartografía IGAG	25
Tabla 2. Datos de aéreo- fotografías IGAG	25
Tabla 3. Información de la estación limnimétrica Santa Marta	26
Tabla 4. Relación de las estaciones pluviométricas, climatológicas y de caudales consultadas	27
Tabla 5. Características de la cuenca municipio N1	32
Tabla 6. Características de la cuenca municipio N1	35
Tabla 7. Caudales máximo, medio, mínimo y ecológico en las bocatomas del municipio N1	41
Tabla 8. Características principales de la cuenca del municipio N2	42
Tabla 9. Resultados Curvas de IDF del municipio N2	46
Tabla 10. Curvas de masas aguaceros puntuales del municipio N2	47
Tabla 11. Incrementos de lluvias puntuales de hietogramas de precipitación del municipio N2	47
Tabla 12. Arreglo de lluvias puntuales de hietogramas de precipitación del municipio N2	48
Tabla 13. Resultados de caudales máximos del municipio N2	51
Tabla 14. Resultados de balance hídrico del municipio N2	54
Tabla 15. Escorrentía media diaria del municipio N2	55
Tabla 16. Resultados de caudales medios diarios del municipio N2	55
Tabla 17. Frecuencia de excedencias del municipio N2	56
Tabla 18. Características de la cuenca del proyecto del municipio N3	59
Tabla 19. Lluvias máximas en 24 horas. Estaciones P, G y T	60
Tabla 20. Intensidades máximas para duraciones entre 10 y 120 minutos	62
Tabla 21. Resultados de creciente de 100 años para la quebrada del estudio N3	65

Tabla 22. Valores de precipitación de las estaciones T y G del estudio N3	67
Tabla 23. Valores de precipitación (mm) corregida para la captación y G del estudio N3	68
Tabla 24. Valores de evaporación media mensual para la captación y estación "S" del estudio N3	69
Tabla 25. Valores de evaporación media mensual para la captación y estación "S" del estudio N3	69
Tabla 26. Valores de caudal para la captación del estudio del municipio N3	71
Tabla 27. Valores de caudal para la captación del estudio del municipio N3	72
Tabla 28. Síntesis de resultados de caudales medios, máximos y mínimos mensuales para la captación del estudio del municipio N3	72
Tabla 29. Caudales medios mensuales para la captación del estudio del municipio N3	73
Tabla 30. Caudales para la captación del estudio del municipio N3	75
Tabla 31. Áreas de las cuencas del estudio del municipio N4	76
Tabla 32. Balance hídrico para el proyecto del municipio N4	79
Tabla 33. Tiempos de concentración del municipio N5	82
Tabla 34. Número de curva (CN) adoptado para el proyecto del municipio N5	84
Tabla 35. Números de curva para diferentes usos del suelo según condiciones de humedad antecedente tipo II para el proyecto del municipio N5	87
Tabla 36. Coeficientes de escorrentía por el método racional (Vente Chow) para el proyecto del municipio N5	94
Tabla 37. Coeficientes de escorrentía adoptados para el proyecto del municipio N5	96
Tabla 38. Caudal máx. (m ³ /s) obtenido por los métodos Racional, SCS y W&H para la fuente La G del proyecto del municipio N5	96
Tabla 39. Caudales máximos (m ³ /s) obtenidos por los métodos Racional, SCS y W&H para la quebrada La M del proyecto del municipio N5	97
Tabla 40. Caudal medio para los sitios de captación de fuentes superficiales (m ³ /s) del proyecto del municipio N5	98

Tabla 41. Precipitación media decadal (mm) en la zona del proyecto del municipio N5	99
Tabla 42. Caudales medios decadales (l/s) del proyecto del municipio N	100
Tabla 43. Caudales con probabilidad de excedencia del 75% (l/s) del proyecto del municipio N5	101
Tabla 44. Coeficientes de media y de desviación del proyecto del municipio N5	104
Tabla 45. Caudales mínimos del proyecto del municipio N5	105
Tabla 46. Caudal ecológico del proyecto del municipio N5	106
Tabla 47. Valores de evapotranspiración de la cuenca en estudio	117
Tabla 48. Valores totales de lluvia anual del municipio N2	119
Tabla 49. Determinación del número de curva AMCII del municipio N2	119
Tabla 50. Cálculo del n ponderado para la cuenca escogida	129
Tabla 51. Valores de la evapotranspiración potencial	130
Tabla 52. Capacidad máxima de retención de agua según tipo de suelos	131
Tabla 53. Valores de almacenamiento de suelo Vs. Textura del suelo	132
Tabla 54. Cálculo de caudales medios diarios-enero	132
Tabla 55. Cálculo de caudales medios diarios - febrero	134
Tabla 56. Cálculo de caudales medios diarios- marzo	135
Tabla 57. Cálculo de caudales medios diarios- abril	136
Tabla 58. Cálculo de caudales medios diarios - mayo	138
Tabla 59. Cálculo de caudales medios diarios- junio	139
Tabla 60. Cálculo de caudales medios diarios - julio	140
Tabla 61. Cálculo de caudales medios diarios - agosto	141
Tabla 62. Cálculo de caudales medios diarios - septiembre	143
Tabla 63. Cálculo de caudales medios diarios - octubre	144
Tabla 64. Cálculo de caudales medios diarios - noviembre	146

Tabla 65. Cálculo de caudales medios diarios - diciembre	147
Tabla 66. Resultados de caudales medios mensuales (m ³ /s)	148
Tabla 67. Cálculo de frecuencias	149
Tabla 68. Datos para la curva de duración de caudales	150
Tabla 69. Resultados de la evaporación media mensual estación SILOS (mm)	153
Tabla 70. Cálculo de Caudales mensuales método municipio N3 (l/s)	155
Tabla 71. Resultados de caudales medios mensuales método municipio N3 (m ³ /s)	162
Tabla 72. Resumen de caudales mensuales método municipio N3 (m ³ /s)	162
Tabla 73. Valores de precipitación mensual multianual-SILOS (mm)	164
Tabla 74. Valores de precipitación media mensual -SILOS (mm)	165
Tabla 75. Valores de evapotranspiración "Ej corregido" -SILOS (mm)	167
Tabla 76. Cálculo de la recarga por balance hídrico método municipio N4	168
Tabla 77. Cálculo de caudales medios método municipio N4	169
Tabla 78. Resumen de caudales mensuales método municipio N4	169
Tabla 79. Precipitación mensual multianual (mm) estación SILOS	170
Tabla 80. Caudal medio anual quebrada Granadillo (m ³ /s)	172
Tabla 81. Caudales decadales y caudales medios mensuales (m ³ /s)	173
Tabla 82. Comparativo de resultados de caudales (m ³ /s)	176
Tabla 83. Diferencia porcentuales del caudal medido (fuente instrumentada) Vs. Caudales calculados metodologías (%)	177

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Regionalización de área de drenaje Vs Caudal de referencia	33
Gráfica 2. Regionalización del periodo de retorno (T_r) Vs. Relación Q_{tr}/Q	36
Gráfica 3. Regionalización Área Vs. Caudal medio	37
Gráfica 4. Regionalización de curvas adimensionales de duración de caudales	39
Gráfica 5. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia	44
Gráfica 6. Curvas de duración de caudales medios diarios	57
Gráfica 8. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia	62
Gráfica 9. Histograma de caudales	73
Gráfica 10- Curva de duración de caudales medios mensuales en captación quebrada.	74
Gráfica 11. Precipitación media mensual multianual Estación	77
Gráfica 12. Curva de duración de caudales	79
Gráfica 13- Hidrograma Unitario propuesto por el U.S.S.C.S	90
Gráfica 14- Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann	91
Gráfica 15- Valores de n en el Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann	92
Gráfica 16- Valores de B en el Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann	92
Gráfica 17. Diagrama de frecuencias de caudales medios diarios	150
Gráfica 18. Curva de duración de caudales medios diarios del año promedio	151
Gráfica 19. Precipitación media mensual multianual- estación SILOS (mm)	165

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la estación Santa Marta	108
Figura 2. Ubicación de la estación Silos	109
Figura 3. Delimitación de la cuenca quebrada Granadillo	112
Figura 4 Ubicación del área de la cuenca quebrada Granadillo	113
Figura 5. Longitud del cauce principal	114
Figura 6. Pendientes del cauce principal-quebrada Granadillo	115
Figura 7. Foto aérea georeferenciada para la estimación de la Cobertura vegetal	122
Figura 8 Cobertura vegetal existente en el área de la cuenca de la quebrada Granadillo	122
Figura 9 Determinación de la clase hidrológica Granadillo	123
Figura 10. Tipos de suelos de la cuenca en estudio	126

INTRODUCCIÓN

El factor más importante para la definición de un sistema de acueducto o de riego, es determinar si la fuente de abastecimiento posee el recurso suficiente para suplir adecuadamente la demanda requerida del sistema. La determinación de caudales mínimos, medios y máximos, ha sido realizada por los ingenieros consultores mediante la utilización de gran variedad de métodos que varían, desde simples aforos puntuales, hasta complicados métodos estadísticos.

La falta de información hidrometeorológica y en muchas ocasiones su baja calidad, hacen que los ingenieros hidrólogos se vean obligados a recurrir a diversos medios de cálculo, con el fin de determinar los parámetros necesarios para la estimación de los caudales de diseño.

En los libros de texto especializados en temas de hidrología, se encuentran tratados con mayor o menor profundidad sobre los métodos de cálculo de caudales que utilizan datos de fuentes con un alto grado de instrumentalización; sin embargo, estos textos no guían al ingeniero en el estudio de corrientes superficiales pequeñas con escasa información o no instrumentadas, como lo son la gran mayoría de las fuentes de abastecimiento de los acueductos y riegos a lo largo del territorio nacional.

La experiencia de los dos autores del presente proyecto en la consultoría de sistemas de acueductos urbanos y rurales, ha sembrado gran inquietud acerca de la subjetividad de los resultados en este tema y consideran relevante, el estudio y análisis de modelos de estimación realizados por diferentes autores, con el fin de establecer criterios y recomendar las metodologías más apropiadas para la realización de estos análisis.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Antecedentes

En Colombia, la única legislación existente acerca de estudios hidrológicos para fuentes de abastecimiento, se encuentra en el REGLAMENTO AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS 2000¹, [título B capítulo 3.4.1.6], y en este, a diferencia de los demás capítulos de diseño, a pesar de la gran importancia que posee el tema, se destinan unos pocos renglones para definir los parámetros que deben ser estudiados.

1.2 Organización del Documento

En el Capítulo No. 1, se presentan generalidades del trabajo por desarrollar.

En el Capítulo No. 2, se incluyen los criterios y selección de la fuente que será objeto de estudio.

En el Capítulo No. 3, se incluye la recopilación y fuentes de la información utilizada para los estudios del presente trabajo.

En el Capítulo No. 4, se presenta la descripción de las metodologías usadas por diferentes autores para la determinación de caudales extremos o medios en proyectos reales de acueducto y/o sistemas de riego.

En el Capítulo No. 5, se presenta la selección de la estación pluviométrica y climatológica para la modelación de la fuente escogida.

En el Capítulo No. 6, se incluyen los análisis de caracterización de la cuenca de la fuente seleccionada para el presente estudio.

¹ Ver Capítulo 8. Observaciones

En el Capítulo No. 7, se presenta la aplicación de cada una de las metodologías analizadas para el cálculo de caudales sobre la fuente escogida.

En el Capítulo No. 8, se presentan las conclusiones, observaciones y recomendaciones derivadas del desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo No. 9, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas.

1.3 Objetivo General

El propósito de este trabajo es conocer y evaluar las diferentes metodologías utilizadas por algunos hidrólogos en Colombia para la determinación de caudales mínimos, medios y máximos, estableciendo cuál es la que estima resultados más cercanos a los reportados por una fuente instrumentada previamente analizada.

1.4 Objetivos Específicos

Analizar los diferentes procedimientos utilizados por distintos profesionales de la hidrología, para determinar la capacidad potencial de una fuente para el abastecimiento de sistemas de acueducto y/o riego que presenten escasa información hidrológica.

Proporcionar criterios acertados de evaluación de fuentes superficiales para el abastecimiento de sistemas de acueducto y/o riego.

Conocer las ventajas y desventajas de los métodos hasta ahora utilizados para la estimación de los caudales medios y mínimos de fuentes superficiales no instrumentadas.

Aplicar las diferentes metodologías encontradas para la determinación de caudales, al estudio de una fuente que posee información limnimétrica y comparar los resultados obtenidos con los datos aportados históricamente por la estación.

Presentar un cuadro comparativo de los resultados obtenidos en la fuente instrumentada y los calculados utilizando los diferentes métodos analizados.

Presentar las recomendaciones y conclusiones del estudio, con el fin de ofrecer herramientas que les permitan a futuros investigadores determinar el método más apropiado para la evaluación de fuentes de abastecimiento no instrumentadas.

Proporcionar al ingeniero diseñador y al especialista en hidrología criterios, que le permitan viabilizar la utilización o no de fuentes de abastecimiento y proponer alternativas de suministro del recurso hídrico.

Capítulo 2

Localización y Selección de Una Fuente Para el Estudio

La mayoría de los sistemas de suministro de agua en el país se abastecen de pequeñas fuentes no instrumentadas sobre las que no se encuentra información estadística que permita predecir datos futuros de caudales mínimos, medios o máximos, por lo cual evaluar su capacidad para sustentar adecuadamente el sistema, se convierte en una labor en la que la experticia del diseñador es fundamental para aportar suficientes elementos de juicio en la escogencia apropiada de la fuente.

La fuente a estudiar en este proyecto de grado, debe permitir semejarla a las condiciones generalmente encontradas por los diseñadores, con amplios rangos de caudales, caudales mínimos cercanos a cero y una ubicación en sectores con poca información pluviométrica e hidrométrica.

Para comparar los resultados obtenidos con la aplicación de los distintos métodos de estimación de caudales, con el comportamiento real de la fuente, también es necesario que la fuente posea un sitio de medición de caudales con un amplio número de registros que permita aceptar como ciertos los resultados de un análisis estadístico de sus datos.

Para la selección de la fuente utilizada en el presente estudio, se adoptaron principalmente los siguientes criterios:

- Que presentará caudales mínimos de baja cuantía, preferiblemente del orden de unos pocos litros por segundo.
- Que contará con un adecuado número de registros que permitiera conocer su régimen de caudales.

Tras una revisión de datos de caudales de las estaciones limnimétricas de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, se escogieron las siguientes tres estaciones que cumplían con los criterios enunciados, todas ellas ubicadas en la zona del embalse del Sisga- municipio de Chocontá-Cundinamarca, que por su relevancia en términos hídricos,

posee bastante información hidrometeorológica y climatológica, buscando con ello contar con la mayor cantidad de datos posibles para efectos de realizar las simulaciones en cada una de las metodologías escogidas para este análisis.

2.1 Estación La Iberia

Se ubica en la cuenca del embalse del SISGA y corresponde con la fuente instrumentada denominada río san Francisco localizada en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1048449.300000 ESTE: 1039431.093260.

Esta estación cuenta con registros de caudales diarios multianuales con una serie de 20 años desde el año 1993 hasta el año 2014.

2.2 Estación Cadillal

Se ubica en la cuenca del embalse del SISGA y corresponde con la fuente instrumentada denominada río san Francisco localizada en el municipio de Sesquilé, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1043067.258410 ESTE: 1036142.318790.

Esta estación cuenta con registros de caudales diarios multianuales con una serie de 22 años desde el año 1991 hasta el año 2014.

2.3 Estación Santa Marta

Se ubica en la cuenca del embalse del SISGA y corresponde con la fuente instrumentada denominada quebrada Granadillo localizada en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1049837.502280 ESTE: 1041638.674980.

Esta estación cuenta con registros de caudales diarios multianuales con una serie de 22 años desde el año 1991 hasta el año 2014.

Producto del análisis de estas tres estaciones y teniendo en cuenta la información disponible de cada una de ellas, se escogió para el desarrollo del presente trabajo la estación Santa Marta, la cual presenta series de datos más completos que las otras dos estaciones analizadas. En el anexo No. 1, se puede observar la información de caudales de esta estación.

Capítulo 3

Recopilación De Información Existente

Esta actividad va encaminada a la recopilación de la información existente que permita la caracterización de la fuente escogida y a la recopilación de informes de estudios hidrológicos de pequeñas fuentes de abastecimiento para captaciones de sistemas hidráulicos

Para la recopilación de datos topográficos, hidrológicos y climatológicos se investigó en las siguientes entidades: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR.

En el IGAG además las planchas cartográficas de la cuenca de la fuente, se obtuvieron fotos de vuelos realizados sobre la zona y un estudio general de suelos y zonificación de tierras en el Departamento de Cundinamarca.

Para la obtención de informes hidrológicos, se recurrió a una recolección de trabajos reales ejecutados por distintos autores para estudios de sistemas de acueducto o riego, cuyas fuentes de abastecimiento fueran cauces con caudales pequeños.

El presente trabajo no pretende ser crítico ni de la metodología ni de la aplicación realizada por sus autores. La utilización de los estudios reales se hace únicamente con fines académicos y las observaciones realizadas corresponden estrictamente a las opiniones de los autores de este trabajo de grado, por esta razón, con el fin de no desviar a los lectores hacia la posible relevancia de los ingenieros que participaron en los estudios y con el fin de que la información aquí consignada no sea utilizada para fines distintos a los mencionados, se mantendrá en reserva el nombre de los autores de los estudios, los nombres de los proyectos y el de las fuentes analizadas por ellos.

3.1 Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAG

La información obtenida en el IGAC, corresponde a planchas cartográficas para la zona de estudio de acuerdo a la relación presentada en la tabla No.1:

Tabla 1. Datos planchas cartografía IGAG

AÑO	PLANCHA	ESCALA
2002	209-IV- A- 4	1:10000
2002	209-IV- C- 2	1:10000
2002	209-IV- C- 3	1:10000
2002	209-IV- C- 4	1:10000

Fuente: IGAC

Estas planchas se encuentran en el medio magnético en el anexo No. 1 de este documento, en la carpeta de información IGAG.

Para el análisis del recubrimiento vegetal se obtuvieron fotos aéreas de la zona cuyo inventario se encuentra en la tabla No. 2.

Tabla 2. Datos de aéreo- fotografías IGAG

VUELO	No. De FOTO
IGAG C2051	00144
IGAG C2051	00145

Fuente: IGAC

Para la determinación de los tipos de suelos en el área de la cuenca aferente, se consultó la información contenida en el documento “Estudio general de suelos y zonificación de tierras en el Departamento de Cundinamarca” (Gobernación de Cundinamarca, 2000), que también cuenta con mapas y descripción de los suelos clasificados en Cundinamarca.

3.2 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR

En la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, se consultaron los datos de caudales medios diarios, medios mensuales y máximos mensuales de la estación Santa Marta, estación escogida para efectos de hacer la comparación de

caudales calculados. La información general obtenida de la estación Santa Marta se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Información de la estación limnimétrica Santa Marta

Código estación	2120868	Categoría estación	LM
Latitud	0503 N	Norte	1049850
Longitud	7343 W	Este	1041350
Elevación	2.700 m.s.n.m	Corriente	Q. Granadillo
Departamento	Cundinamarca	Fecha insta.	12/01/1980
Municipio	Chocontá	Cuenca	Embalse Sisga

Fuente: Propia autoría

Los datos de caudales de esta estación se encuentran en el anexo No. 1 del presente estudio.

3.3 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM

Con base en la información obtenida en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, se pudieron obtener registros de 8 estaciones pluviométricas, climatológicas y de caudales, más cercanas a la estación Santa Marta, objeto del presente estudio. En la tabla No. 4 se presenta un resumen de las estaciones consultadas y sus características tales como: código, tipo de estación, entidad que opera la estación, coordenadas, elevación y sub-cuenca a la que pertenece.

Tabla 4. Relación de las estaciones pluviométricas, climatológicas y de caudales consultadas

CÓDIGO	NOMBRE	NORTE	ESTE	LATITUD	LONGITUD	TIPO EST	MUNICIPIO	FECHA DE INSTALACIÓN	ELEVACIÓN	PARÁMETROS ADQUIRIDOS
21205740	SILOS	1057566,62	1041857,94	507	7342	CO	CHOCONTA	Mar-74	2709	VALORES TOTALES DIARIOS DE EVAPORACION (mm)
										VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mm)
										VALORES MEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURA (oC)
										VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (oC)
21200160	PANONIA	1050192,21	1038165,83	503	7344	PM	CHOCONTA	mar-85	2800	VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mm)
21200620	PICIS	1052038,45	1043709,34	504	7341	PM	CHOCONTA	mar-85	2820	VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mm)
21201620	SUESCA	1055718,71	1032618,72	506	7347	PM	SUESCA	may-87	2575	VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mm)
21201650	SANTA ROSITA	1055722,47	1040010,95	506	7345	PM	SUESCA	ago-88	2750	VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mm)
24017610	BOQUERON	1079684,94	1043692,13	519	7341	LG	LENGUAZAQUE	feb-74	2562	VALORES MEDIOS DIARIOS DE CAUDALES (M3/S)
24017150	LA BOYERA	1077832,57	1025218,57	518	7351	LM	UBAQUE	ene-60	2601	VALORES MEDIOS DIARIOS DE CAUDALES (M3/S)
35077140	BARBOSA	1048365,78	1062194,39	502	7331	LG	TIBIRITA	jun-81	1769	VALORES MEDIOS DIARIOS DE CAUDALES (M3/S)

Fuente: Propia autor

Todos los registros obtenidos se encuentran en medio magnéticos en el anexo No. 1 del presente documento.

Teniendo en cuenta la información anterior, se pudo ubicar una estación climatológica cercana y con características de altura similares a la estación hidrométrica seleccionada (Santa Marta). Esta estación climatológica corresponde a la estación denominada SILOS, la cual se describe a continuación:

3.3.1 Estación SILOS.

Se ubica cerca de la cuenca del embalse del SISGA y se localiza en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1.057.566,623 y ESTE: 1.041.857,945.

Esta estación cuenta con registros de temperatura, clima y evaporación diarios mensuales multianuales desde el año 1991 hasta el año 2014.

En la figura No.1, se incluye la localización general y la ubicación de las estaciones climatológicas representativas de la zona de estudio.

Todas las fotografías y mapas utilizados en el presente estudio fueron georeferenciados utilizando diferentes herramientas de CAD y Sistemas de Información Geográfica.

3.4 Estudios De Hidrología Analizados y Seleccionados

Para el desarrollo del presente trabajo, se investigaron y seleccionaron cinco (5) estudios de hidrología. Teniendo en cuenta que solo se utilizará la metodología de cada uno de estos estudios, para fines netamente académicos y para su comparación con el uso de una fuente instrumentada, no se hará la identificación de los autores ni de los sitios de los proyectos de cada uno de los estudios en mención.

3.4.1 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N1 en Cundinamarca.

El objeto de este estudio, es determinar los caudales máximos, medios y mínimos para el diseño de las obras del sistema de acueducto para el casco urbano del municipio N1 de Cundinamarca (denominado N1 para el presente proyecto).

3.4.2 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N2 en Cundinamarca.

El objeto de este estudio es determinar los caudales máximos, medios y mínimos para el diseño de las obras del sistema de acueducto para el casco urbano del municipio N2 de Cundinamarca (denominado N2 para el presente proyecto).

3.4.3 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N3 en Boyacá.

El objeto de este estudio es determinar los caudales máximos, medios y mínimos para el diseño de las obras del sistema de acueducto para el casco urbano del municipio N3 de Boyacá (denominado N3 para el presente proyecto).

3.4.4 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N4 en Boyacá.

El objeto de este estudio es analizar las condiciones de los caudales medios y mínimos a nivel regional, en la zona de localización de las bocatomas que abastecen el acueducto del municipio N4 (denominado N4 para el presente proyecto), localizado en el departamento de Boyacá, condiciones hidrológicas que se evalúan para determinar volúmenes medios a partir de los datos de lluvia. Dado que las fuentes de captación la constituyen nacederos de agua, el objetivo de este informe de hidrología, es el de calcular los caudales a nivel promedio mensual.

3.4.5 Informe de hidrología y climatología para el acueducto del casco urbano del municipio N5 en Boyacá.

Este estudio busca calcular los caudales máximos instantáneos y mínimos promedios decadales, con el fin de determinar si las fuentes poseen capacidad para suministrar agua a un distrito de riego de aproximadamente 118 hectáreas del municipio N5 (denominado N5 para el presente proyecto).

Capítulo 4

Descripción De Las Metodologías Usadas

Para el desarrollo del presente trabajo, se recopilaron cuatro estudios de acueducto y uno de sistema de riego de pequeña escala, que involucran análisis hidrológicos de fuentes de abastecimiento con información escasa. Estos estudios fueron realizados por distintos profesionales, lo que permitirá la comparación de los métodos utilizados.

A continuación se describe cada una de las metodologías utilizadas por los diferentes autores:

4.1 Informe De Hidrología y Climatología Para El Acueducto Del Casco Urbano Municipio N1 – Cundinamarca

4.1.1 Descripción del proyecto.

El objetivo del informe de hidrología de este estudio, es el cálculo de los caudales máximos y mínimos en el sitio de captación en el río G (denominado G para el presente estudio), fuente de abastecimiento del sistema de acueducto para la cabecera urbana del municipio N1. También se realiza el cálculo del caudal ecológico mínimo, que permite la preservación de la fuente de agua.

4.1.2 Información disponible.

El autor del estudio utilizó datos de estaciones limnimétricas para el cálculo de los caudales de la fuente de abastecimiento para el diseño del sistema de acueducto del casco urbano del municipio N1. Se indica que además, existe un déficit general de densidad de instrumentación hidrometeorológica en la región, a la cual pertenece la localidad. Además agrega que, los registros de pluviometría son muy escasos en la región, evidenciándose una mayor cantidad de estaciones limnimétricas que

pluviométricas, circunstancias bajo las cuales el empleo de un modelo lluvia-escorrentía para el cálculo de los caudales no se muestra favorecido.

4.1.3 Metodología empleada.

Para el cálculo de caudales generados en el sitio de captación por sus cuencas aferentes, el autor utilizó un análisis regional de frecuencias y ajuste de probabilidad. Esta metodología fue adoptada asumiendo características similares en cuanto al comportamiento de las variables hidrológicas de las diferentes cuencas de la región.

4.1.3.1 Información de la cuenca.

Las principales características de la cuenca del municipio N1, se pueden observar en la tabla No. 5:

Tabla 5. Características de la cuenca municipio N1

Municipio	Centro Poblado	Bocatoma	A (Km ²)	L (km)	Hmáx (msnm)	Hmín (msnm)	S(m/m)
N1	Casco Urbano	Río "G"	64.46	16.5	3850	1600	0.14

Fuente: Autor estudio municipio N1

4.1.3.2 Cálculo de caudal máximo.

Para el cálculo del caudal máximo empleando esta metodología, es necesario iniciar realizando por el método de Gumbel, el cálculo los diferentes caudales índice (Q_{100} , Q_{50} , Q_{25} , Q_{10} , Q_5 , Q_3 y Q_2) de cada estación, para llevar a cabo un test de homogeneidad de la información. Este test es un procedimiento estadístico para determinar si todas las estaciones corresponden a una misma región con un mismo comportamiento hidrológico.

Para cada estación fue calculada por este autor, la relación Q_{10}/Q_c , y luego el promedio de estas relaciones ($\overline{\frac{Q_{10}}{Q_c}}$ promedio). Finalmente para cada estación fue calculado el valor Tr^* , si este valor es de 2 ± 1 años.

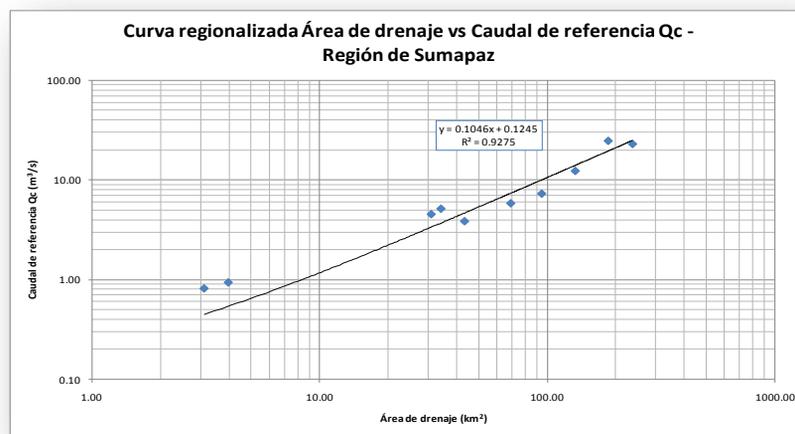
La estación en cuestión, es de un comportamiento similar al de las demás estaciones.

$$T_r^* = \frac{Q_{10}}{\left(\frac{Q_{10}}{Q_c}\right)}$$

Se concluye a partir del test de homogeneidad, que las estaciones pertenecen a una misma región hidrológica y por consiguiente son sujetas a estudios de regionalización, con excepción de la estación Pte R.

El proceso de regionalización permite, para el cálculo de los caudales máximos, generar dos curvas regionales².

La primera curva que el autor elabora, es la curva regionalizada entre el área de drenaje y el caudal de referencia Q_c (adoptado como el caudal para un período de retorno de 2 años y calculado por el método de Gumbel tipo I). Repitiendo este procedimiento para cada una de las estaciones referenciadas, es posible graficar la relación existente entre el área de la cuenca y el Q_c , dando como resultado la curva mostrada en la gráfica No.1 la cual permite calcular el Q_c , conociendo el área de la cuenca.



Gráfica 1. Regionalización de área de drenaje Vs Caudal de referencia
Fuente: Estudio Municipio N1

La segunda curva regionalizada que el autor realiza, corresponde a la relación entre el período de retorno T_r y la relación Q_{tr}/Q_c , en donde Q_{tr} corresponde

² Ver Capítulo 8. Observaciones

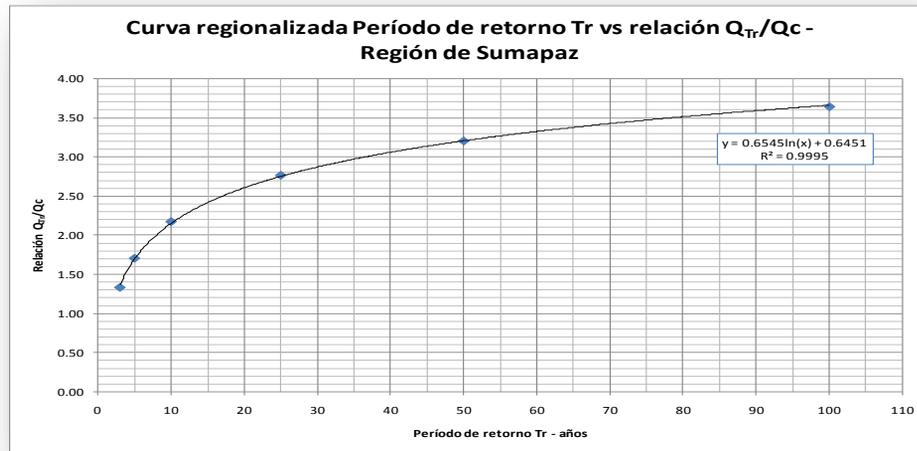
con el caudal para un período de retorno calculado con el método de Gumbel y Q_c es el caudal de referencia calculado previamente. En la tabla No. 6 se pueden observar los resultados de caudales índice (Q_{100} , Q_{50} , Q_{25} , Q_{10} , Q_5 , Q_3 y Q_2) para cada periodo de retorno y los caudales promedios para cada una de las estaciones analizadas por este autor.

Tabla 6. Características de la cuenca municipio N1

Estación	Código estación	Area (km ²)	Qc m ³ /s (Tr=2)	Q3 m ³ /s (Tr=3)	Q5 m ³ /s (Tr=5)	Q10 m ³ /s (Tr=10)	Q25 m ³ /s (Tr=25)	Q50 m ³ /s (Tr=50)	Q100 m ³ /s (Tr=100)	Q3/Qc	Q5/Qc	Q10/Qc	Q25/Qc	Q50/Qc	Q100/Qc
Pasca	2119723	43.30	3.84	4.41	5.04	5.83	6.84	7.58	8.32	1.15	1.31	1.52	1.78	1.97	2.17
Pte Caro	2119729	30.91	4.52	5.06	5.65	6.39	7.34	8.03	8.73	1.12	1.25	1.41	1.62	1.78	1.93
Pte Negro	2119733	236.18	22.98	27.85	33.25	40.06	48.65	55.03	61.36	1.21	1.45	1.74	2.12	2.39	2.67
Pasca 1	2119724	69.06	5.82	7.43	9.21	11.45	14.29	16.39	18.48	1.28	1.58	1.97	2.46	2.82	3.18
Juan XXIII	2119736	3.12	0.81	1.68	2.65	3.87	5.41	6.55	7.69	2.07	3.27	4.78	6.68	8.09	9.49
Pte Aguadita	2119726	94.34	7.27	9.15	11.25	13.88	17.21	19.67	22.12	1.26	1.55	1.91	2.37	2.71	3.04
Pte Caracol	2119728	3.98	0.93	1.20	1.49	1.86	2.32	2.66	3.01	1.29	1.60	2.00	2.49	2.86	3.24
Pte Rojo	2119734	132.46	12.31	12.66	13.06	13.56	14.20	14.67	15.13	1.03	1.06	1.10	1.15	1.19	1.23
Pte Arbeláez	2119727	184.79	24.70	36.97	50.58	67.71	89.36	105.41	121.35	1.50	2.05	2.74	3.62	4.27	4.91
Pte San Vicente	2119735	34.12	5.13	7.44	10.01	13.25	17.34	20.37	23.38	1.45	1.95	2.58	3.38	3.97	4.56
									Promedio	1.34	1.71	2.18	2.77	3.20	3.64
									Tr	3	5	10	25	50	100

Fuente: Autor estudio municipio N1

La gráfica No.2 muestra el resultado obtenido para esta segunda curva.

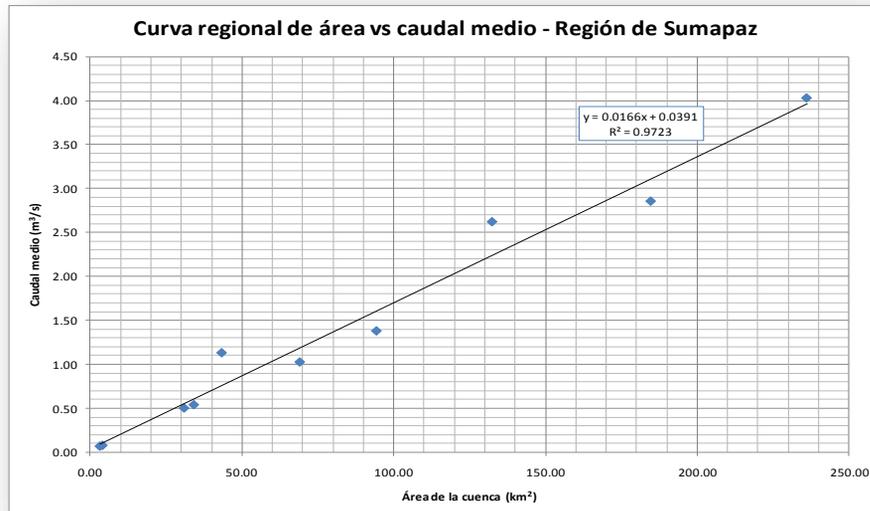


Gráfica 2. Regionalización del periodo de retorno (T_r) Vs. Relación Q_{tr}/Q_c .
Fuente: Estudio Municipio N1

Los caudales máximos en los puntos de bocatoma fueron calculados por el autor, utilizando esta gráfica, para períodos de retorno de 50 y 100 años luego de obtener las relaciones Q_{50}/Q_c y Q_{100}/Q_c .

4.1.3.3 Cálculo del caudal mínimo.

Para el cálculo de los caudales mínimos, el autor de este proyecto genera dos curvas regionales. La primera curva la denomina curva regional de área Vs. Caudal medio. Para su construcción, el autor empleó la información de diez (10) estaciones hidrométricas y calculó para cada una de ellas el área de su cuenca aferente y el caudal medio anual. La gráfica No. 3 muestra el resultado obtenido para esta primera curva.



Gráfica 3. Regionalización Área Vs. Caudal medio.
Fuente: Estudio Municipio N1

Con base en los análisis de frecuencia de las mediciones de caudal medio mensual, en las diferentes estaciones hidrométricas seleccionadas en la región, se construyó para cada una de ellas, las curvas de duración de caudales medios mensuales y se calculó el caudal medio multianual.

La curva de duración de caudales encontrada para cada caso fue desarrollada mediante el procedimiento de asignación de diferentes intervalos de clase de la información mensual, según el llamado criterio de Yevjevich, según el cual:

$$NC = 1.33 \ln N + 1$$

Dónde:

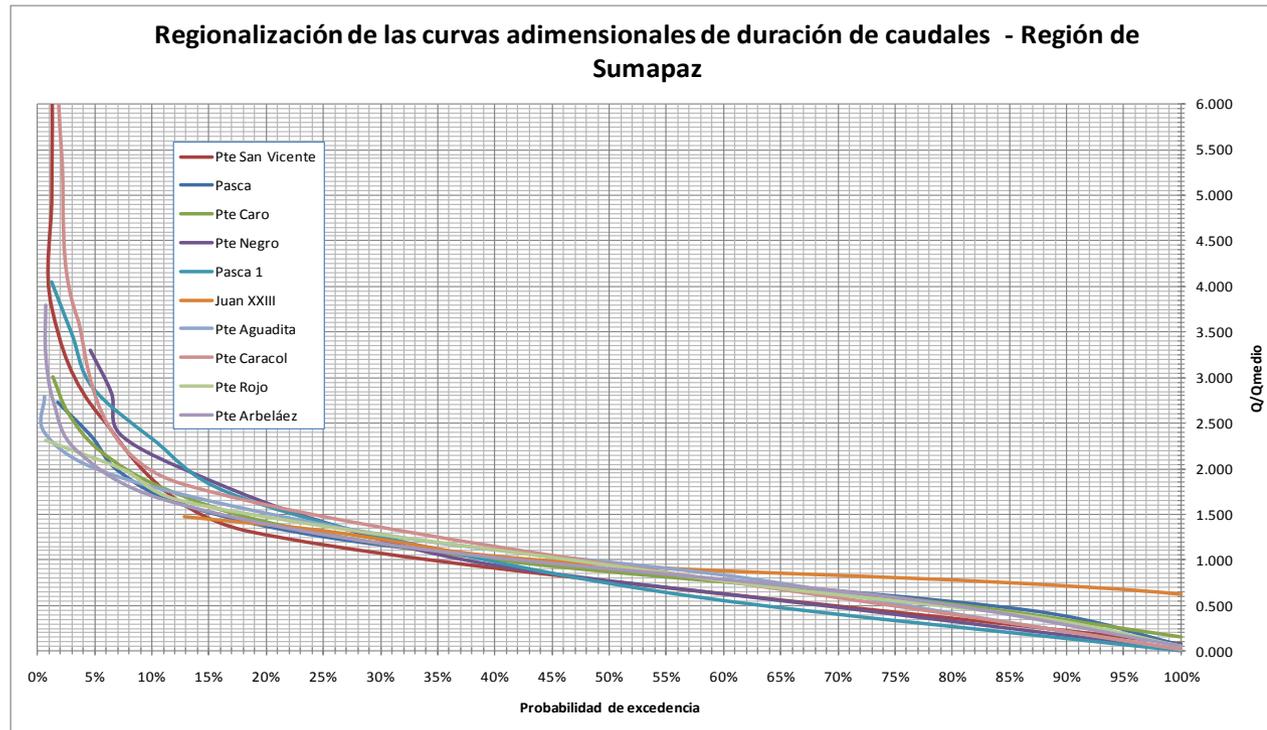
- NC= es el número de intervalos de clase
- N= es el tamaño de la muestra.

Así definido el número de intervalos de clase, se calcula la amplitud de cada intervalo, dividiendo el rango del registro (diferencia entre los registros mayor y menor de toda la muestra) entre el número de intervalos NC.

Esta información permite conocer los límites superior e inferior de cada intervalo de clase. A continuación se cuenta el número de registros que se encuentran en cada uno de los intervalos de clase, que no es otra cosa que la frecuencia de registros por intervalo.

La información de frecuencias se puede acumular, proceso que indica el número de veces que un valor de caudal excede el límite inferior de cada intervalo y que además se puede expresar en porcentaje. Finalmente se grafica el porcentaje calculado en las abscisas contra los límites inferiores de cada intervalo en las ordenadas.

Dividiendo los valores de caudal entre el caudal medio mensual multianual calculado, se logra la adimensionalización de las ordenadas, lo cual permite compararla con otras curvas adimensionales de estaciones vecinas. Ver gráfica No 4.



Gráfica 4. Regionalización de curvas adimensionales de duración de caudales.

Fuente: Estudio Municipio N1

El cálculo del caudal mínimo en la captación, se realizó a partir de la regionalización de las curvas de duración de caudales adimensionales mensuales, asumiendo que este caudal corresponde con aquel igualado o excedido el 95% del tiempo ($Q_{95\%}$).

Como se observa en la gráfica No. 4 el paquete de curvas de duración de caudales permite inferir una gama de relaciones $Q_{95\%}/Q$ medio.

Conocido el caudal medio a través de la gráfica No. 3, es posible calcular para la cuenca en estudio un caudal mínimo, que se encuentra entre el valor más bajo y el valor más alto. El valor adoptado por este autor como caudal mínimo, fue el promedio de los estos dos valores.

4.1.3.4 Cálculo del caudal ecológico.

El caudal ecológico fue calculado por el autor, como el 25% del caudal medio calculado en la corriente, de acuerdo con la Resolución 865 de 2004³, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones y se reglamenta el cálculo del caudal ecológico en las corrientes. Este caudal necesario para la conservación de la flora y fauna dependiente del agua de la fuente, debe perdurar y no puede ser removido de la misma, por lo tanto se debe descontar del caudal aprovechable.

Según la resolución en mención, la autoridad ambiental debe escoger entre las anteriores metodologías de acuerdo con la información disponible y las características regionales particulares.

³ Ver Capítulo 8. Observaciones

4.1.4 Resultados obtenidos con esta metodología.

Los resultados obtenidos con esta metodología empleada se pueden observar en la tabla No. 7:

Tabla 7. Caudales máximo, medio, mínimo y ecológico en las bocatomas del municipio N1

Municipio	Centro Poblado	Bocatoma	Qmáx 50 (m ³ /s)	Qmáx 100 (m ³ /s)	Qmedio (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qecol (m ³ /s)
N1	Casco Urbano	G	22.01	25.13	1.11	0.1775	0.2773

Fuente: Autor Estudio municipio N1

4.2 Informe de Hidrología Y Climatología Para El Acueducto Del Casco Urbano Municipio N2 – Cundinamarca

4.2.1 Descripción del proyecto.

El objetivo del informe de hidrología de este proyecto, es el cálculo de los caudales medio anual y máximos instantáneos anuales para diferentes periodos de retorno. Igualmente el autor calcula la curva de duración de caudales medios diarios a nivel anual.

4.2.2 Información disponible.

El autor utilizó los datos de la estación pluviométrica denominada Monterredondo que se encuentra al interior del área de la cuenca a 1.300 m de altura. El autor, para la aplicación de los métodos de cálculo que se describen más adelante, asumió que las condiciones meteorológicas, pluviométricas e hidrológicas no varían demasiado a lo largo de la cuenca utilizada, lo cual hace prever lluvias intensas simultáneas sobre toda la superficie de la cuenca. Los datos utilizados por el autor de este proyecto, fueron mensual, anual, multi anual y máximo en 24 horas, mensual y anual.

4.2.2.1 Metodología empleada.

Para el cálculo de los caudales máximos instantáneos de escorrentía superficial en diferentes periodos de retorno, el autor utilizó la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, que por utilizar el hidrograma unitario del SCS requiere las características de la lluvia total espacial, la curva CN, el área de drenaje y el tiempo de desfase para la hoya hidrográfica. Los caudales promedio diarios fueron calculados por este autor, mediante la aplicación de un balance hídrico teniendo en cuenta la precipitación promedio sobre la hoya y el cambio de la reserva de humedad del suelo siguiendo el procedimiento aquí descrito.

Para el cálculo de los caudales máximos instantáneos de escorrentía superficial en diferentes periodos de retorno, el autor utilizó la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, que por utilizar el hidrograma unitario del SCS requiere las características de la lluvia total espacial, la curva CN, el área de drenaje y el tiempo de desfase para la hoya hidrográfica. Los caudales promedio diarios fueron calculados por este autor, mediante la aplicación de un balance hídrico teniendo en cuenta la precipitación promedio sobre la hoya y el cambio de la reserva de humedad del suelo siguiendo el procedimiento aquí descrito.

4.2.2.2 Información de la cuenca.

La cuenca estudiada tiene las siguientes características, las cuales se muestran en la tabla No. 8:

Tabla 8. Características principales de la cuenca del municipio N2

Área Cuenca (km²)	Longitud del Cauce (m)	Pendiente del Cauce S (m/m)
81.55	18.811	0.101

Fuente: Autor estudio municipio N2

Las elevaciones de la cuenca se encuentran entre los 3.600 m.s.n.m. y los 1.650 m.s.n.m. en el sitio de captación.

4.2.2.3 Cálculo de caudal máximo.

Para alimentar adecuadamente el programa de computador HEC-HMS es preciso calcular el hidrograma unitario, para lo cual el autor inicia con el cálculo de las curvas IDF basado en datos de lluvias máximas en 24 horas. La acumulación de estas precipitaciones para distintos periodos de retorno, permite la creación del hietograma puntual que se convierte en hietograma de lluvia espacial corrigiéndolo con la aplicación de un coeficiente de reducción de lluvia en función del tamaño del área de drenaje. Por utilizar el hidrograma unitario del SCS se requiere también conocer el “número de curva”, el tiempo de retardo y la profundidad de la precipitación efectiva. Finalmente con estos datos, el programa calcula los hidrogramas unitarios para cada valor de tiempo y el hidrograma total resultante de la suma de las ordenadas de los mismos. Los caudales picos encontrados corresponden a los caudales máximos por cada periodo de retorno.

4.2.2.4 Cálculo de la Intensidad.

Para el cálculo de los caudales máximos instantáneos de escorrentía superficial, este autor inició con el cómputo de las curvas de intensidad duración frecuencia para distintos periodos de retorno, que fueron calculadas con la ecuación extractada del texto “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad Duración Frecuencia para Colombia” Vargas M.R., Díaz – Granados D.M.”⁴ la cual se muestra a continuación:

$$I = a * \left(\frac{T^b}{t^c} \right) * M^d$$

Dónde:

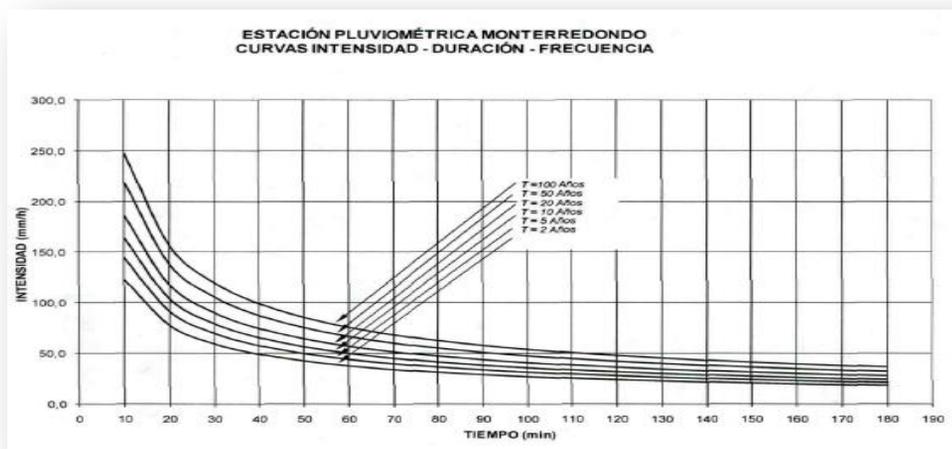
- I= Intensidad de precipitación, mm/h.
- T= Periodo de retorno, años.

⁴ Ver Capítulo 8. Observaciones

- t= Duración de la lluvia, horas.
- M= Promedio de la precipitación máxima anual en 24 horas, mm.

Los parámetros a, b, c y d se encuentran definidos en la referencia bibliográfica señalada por este autor, de acuerdo a la zona donde se encuentra el proyecto.

La gráfica No. 5, muestra los resultados de la aplicación de ésta metodología.



Gráfica 5. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.

Fuente: Estudio Municipio N2

4.2.2.5 Cálculo del coeficiente de reducción de lluvia.

Con el fin de corregir la intensidad de la lluvia que puede caer sobre el área total de la cuenca, este autor calcula el coeficiente de reducción de lluvia mediante la ecuación de Fhruling.

$$I_m = i_o * (1 - 0.0054 * A^{0.25})$$

Dónde:

- I_m= Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

- I_o = Intensidad de la lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1-0.0054 A^{0.25})$ = Coeficiente de reducción de la lluvia, $f(a)$, por el tamaño del área de drenaje A , estando esta última variable expresada en m^2 . Finalmente para encontrar el valor promedio del coeficiente de reducción, el autor adopta un valor medio entre el coeficiente calculado por la fórmula de Fhruling y la unidad, lo que le permite obtener un valor más conservador e introducir un factor de seguridad a su diseño.

4.2.2.6 Cálculo del Tiempo de Concentración.

Para el cálculo del tiempo de concentración, este autor emplea la metodología del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service, utilizando la aplicación de las fórmulas de Kirpich y del Soil Conservation Service.

Fórmula de Kirpich: $T_c = 3.9780 * L^{0.77} * S^{0.385}$

Dónde:

- T_c = Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- L = Longitud del cauce principal, en km.
- S = Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

Fórmula del Soil Conservation Service:

$$T_c = 1.6667 * (L^{0.8} * (2540 - 22.86 * CN)^{0.7}) / (14104 CN^{0.7} * Y^{0.5})$$

Dónde:

- T_c = Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
- L = Longitud del cauce principal, en m.
- CN = Número de la curva hidrográfica, de acuerdo con el método del SCS, adimensional.

- $Y =$ Pendiente promedio de la cuenca, m/m.

El autor adopta como tiempo de concentración el hallado mediante la fórmula de Kirpich, que es el menor de los dos valores encontrados por lo que dará una mayor intensidad de lluvia.

4.2.2.7 Cálculo del Hietograma de precipitación.

El siguiente paso del autor, consiste en hallar el Hietograma de precipitación, el cual es calculado a partir de los datos de la curva de Intensidad – duración – frecuencia, para lo cual halla en primer lugar la curva de masas de aguaceros puntuales en cada periodo de retorno, que consiste en averiguar la cantidad de lluvia caída durante el tiempo determinado según la intensidad dada.

En las tablas No. 9 y No. 10 se presentan los resultados obtenidos por el autor:

Tabla 9. Resultados Curvas de IDF del municipio N2

CURVAS INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA (valores en mm/h)						
TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
10	122,4	144,4	163,6	185,3	218,6	247,6
20	77,5	91,4	103,5	117,3	138,3	156,7
30	59,3	69,9	79,2	89,8	105,8	119,9
40	49,0	57,8	65,5	74,2	87,5	99,2
50	42,3	49,9	56,6	64,1	75,6	85,6
60	37,5	44,3	50,1	56,8	67,0	75,9
70	33,9	40,0	45,3	51,3	60,5	68,5
80	31,0	36,6	41,5	47,0	55,4	62,8
90	28,7	33,9	38,4	43,5	51,3	58,1
100	26,8	31,6	35,8	40,5	47,8	54,2
110	25,2	29,7	33,6	38,1	44,9	50,9
120	23,8	28,0	31,7	35,9	42,4	48,0
130	22,5	26,6	30,1	34,1	40,2	45,6
140	21,5	25,3	28,7	32,5	38,3	43,4
150	20,5	24,2	27,4	31,0	36,6	41,5
160	19,6	23,2	26,2	29,7	35,1	39,7
170	18,9	22,3	25,2	28,6	33,7	38,2
180	18,2	21,4	24,3	27,5	32,4	36,8

Fuente: Autor Estudio MunicipioN2

Tabla 10. Curvas de masas aguaceros puntuales del municipio N2

CURVAS DE MASAS DE AGUACEROS PUNTUALES ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA MONTERREDONDO (valores en mm)						
TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0	0	0	0	0	0	0
10	20,4	24,1	27,3	30,9	36,4	41,3
20	25,8	30,5	34,5	39,1	46,1	52,2
30	29,6	35,0	39,6	44,9	52,9	60,0
40	32,7	38,6	43,7	49,5	58,4	66,1
50	35,3	41,6	47,1	53,4	63,0	71,3
60	37,5	44,3	50,1	56,8	67,0	75,9
70	39,5	46,6	52,8	59,9	70,6	80,0
80	41,4	48,8	55,3	62,6	73,9	83,7
90	43,1	50,8	57,6	65,2	76,9	87,1
100	44,6	52,7	59,7	67,6	79,7	90,3
110	46,1	54,4	61,6	69,8	82,3	93,3
120	47,5	56,0	63,5	71,9	84,8	96,1
130	48,8	57,6	65,2	73,9	87,1	98,7
140	50,1	59,0	66,9	75,8	89,4	101,2
150	51,2	60,4	68,5	77,6	91,5	103,6
160	52,4	61,8	70,0	79,3	93,5	105,9
170	53,5	63,1	71,4	80,9	95,5	108,1
180	54,5	64,3	72,8	82,5	97,3	110,3

Fuente: Autor estudio municipio N2

El hietograma se calcula hallando para cada intervalo de tiempo cual es la variación de la cantidad de milímetros caídos: P2-P1. Ver tabla No.11.

Tabla 11. Incrementos de lluvias puntuales de hietogramas de precipitación del municipio N2

INCREMENTOS DE LLUVIAS PUNTUALES DE LOS HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA MONTERREDONDO (valores en mm)						
INTERVALO DE TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0-10	20,4	24,1	27,3	30,9	36,4	41,3
10-20	5,4	6,4	7,2	8,2	9,7	11,0
20-30	3,8	4,5	5,1	5,8	6,8	7,7
30-40	3,0	3,6	4,1	4,6	5,4	6,2
40-50	2,6	3,0	3,4	3,9	4,6	5,2
50-60	2,3	2,7	3,0	3,4	4,0	4,6
60-70	2,0	2,4	2,7	3,1	3,6	4,1
70-80	1,8	2,2	2,5	2,8	3,3	3,7
80-90	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4
90-100	1,6	1,9	2,1	2,4	2,8	3,2
100-110	1,5	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0
110-120	1,4	1,6	1,9	2,1	2,5	2,8
120-130	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,7
130-140	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5
140-150	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4
150-160	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3
160-170	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2
170-180	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1
TOTAL	54,5	64,3	72,8	82,5	97,3	110,3

Fuente: Autor estudio municipio N2

Los valores así encontrados se ordenan de la siguiente manera: el valor más bajo se coloca en el primer rango 0-10, el segundo valor menor se coloca en el último rango 170-80, el tercero en el rango 10-20 y el cuarto en el rango 160-170 y así sucesivamente hasta formar la tabla No. 12 de histograma de lluvia puntual que se presenta a continuación:

Tabla 12. Arreglo de lluvias puntuales de hietogramas de precipitación del municipio N2

INCREMENTOS ARREGLADOS DE LLUVIAS PUNTALES DE LOS HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN						
ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA MONTERREDONDO						
(valores en mm)						
INTERVALO DE TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0-10	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1
10-20	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3
20-30	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5
30-40	1,4	1,6	1,9	2,1	2,5	2,8
40-50	1,6	1,9	2,1	2,4	2,8	3,2
50-60	1,8	2,2	2,5	2,8	3,3	3,7
60-70	2,3	2,7	3,0	3,4	4,0	4,6
70-80	3,0	3,6	4,1	4,6	5,4	6,2
80-90	5,4	6,4	7,2	8,2	9,7	11,0
90-100	20,4	24,1	27,3	30,9	36,4	41,3
100-110	3,8	4,5	5,1	5,8	6,8	7,7
110-120	2,6	3,0	3,4	3,9	4,6	5,2
120-130	2,0	2,4	2,7	3,1	3,6	4,1
130-140	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4
140-150	1,5	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0
150-160	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,7
160-170	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4
170-180	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2
TOTAL	54,5	64,3	72,8	82,5	97,3	110,3

Fuente: Autor estudio municipio N2

Este hietograma puntual se convierte en hietograma de lluvia espacial afectando cada valor por el coeficiente de reducción espacial adoptado.

El autor utilizó el Hidrograma unitario curvilíneo del Soil Conservation Service para hallar el hidrograma unitario de la cuenca en estudio, calculando el caudal unitario máximo de lluvia neta, el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$qp = 0.208 * A * E / Tp$$

$$T_p = \left(\frac{10}{9}\right) * T_{lag}$$

$$T_{lag} = 0.6 * T_c$$

Dónde:

- q_p = Caudal unitario máximo, en $m^3/s/mm$ de lluvia neta.
- A = Área de la cuenca considerada, en km^2 .
- E = Precipitación efectiva unitaria, en mm .
- T_p = Tiempo al pico del hidrograma, en horas, medido desde el comienzo.
- T_{lag} = Tiempo de retardo en horas, medido entre los centros de gravedad del hietograma espacial e hidrograma unitario.
- T_c = Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, h.
- L = Longitud del cauce, en metros.
- S = Pendiente de la ladera de la cuenca, en m/m .

La ecuación anterior, relaciona el caudal pico del hidrograma unitario para 1 mm de precipitación efectiva, la cual se usa solamente para la convolución de la precipitación neta y de esta manera obtener el hidrograma unitario de la cuenca en estudio.

4.2.2.8 Cálculo del “número de curva” CN.

Para la aplicación de este método también es necesario definir el valor de CN, “número de la curva”, que el autor adopta como 80, correspondiente a áreas en pastos y bosques, en condición hidrológica regular 50% a 75% del suelo cubierto, con pastoreo intensivo, sin maleza.

Aunque el autor enunció las fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de retardo, posteriormente indica que este tiempo es calculado con el método del “número de curva” CN.

$$t_1 = \frac{L^{0.8}(2540 - 22.86CN)^{0.7}}{14104CN^{0.7}Y^{0.5}}$$

Dónde:

- TI = Tiempo de desfase
- L= Longitud hidráulica.
- CN= Número de curva.
- Y= Pendiente de la hoya en metro por metro.

4.2.2.9 Cálculo de la profundidad de la precipitación efectiva.

Ya que hasta ahora se tiene la precipitación total y se requiere la profundidad de la precipitación efectiva, el autor siguiendo el método del SCS utiliza la siguiente fórmula para calcularla:

$$Q = \frac{(P - 0.20S)^2}{P - 0.80S}$$

$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4$$

Dónde:

- Q: Escorrentía total acumulada, pulgadas
- P: Precipitación total del evento, pulgadas.
- S: Infiltración potencial ó retención potencial máxima, pulgadas.
- CN: Curva número.

4.2.2.10 Cálculo de los hidrogramas totales.

Para el cálculo de los hidrogramas totales el autor utilizó el programa de computador HEC-HMS⁵, el cual se describe brevemente a continuación:

El cálculo del hidrograma total se realizó considerando el hidrograma unitario afectado por la escorrentía directa o precipitación efectiva en cada duración unitaria del hietograma en el cual se va desplazando tal duración. El hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas unitarios para cada valor constante de tiempo. Para este estudio el autor no adicionó el caudal base dado que no posee información para su obtención y que su porcentaje es mínimo en relación al caudal pico.

El modelo computacional HEC-HMS ha sido diseñado para simular la escorrentía superficial en una corriente de agua en respuesta a un evento como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas. Cada componente se modela como un aspecto precipitación-escorrentía dentro de una porción de hoya hidrográfica comúnmente referida como una subhoya.

El autor no presenta los hidrogramas totales hallados y se limita solo a enunciar los caudales picos encontrados. Tampoco hace mención dentro de la metodología, sobre el procedimiento empleado para calcular la proyección de los caudales de los Tr correspondientes a los 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

En la tabla No. 13, se muestran los valores de caudales máximos para cada periodo de retorno.

Tabla 13. Resultados de caudales máximos del municipio N2

CAUDAL (m ³ /s)					
T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 20 años	T= 50 años	T= 100 años
105.20	156.60	206.90	269.60	373.10	469.20

Fuente: Autor estudio municipio N2

⁵ Ver Capitulo 8. Observaciones

4.2.2.11 Cálculo del caudal mínimo.

Para el cálculo de los caudales medios diarios, el autor halla los promedios anuales de precipitación y encuentra que la precipitación del año 1990 es muy similar al promedio multianual de lluvias de la estación, por lo cual considera que ese año es el representativo de la estación. No realiza correcciones por altitud ya que asume que al estar la estación ubicada a una altura similar a la del punto del proyecto, este tipo de ajustes no es necesario.

Siguiendo la metodología del SCS, el autor calcula a partir de la precipitación diaria, la precipitación efectiva, pero ahora asumiendo un número de curva AMC II igual a 60, cambio que se origina por no pretender calcular caudales máximos si no promedios en la cuenca.

La evapotranspiración potencial la extrae del estudio realizado por el HIMAT y publicado en 1.976 con el título “Evaluación de evapotranspiración potencial en Colombia según el método de C.W. Thornthwaite”.

El balance hídrico lo realiza diariamente siguiendo la siguiente metodología:

- La infiltración la calcula como la diferencia en la precipitación total y la infiltración efectiva.
- La evapotranspiración la calcula dividiendo la evapotranspiración mensual entre el número de días del mes.
- La reserva de humedad inicial del suelo corresponde a la final del día anterior y la final del día estudiado, por lo que la calcula como la resultante después de hacer la diferencia entre la infiltración y la evapotranspiración del día estudiado.
- La percolación es el resultado del excedente de almacenamiento agua en el suelo, el cual aportara un 1% como escorrentía subterránea que llegara a la cuenca ese mismo día. El almacenamiento máximo de agua del suelo lo estima en 100 mm, valor que concuerda con suelos

franco y franco arcillosos, con humedades disponibles de 17 mm/cm de suelo y profundidad del suelo de 60 cm.

- La escorrentía subterránea la calcula como el 99% de la escorrentía subterránea del día anterior, más el aporte del 1% de la percolación del día estudiado.
- La escorrentía total es igual a la escorrentía subterránea más la precipitación efectiva del día estudiado.

Un ejemplo de los cálculos descritos para la realización del balance hídrico diario se presenta en la tabla No. 14.

Tabla 14. Resultados de balance hídrico del municipio N2

JUNIO																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	MENSUAL
Precipitación P (mm)	4,3	9,2	0,3	1,7	15,9	0	0	2,5	48,5	66,2	9,3	21,9	0,6	2,3	24,9	23,6	7,4	12,5	22,1	11,2	7,2	15,2	9,1	12,1	0	31,5	8,8	16,5	8,5	8,2	401,5
Precipitación efectiva (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Infiltración (mm)	4	9	0	2	16	0	0	3	49	44	9	21	1	2	24	23	7	13	21	11	7	15	9	12	0	32	9	16	9	8	
Evapotranspiración EVP (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	70	
Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	100	100	100	98	97	100	96	95	95	100	100	100	100	96	96	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	
Reserva de humedad del suelo final (mm)	100	100	96	97	100	98	95	95	100	100	100	100	96	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100	
Percolación (mm)	2	7	0	0	11	0	0	0	42	42	7	19	0	0	19	20	5	10	19	9	5	13	7	10	0	27	6	14	6	6	
Escorrentía subterránea (mm)	4,24	4,26	4,22	4,18	4,24	4,2	4,16	4,12	4,49	4,87	4,89	5,03	4,98	4,93	5,07	5,22	5,22	5,27	5,41	5,44	5,44	5,51	5,52	5,57	5,51	5,72	5,73	5,82	5,82	5,82	150,9
Escorrentía total (mm)	4,2	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,5	29,7	4,9	5,8	5	4,8	6,4	5,3	5,2	5,3	6,2	5,4	5,4	5,5	5,5	5,6	5,5	5,7	5,7	5,9	5,8	5,8	

Fuente: Autor estudio municipio N2

La escorrentía calculada la convierte en caudal, al multiplicarla por el área de la cuenca y dividirla entre la unidad de tiempo requerida 86.400 segundos. Las tablas No. 15 y No. 16 muestran el resultado de estos cálculos hasta hallar el caudal medio de la cuenca:

Tabla 15. Escorrentía media diaria del municipio N2

ZONA DE PROYECTO - ESCORRENTIA MEDIA DIARIA (Valores en mm)													
DÍA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1	2,6	1,9	1,4	1,4	2,5	4,2	6,1	6,0	6,3	5,7	4,7	3,4	46,3
2	2,5	1,9	1,4	1,4	3,1	4,3	5,9	5,9	6,2	5,7	4,6	3,4	45,3
3	2,5	1,8	1,4	1,4	2,6	4,2	5,9	11,6	6,2	5,6	4,6	3,4	51,3
4	2,5	1,8	1,4	1,4	2,6	4,2	6,0	6,5	6,1	5,6	4,5	3,3	45,9
5	2,5	1,8	1,4	1,4	2,6	4,2	5,9	6,4	6,1	5,5	4,5	3,4	45,7
6	2,4	1,8	1,4	1,4	2,6	4,2	5,9	6,3	6,0	5,5	4,4	3,4	45,2
7	2,4	1,8	1,3	1,4	2,6	4,2	5,8	6,3	6,0	5,5	4,4	3,3	44,9
8	2,4	1,8	1,3	1,3	2,7	4,1	5,8	6,3	6,0	5,4	4,3	3,3	44,7
9	2,4	1,7	1,3	1,3	2,7	4,5	5,7	6,7	5,9	5,3	4,3	3,3	45,1
10	2,4	1,7	1,6	1,4	2,7	26,7	5,6	6,6	6,0	5,4	4,2	3,2	67,7
11	2,3	1,7	1,5	1,4	2,9	4,9	5,6	6,7	6,0	5,3	4,2	3,2	45,8
12	2,3	1,7	1,5	1,5	2,8	5,6	5,7	6,6	6,0	5,3	4,2	3,2	46,5
13	2,3	1,7	1,5	1,6	2,9	5,0	5,7	6,6	6,0	5,2	4,1	3,1	45,7
14	2,3	1,7	1,6	1,6	2,9	4,9	5,8	6,5	6,0	5,5	4,1	3,1	46,0
15	2,2	1,6	1,7	1,6	2,9	6,4	5,8	6,5	6,0	5,0	4,0	3,1	47,4
16	2,2	1,6	1,7	1,6	2,9	6,3	5,9	6,4	5,9	5,4	4,0	3,1	47,1
17	2,2	1,6	1,7	1,6	3,2	5,2	5,9	6,3	5,9	5,4	4,0	3,1	46,0
18	2,2	1,6	1,7	1,7	10,5	6,3	5,9	6,3	5,8	5,3	3,9	3,0	53,1
19	2,1	1,6	1,6	1,7	4,2	6,2	5,8	6,2	5,8	5,3	3,9	3,0	47,4
20	2,1	1,6	1,6	1,6	3,6	5,4	5,8	6,2	5,8	5,2	3,8	3,0	45,7
21	2,1	1,5	1,6	1,6	4,4	5,4	5,6	6,1	6,2	5,3	3,8	2,9	46,7
22	2,1	1,5	1,6	1,6	4,6	5,5	5,8	6,0	6,1	5,1	3,8	2,9	46,9
23	2,1	1,5	1,6	1,6	3,9	5,5	5,9	6,2	6,1	5,1	3,7	2,9	46,0
24	2,0	1,5	1,6	1,6	3,9	6,6	6,0	6,1	6,0	5,0	3,7	2,9	45,8
25	2,0	1,5	1,5	1,9	4,0	5,5	6,1	6,0	5,9	5,0	3,7	2,8	46,0
26	2,0	1,5	1,5	1,8	4,0	5,7	6,0	6,0	5,9	4,9	3,6	2,8	45,8
27	2,0	1,5	1,5	1,8	4,0	5,7	6,0	6,0	5,8	4,9	3,6	2,8	45,6
28	2,0	1,4	1,5	3,0	4,1	5,9	6,0	5,9	5,8	4,8	3,5	2,7	46,7
29	1,9	1,5	1,5	4,0	4,1	5,8	6,0	6,2	5,7	4,8	3,5	2,7	46,3
30	1,9	1,5	1,5	2,7	4,5	5,8	6,1	6,1	5,7	4,7	3,5	2,7	45,4
31	1,9	1,5	1,5	2,7	4,3	4,3	6,0	6,4	5,7	4,7	3,5	2,7	27,4
TOTAL	68,9	46,3	47,0	51,2	111,5	176,7	182,2	200,5	179,2	163,1	121,1	94,9	1442,6
MÁXIMO	2,6	1,9	1,7	4,0	10,5	26,7	6,1	11,6	6,3	5,7	4,7	3,4	28,2
MÍNIMO	1,9	1,4	1,3	1,3	2,5	4,1	5,6	5,9	5,7	4,7	3,5	2,7	1,3

Fuente: Autor Estudio Municipio N2

Tabla 16. Resultados de caudales medios diarios del municipio N2

ZONA DE PROYECTO - CAUDALES MEDIOS DIARIOS (Valores en m³/s)													
DÍA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1	2,4	1,8	1,3	1,4	2,4	4,0	5,6	5,6	6,0	5,4	4,4	3,2	43,7
2	2,4	1,8	1,3	1,3	2,9	4,0	5,5	5,6	5,9	5,4	4,3	3,2	43,7
3	2,4	1,7	1,3	1,3	2,5	4,0	5,5	11,0	5,8	5,3	4,3	3,2	46,4
4	2,4	1,7	1,3	1,3	2,5	3,9	5,7	6,1	5,8	5,3	4,3	3,2	43,4
5	2,3	1,7	1,3	1,3	2,4	4,0	5,6	6,1	5,7	5,2	4,2	3,2	43,1
6	2,3	1,7	1,3	1,3	2,4	4,0	5,6	6,0	5,7	5,2	4,2	3,2	42,7
7	2,3	1,7	1,3	1,3	2,5	3,9	5,5	5,9	5,6	5,1	4,1	3,1	42,4
8	2,3	1,7	1,3	1,3	2,5	3,9	5,4	6,0	5,6	5,1	4,1	3,1	42,2
9	2,2	1,6	1,2	1,3	2,5	4,2	5,4	6,3	5,6	5,0	4,1	3,1	42,6
10	2,2	1,6	1,5	1,3	2,6	25,2	5,3	6,4	5,6	5,1	4,0	3,0	63,9
11	2,2	1,6	1,5	1,3	2,7	4,6	5,3	6,3	5,7	5,0	4,0	3,0	43,2
12	2,2	1,6	1,5	1,4	2,7	5,4	5,3	6,3	5,7	5,0	3,9	3,0	43,9
13	2,2	1,6	1,4	1,6	2,7	4,7	5,4	6,2	5,7	4,9	3,9	2,9	43,2
14	2,1	1,6	1,5	1,5	2,8	4,7	5,4	6,1	5,7	5,2	3,9	2,9	43,4
15	2,1	1,6	1,6	1,5	2,8	6,1	5,5	6,1	5,7	5,2	3,8	2,9	44,7
16	2,1	1,5	1,6	1,5	2,7	5,9	5,6	6,0	5,6	5,1	3,8	2,9	44,4
17	2,1	1,5	1,6	1,5	3,0	4,9	5,6	6,0	5,5	5,1	3,7	2,9	43,4
18	2,0	1,5	1,6	1,6	3,9	5,0	5,6	5,9	5,5	5,0	3,7	2,9	50,1
19	2,0	1,5	1,6	1,6	4,0	5,8	5,5	5,9	5,5	5,0	3,7	2,8	44,8
20	2,0	1,5	1,5	1,5	3,4	5,1	5,4	5,8	5,4	4,9	3,6	2,8	43,2
21	2,0	1,5	1,5	1,5	4,1	5,1	5,4	5,8	5,6	4,9	3,6	2,8	44,1
22	2,0	1,4	1,5	1,5	4,5	5,2	5,5	6,7	6,6	4,8	3,6	2,7	44,3
23	1,9	1,4	1,5	1,5	3,7	5,2	5,5	5,8	5,7	4,8	3,5	2,7	43,4
24	1,9	1,4	1,5	1,5	3,6	5,3	5,7	5,8	5,7	4,8	3,5	2,7	43,3
25	1,9	1,4	1,5	1,7	3,8	5,2	5,8	6,7	5,6	4,7	3,4	2,7	43,4
26	1,9	1,4	1,4	1,7	3,8	5,4	5,7	5,7	5,6	4,7	3,4	2,6	43,2
27	1,9	1,4	1,4	1,7	3,8	5,4	5,7	5,6	5,5	4,6	3,4	2,6	43,1
28	1,9	1,4	1,4	2,8	3,8	5,5	5,7	5,8	5,4	4,6	3,3	2,6	44,0
29	1,8	1,4	1,4	3,7	3,9	5,5	5,7	5,8	5,4	4,5	3,3	2,6	43,7
30	1,8	1,4	1,4	2,5	4,3	5,5	5,7	6,0	5,3	4,5	3,3	2,5	42,9
31	1,8	1,4	1,4	2,5	4,0	4,0	5,7	6,0	5,7	4,4	3,2	2,5	25,9
PROMEDIO	2,1	1,6	1,4	1,6	3,4	5,6	5,5	6,1	5,6	5,0	3,8	2,9	3,7
MÁXIMO	2,4	1,8	1,6	3,7	9,9	25,2	5,8	11,0	6,0	5,4	4,4	3,2	25,2
MÍNIMO	1,8	1,4	1,2	1,3	2,4	3,9	5,3	5,6	5,3	4,4	3,3	2,5	1,2

Fuente: Autor estudio municipio N2

Con estos resultados se construye una curva de duración de caudales encontrando el número de veces que un caudal determinado es igualado o excedido. La tabla No. 17 muestra los resultados a graficar para este tipo de curva, la cual se puede apreciar en la gráfica No. 6:

Tabla 17. Frecuencia de excedencias del municipio N2

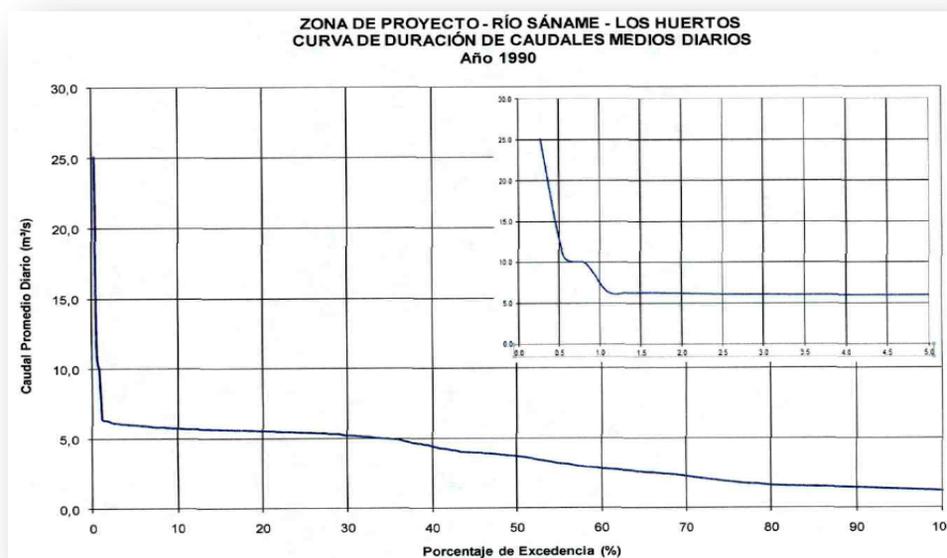
ZONA DE PROYECTO - RÍO SÁNAME - LOS HUERTOS	
CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS	
AÑO 1990	
Caudal Medio Diario (m ³ /s)	Frecuencia de Excedencia (%)
25,16	0,27
13,46	0,50
10,02	0,80
7,66	1,00
6,24	2,00
6,10	3,00
6,03	4,00
5,99	5,00
5,93	6,00
5,86	7,00
5,82	8,00
5,79	9,00
5,76	10,00
5,55	20,00
5,22	30,00
4,43	40,00
3,72	50,00
2,83	60,00
2,28	70,00
1,63	80,00
1,46	90,00
1,35	95,00
1,33	96,00
1,30	97,00
1,28	98,00
1,27	99,00
1,25	99,50
1,240	100,00

Fuente: Autor estudio municipio N2

La adopción del porcentaje de frecuencia de excedencia (%) del caudal medio diario para su comparación con el caudal medio diario calculado en el diseño, no se menciona en el estudio ya que el autor solamente presenta los resultados obtenidos en la curva de duración de caudales y es a criterio del diseñador la escogencia del valor recomendado, lo cual debe hacerse teniendo en cuenta lo consignado en el RAS 2000⁶, el cual corresponde al Q95, es decir al caudal correspondiente al 95% de tiempo de excedencia en

⁶ Ver Capítulo 9. Observaciones

la curva de duración de caudales diarios, Q_{95} , el cual debe ser superior a dos veces el caudal medio diario si la captación se realiza por gravedad o si el sistema de acueducto incluye sistemas de almacenamiento, o superior a dos veces el caudal máximo horario si la captación se realiza por bombeo.



Gráfica 6. Curvas de duración de caudales medios diarios.

Fuente: Estudio Municipio N2.

4.3 Informe De Hidrología Y Climatología Casco Urbano Municipio N3– Boyacá

4.3.1 Descripción del proyecto.

El objetivo del informe de hidrología, es el cálculo de los caudales medios mensuales y máximos instantáneos anuales para diferentes periodos de retorno. De igual forma,

calcula la curva de duración de caudales medios mensuales multianuales. El hecho de trabajar con caudales medios mensuales va en contravía de las disposiciones del RAS 2000.⁷

4.3.2 Información disponible.

Para los cálculos requeridos de lluvias, el autor utilizó el promedio de los datos de las estaciones pluviométricas G y T (llamadas así para el presente proyecto), por encontrarse cercanas a la fuente pero en alturas diferentes a la del sitio de toma. Para los datos climatológicos el autor utilizó la estación S (llamada así para el presente proyecto), ubicada a 1.930 m.s.n.m. Los datos utilizados para el análisis fueron a nivel total mensual, anual multi- anual y máximo en 24 horas a nivel mensual y anual.

4.3.3 Metodología empleada.

Con la información disponible, utilizando la distribución de probabilidades de Gumbel, el autor calculó las lluvias máximas diarias para frecuencias entre 2 y 100 años y aplicó la metodología de las curvas normalizadas de Intensidad-duración-frecuencia (Bell, 1969)⁸, cuyo detalle se expone a continuación.

Según la metodología de Bell (1969), las curvas IDF tienen la siguiente forma:

$$I = \frac{a * Tr^c}{(d + b)^n} = \frac{K}{(d + b)^n}$$

Dónde:

- I= Intensidad de la lluvia (mm/h)
- a, c = Coeficientes a calcular

⁷ Ver Capítulo 9. Observaciones

⁸ Ver Capítulo 9. Observaciones

- T_r = Período de retorno de la lluvia (años)
- d = Duración de la lluvia (minutos)
- b, n = Coeficientes de la zona. $b = 10$ minutos, $n = 0.5$, valores recomendados para estudios preliminares en la zona andina de Colombia (Silva).

Para estimar la serie de caudales medios que llega a la captación, por tratarse de una cuenca pequeña, el autor elaboró un modelo hidrológico de Balance Hídrico, utilizando la serie de lluvias mensuales de la captación de la quebrada durante los últimos 20 años, la serie correspondiente de evaporación y los coeficientes apropiados a las características morfo métricas de la cuenca de estudio.

4.3.4 Información de la cuenca.

Las características de la cuenca estudiada en este proyecto, se muestran en la Tabla No.18:

Tabla 18. Características de la cuenca del proyecto del municipio N3

Quebrada N₃		
Área	0.62	Km ²
Longitud del cauce	1	km
Ancho medio	0.62	km
Cota máxima	2.600	msnm
Cota mínima (de captación)	2.300	msnm
Pendiente del cauce	0.300	m/m

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

4.3.4.1 Cálculo de caudal máximo.

Para la estimación de los caudales puntuales extremos, el autor de este estudio inicia con la aplicación del modelo de Gumbel que parte del análisis de datos de lluvias máximas en 24 horas de las estaciones escogidas. Estos datos se pueden apreciar en la tabla No. 19:

Tabla 19. Lluvias máximas en 24 horas. Estaciones P, G y T

Año	Estación P	Estación T	Estación G
	Altura : 2160 msnm	Altura: 1830 msnm	Altura: 1580 msnm
1991	76.0	45.7	43.0
1992	35.0	46.0	74.0
1993	115.0	36.5	41.0
1994	80.0	57.3	37.0
1995	70.0	61.5	42.2
1996	28.0	50.0	44.3
1997	25.0	60.0	64.5
1998	33.5	50.1	37.7
1999	85.0	60.0	50.0
2000	46.7	44.2	40.0
2001	35.0	47.3	31.5
2002	87.0	54.4	51.1
2003	43.0	30.0	34.5
2004	72.2	100.0	55.9
2005	46.0	36.8	49.2
2006	39.0	36.0	31.3
2007	41.5	38.0	48.0
2008	36.0	48.9	45.4
2009	37.2	48.7	35.5
2010	33.6	48.6	*
RESULTADOS			
Pmx	53.2	50.0	45.1
Smx	24.9	14.7	11.0
C variación	0.468	0.293	0.244
Máximo	115.0	100.0	74.0
No. Años	20	20	19

Fuente: Autor estudio municipio N3

Con estos parámetros, utilizando la distribución de probabilidades de Gumbel, el autor calcula las lluvias máximas diarias para frecuencias entre 2 y 100 años y aplica la metodología de las curvas normalizadas de Intensidad-duración-frecuencia (Bell, 1969) de la siguiente manera (Silva, G, 1998):

4.3.4.2 Cálculo de las lluvias máximas.

Las lluvias máximas horarias el autor las estima a partir de las máximas diarias por medio de la expresión:

$$P_{mx \text{ horaria}} = C P_{mx \text{ diaria}}$$

Donde C es un coeficiente que varía entre 0.20 y 0.60. El valor más alto corresponde a zonas donde las lluvias intensas son de corta duración. Para el caso en estudio se ha adoptado el valor $C = 0.40$. De aquí se deducen las intensidades máximas horarias para las frecuencias de 2 a 100 años.

4.3.4.3 Cálculo de las intensidades máximas para diferentes duraciones.

Una vez determinadas las lluvias horarias para frecuencias entre 2 y 100 años, las intensidades máximas para diferentes duraciones el autor las calcula aplicando la siguiente ecuación general:

$$(imx) = Cr / (t + 10)^{0.5}$$

Dónde:

- imx es la intensidad máxima (mm/h) de aguaceros de duración t (minutos) y frecuencia Tr (años).
- Cr es un coeficiente que depende de la frecuencia.
- Tr se calcula con base en la intensidad horaria, ya definida.
- $Cr = (imx)_{h,Tr} * (70)^{0.5}$

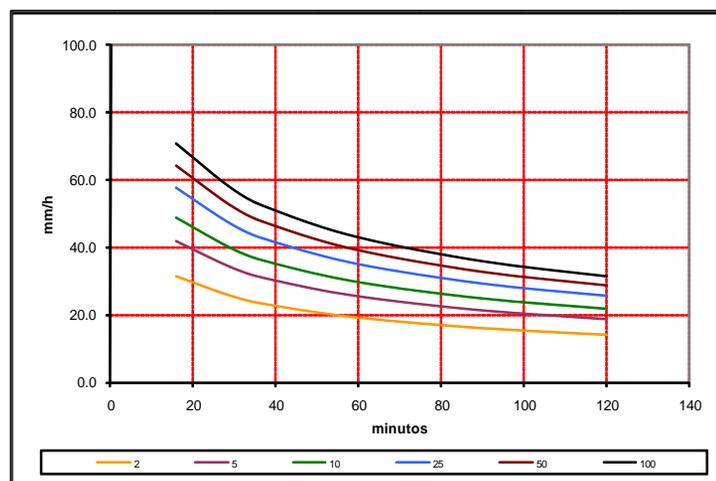
En la tabla No. 20, se aprecian los datos para el cálculo de las curvas de intensidad-duración-frecuencia para la captación del municipio N3.

Tabla 20. Intensidades máximas para duraciones entre 10 y 120 minutos

Promedio de lluvias máximas en 24 h		50	mm			
Desviación estándar de la serie de máximos		15	mm			
Relación entre Lluvia horaria y Lluvia diaria		0.40				
T retorno	Intensidades máximas (mm/h) para duraciones entre 10 y 120 minutos					
años	16	30	40	60	90	120
2	31.4	25.3	22.6	19.1	16.0	14.0
5	41.9	33.8	30.2	25.5	21.4	18.7
10	48.9	39.4	35.3	29.8	24.9	21.9
25	57.7	46.5	41.6	35.2	29.4	25.8
50	64.2	51.8	46.3	39.1	32.7	28.7
100	70.7	57.0	51.0	43.1	36.1	31.6

Fuente: Autor estudio municipio N3

En la gráfica No. 7, se aprecian las curvas de intensidad-duración-frecuencia para la captación del municipio N3.



Gráfica 7. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.

Fuente: Estudio Municipio N3

Para determinar las magnitudes de los caudales máximos instantáneos, o crecientes, el autor utilizó el método del Hidrograma unitario del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos⁹, el cual es apropiado

⁹ Ver Capítulo 8. Observaciones

para cuencas rurales de características similares a las de la corriente analizada.

El método del SCS tiene amplia aceptación en los estudios hidrológicos que se realizan en Colombia y consiste básicamente en la determinación del caudal pico, Q_p , por medio de la expresión:

$$Q_p = C i_{\max} t q_p$$

Dónde:

- i_{\max} se deduce de la curva de intensidad-duración-frecuencia a partir del período de retorno seleccionado, T_r , y de la duración, t , del aguacero que produce la creciente.
- C es un coeficiente menor que 1, que depende del tamaño del área, y de la pendiente de la cuenca. En general, C varía entre 0.1 y 1.0; el valor más alto para cuencas pequeñas de pendiente muy fuerte, y el menor para cuencas extensas de poca pendiente. La quebrada del proyecto tiene una vertiente pequeña, con un cauce de pendiente fuerte. Para el cálculo el autor asignó un coeficiente $C = 0.40$.
- q_p es el caudal pico del hidrograma unitario triangular del SCS, el cual se calcula por medio de la expresión:

$$q_p = A / (1.8 T)$$

Se aplica a cuencas pequeñas y homogéneas y produce resultados aceptables en el cálculo de caudales de creciente generados por escorrentía. La lluvia unitaria que se aplica al hidrograma es 1 mm de lluvia de exceso.

Las componentes del hidrograma unitario triangular se deducen de las características morfométricas de la cuenca y se expresan por medio de las siguientes fórmulas:

$$t_p = D/2 + 0.6t_c$$

$$T = 8/3 t_p$$

$$q_p = A / (1.8 T)$$

Dónde:

- A es el área de la cuenca, en Km²
- T la duración de la creciente, en horas.
- t_p es el tiempo entre el comienzo de la lluvia y el pico de la creciente, que se calcula con la expresión:
- D es la duración de la lluvia
- t_c el tiempo de concentración. La duración de la lluvia se determina por aproximaciones sucesivas, buscando la duración que produzca la creciente más alta.
- La lluvia de exceso, P_e, es una parte de P y se determina realizando análisis de índices de infiltración y de pérdidas, o aplicando la metodología del Soil Conservation Service que se basa en las características de los suelos y en el índice CN.

Por último el caudal pico de creciente de escorrentía, Q_p, con frecuencia T_r resulta:

$$Q_p = P_e * q_p$$

Para calcular el tiempo de concentración el autor utiliza la fórmula de Kirpich¹⁰, la cual está dada por la siguiente expresión:

¹⁰ Ver Capítulo 8. Observaciones

$$t_c = 4 (L / S^{0.5})^{0.77}$$

Dónde:

- t_c es el tiempo de concentración, minutos
- L la longitud del cauce, km
- S la pendiente del cauce, m/m.

En la tabla No. 21 se presentan los valores utilizados y los resultados obtenidos en la cuenca de la captación para la creciete de 100 años.

Tabla 21. Resultados de creciete de 100 años para la quebrada del estudio N3

Área	km ²	0.62
Longitud	km	1.00
Pendiente	m/m	0.30
T concentración	minutos	6.36
Duración de la lluvia	minutos	15.00
Periodo de retorno	años	100
Intensidad	mm/h	72.10
Tiempo al pico, t_p	minutos	11.32
Duración de la creciete	horas	0.57
Caudal unitario	m ³ /s/mm	0.609
Coeficiente		0.40
Caudal de 100 años	m ³ /s	4.40

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Se puede observar que este autor utiliza diferentes metodologías para el cálculo de los caudales máximos y el tiempo de concentración.

Respecto al tiempo de concentración obtenido en la tabla No. 20, se puede observar que utiliza tiempos de concentración muy por debajo de los tiempos establecidos los cuales no deben ser inferiores a 0.25 h, es decir 15 min.

4.3.4.4 Cálculo del caudal medio.

Para la estimación de los caudales medios mensuales, el autor elaboró un modelo hidrológico de balance hídrico, utilizando la serie de lluvias mensuales.

El modelo de Balance Hídrico (Silva, G, 1998) se basa en la siguiente expresión:

$$Q(i) = P(i) - ET(i) - H(i) + dQ(-i)$$

Dónde:

- (i) se refiere al mes correspondiente al cálculo.
- Q es el caudal mensual "Rendimiento".
- P la precipitación mensual.
- ET la evapotranspiración real mensual.
- H las pérdidas mensuales, o sea la parte de lluvia que no se convierte en caudal.
- dQ (-i) se refiere a los volúmenes de escorrentía que se han infiltrado durante el mes anterior y que llegan lentamente al sitio de captación.

La ecuación se puede escribir ahora en la forma:

$$Q(i) = K1(P(i) - ET(i)) + K2(P(i-1) - ET(i-1))$$

Dónde:

- K1 y k2 son coeficientes para el mes (i) y para el mes (i-1).
- K1: Factor que determina el porcentaje de lluvia que directamente se convierte en escorrentía.

- K2: Factor que determina el porcentaje de la infiltración del mes anterior que se convierte en escorrentía.

De esta precipitación que excede a la evapotranspiración, el autor considera que un 35% se convierte en escorrentía directa que llega el mismo día a la corriente y, un 15% llega a la corriente un día después infiltrándose en el subsuelo.

El procesamiento del modelo fue realizado por el autor en un cuadro Excel, mediante un algoritmo de cálculo que aplica los coeficientes y las ecuaciones descritos anteriormente. De este cuadro de Excel el autor despeja las fórmulas utilizadas.

4.3.4.5 Cálculo de la precipitación.

Para el cálculo de la precipitación media mensual en la zona de la captación, el autor indica que en este sitio la lluvia es igual al promedio mensual de lluvias de las dos estaciones escogidas¹¹, posteriormente cada valor medio mensual de los datos de la estación lo afecta siguiendo este mismo criterio para encontrar el valor de la precipitación en la sitio de captación. Los valores de precipitación de las estaciones T y G, se pueden observar en la tabla No.22:

Tabla 22. Valores de precipitación de las estaciones T y G del estudio N3

MES	ESTACIÓN T (1.830 msnm)	ESTACIÓN G (1.580 msnm)	CAPTACIÓN (2.300 msnm)
E	19.2	18.4	18.8
F	23.3	30.6	27.0
M	57.1	58.3	57.7
A	115.7	122.9	119.3
M	192.0	176.8	184.4
J	185.2	171.8	178.5
J	199.3	162.9	181.1

¹¹ Ver Capítulo 8. Observaciones

MES	ESTACIÓN T (1.830 msnm)	ESTACIÓN G (1.580 msnm)	CAPTACIÓN (2.300 msnm)
A	170.3	147.5	158.9
S	112.8	105.0	108.9
O	94.4	97.8	96.1
N	79.2	74.0	76.6
D	31.0	21.1	26.1
ANUAL	1.279,5	1.187,1	1.233,3
MENSUAL	106.6	98.9	102.8

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Los valores de precipitación corregida para la captación y la estación G, se pueden observar en la tabla No.23:

Tabla 23. Valores de precipitación (mm) corregida para la captación y G del estudio N3

Serie mensual		Precipitación		Corregida
		Promedio Lluvias	Cap. Jayatá:	
Ene - 91	1	5,0		5,2
Feb - 91	2	16,3		16,9
Mar - 91	3	65,4		67,9
Abr - 91	4	87,7		91,1
May - 91	5	150,1		155,9
Jun - 91	6	153,5		159,5
Jul - 91	7	234,3		243,4
Ago - 91	8	189,4		196,8
Sep - 91	9	68,0		70,6
Oct - 91	10	95,0		98,7
Nov - 91	11	56,9		59,1
Dic - 91	12	7,5		7,8
Ene - 92	13	20,8		21,6
Feb - 92	14	15,5		16,1

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

4.3.4.6 Cálculo de la evapotranspiración.

La evapotranspiración el autor la calcula de forma similar a la precipitación, pero al no tener datos de dos estaciones para promediar, el dato de la estación escogida lo corrige multiplicándolo por un factor igual a la suma de los valores corregidos sobre la suma de los valores de la estación original. Los resultados se muestran en las tablas No. 24 y No. 25.

Tabla 24. Valores de evaporación media mensual para la captación y estación "S" del estudio N3

EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL (mm)		
MES	ESTACIÓN "S" (1930 msnm)	SITIO CAPTACIÓN (2300 msnm)
ENERO	134.6	124.3
FEBRERO	124.0	114.5
MARZO	117.7	108.7
ABRIL	94.6	87.4
MAYO	90.8	83.8
JUNIO	75.0	69.3
JULIO	74.8	69.1
AGOSTO	81.4	75.2
SEPTIEMBRE	101.6	93.8
OCTUBRE	112.8	104.2
NOVIEMBRE	113.1	104.2
DICIEMBRE	125.0	115.4

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Tabla 25. Valores de evaporación media mensual para la captación y estación "S" del estudio N3

SERIE MENSUAL ESTACIÓN "S"		ESTACIÓN "S"	CAPTACIÓN
EVAPORACIÓN (mm)			
Enero 91	1	147.1	135.8
Febrero 91	2	119.8	110.6
Marzo 91	3	122.4	113.0
Abril 91	4	97.3	89.8
Mayo 91	5	97.9	90.4
Junio 91	6	74.6	68.9
Julio 91	7	71.1	65.7
Agosto 91	8	70.3	64.9
Septiembre 91	9	100.9	93.2
Octubre 91	10	119.7	110.5
Noviembre 91	11	97.9	90.4
Diciembre 91	12	125.7	116.1
Enero 92	13	144.1	133.1
Febrero 92	14	136.6	126.1

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Dado que el valor de la precipitación mensual está dado en mm/m^2 (L/m^2), es necesario para su conversión a $\text{L}/\text{s}/\text{Km}^2$, afectarlo por un coeficiente que dependerá del número de días que tenga el mes. El autor, calcula el caudal total aportado multiplicando el rendimiento por el área de la cuenca. Los resultados se muestran en la tabla No. 26.

Tabla 26. Valores de caudal para la captación del estudio del municipio N3

		Guayatá						Captación
		P mensual	Ev mensual	ET mensual	P-ET	k1 (P-ET)	Rendimiento	Caudal (lps)
	Meses	1991-2009	mm	mm	mm	mm	lps/km2	
Ene - 91	1	5,2	135,83	67,92	0,52	0,18	0,07	0,04
Feb - 91	2	16,9	110,62	55,31	1,69	0,59	0,25	0,16
Mar - 91	3	67,9	113,02	56,51	11,43	4,00	1,62	1,00
Abr - 91	4	91,1	89,85	44,92	46,19	16,17	6,79	4,21
May - 91	5	155,9	90,40	45,20	110,74	38,76	17,34	10,75
Jun - 91	6	159,5	68,89	34,44	125,03	43,76	22,91	14,20
Jul - 91	7	243,4	65,65	32,83	210,59	73,71	35,09	21,76
Ago - 91	8	196,8	64,91	32,46	164,31	57,51	33,81	20,96
Sep - 91	9	70,6	93,17	46,59	24,06	8,42	12,55	7,78
Oct - 91	10	98,7	110,53	55,27	43,43	15,20	7,14	4,43
Nov - 91	11	59,1	90,40	45,20	13,91	4,87	4,32	2,68
Dic - 91	12	7,8	116,07	58,04	0,78	0,27	0,90	0,56
Ene - 92	13	21,6	133,06	66,53	2,16	0,76	0,33	0,21
Feb - 92	14	16,1	126,14	63,07	1,61	0,56	0,34	0,21

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Como resultado de la aplicación del modelo hidrológico el autor obtuvo en la captación, una serie de 228 caudales medios mensuales de entrada, que tiene los valores principales que se muestran en la tabla No. 27.

Tabla 27. Valores de caudal para la captación del estudio del municipio N3

	Meses	P mensual	Ev mensual	ET mensual	P-Et	k1 (P-ET)	Rendimiento	Captación
		1991-2009	mm	mm	mm	mm	lps/km2	Caudal (lps)
Ene - 91	1	5,2	135,83	67,92	0,52	0,18	0,07	0,04
Feb - 91	2	16,9	110,62	55,31	1,69	0,59	0,25	0,16
Mar - 91	3	67,9	113,02	56,51	11,43	4,00	1,62	1,00
Abr - 91	4	91,1	89,85	44,92	46,19	16,17	6,79	4,21
May - 91	5	155,9	90,40	45,20	110,74	38,76	17,34	10,75
Jun - 91	6	159,5	68,89	34,44	125,03	43,76	22,91	14,20
Jul - 91	7	243,4	65,65	32,83	210,59	73,71	35,09	21,76
Ago - 91	8	196,8	64,91	32,46	164,31	57,51	33,81	20,96
Sep - 91	9	70,6	93,17	46,59	24,06	8,42	12,55	7,78
Oct - 91	10	98,7	110,53	55,27	43,43	15,20	7,14	4,43
Nov - 91	11	59,1	90,40	45,20	13,91	4,87	4,32	2,68
Dic - 91	12	7,8	116,07	58,04	0,78	0,27	0,90	0,56
Ene - 92	13	21,6	133,06	66,53	2,16	0,76	0,33	0,21
Feb - 92	14	16,1	126,14	63,07	1,61	0,56	0,34	0,21

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

Como resultado de la aplicación del modelo hidrológico este autor presenta la síntesis de los caudales medios mensuales para el proyecto, los cuales se resumen en la tabla No. 28:

Tabla 28. Síntesis de resultados de caudales medios, máximos y mínimos mensuales para la captación del estudio del municipio N3

Área	0.62	Km ²
Factor ET	0.50	adimensional
K1	0.35	adimensional
K2	0.15	adimensional
Rendimiento medio	12.49	L/s/km ²
Qmedio	7.75	l/s
Qmáx mes	28.8	l/s
Qmín mes	0.04	l/s

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

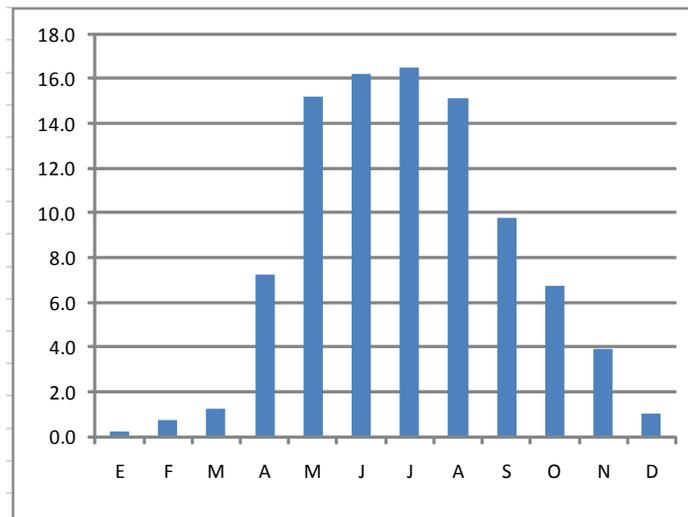
El resultado de los caudales medios mensuales obtenidos en el modelo, se observa en la tabla 29:

Tabla 29. Caudales medios mensuales para la captación del estudio del municipio N3

MES	Caudal medio mensual (l/s)
E	0.2
F	0.7
M	1.2
A	7.3
M	15.2
J	16.2
J	16.5
A	15.1
S	9.8
O	6.7
N	3.9
D	1.0
ANUAL	7.8

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

La gráfica del histograma de caudales, se puede apreciar en la gráfica No. 8:



Gráfica 8. Histograma de caudales.

Fuente: Estudio Municipio N3

La distribución de los caudales en el año es monomodal, similar a la de las lluvias medias mensuales.

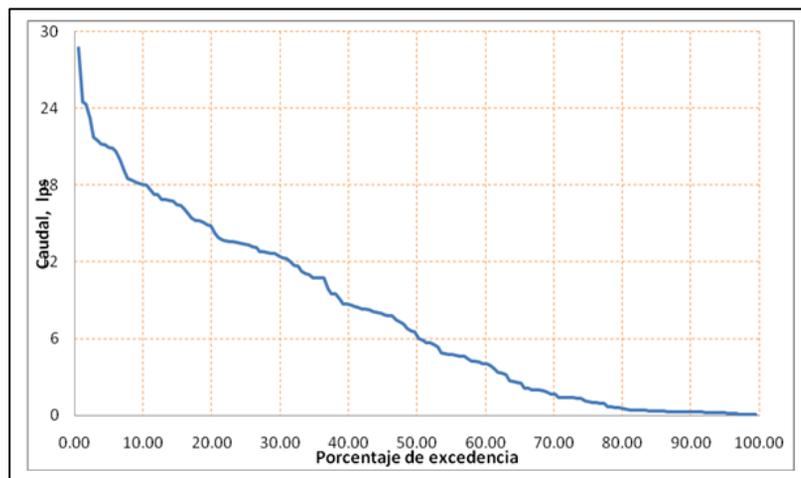
Con la serie de caudales mensuales el autor elaboró la curva de duración de caudales de la quebrada en la captación. Para determinar la curva de duración de caudales medios mensuales, el autor utilizó la serie que resultó de la aplicación del modelo hidrológico. En total el autor obtuvo N = 228 caudales mensuales en la captación. Estos caudales fueron ordenados de mayor a menor y se dio a cada caudal ordenado, un número de orden (m) entre 1 y 228.

El autor, utilizando la fórmula de probabilidades de Weibull, en la que la probabilidad de que se presente un caudal mayor o igual que el caudal de orden m es igual a:

$$P(Q > Q(m)) = m / (N+1)$$

El autor de esta manera, calculó las probabilidades para los 228 valores de la serie y luego dibujó el gráfico entre las probabilidades y los caudales respectivos. Este gráfico es la curva de duración de caudales.

En la gráfica No. 9, se presenta la curva de duración de caudales medios mensuales en la captación, calculada por el autor de los estudios.



Gráfica 9- Curva de duración de caudales medios mensuales en captación quebrada.

Fuente: Estudio Municipio N3

En la tabla No. 30, se presentan los valores de caudales para la captación, calculados por el autor de los estudios.

Tabla 30. Caudales para la captación del estudio del municipio N3

CLASIFICACIÓN	EXCEDENCIA (%)	CAUDAL (l/s)
Caudal de aguas altas	10.0	18.00
Caudal medio anual	45.30	7.82
Caudal mediana	50.0	6.20
Caudal del 80%	80.0	0.58
Caudal de aguas bajas	90.0	0.25
Caudal del 95%	95.0	0.19
Caudal mínimo probable	98.0	0.09

Fuente: Autor Estudio Municipio N3

4.4 Estudios Hidrológicos Abastecimiento Del Acueducto Del Municipio N4 – Boyacá

4.4.1 Descripción del proyecto.

Este estudio analiza las condiciones de los caudales medios y mínimos a nivel regional, en la zona de localización de las bocatomas que abastecen el acueducto del municipio N4 localizado en el departamento de Boyacá, condiciones hidrológicas que se evalúan con el objetivo de determinar volúmenes medios a partir de los datos de lluvia. Dado que las fuentes de captación la constituyen nacederos de agua, el objetivo del informe de hidrología del presente proyecto, es el de calcular los caudales a nivel promedio mensual.

4.4.2 Información disponible.

Los análisis hidrológicos, se realizaron a partir de la información hidroclimatológica suministrada por el IDEAM, correspondiente a los datos de lluvia de la estación pluviométrica (PM) denominada V para el presente proyecto, la cual está localizada

en el municipio del mismo nombre y de la estación meteorológica (AM) NC, localizada en el municipio del mismo nombre. De esta última estación, se contó con la información a nivel mensual de temperatura desde el año 1977 hasta 1987. Los datos utilizados para el análisis fueron a nivel total mensual, anual multi anual y máximo en 24 horas a nivel mensual y anual.

4.4.3 Metodología empleada.

Para estimar la serie de caudales medios que llega a la captación, por tratarse de una cuenca pequeña, el autor de este estudio elaboró un modelo hidrológico de Balance Hídrico.

4.4.3.1 Información de la cuenca.

Las características de las cuencas estudiadas en este proyecto, se muestran en la tabla No.31:

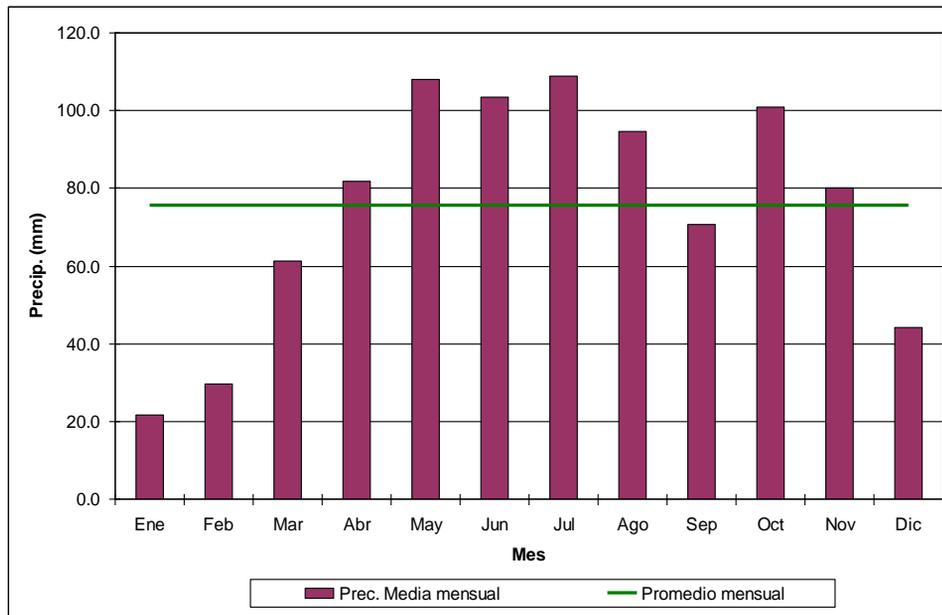
Tabla 31. Áreas de las cuencas del estudio del municipio N4

Nombre	Área (Ha)
El GA	35.6
El ARRA	55.0
El PE	30.0

Fuente: Autor Estudio Municipio N4

4.4.3.2 Cálculo del caudal mínimo.

De los datos de la estación de T se extraen los valores medios mensuales de precipitación. Estos valores se muestran en la gráfica No. 10:



Gráfica 10. Precipitación media mensual multianual Estación

Fuente: Estudio Municipio N4

4.4.3.3 Cálculo del balance hídrico.

El balance hídrico se realizó comparando mensualmente la ETP y la precipitación neta, encontrando inicialmente un exceso o un déficit.

Cuando escasea el agua en el suelo, la evapotranspiración real (ETR) es inferior a la potencial existiendo escasez o falta de agua. Lo contrario, es decir, cuando hay abundancia de agua en el suelo, permiten la ocurrencia de la infiltración y por ende la recarga hacia los acuíferos.

En términos generales, en un balance hídrico se debe cumplir que las entradas de flujo (I) menos las salidas (O), son el equivalente al almacenamiento en la zona de estudio (ΔS), es decir:

$$I - O = \Delta S$$

Es importante resaltar que, la recarga obtenida mediante los balances hídricos, es la cantidad potencial del agua que pudiera ingresar a los acuíferos mediante la infiltración.

4.4.3.4 Cálculo de la Evapotranspiración.

Los datos de evapotranspiración son estimados a partir de los datos de temperatura con la ecuación de Thornthwaite para el cual, la evapotranspiración potencial se define a partir de la siguiente ecuación:

$$E_j = 16 \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

Dónde:

- E_j es la evapotranspiración potencial mensual del mes j, no ajustada
- T_j la temperatura media mensual del mes j (en °C)
- I el índice de calor que se define a partir de la siguiente expresión:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49$$

Los valores de E_j deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días en el mes.

$$E_{j \text{ corr}} = E_j * L$$

$$L = N_{\text{díasj}}/30 * N_{\text{horassolj}}/12$$

En la tabla No. 32, se presenta el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos de temperatura en las cuencas de la zona, efectuado por el autor de estos estudios. En dichos cuadros el autor compara los valores medios

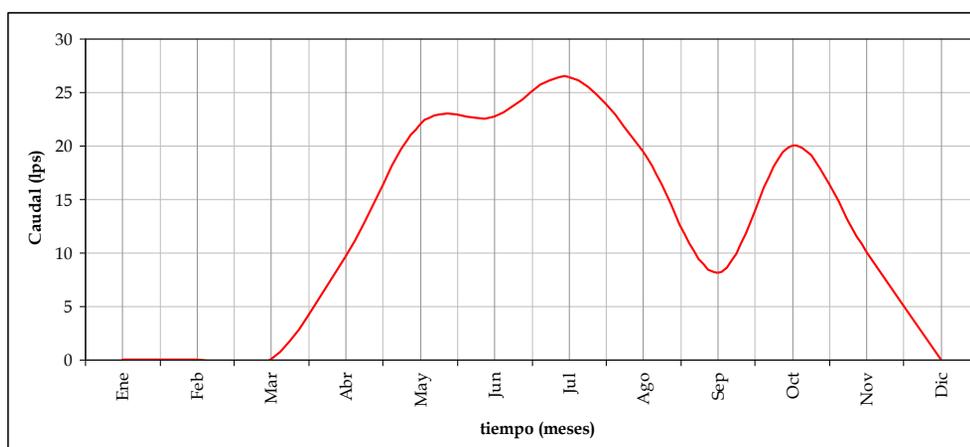
mensuales multianuales de precipitación con los valores medios de evapotranspiración calculados, comparación que se puede apreciar en la gráfica No. 11.

Tabla 32. Balance hídrico para el proyecto del municipio N4

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T (°C)	14.5	14.8	15	14.9	14.4	13.6	12.9	13.1	13.6	14.2	14.7	14.4	14.2
l	5.01	5.17	5.28	5.22	4.96	4.55	4.20	4.30	4.55	4.86	5.12	4.96	58.2
a	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.4
Ei (mm)	57.7	59.4	60.5	59.9	57.1	52.7	49.0	50.0	52.7	56.0	58.8	57.1	
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02	1.0
ETP corr. (mm)	58.9	55.2	62.3	61.1	60.6	54.3	51.9	52.5	53.3	57.7	58.2	58.3	684.4

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	21.6	29.5	61.4	81.9	108.1	103.4	109.0	94.6	70.7	100.9	80.1	44.1	905.4
ETR (mm)	58.9	55.2	62.3	61.1	60.6	54.3	51.9	52.5	53.3	57.7	58.2	58.3	606.3
Déficit (mm)	37.2	25.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	78.1
Recarga (mm)	0.0	0.0	0.0	20.8	47.6	49.1	57.1	42.0	17.5	43.2	21.9	0.0	299.1
P-ETP (mm)	-37.2	-25.7	-0.9	20.8	47.6	49.1	57.1	42.0	17.5	43.2	21.9	-14.2	221.0

Fuente: Autor Estudio Municipio N4



Gráfica 11. Curva de duración de caudales.

Fuente: Estudio Municipio N4

El área aproximada de los manantiales, tomada de acuerdo con la topografía del sector hasta el punto de localización de las bocatomas, es

aproximadamente de 1.20 Km², dato con el cual se puede realizar un estimativo de los caudales potenciales que se pueden presentar en éstas áreas y que abastecen las bocatomas.

4.5 Estudios Hidrológicos Para El Distrito De Riego 1 Municipio N5-Cundinamarca.

4.5.1 Descripción del proyecto.

Este estudio busca calcular los caudales máximos instantáneos y promedios diarios, con el fin de determinar si las fuentes poseen capacidad para suministrar agua a un distrito de riego de aproximadamente 118 Ha.

4.5.2 Información disponible.

Las crecientes para el cálculo de los caudales máximos se estimaron con base en precipitaciones de diseño aplicadas a hidrógrafas unitarias sintéticas, deducidas para las cuencas de interés. Las crecientes y por ende las tormentas de diseño, se estimaron para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

4.5.3 Metodología empleada.

Para la obtención del caudal máximo mediante la modelación del fenómeno lluvia escorrentía, se procedió a estimar el Hidrograma unitario (HU) de cada una de las cuencas a partir de dos hidrogramas sintéticos diferentes, con el fin de confrontar los resultados obtenidos por el método Racional, el cual se explica más adelante. Los hidrogramas utilizados fueron los desarrollados por el U. S. Soil Conservation Service (SCS) y Williams – Hann (W&H).

Para la obtención del caudal mínimo, el autor realiza dos metodologías. En primer lugar basado en la precipitación media y una ecuación de regionalización desarrollada por el mismo, encuentra los valores de caudal medio, luego calcula los

caudales medios para cada década del año. Estos caudales se calculan a partir del caudal medio y la serie de precipitación por década presentada para una excedencia del 75%.

El segundo método utilizado para el cálculo del caudal mínimo se expone en el “Atlas Hidrológico de Colombia” (Universidad Nacional sede Medellín, 2000), en el basado en una relación con el caudal medio. Se calcula el mínimo medio anual, posteriormente se calcula el factor de frecuencia para diferentes periodos de retorno y para distribuciones de probabilidad tipo Gumbel y Log Normal.

4.5.3.1 Información de la cuenca.

Para este estudio el autor tiene en cuenta información de dos cuencas que para efectos del presente proyecto, se denominarán La G y La M.

4.5.3.2 Cálculo del caudal máximo.

Las tormentas de diseño se estimaron a partir de un valor de precipitación máximo puntual o foco deducido a partir del análisis de los polígonos de Thiessen, el cual se redujo para considerar su distribución en el área y se distribuyó en el tiempo con intensidades variables.

La duración de las tormentas de diseño se consideró igual al tiempo de concentración de cada cuenca, debido a que esta duración es la más crítica para la generación de las crecientes y que en este tiempo toda la escorrentía producida en cada cuenca alcanza a sumarse en el punto de interés, por lo que, teóricamente, duraciones mayores no generan un aumento en el caudal pico de la hidrógrafa.

4.5.3.3 Cálculo del tiempo de concentración.

El tiempo de concentración¹² utilizado para la estimación de crecientes, fue calculado como el promedio de los valores obtenidos mediante expresiones

¹² Ver Capítulo 8. Observaciones

propuestas por diferentes autores como Kirpich, Ventura Heras, Giandotti, U.S.C.E, Bransby, y Chow, las cuales son función de los parámetros morfométricos de las cuencas, como son el área, la longitud del cauce principal y la diferencia máxima de altura.

En la tabla No. 33, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes métodos, además de su valor asumido.

Tabla 33. Tiempos de concentración del municipio N5

Cuenca	Tiempos de Concentración (min)							
	FORMULA KIRPICH	FORMULA VENTURA	FORMULA GIANDOTTI	FORMUA U.S.C.E.	FORMULA BRANSBY	FORMULA DE CHOW	PROMEDIO OBTENIDO.	Valor de concentración n adoptado (Promedio)
Qda. G	9	31	26	22	28	24	23	25
Qda. La M	11	38	26	27	36	29	28	30

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

4.5.3.4 Cálculo de la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva corresponde a la precipitación total menos las pérdidas de precipitación por infiltración, retención y evapotranspiración. Para estimar las pérdidas se utilizó el método propuesto por el U. S. Soil Conservation Service, en el cual las pérdidas se calculan a partir de la intensidad de la precipitación y del número de curva, que a su vez es función de la cobertura vegetal, del tipo y uso del suelo, de la impermeabilidad del terreno y su humedad antecedente.

La precipitación efectiva se estimó con base en la precipitación dada para cada periodo de retorno y la abstracción inicial (I_a), asumida como el 20% del almacenamiento potencial (S), según la siguiente ecuación:

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

Ecuación de Abstracción inicial

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

Ecuación de Precipitación efectiva

Dónde:

- Pe: Precipitación efectiva, en mm.
- P: Precipitación media, en mm.
- S: Almacenamiento potencial de la cuenca, en mm.

4.5.3.5 Cálculo del almacenamiento potencial (S).

Posteriormente, con el número de curva ponderado se calculó el almacenamiento potencial (S), que representa el almacenamiento máximo en una cuenca debido a fenómenos de infiltración, y a la detención, intersección y evaporación, los cuales están relacionados con las condiciones de cobertura y tipos de suelo presentes en la cuenca hidrográfica; para este proceso se asumió la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación de Almacenamiento potencial (mm)

Dónde:

- S: Almacenamiento potencial de la cuenca, en mm.
- CN: Número de curva, adimensional.

Las cuencas identificadas para este proyecto pueden clasificarse dentro del grupo de suelos C, dado el predominio de suelos limo arcillosos. Además, la topología de la cuenca, canales de alta pendiente, hace que la infiltración sea baja y no existan zonas de almacenamiento.

Con tales características se definió el número de curva predominante en la cuenca de acuerdo con las salidas de campo realizadas y seleccionando un CN de acuerdo a la categoría identificada. En la tabla No. 34 se presentan los valores de CN para cada tipo de suelo y la ponderación para toda la cuenca, para una condición de humedad antecedente promedia.

Tabla 34. Número de curva (CN) adoptado para el proyecto del municipio N5

USO DEL SUELO	CN AMC II	% ÁREA
Prado (pasto sin pastar y corto para follaje)	71	40
Bosques con cobertura pobre	77	60
PONDERACIÓN	75	100

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

A continuación se presenta la metodología que usó el autor de este estudio, para el cálculo del “número de curva”:

4.5.3.6 Cálculo del “Número de curva” (CN).

El “número de curva” depende del tipo del suelo, del tipo de tratamiento superficial que éste presente, de su condición hidrológica y de su humedad antecedente que puede relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores.

La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos:

AMC-I: Para suelos secos.

AMC-II: Para suelo intermedios.

AMC-III: Para suelos húmedos.

Además se requiere ubicar la zona dentro de un grupo hidrológico del suelo, el cual está definido como el potencial de infiltración después de una lluvia prolongada. El tipo de suelo se clasifica en cuatro categorías hidrológicas,

según el método del SCS. En orden decreciente de permeabilidad las categorías hidrológicas son:

➤ **Grupo de Suelo A.**

- Alta infiltración (baja escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas cubiertos con vegetación (bosque o rastrojo alto) con grado de meteorización 30/50 según Brand (1988) y con discontinuidades en la matriz de suelo producto del proceso de descomposición de la roca. Las estructuras heredadas funcionan como canales de flujo principales. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 7%. También se incluyen los suelos que presentan un efecto geológico marcado por diaclasas y bandeamientos, y cuyo buzamiento se da en ángulos mayores a 60°.

➤ **Grupo de Suelo B.**

- Infiltración moderada (escorrentía moderada). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias poco denudadas con grado de meteorización 0/30 según Brand (1988) y con discontinuidades difícilmente cartografiables en campo. Las estructuras heredadas ya no son tan importantes en la permeabilidad del conjunto, por lo cual la permeabilidad primaria es la que controla el flujo de agua en el suelo. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 10%.

➤ **Grupo de Suelo C.**

- Infiltración baja (escorrentía de moderada a alta). Suelos residuales derivados de cualquier tipo de roca, y cuyo grado de meteorización se clasifique como residuales maduros (SR, Brand – 1988), en los cuales las propiedades y minerales del material parental no son fácilmente identificables. Esta formación tiene como característica principal que está cubierta por pastos manejados y sus pendientes varían entre un 5 y 15%.

➤ **Grupo de Suelo D.**

- Muy poca infiltración (alta escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyo grado de meteorización varía entre 50/90 y en donde la pendiente media excede 15%. El tipo de vegetación en este grupo no es de mayor importancia ya que el fuerte gradiente topográfico impide la recarga de los acuíferos en la zona, generando por el contrario un flujo hipodérmico hasta aflorar nuevamente en superficie y hacer parte del agua que se aporta al canal principal de la cuenca.

Con base en el tipo de suelo hidrológico identificado y las diferentes coberturas de uso del suelo definidas anteriormente, este autor obtuvo un número de curva ponderado para cada uno de los sectores, obteniendo inicialmente un CN determinado para cada uno de los usos identificados, de acuerdo a la clasificación mostrada en la tabla No. 35 y posteriormente definiendo el porcentaje de afectación de cada uno de ellos en el área de estudio.

Tabla 35. Números de curva para diferentes usos del suelo según condiciones de humedad antecedente tipo II para el proyecto del municipio N5

Descripción de usos del suelo	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Zona de parqueo pavimentada, Techada.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentos con bordillos y alcantarillas	98	98	98	98
Afirmado	76	85	89	91
Suelo compactado	72	82	87	89
Cultivos (Cosecha agrícola) del suelo:				
Sin tratamientos de conservación (Sin terrazas)	72	81	88	91
Con tratamientos de conservación (Terrazas, Contornos)	62	71	78	81
Pastos o gama de suelos				
Pobre (< 50% cobertura del suelos por pastos muy continuos)	68	79	86	89
Buena (50-75% Cobertura del suelo por pastos poco continuos)	39	61	74	80
Prado (pasto sin pastar y corto para follaje)	30	58	71	78
Rastrojo (bueno, >75% cobertura de suelo)	30	48	65	73

Descripción de usos del suelo	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Bosques y selvas				
Pobre (árboles pequeños – rastrojo destruido después de quema o rozada)	45	66	77	83
Regular (rozado pero sin quema, algunos rastrojos)	36	60	73	79
Bueno (sin rozado, cobertura de suelo rastrojo)	30	55	70	77
Espacios abiertos (pastos, parques, canchas de golf, cementerios, etc.):				
Regular (cobertura de pastos 50-75% del área)	49	69	79	84
Bueno (cobertura de pastos >75% del área)	39	61	74	80
Zonas comerciales y de negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Zonas industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
Áreas residenciales:				
Lotes de 505 m2, cerca de 65% impermeable	77	85	90	92
Lotes de 1011 m2, cerca de 38% impermeable	61	75	83	87
Lotes de 2023 m2, cerca de 25% impermeable	54	70	80	85
Lotes de 4046 m2, cerca de 20% impermeable	51	68	79	84

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

4.5.3.7 Cálculo del hidrograma unitario.

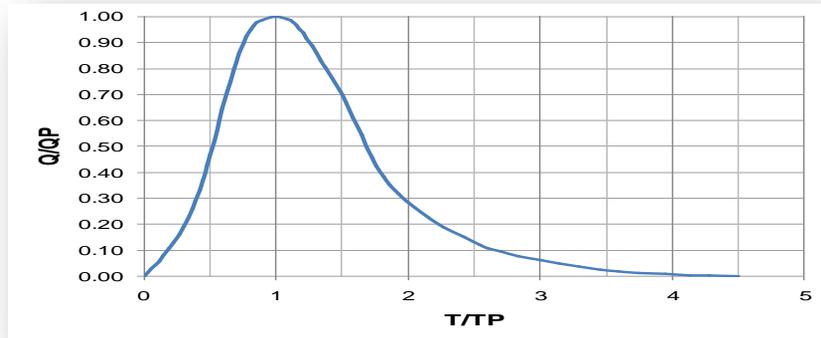
El hidrograma unitario de las cuencas se calculó multiplicando las ordenadas y abscisas del Hidrograma adimensional propuesto por el U.S. S.C.S por el caudal pico y el tiempo al pico de cada cuenca, empleando las ecuaciones para la estimación de parámetros del HU del SCS, las cuales se muestran a continuación:

$$T_p = \frac{D}{2} + Lag$$
$$Q_p = 0.208 \cdot \frac{A}{T_p}$$

Dónde:

- T_p : Tiempo al pico, en horas.
- D : Duración unitaria de la lluvia, en horas.
- Lag : Tiempo de retraso de la cuenca, en horas.
- A : Área de la cuenca, en km^2 .
- Q_p : Caudal pico en $m^3/s/mm$.

En la gráfica No. 12 se puede apreciar el hidrograma unitario propuesto por el U.S.S.C.S.



Gráfica 12- Hidrograma Unitario propuesto por el U.S.S.C.S

Fuente: Estudio Municipio N5

Para el Hidrograma unitario de Williams – Hann el cálculo de las crecientes se realiza aplicando la lluvia de diseño al Hidrograma unitario adimensional propuesto por Williams y Hann, tal como se procede con el método del U. S. Soil Conservation Service, el Hidrograma unitario de la cuenca se obtiene multiplicando las ordenadas y abscisas del Hidrograma adimensional por el caudal pico y el tiempo al pico característico de cada cuenca.

Las expresiones empleadas para calcular estos parámetros del HU de W&H, son las siguientes:

$$T_p = 4.63 \cdot A^{0.422} \cdot SLP^{-0.46} \cdot \frac{L}{W}^{0.133}$$

$$K = 27 \cdot A^{0.231} \cdot SLP^{-0.777} \cdot \frac{L}{W}^{0.124}$$

$$Q_p = \frac{B \cdot A \cdot R}{896.99 \cdot T_p}$$

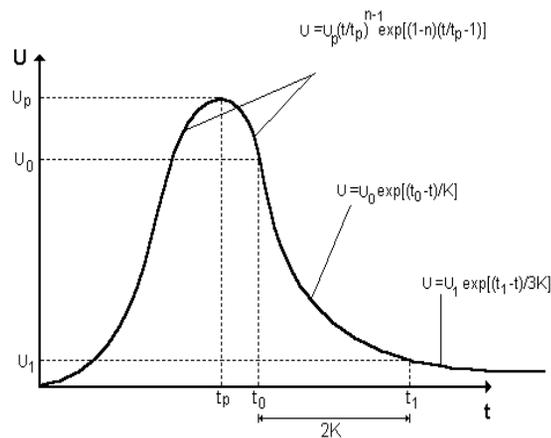
Dónde:

- T_p : Tiempo al pico, en horas.
- A : Área de la cuenca, en km^2 .

- SLP: Relación entre la diferencia de cotas en la cuenca y la longitud del cauce principal, en pie/milla.
- L/W: Relación longitud - ancho de la cuenca, equivalente a la relación entre la longitud al cuadrado y el área (L^2/A).
- Q_p : Caudal máximo del Hidrograma unitario, en m^3/s .
- R: Profundidad unitaria efectiva asociada con la hidrógrafa (1 mm).

El parámetro B empleado para el cálculo del caudal máximo es función de una constante n, la cual depende de la relación entre la constante de recesión (K) y el tiempo al pico (T_p).

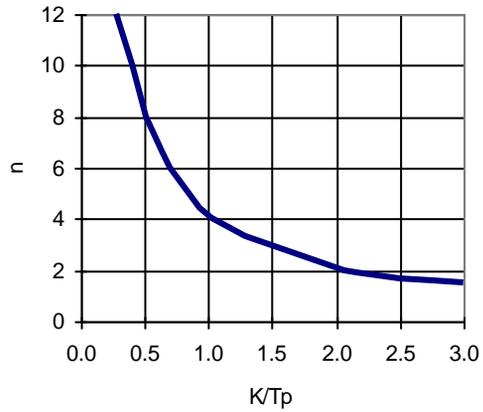
En la gráfica No. 13 se puede apreciar el Hidrograma unitario propuesto por Williams y Hann.



Gráfica 13- Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann.

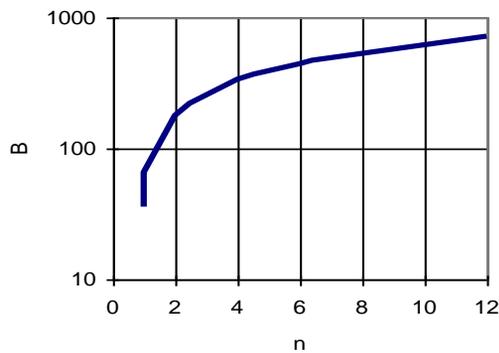
Fuente: Estudio Municipio N5

En las gráficas No. 14 y No. 15 se pueden apreciar las curvas para obtener los valores de n y B en el hidrograma unitario propuesto por Williams y Hann.



Gráfica 14- Valores de n en el Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann.

Fuente: Estudio Municipio N5



Gráfica 15- Valores de B en el Hidrograma Unitario propuesto por Williams y Hann.

Fuente: Estudio Municipio N5

Finalmente, las crecientes de diseño se obtuvieron mediante la convolución entre las tormentas de diseño y el Hidrograma unitario obtenido para cada cuenca. Para llevar a cabo estos cálculos se utilizaron programas desarrollados por la consultoría de este proyecto. Los valores asumidos para las crecientes de diseño se seleccionaron promediando los resultados obtenidos a partir de los hidrogramas unitarios del U. S. Soil Conservation

Service y de Williams – Hann, para cuencas mayores a 3 km² de área, ya que para cuencas de área menor resulta más preciso emplear el método racional.

4.5.3.8 Método Racional.

En el caso de aplicación del método Racional en la estimación de crecientes, las pérdidas son evaluadas a través de la definición de un coeficiente de escorrentía (C) que depende principalmente de parámetros como la permeabilidad del suelo, la pendiente y las características de encharcamiento de la superficie.

Para la aplicación del método racional, el coeficiente de escorrentía (C) fue estimado por este autor de la siguiente manera:

Los coeficientes de escorrentía que se usaron para la estimación de crecientes fueron estimados de acuerdo a los valores propuestos por Ven Te Chow. En la tabla No. 36 se muestran los coeficientes reportados en la literatura técnica y en la tabla No. 37 se muestran los valores asumidos por el autor para el proyecto.

Tabla 36. Coeficientes de escorrentía por el método racional (Vente Chow) para el proyecto del municipio N5

Característica de la superficie		Periodo de retorno (años)						
		2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas								
	Asfáltico	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
	Concreto / techo	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)								
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50 % del área)								
	Plano, 0-2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
	Promedio, 2-7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
	Pendiente, superior a 7%	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75 % del área)								
	Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
	Promedio, 2-7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
	Pendiente, superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75 % del área)								
	Plano, 0-2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49

			Período de retorno (años)						
Característica de la superficie			2	5	10	25	50	100	500
		Promedio, 2-7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
		Pendiente, superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Áreas no desarrolladas									
Área de cultivos									
		Plano, 0-2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
		Promedio, 2-7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
		Pendiente, superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales									
		Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
		Promedio, 2-7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
		Pendiente, superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques									
		Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
		Promedio, 2-7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
		Pendiente, superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Tabla 37. Coeficientes de escorrentía adoptados para el proyecto del municipio N5

Cuenca	Periodo de retorno (años)					
	2,33	5	10	25	50	100
Qda. G	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
Qda. La M	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Con la información presentada anteriormente se encontraron los caudales máximos por las metodologías mencionadas.

En la tabla No. 38 se presentan los caudales máximos por cada uno de los métodos descritos anteriormente y los caudales máximos asumidos de acuerdo al área de la cuenca.

Tabla 38. Caudal máx. (m^3/s) obtenido por los métodos Racional, SCS y W&H para la fuente La G del proyecto del municipio N5

TR (años)	Racional (m^3/s)	SCS (m^3/s)	W&H (m^3/s)	Asumidos (m^3/s)
2,33	8,93	4,91	7,33	8,93
5	11,50	6,74	10,08	11,50
10	13,66	8,39	12,54	13,66
25	17,13	10,65	15,92	17,13
50	19,95	12,44	18,60	19,95
100	22,97	14,30	21,39	22,97

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Tabla 39. Caudales máximos (m³/s) obtenidos por los métodos Racional, SCS y W&H para la quebrada La M del proyecto del municipio N5.

TR (años)	Racional (m ³ /s)	SCS (m ³ /s)	W&H (m ³ /s)	Asumidos (m ³ /s)
2,33	9,07	5,26	8,25	9,07
5	11,70	7,21	11,30	11,70
10	13,89	8,95	14,03	13,89
25	17,42	11,34	17,75	17,42
50	20,29	13,23	20,69	20,29
100	23,35	15,19	23,75	23,35

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

4.5.3.9 Cálculo del caudal medio.

Como análisis preliminar para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico se realizó una estimación del caudal medio a partir del cálculo de caudales con base en valores de rendimientos medios de las cuencas de la región (regionalización).

La regionalización de caudales se basó en las variables de área de drenaje y precipitación y fue desarrollada por este autor para cuencas ubicadas en la región andina colombiana, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Q_{med} = a * A^b * P^c$$

Ecuación para el cálculo del caudal medio por regionalización

Dónde:

- Qmed: Caudal Medio (m³/s).
- A: Área de la cuenca (km²).

– P: Precipitación media de la cuenca (mm/año).

Los coeficientes a, b y c fueron determinados a partir de técnicas de ajuste por regresión usando la transformación logarítmica de las variables hasta lograr el mejor ajuste a los datos de caudal de varias estaciones conocidas:

a: $4,322 \times 10^{-07}$

b: 1,009

c: 1,476

A través de la ecuación de regresión se obtiene el caudal medio multianual asociado a cada una de las subcuencas identificadas para los sitios propuestos de captación.

En la tabla No. 40 se muestran los caudales medios obtenidos para cada una de las fuentes estudiadas:

Tabla 40. Caudal medio para los sitios de captación de fuentes superficiales (m^3/s) del proyecto del municipio N5

Fuente	Área (km ²)	Precipitación (mm)	Q medio	
			(m ³ /s)	(l/s)
Qda. La G	1,44	938	0,02	15,23
Qda. La M	1,64		0,02	17,39

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Luego de estimar el caudal medio de las diferentes fuentes, en la tabla No. 41, se muestran los caudales medios para cada década del año. Estos caudales fueron calculados a partir del caudal medio y la serie de precipitación decadal.

Teniendo la serie diaria de precipitación para las estaciones cercanas y con la ayuda de los polígonos de Thiessen fue posible determinar la precipitación decadal en cada una de las fuentes analizadas. En la siguiente tabla se reportan los valores encontrados.

Tabla 41. Precipitación media decadal (mm) en la zona del proyecto del municipio N5

Mes	Década	Precipitación media	Precipitación 75% de excedencia
Enero	1	22,48	0,05
	2	17,85	2,40
	3	16,69	1,95
Febrero	4	20,78	4,25
	5	30,54	3,48
	6	22,65	4,30
Marzo	7	28,02	4,18
	8	33,69	10,95
	9	41,60	14,10
Abril	10	34,53	9,00
	11	44,23	18,70
	12	43,21	8,60
Mayo	13	31,30	7,03
	14	35,19	6,05
	15	25,84	4,38
Junio	16	16,84	2,58
	17	17,22	5,45
	18	12,03	1,20
Julio	19	10,71	2,08
	20	9,90	1,88
	21	12,56	6,88
Agosto	22	8,33	1,15
	23	9,21	2,00
	24	20,49	3,60
Septiembre	25	15,31	1,23
	26	26,79	1,48
	27	28,73	9,70
Octubre	28	34,80	7,95
	29	46,28	22,50
	30	31,70	13,85
Noviembre	31	44,26	16,65
	32	39,26	12,75
	33	39,89	5,45
Diciembre	34	28,15	9,15
	35	36,75	6,70
	36	14,58	2,38

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Para calcular el caudal decadal medio se utilizó la siguiente expresión:

$$Q_x = Q_m * \frac{P_x}{\bar{P}_x}$$

Dónde:

- Qx: Caudal en la década x
- Qm: Caudal medio anual
- Px: Precipitación media en la década x
- \bar{P}_x : Precipitación decadal promedio.

Ahora para calcular los caudales para una probabilidad de excedencia del 75% de excedencia fue necesario encontrar un caudal medio para dicha probabilidad a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{75} = Q_m * \frac{\bar{P}_{75}}{\bar{P}_{med}}$$

En la tabla No. 42 se muestran los caudales medios para cada década del año para las fuentes analizadas en esta asociación.

Tabla 42. Caudales medios decadales (l/s) del proyecto del municipio N5

Mes	Década	Qda. La G (l/s)	Qda. La M (l/s)
Enero	1	12,94	14,77
	2	10,28	11,73
	3	9,61	10,97
Febrero	4	11,97	13,66
	5	17,58	20,07
	6	13,04	14,89
Marzo	7	16,14	18,42
	8	19,40	22,14
	9	23,95	27,35
Abril	10	19,88	22,70
	11	25,47	29,07
	12	24,88	28,40
Mayo	13	18,03	20,58
	14	20,26	23,13
	15	14,88	16,99
Junio	16	9,69	11,07
	17	9,91	11,32
	18	6,93	7,91

Mes	Década	Qda. La G (l/s)	Qda. La M (l/s)
Julio	19	6,17	7,04
	20	5,70	6,50
	21	7,23	8,26
Agosto	22	4,79	5,47
	23	5,30	6,05
	24	11,80	13,47
Septiembre	25	8,82	10,07
	26	15,43	17,61
	27	16,54	18,89
Octubre	28	20,04	22,88
	29	26,65	30,42
	30	18,25	20,84
Noviembre	31	25,48	29,09
	32	22,60	25,81
	33	22,97	26,22
Diciembre	34	16,21	18,51
	35	21,16	24,16
	36	8,40	9,58

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Con el objeto de cumplir con lo establecido en términos de referencia del contrato que el autor del proyecto suscribió, en la tabla No. 43 se muestran los caudales decadales para una probabilidad de excedencia del 75% para las fuentes analizadas en esta asociación.

Tabla 43. Caudales con probabilidad de excedencia del 75% (l/s) del proyecto del municipio N5

	Década	Qda. La G L/s	Qda. La M
Enero	1	3,21	3,66
	2	2,55	2,91
	3	2,38	2,72
Febrero	4	2,97	3,38
	5	4,36	4,97
	6	3,23	3,69
Marzo	7	4,00	4,56
	8	4,81	5,49
	9	5,94	6,78
Abril	10	4,93	5,62
	11	6,31	7,20
	12	6,16	7,04
Mayo	13	4,47	5,10
	14	5,02	5,73
	15	3,69	4,21
Junio	16	2,40	2,74
	17	2,46	2,80
	18	1,72	1,96
Julio	19	1,53	1,74
	20	1,41	1,61

	Década	Qda. La G L/s	Qda. La M
	21	1,79	2,05
Agosto	22	1,19	1,36
	23	1,31	1,50
	24	2,92	3,34
	25	2,18	2,49
Septiembre	26	3,82	4,36
	27	4,10	4,68
	28	4,97	5,67
Octubre	29	6,60	7,54
	30	4,52	5,16
	31	6,31	7,21
Noviembre	32	5,60	6,39
	33	5,69	6,50
	34	4,02	4,59
Diciembre	35	5,24	5,99
	36	2,08	2,37

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

4.5.3.10 Cálculo del caudal mínimo.

Los caudales mínimos anuales fueron calculados de acuerdo a lo expuesto en el “Atlas Hidrológico de Colombia” (Universidad Nacional sede Medellín, 2000), donde se propone el cálculo del caudal mínimo a partir de factores dependientes de la zona y el caudal medio a largo plazo como se muestra en las ecuaciones siguientes. Dicho factor fue calculado con registros de caudal medio y mínimo (para la media y desviación) a nivel diario en diferentes estaciones en el país.

En la tabla No. 44 se presentan los valores reportados en el estudio y que serán utilizados para la estimación de los caudales mínimos.

$$\overline{Q_{min}} = C_{\mu} * Q_{med}$$

Cálculo de caudal mínimo medio

$$\sigma_{Qmin} = C_{\sigma} * Q_{med}$$

Cálculo de la desviación del caudal medio

Dónde:

- Q_{min} = Caudal mínimo medio
- σ_{min} = Desviación del caudal mínimo
- Q_{med} =Caudal medio a largo plazo

Luego de calcular el caudal mínimo medio y la desviación de dicho caudal, se calculo el factor de frecuencia para diferentes periodos de retorno y para distribuciones de probabilidad tipo Gumbel y Log-Normal. Los factores de frecuencia de estas distribuciones son los que se presentan a continuación:

$$K_{gumbel} = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} * \left[0.5772 + \ln \left(-\ln \left(\frac{1}{Tr} \right) \right) \right]$$

Factor de frecuencia para la distribución Gumbel

$$K_{Lognormal} = \frac{\exp[Z * \sqrt{\ln(1 + CV^2) - 0.5 \ln(1 + CV^2)}] - 1}{CV}$$

Factor de frecuencia para la distribución Log Normal

Dónde:

- Z: Valor de la función de densidad de probabilidad normal estándar asociada a cada periodo de retorno
- CV: Coeficiente de variación
- Tr: Período de retorno

Finalmente se calcula el caudal mínimo para cada periodo de retorno a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{tr} = \overline{Q_{min}} + k * \sigma_{Qmin}$$

4.5.3.11 Cálculo de caudal mínimo para diferentes periodos de retorno.

En la tabla No. 44 se presentan los coeficientes utilizados por cada subregión hidrológica y los caudales mínimos calculados de acuerdo a las distribuciones Gumbel y Log Normal. Los caudales finalmente definidos para la fuente de aprovechamiento corresponden al menor valor entre las dos distribuciones para cada periodo de retorno.

Tabla 44. Coeficientes de media y de desviación del proyecto del municipio N5

REGIÓN	NOMBRE REGIÓN	Coeficiente Media	Coeficiente Desviación
1	GUAJIRA	0,065	0,1
2	BAJO MAGDALENA	0,454	0,122
3	CATATUMBO	0,295	0,11
4	MAGDALENA MEDIO	0,373	0,11
5	NECHÍ	0,39	0,11
6	CAÑON DEL CAUCA	0,349	0,119
7	ATRATO	0,286	0,121
8	PACÍFICO	0,277	0,098
9	VALLE DEL CAUCA	0,256	0,111
10	ALTO MAGDALENA	0,342	0,104
11	SOGAMOSO	0,153	0,074
12	ORINOCO	0,171	0,071
13	AMAZONAS	0,258	0,073
14	SINÚ	0,192	0,083
15	SIERRA NEVADA	0,296	0,132
16	CESAR	0,212	0,067

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

4.5.3.12 Caudales mínimos por regionalización.

En la tabla No. 45 se presentan los caudales mínimos calculados de acuerdo a las distribuciones Gumbel y Log Normal. Los caudales finalmente definidos

para la fuente de aprovechamiento corresponden al menor valor entre las dos distribuciones para cada periodo de retorno.

Tabla 45. Caudales mínimos del proyecto del municipio N5

	Parámetro	Unidad	Qda. La G	Qda. La M
	Q medio	m ³ /s	0,02	0,02
		l/s	15,23	17,39
	Región		4	4
	Media de Q min	l/s	5,68	6,49
	Desviación de Q min	l/s	1,68	1,91
	Qmin (Gumbel)	2,33	l/s	5,15
5		l/s	4,31	4,92
10		l/s	3,84	4,38
25		l/s	3,40	3,88
50		l/s	3,15	3,59
Qmin (LogNormal)	2,33	l/s	5,18	5,91
	5	l/s	4,27	4,88
	10	l/s	3,76	4,30
	25	l/s	3,29	3,75
	50	l/s	3,01	3,44
Qmin asumido	2,33	l/s	5,15	5,88
	5	l/s	4,27	4,88
	10	l/s	3,76	4,30
	25	l/s	3,29	3,75
	50	l/s	3,01	3,44

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Vale la pena mencionar que los caudales mínimos mostrados en la tabla No. 45 son caudales de referencia, y no fueron utilizados para la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico requerida en la realización del balance hídrico y la definición del plan de ingeniería del proyecto. Los caudales definidos para dichos estudios corresponden a los caudales para una probabilidad de excedencia del 75% (el cual es comparable para garantizar una confiabilidad de excedencia de alrededor de 4 años), ya que estos tienen en cuenta la variabilidad anual y se encontró que para las décadas más críticas, la disponibilidad es menor que el valor estimado de caudal mínimo para un periodo de retorno de 5 años por medio de la regionalización, por lo que se considera un resultado conservador y acorde con la calidad de información utilizada.

4.5.3.13 Cálculo del caudal ecológico

Para la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico en las fuentes analizadas, fue necesario tener en cuenta un valor de caudal ecológico, que fue solicitado por el autor de este estudio a la Corporación Autónoma Regional Cundinamarca, CAR. En respuesta, la corporación hace referencia al cálculo del caudal ecológico de acuerdo a lo estipulado en la resolución 0865 de 2004 donde se expresa el caudal ecológico como el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio. Partiendo de lo propuesto en la resolución, el autor de este estudio obtuvo el caudal ecológico para la fuente analizada, resultados que se muestran en la tabla No. 46.

Tabla 46. Caudal ecológico del proyecto del municipio N5

FUENTE	UNIDAD	CAUDAL
Qda. La G	l/s	1,59
Qda. La M	l/s	1,82

Fuente: Autor Estudio Municipio N5

Capítulo 5

Estudio De Hidrología Para La Fuente Instrumentada

5.1 Localización Y Selección De Una Fuente Para El Estudio

Con el fin de realizar la comparación de las metodologías usadas por los diferentes autores, las cuales fueron descritas ampliamente en el numeral 5 del presente trabajo de grado, a continuación se hará la descripción del criterio para la determinación de la estación tanto pluviométrica como climatológica, empleadas para el desarrollo del presente proyecto de grado.

5.2 Selección De La Estación Pluviométrica

Como se mencionó en el numeral 4.2 del presente documento, de la información obtenida en Corporación autónoma regional de Cundinamarca CAR-Cundinamarca, de las estaciones investigadas y analizadas para este proyecto, se seleccionó la estación Santa Marta, la cual se ubica en la cuenca del embalse del SISGA y corresponde con la fuente instrumentada denominada quebrada Granadillo localizada en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1.049.837.502280 ESTE: 1.041.638.674980. Como se mencionó anteriormente, esta estación cuenta con registros de caudales diarios multianuales con una serie de 22 años de registros desde el año 1991 hasta el año 2014.

La ubicación de esta estación se puede observar en la figura No. 1:

5.2.1 Series de datos de la estación pluviométrica.

Esta fuente posee registros de caudales medios diarios desde el año 1991 hasta el año 2014, los cuales se presentan en el anexo No. 1 del presente documento.

También cuenta con series de datos de caudales medios mensuales desde el año 1991 hasta el año 2014, los cuales se presentan en el anexo No. 2 del presente documento.

5.3 Selección De La Estación Climatológica

Para la selección de la estación pluviométrica con la cual se modelarán los caudales en el sitio escogido, se tuvo en cuenta la cercanía al sitio de modelación y la escasa diferencia de alturas entre los dos sitios escogidos. La estación pluviométrica escogida se denomina SILOS, cuya ubicación se puede observar en la figura No. 2:



Figura 2. Ubicación de la estación Silos

Fuente: Google Earth

5.3.1 Series de datos de la estación climatológica.

Esta estación posee registros diarios de evaporación (mm) desde el año 1976 hasta el año 1993 y desde el año 1996 hasta el año 2013, los cuales se presentan en el anexo No. 3 del presente documento.

También cuenta con series de datos de registros diarios de precipitación (mm) desde el año 1974 hasta el año 1979 y desde el año 1980 hasta el año 2013, los cuales se presentan en el anexo No. 4 del presente documento.

Así mismo, esta estación cuenta con series de datos de registros medios, máximos y mínimos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) desde el año 1974 hasta el año 2013, los cuales se presentan en el anexo No. 5 del presente documento.

Capítulo 6

Caracterización de la cuenca de la fuente seleccionada

Como se mencionó en el Capítulo 3 del presente documento, la estación seleccionada se ubica en la cuenca del embalse del SISGA y corresponde con la fuente instrumentada denominada quebrada Granadillo localizada en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca con coordenadas: NORTE: 1.049.837.502280 ESTE: 1.041.638.674980. Esta quebrada es un afluente del embalse, la cual cuenta con varias estaciones hidrométricas a lo largo de su cauce.

6.1 Estimación de las características morfológicas de la cuenca

6.1.1 Cálculo del área de la cuenca

Para el desarrollo de las metodologías descritas ampliamente en el capítulo 5 del presente documento, se deben calcular las características morfológicas de la cuenca de la fuente seleccionada. En la figura No. 3 se aprecia la delimitación de la cuenca de la fuente escogida para el desarrollo del presente trabajo.

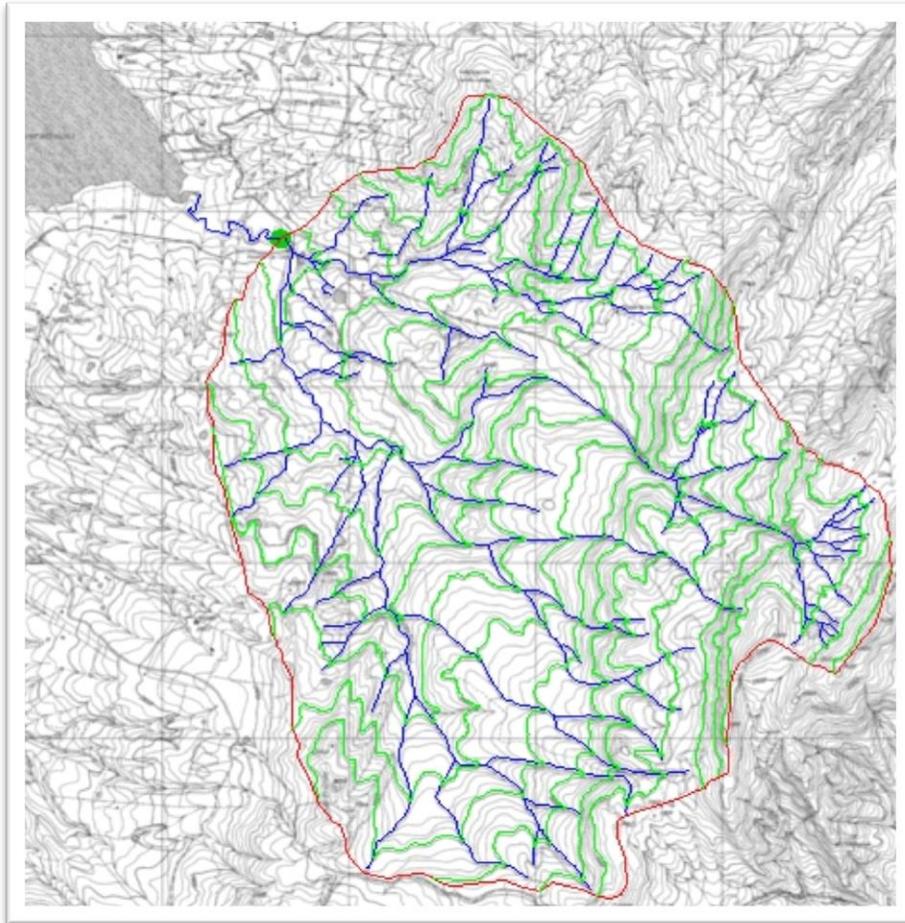


Figura 3. Delimitación de la cuenca quebrada Granadillo.

Fuente: Autoría propia

Para el cálculo del área de la cuenca, se procedió a la localización de la hoya hidrográfica de la quebrada Granadillo y sobre un mosaico georeferenciado elaborado con las planchas IGAG 209-IV-A-4, 209-IV-C-2, 209-IV-C-3 y 209-IV-C-4 que se obtuvieron del IGAC, se determinó el área de la hoya hidrográfica, dando como resultado un valor de 10.748.572,71 m².

En la figura No. 4 se aprecia la ubicación de la cuenca en estudio.

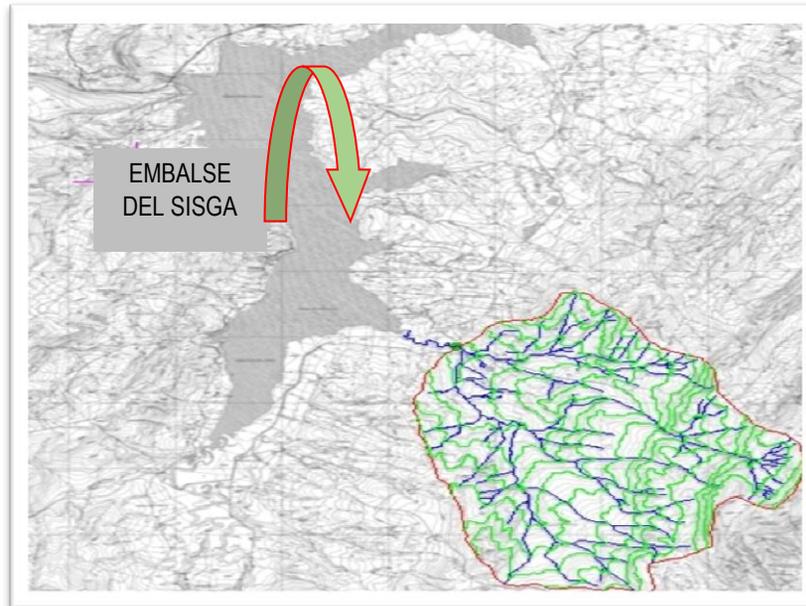


Figura 4. Ubicación del área de la cuenca quebrada Granadillo

Fuente: Autoría propia

6.1.2 Cálculo de la longitud del cauce principal

Para el cálculo de la longitud del cauce principal, se procedió a la localización de la hoya hidrográfica de la quebrada Granadillo y sobre un mosaico georeferenciado elaborado con las planchas IGAG 209-IV-A-4, 209-IV-C-2, 209-IV-C-3 y 209-IV-C-4 que se obtuvieron del IGAC, se trazó el recorrido de la fuente, dando como resultado una longitud de cauce de la corriente de 5.182,43 m.

En la figura No. 5 se muestra el recorrido de la quebrada Granadillo dentro de la cuenca delimitada.

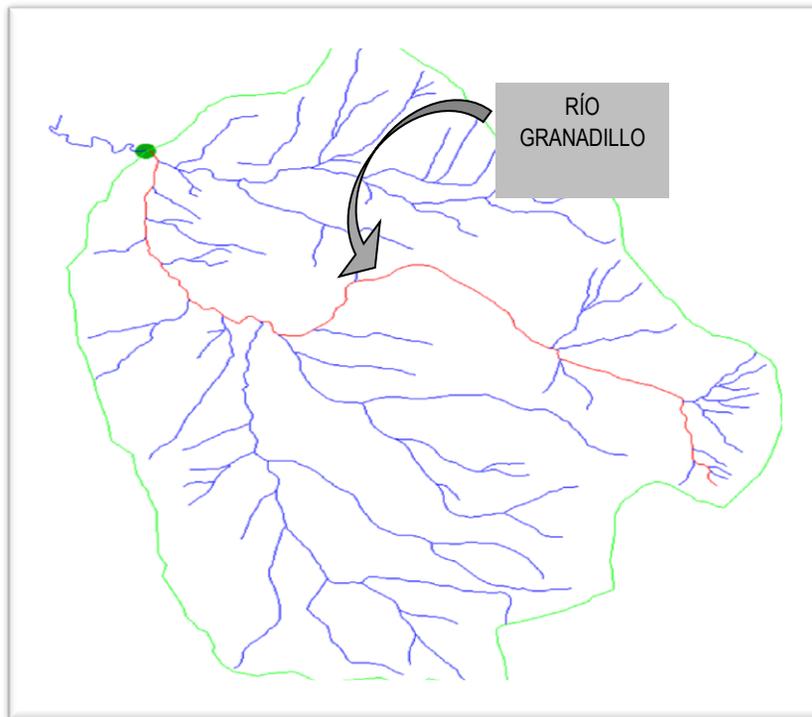


Figura 5. Longitud del cauce principal.

Fuente: Autoría propia

6.1.3 Cálculo de las pendientes del cauce

A partir de la información obtenida en el IGAC, se pudieron establecer las cotas del cauce principal, las cuales son:

- Cota inicial: 3.350 m.s.n.m
- Cota Final: 2.700 m.s.n.m

6.1.3.1 *Pendientes de la corriente principal.*

A partir de la información cartográfica se calcularon dos pendientes de la corriente. La pendiente media hallada como la diferencia total de elevación del lecho del río dividido por su longitud entre los puntos y la pendiente media ponderada que se identifica como la pendiente de la línea que determina que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados es igual a la

comprendida entre la curva del perfil de la quebrada y dichos ejes. La figura No. 6 muestra las pendientes calculadas del cauce principal.

- Pendiente media: 12,83%
- Pendiente media ponderada: 8,28%

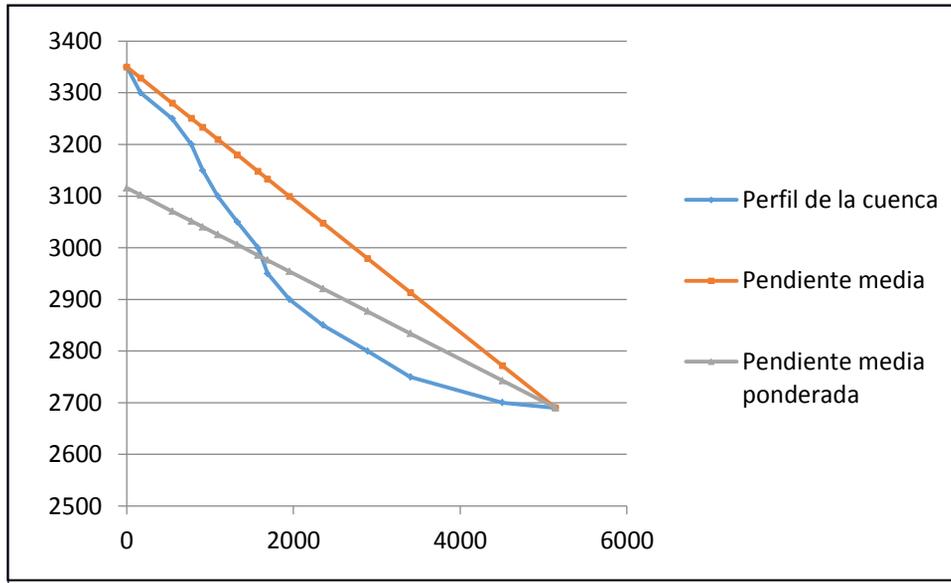


Figura 6. Pendientes del cauce principal-quebrada Granadillo.

Fuente: Autoría propia.

6.1.3.2 *Pendiente ponderada de la hoya.*

La pendiente ponderada de la hoya hidrográfica se calcula a partir de las curvas de nivel mediante la fórmula:

$$S = \frac{D \sum l_i}{A}$$

Dónde:

- S=Pendiente ponderada de la toda la hoya hidrográfica adimensional.
- D = Diferencia de las cotas promedio entre las curvas de nivel interpoladas (0.05 Km).

- $\sum.l_i$ = Sumatoria de la longitud de las curvas de nivel "i" dentro del área de drenaje de la hoya hidrográfica. (75,5 Km)
- A = Área total de drenaje = 10,75 Km²

La pendiente ponderada de la hoya hidrográfica es de 0,35.

6.1.3.3 Estimación de la evapotranspiración en el área de la cuenca.

Un fenómeno que caracteriza a cualquier cuenca estudiada es el de la evapotranspiración. Su cálculo es de interés, para conocer las pérdidas de agua en las corrientes, canales, embalses, así como la cantidad de agua que debe ser adicionada para la irrigación. Para el cálculo de caudales por medio de balance hídrico el valor de la evapotranspiración es de alta importancia.

Para calcular la evapotranspiración se emplean gran cantidad de métodos, siendo los principales el método aerodinámico, el del balance energético, el método de Penman, el de Thornthwaite y el método de Blaney y Criddle.

Para el presente trabajo se realizaron los cálculos de la evapotranspiración mediante los métodos utilizados por cada uno de los autores de los estudios analizados.

6.1.3.3.1 Cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite.

Es este, uno de los métodos más utilizados debido a la simplicidad de su cálculo y el fácil acceso a los datos requeridos.

Para un mes de 30 días e insolación diaria de 12 horas se tiene:

$$E_j = \left(\frac{10t_j}{I} \right)^a * 1.6$$

Dónde:

- E_j = Evapotranspiración potencial mensual del mes j, no ajustada. (cm)
- T_j = Temperatura media mensual del mes j, °C
- $a = 0,675 \cdot 10^{-6} I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I + 0,49$
- I = Índice de calor.

$$I = \sum_{i=1}^{12} ij \quad \text{donde} \quad ij = \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1.514}$$

El valor así hallado debe ser ajustado a la longitud del día y al número de días en el mes, ajuste que se realiza multiplicando el valor de E_j por un factor de corrección que depende de la latitud y el mes. En la tabla No. 47 se muestran los resultados de la evapotranspiración mensual.

Tabla 47. Valores de evapotranspiración de la cuenca en estudio

	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	$I = \sum ij$	a
Temperatura media °C	12	12,5	12,7	12,8	12,6	11,8	11,3	11,6	11,8	12,4	12,7	12,2		
ij	3,76	4	4,1	4,15	4,05	3,67	3,44	3,58	3,67	3,96	4,1	3,86	46,34	1,22
E_j (cm)	5,12	5,38	5,49	5,54	5,43	5,01	4,76	4,91	5,01	5,33	5,49	5,22		
F. corrección	1,0195	0,9295	1,03	1,0202	1,0605	1,0305	1,0605	1,0505	1,0102	1,0298	0,9898	1,0193		
E_j corregido (cm)	5,22	5	5,65	5,65	5,76	5,17	5,04	5,16	5,07	5,49	5,43	5,32		
Sumatoria													46,34	1,22

Fuente: Autoría propia

Capítulo 7

Caracterización De La Cuenca De La Fuente Seleccionada

7.1 Desarrollo de las metodologías

7.1.1 Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N1 en Cundinamarca.

Debido a que el método empleado en el estudio del municipio N1 contempla la elaboración de distintas curvas de regionalización, dada la complejidad para la elaboración de las curvas regionalizadas, consecución de información cartográfica, pluviométrica y climatológica para la regionalización objeto del presente estudio, esta metodología no será desarrollada.

7.1.2 Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N2 en Cundinamarca.

7.1.2.1 *Cálculo del caudal mínimo.*

Para establecer el año de precipitaciones promedio, con base en las precipitaciones totales anuales multianuales, se establece que el promedio de lluvias totales anuales es de 980,9 mm, por lo que el año con lluvias más cercanas a este promedio es 1.996 con 982,9 mm de lluvia caídos al año.

La tabla No. 48 muestra para los años con registros más completos, el valor total de lluvia caída resaltando el año que posee el valor más cercano al promedio anual.

Tabla 48. Valores totales de lluvia anual del municipio N2

AÑO	LLUVIA TOTAL	AÑO	LLUVIA TOTAL
	mm		mm
1977	818,5	1996	982,9
1980	970,3	1997	907,7
1981	858,9	1998	729
1982	1065,8	1999	528,3
1983	889,9	2002	1250,5
1984	863,1	2005	990,4
1985	1035,5	2006	1114,6
1986	1140,7	2007	835,5
1987	888,2	2008	1081
1989	897,4	2009	991,7
1990	956,4	2010	1033,8
1991	972,8	2011	1443,6
1992	813,5	2012	1295,4
		2013	1128,8

Promedio anual 980,90 mm

Fuente: Autoría propia

7.1.2.2 Cálculo del número de curva CN.

Para hallar los caudales medios, se emplea el método de SCS, para lo cual se estima el número de curva para una condición de humedad antecedente promedio, AMC II. La tabla No. 49, muestra este número de curva para distintas condiciones de suelo.

Tabla 49. Determinación del número de curva AMCII del municipio N2

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R + CR	Pobre	71	80	87	90

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
	R + CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82
	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	Buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	R + CR	Pobre	64	75	83	86
	R + CR	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
	C + CR	Buena	60	72	80	83
	C + T	Pobre	61	72	79	82
	C + T	Buena	59	70	78	81
	C + T + CR	Pobre	60	71	78	81
	C + T + CR	Buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	Pobre	66	77	85	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C + T	Pobre	63	73	80	83
	C + T	Buena	51	67	76	80
Pastizales o pastos naturales	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
Pastizales	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobres	48	67	77	83
	-	Regulares	35	56	70	77
	-	Buenas	≤30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Pobres	57	73	82	86
	-	Regulares	43	65	76	82
	-	Buenas	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques	-	I Muy pobre	56	75	86	91

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos con firme	-	-	74	84	90	92

Fuente: Literatura especializada

7.1.2.3 Tipo de vegetación.

Para hallar el tipo de vegetación existente en el área de la cuenca se investigaron fotos recientes del sitio en Google Maps. Sin embargo el sector en el que se encuentra comprendida la cuenca objeto de este estudio, aparece muy pobremente definido en esta herramienta. Debido a esto, se investigó información utilizando fotografías aéreas tomadas de los archivos del IGAG, que fueron interpretadas para el desarrollo del presente proyecto, por un ingeniero agrícola de amplia experiencia en este tipo de trabajos. Las fotos utilizadas se encuentran en el anexo No. 1 y los resultados de este estudio se muestran en las figuras No. 7 y No 8.

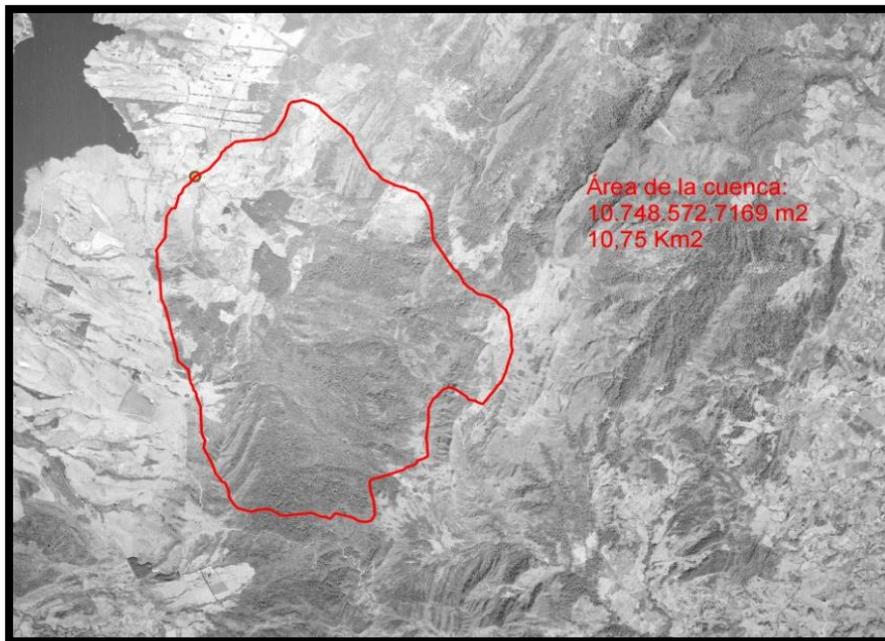


Figura 7. Foto aérea georeferenciada para la estimación de la Cobertura vegetal.

Fuente: Autoría propia

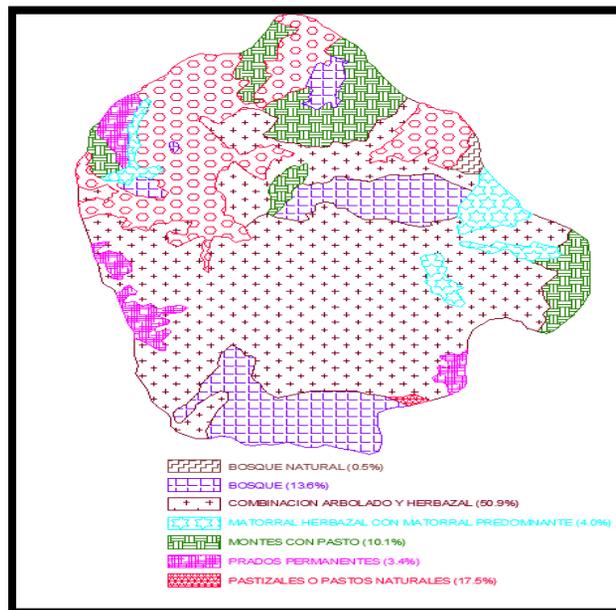


Figura 8. Cobertura vegetal existente en el área de la cuenca de la quebrada Granadillo.

Fuente: Autoría propia

7.1.2.4 Determinación de la condición hidrológica.

Para determinar la condición hidrológica se siguieron los criterios expuestos en el artículo "Pequeña guía de uso del modelo MODIPE", (A. Martínez de Azagra, J. Monguil y J. del río, 2.003). En esta guía se hace una descripción de los tipos de cobertura, la cual se muestra a continuación:

Bosques: la versión de la tabla del número de curva recogida por Ponce (1.989) y adaptada al español por Martínez de Azagra (1.996), establece cinco clases hidrológicas para los bosques, desde muy pobre hasta muy buena. Estas clases se basan en la consideración de la profundidad y el grado de consolidación de las capas de mantillo del bosque, de modo que cuanto mayor sea el espesor de dichas capas y menos compactas e impermeables aparezcan tanto mejor será la condición hidrológica resultante para la infiltración. Para el presente estudio, se determinó la clase hidrológica mediante un monograma creado por Morey (1.995), el cual se puede apreciar en la figura No. 9.

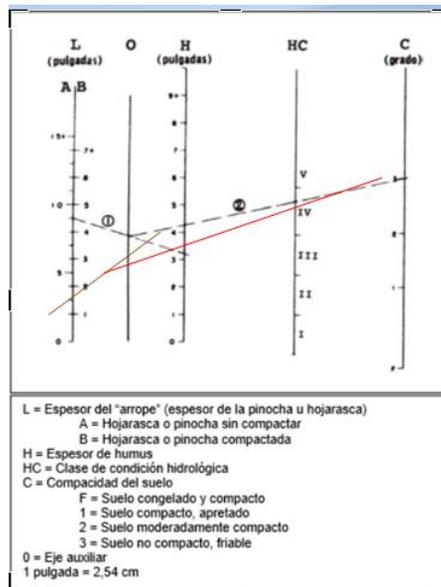


Figura 9. Determinación de la clase hidrológica Granadillo.

Fuente: Autoría propia

Es característico de estos bosques de zonas de altura que su hojarasca no sea compacta ni de gran espesor, aproximadamente 2 pulgadas, se adopta en promedio de altura del humos 4 pulgadas y suelos no compactos, utilizando estos supuestos la línea roja nos marca la clase de condición hidrológica en la zona de bosques.

Respecto a la condición hidrológica de un terreno agrícola, hay que decir que se basa en una combinación de factores que afectan la infiltración y a la escorrentía superficial.

Estos factores son:

- ❖ Densidad y fracción de cabida cubierta de la vegetación.
- ❖ Grado de la cubierta vegetal a lo largo del año.
- ❖ Numero de cultivos de leguminosas y otras prateras en la rotación.
- ❖ Porcentaje de residuos vegetales cubriendo la superficie del suelo.
- ❖ Grado de rugosidad superficial.

La condición hidrológica es pobre si los factores antes descritos dificultan la infiltración y facilitan la escorrentía superficial; y es buena en la situación contraria.

Para el caso de la cuenca del presente estudio, no se evidenciaron zonas de cultivo por lo que esta característica no aplica.

Para los pastizales y pastos naturales se clasifican tres grupos (pobres, regulares y buenos) teniendo en cuenta condiciones hidrológicas y no la producción de forraje. Se consideran pobres los que soportan una alta carga ganadera por lo que tienen escasa materia orgánica sobre el terreno; también aquellos en los que las plantas cubren menos del 50% de la superficie total. Los regulares son los que tienen una cubierta vegetal que alcanza entre el 50% y un 75% de la superficie del terreno y son moderadamente pastados. Y,

finalmente los buenos son aquellos cuya cubierta vegetal supera el 75% de la superficie del terreno y son ligeramente pastados.

Los pastos permanentes son formaciones no pastadas. Su vegetación es permanente, cubriendo el 100% de la superficie del terreno.

Dentro del grupo de matorral – herbazal, siendo el matorral preponderante se hacen tres subdivisiones en función de la superficie cubierta. Así, se distingue entre pobre (si la cubierta del suelo es inferior al 50%), regular (del 50% al 75% de la cubierta vegetal) y buena (si hay una cubierta vegetal superior al 75%).

Para montes con pasto se establecen también tres clases basadas en los factores hidrológicos y no de producción. De esta manera, se consideran pobres cuando se dan labores al terreno o cuando son abundantemente pastados o incluso quemados, de modo que el monte está sin arbustos, matas, pastos y restos vegetales. Se consideran regulares cuando son pastados pero nunca labrados o quemados, de manera que la superficie del terreno presenta pastos y mantillo. Por último son buenos aquellos en que, protegidos del pastoreo, el terreno aparece cubierto de matas abundantes, pastos naturales y restos orgánicos de toda clase.

Los números de curva indicados en la tabla para la combinación arbolada – herbazal se refieren a un 50% de la cubierta proporcionada por el arbolado y un 50% por el herbazal. Para otros porcentajes hay que ponderar entre los valores que se ofrecen en los epígrafes de “pastizales” y “montes con pastos”.

Para conocer el tipo de suelos la guía ofrece metodologías basadas en ensayos de campo para determinar la tasa de infiltración, la conductividad hidráulica o la clasificación contextual del suelo, con estos datos es posible mediante la utilización de gráficas determinar el grupo de suelos.

El IGAG en Colombia, realizó el “ESTUDIO GENERAL DE SUELOS Y ZONIFICACION DE TIERRAS DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA” donde se describe el tipo de suelos encontrado para el área de la cuenca estudiada.

La figura No. 10 se muestra sobre el área de la cuenca en estudio, los diferentes tipos de suelos demarcados por el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca – tomo II, Bogotá D.C. 2000:

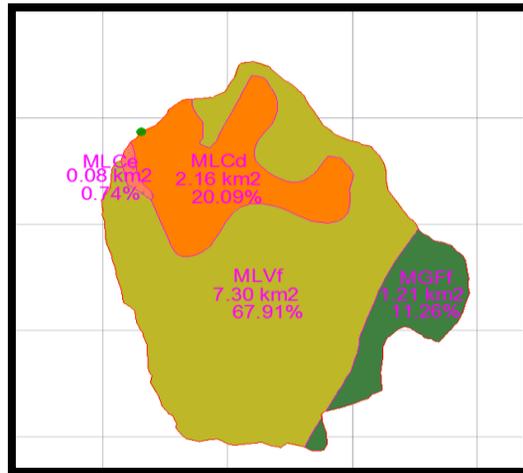


Figura 10. Tipos de suelos de la cuenca en estudio.

Fuente: Autoría propia

A continuación se presenta la descripción de cada suelo encontrado dentro de la cuenca objeto del presente estudio:

MGFF (Pg 205): Esta unidad cartográfica se distribuye en su mayoría en los municipios de Usme, Sibaté y Villapinzón. Estos suelos se encuentran en alturas entre 3.000 y 3.600 msnm, en clima ambiental muy frío y muy húmedo con precipitación promedio anual entre 1.000 y 2.000 mm y temperatura entre 8 y 12° C.

Ocupan el tipo de relieve denominado “crestones”, que corresponde a una geo forma de tipo estructural formada como consecuencia de la degradación parcial de estratos sedimentarios moderadamente plegados, que se caracterizan por una ladera estructural, generalmente más larga que el escarpe, con buzamientos que varía entre 25 - 50% aproximadamente.

Los suelos de esta unidad han evolucionado a partir de rocas clásticas limo-arcillosas y arenosas, y son bien a excesivamente bien drenados. Profundos a superficiales limitados por contacto con material rocoso coherente y de grupo textural fino a moderadamente grueso.

Los suelos de esta unidad cartográfica tienen baja aptitud agrícola, se deben destinar a la conservación de flora y fauna existentes y la protección del recurso hídrico.

MLCd y MLCe (Pg 233): Los suelos de esta unidad cartográfica se localizan en los municipios de Guasca, Villa pinzón, Anolaima, Chocontá, Cogua y Gachancipá. En las alturas entre 2.000 y 3.000 msnm, caracterizados por clima ambiental frío y húmedo, temperaturas entre 12 y 18°C y precipitación promedio anual que varía entre 1.000 y 2.000 mm.

Ocupan la posición de lomas dentro del paisaje de montaña; el relieve es ligera a fuertemente quebrado, con laderas medias y largas, ligeramente convexas y cimas estrechas y redondeadas.

Estos suelos se han desarrollado a partir de rocas clásticas arenosas, limo-arcillosas y mantos de espesor variable de ceniza volcánica; son bien drenados, de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, profundos a superficiales.

MLVf (Pg 209): Esta asociación se localiza en un amplio sector del departamento en jurisdicción de los municipios de Albán, La Vaga, Bojacá, La calera, Usme, Chipaque, Zipacón, Sibaté, entre otros. Se encuentran en alturas entre 2.000 y 3.000 msnm, en un clima ambiental frío y húmedo, con temperaturas entre 12 y 18°C y precipitación promedio anual entre 1.000 y 2.000 mm.

Geomorfológicamente estos suelos se ubican en crestones de relieve que varía de moderadamente quebrado a moderadamente escarpado con pendientes 12-75%, algunos de los suelos de la unidad están afectados por erosión moderada.

Los suelos se han desarrollado a partir de rocas clásticas limo-arcillosas, químicas carbonatadas y depósitos de espesor variable de ceniza volcánica; son profundos a superficiales limitados por contacto con el manto rocoso, bien a moderadamente bien drenados y de texturas finas a moderadamente gruesas.

Las características comunes del tipo de suelos encontrados nos permiten calificarlos en el grupo C: Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables.

7.1.2.5 Forma de explotación.

Esta característica es de importancia cuando se da explotación agrícola al interior del área del estudio. Debido a que la cuenca analizada no presenta ningún tipo de explotación, la tabla de asignación del número de curva permite prescindir de este dato.

7.1.2.6 Cálculo del “número de curva” ponderado.

De acuerdo a los estudios de cobertura y tipo de suelos, utilizando el modelo propuesto en la tabla 47, se halla el “número de curva” ponderado para la totalidad de la cuenca. En la tabla No. 50 se ilustra el procedimiento para hallar el n ponderado de la cuenca.

Tabla 50. Cálculo del n ponderado para la cuenca escogida

% Cobertura	Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición hidrológica	Tipo de suelo	n	n ponderado
17,5	Pastizales o pastos naturales	C	Buena	C	74	12,95
3,4	pastos permanentes			C	71	2,414
4	matorral herbazal siendo el matorral predominante		Buena	C	70	2,8
10,1	montes con pasto		Buena	C	70	7,07
14,1	bosques		IV Buena	C	63	8,883
50,9	combinación arbolada - herbazal		Buena	C	72	36,648
100						70,765

Fuente: Autoría propia

7.1.2.7 Cálculo de la evapotranspiración.

El siguiente paso en el desarrollo del método usado para en proyecto del municipio No. 1, consiste en hallar la evapotranspiración potencial, que para el presente estudio fue calculada en el numeral 7.2, por lo que solamente se presenta el valor hallado, el cual se muestra en la tabla No.51.

Tabla 51. Valores de la evapotranspiración potencial

	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
Ej corregido(cm)	5,22	5,00	5,65	5,65	5,76	5,17	5,04	5,16	5,07	5,49	5,43	5,32

Fuente: Autoría propia

7.1.2.8 Cálculo de la precipitación neta.

Para el cálculo de la precipitación neta se utiliza en método del SCS, el cual se basa en las siguientes hipótesis:

La precipitación comienza a producir escorrentía directa cuando la precipitación total caída hasta ese momento supera un umbral inicial o abstracción inicial. Se considera que ese umbral inicial es del 20% de la abstracción máxima posible (S).

Se puede establecer la siguiente proporción:

$$\frac{\text{Abstracción producida}}{\text{Abstracción máxima}} = \frac{\text{Precipitación neta}}{\text{Precipitación neta máxima}}$$

El valor de la abstracción máxima S en milímetros en función del número de curva (CN), se despeja de la ecuación:

$$CN = \frac{25400}{254 + S}$$

La precipitación neta se calcula mediante la fórmula:

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

Si la precipitación es menor que la abstracción inicial ($0,2 \cdot S$) la precipitación neta es 0, en caso contrario la precipitación neta será la calculada.

El valor de S para la cuenca estudiada, con un CN calculado de 70,76, es de 104.96 mm, por lo que la abstracción inicial es 20.99 mm.

7.1.2.9 **Cálculo del almacenamiento máximo de agua.**

Para determinar el almacenamiento máximo de agua en el suelo, se ha tomado como guía las tablas publicadas Ing. Jesús Antonio Jaime Piñas Director de la EAP-AGRONOMÍA de la Universidad Nacional de Huancavelica (Perú). En la tabla No. 52 se muestra el valor del almacenamiento del suelo de acuerdo con la textura del suelo:

Tabla 52. Capacidad máxima de retención de agua según tipo de suelos

TEXTURA DEL SUELO	ALMACENAMIENTO DEL SUELO Sa.
Arcilla Pesada.	180 mm /m
Arcilla Limosa.	190 mm /m
Franco.	200 mm /m.
Franco Limoso.	250 mm /m
Franco Arcillo Limoso.	160 mm /m
Finos.	200 mm /m.
Franco Arcillo Arenoso.	140 mm /m
Franco Arenoso.	130 mm /m
Arcilla Fina Franca	140 mm /m.
Medios.	140 mm /m
Gruesos.	60 mm /m

Fuente: Ing. Jesús Antonio Jaime Piñas

Con fines prácticos el autor recomienda los valores aproximados de reserva del suelo, mostrados en la siguiente tabla No.53:

Tabla 53. Valores de almacenamiento de suelo Vs. Textura del suelo

TEXTURA DEL SUELO	ALMACENAMIENTO DEL SUELO Sa.
Pesados (suelos arcillosos)	165 a 210 mm /m
Medios (suelos francos)	125 a 165 mm /m
Livianos (suelos Arenosos)	85 a 125 mm /m.

Fuente: Ing. Jesús Antonio Jaime Piñas

Dado que las características del suelo de la cuenca en estudio, lo ubican entre franco y arcilloso, se adopta como valor máximo de retención de agua 165 mm/m que con un espesor de 0,60 m se calcula para el área de la cuenca, un valor de 99 mm.

7.1.2.10 Cálculo de caudales medios diarios.

Con los datos anteriores se elaboran las tablas que se muestran a continuación, para el cálculo de los caudales medios diarios del año promedio seleccionado, por cada mes. A continuación se presenta la tabla No. 54 para el mes de enero:

Tabla 54. Cálculo de caudales medios diarios-enero

MES DE ENERO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	0,00	0,00	0,00	1,68	65,58	63,90	63,90	0,00	0,74	0,74	0,0921
2	0,00	0,00	0,00	1,68	63,90	62,21	62,21	0,00	0,73	0,73	0,0911
3	0,00	0,00	0,00	1,68	62,21	60,53	60,53	0,00	0,73	0,73	0,0902
4	0,00	0,00	0,00	1,68	60,53	58,85	58,85	0,00	0,72	0,72	0,0893
5	0,00	0,00	0,00	1,68	58,85	57,16	57,16	0,00	0,71	0,71	0,0884
6	0,00	0,00	0,00	1,68	57,16	55,48	55,48	0,00	0,70	0,70	0,0875
7	0,00	0,00	0,00	1,68	55,48	53,80	53,80	0,00	0,70	0,70	0,0867
8	0,00	0,00	0,00	1,68	53,80	52,11	52,11	0,00	0,69	0,69	0,0858
9	0,00	0,00	0,00					0,00			

MES DE ENERO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentia subterránea (mm)	Escurrentia total (mm)	Caudal (m ³ /s)
				1,68	52,11	50,43	50,43		0,68	0,68	0,0849
10	0,00	0,00	0,00	1,68	50,43	48,75	48,75	0,00	0,68	0,68	0,0841
11	0,00	0,00	0,00	1,68	48,75	47,06	47,06	0,00	0,67	0,67	0,0833
12	0,00	0,00	0,00	1,68	47,06	45,38	45,38	0,00	0,66	0,66	0,0824
13	2,40	0,00	2,40	1,68	45,38	46,10	46,10	0,00	0,66	0,66	0,0816
14	0,00	0,00	0,00	1,68	46,10	44,42	44,42	0,00	0,65	0,65	0,0808
15	0,00	0,00	0,00	1,68	44,42	42,73	42,73	0,00	0,64	0,64	0,0800
16	12,90	0,00	12,90	1,68	42,73	53,95	53,95	0,00	0,64	0,64	0,0792
17	0,00	0,00	0,00	1,68	53,95	52,27	52,27	0,00	0,63	0,63	0,0784
18	0,00	0,00	0,00	1,68	52,27	50,58	50,58	0,00	0,62	0,62	0,0776
19	0,00	0,00	0,00	1,68	50,58	48,90	48,90	0,00	0,62	0,62	0,0768
20	3,10	0,00	3,10	1,68	48,90	50,32	50,32	0,00	0,61	0,61	0,0761
21	2,60	0,00	2,60	1,68	50,32	51,23	51,23	0,00	0,61	0,61	0,0753
22	6,60	0,00	6,60	1,68	51,23	56,15	56,15	0,00	0,60	0,60	0,0745
23	1,70	0,00	1,70	1,68	56,15	56,17	56,17	0,00	0,59	0,59	0,0738
24	0,00	0,00	0,00	1,68	56,17	54,48	54,48	0,00	0,59	0,59	0,0731
25	0,00	0,00	0,00	1,68	54,48	52,80	52,80	0,00	0,58	0,58	0,0723
26	0,00	0,00	0,00	1,68	52,80	51,12	51,12	0,00	0,58	0,58	0,0716
27	0,00	0,00	0,00	1,68	51,12	49,43	49,43	0,00	0,57	0,57	0,0709
28	0,00	0,00	0,00	1,68	49,43	47,75	47,75	0,00	0,56	0,56	0,0702
29	0,00	0,00	0,00	1,68	47,75	46,07	46,07	0,00	0,56	0,56	0,0695
30	1,50	0,00	1,50	1,68	46,07	45,88	45,88	0,00	0,55	0,55	0,0688
31	0,00	0,00	0,00	1,68	45,88	44,20	44,20	0,00	0,55	0,55	0,0681
Promedio mensual											0,0795

Fuente: Autoría propia

Tabla 55. Cálculo de caudales medios diarios - febrero

MES DE FEBRERO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	1,30	0,00	1,30	1,72	44,20	43,78	43,78	0,00	0,54	0,54	0,0674
2	1,50	0,00	1,50	1,72	43,78	43,55	43,55	0,00	0,54	0,54	0,0667
3	1,20	0,00	1,20	1,72	43,55	43,03	43,03	0,00	0,53	0,53	0,0661
4	23,00	0,04	22,96	1,72	43,03	64,27	64,27	0,00	0,53	0,56	0,0701
5	18,20	0,00	18,20	1,72	64,27	80,74	80,74	0,00	0,52	0,52	0,0648
6	4,40	0,00	4,40	1,72	80,74	83,42	83,42	0,00	0,52	0,52	0,0641
7	1,90	0,00	1,90	1,72	83,42	83,59	83,59	0,00	0,51	0,51	0,0635
8	0,00	0,00	0,00	1,72	83,59	81,87	81,87	0,00	0,51	0,51	0,0628
9	0,50	0,00	0,50	1,72	81,87	80,64	80,64	0,00	0,50	0,50	0,0622
10	6,20	0,00	6,20	1,72	80,64	85,12	85,12	0,00	0,50	0,50	0,0616
11	2,60	0,00	2,60	1,72	85,12	86,00	86,00	0,00	0,49	0,49	0,0610
12	12,40	0,00	12,40	1,72	86,00	96,67	96,67	0,00	0,49	0,49	0,0604
13	1,30	0,00	1,30	1,72	96,67	96,25	96,25	0,00	0,48	0,48	0,0598
14	0,00	0,00	0,00	1,72	96,25	94,52	94,52	0,00	0,48	0,48	0,0592
15	0,00	0,00	0,00	1,72	94,52	92,80	92,80	0,00	0,47	0,47	0,0586
16	0,00	0,00	0,00	1,72	92,80	91,07	91,07	0,00	0,47	0,47	0,0580
17	0,00	0,00	0,00	1,72	91,07	89,35	89,35	0,00	0,46	0,46	0,0574
18	0,00	0,00	0,00	1,72	89,35	87,62	87,62	0,00	0,46	0,46	0,0568
19	0,00	0,00	0,00	1,72	87,62	85,90	85,90	0,00	0,45	0,45	0,0563
20	2,50	0,00	2,50	1,72	85,90	86,68	86,68	0,00	0,45	0,45	0,0557
21	0,00	0,00	0,00	1,72	86,68	84,95	84,95	0,00	0,44	0,44	0,0551
22	0,00	0,00	0,00	1,72	84,95	83,23	83,23	0,00	0,44	0,44	0,0546
23	0,00	0,00	0,00	1,72	83,23	81,50	81,50	0,00	0,43	0,43	0,0540
24	0,00	0,00	0,00	1,72	81,50	79,78	79,78	0,00	0,43	0,43	0,0535
25	0,30	0,00	0,30	1,72	79,78	78,35	78,35	0,00	0,43	0,43	0,0530
26	0,50	0,00	0,50	1,72	78,35	77,13	77,13	0,00	0,42	0,42	0,0524
27	0,80	0,00	0,80	1,72	77,13	76,21	76,21	0,00	0,42	0,42	0,0519

MES DE FEBRERO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
28	0,00	0,00	0,00	1,72	76,21	74,48	74,48	0,00	0,41	0,41	0,0514
29	7,20	0,00	7,20	1,72	74,48	79,96	79,96	0,00	0,41	0,41	0,0509
Promedio mensual											0,0589

Fuente: Autoría propia

Tabla 56. Cálculo de caudales medios diarios- marzo

MES DE MARZO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,00	0,00	1,82	79,96	78,13	78,13	0,00	0,40	0,40	0,0504
2	0,00	0,00	0,00	1,82	78,13	76,31	76,31	0,00	0,40	0,40	0,0499
3	0,00	0,00	0,00	1,82	76,31	74,49	74,49	0,00	0,40	0,40	0,0494
4	1,20	0,00	1,20	1,82	74,49	73,87	73,87	0,00	0,39	0,39	0,0489
5	7,60	0,00	7,60	1,82	73,87	79,64	79,64	0,00	0,39	0,39	0,0484
6	10,00	0,00	10,00	1,82	79,64	87,82	87,82	0,00	0,39	0,39	0,0479
7	1,00	0,00	1,00	1,82	87,82	87,00	87,00	0,00	0,38	0,38	0,0474
8	4,40	0,00	4,40	1,82	87,00	89,58	89,58	0,00	0,38	0,38	0,0469
9	0,00	0,00	0,00	1,82	89,58	87,75	87,75	0,00	0,37	0,37	0,0465
10	28,30	0,47	27,83	1,82	87,75	113,76	99,00	14,76	0,52	0,99	0,1234
11	1,60	0,00	1,60	1,82	99,00	98,78	98,78	0,00	0,51	0,51	0,0637
12	27,80	0,41	27,39	1,82	98,78	124,34	99,00	25,34	0,76	1,17	0,1461
13	0,20	0,00	0,20	1,82	99,00	97,38	97,38	0,00	0,75	0,75	0,0937
14	0,00	0,00	0,00	1,82	97,38	95,56	95,56	0,00	0,75	0,75	0,0927
15	1,40	0,00	1,40	1,82	95,56	95,13	95,13	0,00	0,74	0,74	0,0918
16	5,70	0,00	5,70	1,82	95,13	99,01	99,00	0,01	0,73	0,73	0,0909
17	0,10	0,00	0,10	1,82	99,00	97,28	97,28	0,00	0,72	0,72	0,0900
18	0,00	0,00	0,00	1,82	97,28	95,46	95,46	0,00	0,72	0,72	0,0891
19	0,00	0,00	0,00	1,82	95,46	93,63	93,63	0,00	0,71	0,71	0,0882

MES DE MARZO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentia subterránea (mm)	Escurrentia total (mm)	Caudal (m ³ /s)
20	0,00	0,00	0,00	1,82	93,63	91,81	91,81	0,00	0,70	0,70	0,0873
21	0,00	0,00	0,00	1,82	91,81	89,99	89,99	0,00	0,69	0,69	0,0864
22	0,00	0,00	0,00	1,82	89,99	88,17	88,17	0,00	0,69	0,69	0,0856
23	0,00	0,00	0,00	1,82	88,17	86,34	86,34	0,00	0,68	0,68	0,0847
24	0,00	0,00	0,00	1,82	86,34	84,52	84,52	0,00	0,67	0,67	0,0839
25	0,00	0,00	0,00	1,82	84,52	82,70	82,70	0,00	0,67	0,67	0,0830
26	0,00	0,00	0,00	1,82	82,70	80,88	80,88	0,00	0,66	0,66	0,0822
27	4,80	0,00	4,80	1,82	80,88	83,85	83,85	0,00	0,65	0,65	0,0814
28	0,00	0,00	0,00	1,82	83,85	82,03	82,03	0,00	0,65	0,65	0,0806
29	0,00	0,00	0,00	1,82	82,03	80,21	80,21	0,00	0,64	0,64	0,0798
30	2,30	0,00	2,30	1,82	80,21	80,69	80,69	0,00	0,63	0,63	0,0790
31	1,50	0,00	1,50	1,82	80,69	80,36	80,36	0,00	0,63	0,63	0,0782
Promedio mensual											0,0773

Fuente: Autoría propia

Tabla 57. Cálculo de caudales medios diarios- abril

MES DE ABRIL											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentia subterránea (mm)	Escurrentia total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	2,40	0,00	2,40	1,88	80,36	80,88	80,88	0,00	0,62	0,62	0,0774
2	1,70	0,00	1,70	1,88	80,88	80,70	80,70	0,00	0,62	0,62	0,0766
3	0,00	0,00	0,00	1,88	80,70	78,81	78,81	0,00	0,61	0,61	0,0759
4	0,00	0,00	0,00	1,88	78,81	76,93	76,93	0,00	0,60	0,60	0,0751
5	1,00	0,00	1,00	1,88	76,93	76,05	76,05	0,00	0,60	0,60	0,0743
6	0,20	0,00	0,20	1,88	76,05	74,36	74,36	0,00	0,59	0,59	0,0736
7	0,30	0,00	0,30	1,88	74,36	72,78	72,78	0,00	0,59	0,59	0,0729
8	0,00	0,00	0,00	1,88	72,78	70,90	70,90	0,00	0,58	0,58	0,0721

MES DE ABRIL											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
9	0,50	0,00	0,50	1,88	70,90	69,51	69,51	0,00	0,57	0,57	0,0714
10	0,00	0,00	0,00	1,88	69,51	67,63	67,63	0,00	0,57	0,57	0,0707
11	3,10	0,00	3,10	1,88	67,63	68,85	68,85	0,00	0,56	0,56	0,0700
12	0,00	0,00	0,00	1,88	68,85	66,96	66,96	0,00	0,56	0,56	0,0693
13	0,00	0,00	0,00	1,88	66,96	65,08	65,08	0,00	0,55	0,55	0,0686
14	0,20	0,00	0,20	1,88	65,08	63,40	63,40	0,00	0,55	0,55	0,0679
15	0,00	0,00	0,00	1,88	63,40	61,51	61,51	0,00	0,54	0,54	0,0672
16	0,00	0,00	0,00	1,88	61,51	59,63	59,63	0,00	0,54	0,54	0,0666
17	0,00	0,00	0,00	1,88	59,63	57,75	57,75	0,00	0,53	0,53	0,0659
18	0,00	0,00	0,00	1,88	57,75	55,86	55,86	0,00	0,52	0,52	0,0652
19	0,50	0,00	0,50	1,88	55,86	54,48	54,48	0,00	0,52	0,52	0,0646
20	2,50	0,00	2,50	1,88	54,48	55,10	55,10	0,00	0,51	0,51	0,0639
21	0,00	0,00	0,00	1,88	55,10	53,21	53,21	0,00	0,51	0,51	0,0633
22	8,50	0,00	8,50	1,88	53,21	59,83	59,83	0,00	0,50	0,50	0,0627
23	0,00	0,00	0,00	1,88	59,83	57,95	57,95	0,00	0,50	0,50	0,0620
24	11,70	0,00	11,70	1,88	57,95	67,76	67,76	0,00	0,49	0,49	0,0614
25	1,30	0,00	1,30	1,88	67,76	67,18	67,18	0,00	0,49	0,49	0,0608
26	4,60	0,00	4,60	1,88	67,18	69,90	69,90	0,00	0,48	0,48	0,0602
27	2,20	0,00	2,20	1,88	69,90	70,21	70,21	0,00	0,48	0,48	0,0596
28	3,70	0,00	3,70	1,88	70,21	72,03	72,03	0,00	0,47	0,47	0,0590
29	3,80	0,00	3,80	1,88	72,03	73,95	73,95	0,00	0,47	0,47	0,0584
30	4,70	0,00	4,70	1,88	73,95	76,76	76,76	0,00	0,46	0,46	0,0578
Promedio mensual											0,0672

Fuente: Autoría propia

Tabla 58. Cálculo de caudales medios diarios - mayo

MES DE MAYO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	0,00	0,00	0,00	1,86	76,76	74,90	74,90	0,00	0,46	0,46	0,0573
2	0,00	0,00	0,00	1,86	74,90	73,05	73,05	0,00	0,46	0,46	0,0567
3	0,00	0,00	0,00	1,86	73,05	71,19	71,19	0,00	0,45	0,45	0,0561
4	0,50	0,00	0,50	1,86	71,19	69,83	69,83	0,00	0,45	0,45	0,0556
5	0,00	0,00	0,00	1,86	69,83	67,97	67,97	0,00	0,44	0,44	0,0550
6	0,40	0,00	0,40	1,86	67,97	66,51	66,51	0,00	0,44	0,44	0,0544
7	3,70	0,00	3,70	1,86	66,51	68,35	68,35	0,00	0,43	0,43	0,0539
8	3,30	0,00	3,30	1,86	68,35	69,80	69,80	0,00	0,43	0,43	0,0534
9	0,80	0,00	0,80	1,86	69,80	68,74	68,74	0,00	0,42	0,42	0,0528
10	5,80	0,00	5,80	1,86	68,74	72,68	72,68	0,00	0,42	0,42	0,0523
11	12,70	0,00	12,70	1,86	72,68	83,52	83,52	0,00	0,42	0,42	0,0518
12	1,20	0,00	1,20	1,86	83,52	82,86	82,86	0,00	0,41	0,41	0,0513
13	22,00	0,01	21,99	1,86	82,86	103,00	99,00	4,00	0,45	0,46	0,0569
14	0,00	0,00	0,00	1,86	99,00	97,14	97,14	0,00	0,44	0,44	0,0552
15	0,00	0,00	0,00	1,86	97,14	95,28	95,28	0,00	0,44	0,44	0,0546
16	0,00	0,00	0,00	1,86	95,28	93,42	93,42	0,00	0,43	0,43	0,0541
17	0,60	0,00	0,60	1,86	93,42	92,17	92,17	0,00	0,43	0,43	0,0535
18	5,50	0,00	5,50	1,86	92,17	95,81	95,81	0,00	0,43	0,43	0,0530
19	2,20	0,00	2,20	1,86	95,81	96,15	96,15	0,00	0,42	0,42	0,0525
20	4,20	0,00	4,20	1,86	96,15	98,49	98,49	0,00	0,42	0,42	0,0519
21	1,80	0,00	1,80	1,86	98,49	98,43	98,43	0,00	0,41	0,41	0,0514
22	2,00	0,00	2,00	1,86	98,43	98,57	98,57	0,00	0,41	0,41	0,0509
23	1,20	0,00	1,20	1,86	98,57	97,92	97,92	0,00	0,41	0,41	0,0504
24	12,40	0,00	12,40	1,86	97,92	108,46	99,00	9,46	0,50	0,50	0,0617
25	13,20	0,00	13,20	1,86	99,00	110,34	99,00	11,34	0,60	0,60	0,0751
26	3,40	0,00	3,40	1,86	99,00	100,54	99,00	1,54	0,61	0,61	0,0763
27	2,10	0,00	2,10	1,86	99,00	99,24	99,00	0,24	0,61	0,61	0,0759
28	0,00	0,00	0,00	1,86	99,00	97,14	97,14	0,00	0,60	0,60	0,0751

MES DE MAYO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escoorrentia subterránea (mm)	Escoorrentia total (mm)	Caudal (m ³ /s)
29	0,00	0,00	0,00	1,86	97,14	95,28	95,28	0,00	0,60	0,60	0,0743
30	0,00	0,00	0,00	1,86	95,28	93,42	93,42	0,00	0,59	0,59	0,0736
31	0,10	0,00	0,10	1,86	93,42	91,67	91,67	0,00	0,59	0,59	0,0729
Promedio mensual											0,0587

Fuente: Autoría propia

Tabla 59. Cálculo de caudales medios diarios- junio

MES DE JUNIO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escoorrentia subterránea (mm)	Escoorrentia total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	0,80	0,00	0,80	1,72	91,67	90,74	90,74	0,00	0,58	0,58	0,0721
2	4,20	0,00	4,20	1,72	90,74	93,22	93,22	0,00	0,57	0,57	0,0714
3	1,80	0,00	1,80	1,72	93,22	93,30	93,30	0,00	0,57	0,57	0,0707
4	0,50	0,00	0,50	1,72	93,30	92,08	92,08	0,00	0,56	0,56	0,0700
5	0,00	0,00	0,00	1,72	92,08	90,36	90,36	0,00	0,56	0,56	0,0693
6	1,00	0,00	1,00	1,72	90,36	89,63	89,63	0,00	0,55	0,55	0,0686
7	2,00	0,00	2,00	1,72	89,63	89,91	89,91	0,00	0,55	0,55	0,0679
8	6,60	0,00	6,60	1,72	89,91	94,79	94,79	0,00	0,54	0,54	0,0672
9	0,60	0,00	0,60	1,72	94,79	93,67	93,67	0,00	0,54	0,54	0,0666
10	0,60	0,00	0,60	1,72	93,67	92,54	92,54	0,00	0,53	0,53	0,0659
11	5,50	0,00	5,50	1,72	92,54	96,32	96,32	0,00	0,52	0,52	0,0652
12	2,90	0,00	2,90	1,72	96,32	97,50	97,50	0,00	0,52	0,52	0,0646
13	0,80	0,00	0,80	1,72	97,50	96,58	96,58	0,00	0,51	0,51	0,0639
14	1,20	0,00	1,20	1,72	96,58	96,06	96,06	0,00	0,51	0,51	0,0633
15	7,80	0,00	7,80	1,72	96,06	102,13	99,00	3,13	0,54	0,54	0,0666
16	2,50	0,00	2,50	1,72	99,00	99,78	99,00	0,78	0,54	0,54	0,0669
17	7,60	0,00	7,60	1,72	99,00	104,88	99,00	5,88	0,59	0,59	0,0735
18	5,00	0,00	5,00	1,72	99,00	102,28	99,00	3,28	0,62	0,62	0,0769
19	7,50	0,00	7,50	1,72	99,00	104,78	99,00	5,78	0,67	0,67	0,0833
20	0,50	0,00	0,50	1,72	99,00	97,78	97,78	0,00	0,66	0,66	0,0824
21	0,30	0,00	0,30	1,72	97,78	96,36	96,36	0,00	0,66	0,66	0,0816

MES DE JUNIO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
22	8,90	0,00	8,90	1,72	96,36	103,53	99,00	4,53	0,69	0,69	0,0864
23	2,00	0,00	2,00	1,72	99,00	99,28	99,00	0,28	0,69	0,69	0,0859
24	5,70	0,00	5,70	1,72	99,00	102,98	99,00	3,98	0,72	0,72	0,0900
25	0,10	0,00	0,10	1,72	99,00	97,38	97,38	0,00	0,72	0,72	0,0891
26	0,70	0,00	0,70	1,72	97,38	96,36	96,36	0,00	0,71	0,71	0,0882
27	8,50	0,00	8,50	1,72	96,36	103,13	99,00	4,13	0,74	0,74	0,0925
28	8,70	0,00	8,70	1,72	99,00	105,98	99,00	6,98	0,81	0,81	0,1002
29	4,00	0,00	4,00	1,72	99,00	101,28	99,00	2,28	0,82	0,82	0,1021
30	3,60	0,00	3,60	1,72	99,00	100,88	99,00	1,88	0,83	0,83	0,1034
Promedio mensual											0,0772

Fuente: Autoría propia

Tabla 60. Cálculo de caudales medios diarios - julio

MES DE JULIO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	1,00	0,00	1,00	1,63	99,00	98,37	98,37	0,00	0,82	0,82	0,1023
2	2,20	0,00	2,20	1,63	98,37	98,95	98,95	0,00	0,81	0,81	0,1013
3	1,50	0,00	1,50	1,63	98,95	98,82	98,82	0,00	0,81	0,81	0,1003
4	1,00	0,00	1,00	1,63	98,82	98,19	98,19	0,00	0,80	0,80	0,0993
5	3,50	0,00	3,50	1,63	98,19	100,07	99,00	1,07	0,80	0,80	0,0996
6	2,20	0,00	2,20	1,63	99,00	99,57	99,00	0,57	0,80	0,80	0,0994
7		0,00	0,00	1,63	99,00	97,37	97,37	0,00	0,79	0,79	0,0984
8	4,50	0,00	4,50	1,63	97,37	100,25	99,00	1,25	0,80	0,80	0,0989
9	1,70	0,00	1,70	1,63	99,00	99,07	99,00	0,07	0,79	0,79	0,0980
10	1,50	0,00	1,50	1,63	99,00	98,87	98,87	0,00	0,78	0,78	0,0971
11	2,20	0,00	2,20	1,63	98,87	99,45	99,00	0,45	0,78	0,78	0,0966
12	1,60	0,00	1,60	1,63	99,00	98,97	98,97	0,00	0,77	0,77	0,0957
13	0,50	0,00	0,50	1,63	98,97	97,85	97,85	0,00	0,76	0,76	0,0947

MES DE JULIO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
14	17,20	0,00	17,20	1,63	97,85	113,42	99,00	14,42	0,90	0,90	0,1117
15	13,20	0,00	13,20	1,63	99,00	110,57	99,00	11,57	1,00	1,00	0,1250
16	20,30	0,00	20,30	1,63	99,00	117,67	99,00	18,67	1,18	1,18	0,1470
17	21,00	0,00	21,00	1,63	99,00	118,37	99,00	19,37	1,36	1,36	0,1696
18	8,80	0,00	8,80	1,63	99,00	106,17	99,00	7,17	1,42	1,42	0,1768
19	4,80	0,00	4,80	1,63	99,00	102,17	99,00	3,17	1,44	1,44	0,1790
20	14,50	0,00	14,50	1,63	99,00	111,87	99,00	12,87	1,55	1,55	0,1932
21	24,60	0,12	24,48	1,63	99,00	121,85	99,00	22,85	1,77	1,89	0,2346
22	1,50	0,00	1,50	1,63	99,00	98,87	98,87	0,00	1,75	1,75	0,2175
23	0,00	0,00	0,00	1,63	98,87	97,25	97,25	0,00	1,73	1,73	0,2154
24	0,00	0,00	0,00	1,63	97,25	95,62	95,62	0,00	1,71	1,71	0,2132
25	1,50	0,00	1,50	1,63	95,62	95,49	95,49	0,00	1,70	1,70	0,2111
26	5,80	0,00	5,80	1,63	95,49	99,67	99,00	0,67	1,69	1,69	0,2098
27	1,60	0,00	1,60	1,63	99,00	98,97	98,97	0,00	1,67	1,67	0,2077
28	4,50	0,00	4,50	1,63	98,97	101,85	99,00	2,85	1,68	1,68	0,2092
29	5,00	0,00	5,00	1,63	99,00	102,37	99,00	3,37	1,70	1,70	0,2113
30	3,60	0,00	3,60	1,63	99,00	100,97	99,00	1,97	1,70	1,70	0,2116
31	2,30	0,00	2,30	1,63	99,00	99,67	99,00	0,67	1,69	1,69	0,2103
Promedio mensual											0,1528

Fuente: Autoría propia

Tabla 61. Cálculo de caudales medios diarios - agosto

MES DE AGOSTO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,00	0,00	1,66	99,00	97,34	97,34	0,00	1,67	1,67	0,2082
2	1,00	0,00	1,00	1,66	97,34	96,67	96,67	0,00	1,66	1,66	0,2061
3	1,00	0,00	1,00					0,00			

MES DE AGOSTO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
				1,66	96,67	96,01	96,01		1,64	1,64	0,2041
4	1,00	0,00	1,00	1,66	96,01	95,34	95,34	0,00	1,62	1,62	0,2020
5	1,70	0,00	1,70	1,66	95,34	95,38	95,38	0,00	1,61	1,61	0,2000
6	6,80	0,00	6,80	1,66	95,38	100,52	99,00	1,52	1,61	1,61	0,1999
7	0,00	0,00	0,00	1,66	99,00	97,34	97,34	0,00	1,59	1,59	0,1979
8	0,00	0,00	0,00	1,66	97,34	95,67	95,67	0,00	1,57	1,57	0,1959
9	25,50	0,19	25,31	1,66	95,67	119,32	99,00	20,32	1,76	1,95	0,2423
10	8,20	0,00	8,20	1,66	99,00	105,54	99,00	6,54	1,81	1,81	0,2252
11	1,20	0,00	1,20	1,66	99,00	98,54	98,54	0,00	1,79	1,79	0,2229
12	0,00	0,00	0,00	1,66	98,54	96,87	96,87	0,00	1,77	1,77	0,2207
13	0,80	0,00	0,80	1,66	96,87	96,01	96,01	0,00	1,76	1,76	0,2185
14	3,40	0,00	3,40	1,66	96,01	97,74	97,74	0,00	1,74	1,74	0,2163
15	5,40	0,00	5,40	1,66	97,74	101,48	99,00	2,48	1,75	1,75	0,2172
16	2,20	0,00	2,20	1,66	99,00	99,54	99,00	0,54	1,73	1,73	0,2157
17	0,00	0,00	0,00	1,66	99,00	97,34	97,34	0,00	1,72	1,72	0,2136
18	17,80	0,00	17,80	1,66	97,34	113,47	99,00	14,47	1,84	1,84	0,2294
19	3,10	0,00	3,10	1,66	99,00	100,44	99,00	1,44	1,84	1,84	0,2289
20	0,50	0,00	0,50	1,66	99,00	97,84	97,84	0,00	1,82	1,82	0,2266
21	3,70	0,00	3,70	1,66	97,84	99,87	99,00	0,87	1,81	1,81	0,2255
22	1,40	0,00	1,40	1,66	99,00	98,74	98,74	0,00	1,79	1,79	0,2232
23	1,90	0,00	1,90	1,66	98,74	98,97	98,97	0,00	1,78	1,78	0,2210
24	2,40	0,00	2,40	1,66	98,97	99,71	99,00	0,71	1,77	1,77	0,2196
25	2,60	0,00	2,60	1,66	99,00	99,94	99,00	0,94	1,76	1,76	0,2186
26	3,20	0,00	3,20	1,66	99,00	100,54	99,00	1,54	1,76	1,76	0,2183
27	5,20	0,00	5,20	1,66	99,00	102,54	99,00	3,54	1,77	1,77	0,2206
28	0,00	0,00	0,00	1,66	99,00	97,34	97,34	0,00	1,76	1,76	0,2183
29	0,00	0,00	0,00	1,66	97,34	95,67	95,67	0,00	1,74	1,74	0,2162
30	0,00	0,00	0,00	1,66	95,67	94,01	94,01	0,00	1,72	1,72	0,2140
31	0,60	0,00	0,60	1,66	94,01	92,94	92,94	0,00	1,70	1,70	0,2119

MES DE AGOSTO											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
Promedio mensual											0,2161

Fuente: Autoría propia

Tabla 62. Cálculo de caudales medios diarios - septiembre

MES DE SEPTIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m3/s)
1	2,60	0,00	2,60	1,69	92,94	93,86	93,86	0,00	1,69	1,69	0,2097
2	2,30	0,00	2,30	1,69	93,86	94,47	94,47	0,00	1,67	1,67	0,2076
3	0,00	0,00	0,00	1,69	94,47	92,78	92,78	0,00	1,65	1,65	0,2056
4		0,00	0,00	1,69	92,78	91,09	91,09	0,00	1,64	1,64	0,2035
5	1,50	0,00	1,50	1,69	91,09	90,90	90,90	0,00	1,62	1,62	0,2015
6	1,00	0,00	1,00	1,69	90,90	90,21	90,21	0,00	1,60	1,60	0,1995
7	0,50	0,00	0,50	1,69	90,21	89,03	89,03	0,00	1,59	1,59	0,1975
8	0,00	0,00	0,00	1,69	89,03	87,34	87,34	0,00	1,57	1,57	0,1955
9	0,00	0,00	0,00	1,69	87,34	85,65	85,65	0,00	1,56	1,56	0,1935
10	0,00	0,00	0,00	1,69	85,65	83,96	83,96	0,00	1,54	1,54	0,1916
11	1,40	0,00	1,40	1,69	83,96	83,67	83,67	0,00	1,52	1,52	0,1897
12	1,70	0,00	1,70	1,69	83,67	83,68	83,68	0,00	1,51	1,51	0,1878
13	12,20	0,00	12,20	1,69	83,68	94,20	94,20	0,00	1,49	1,49	0,1859
14	2,70	0,00	2,70	1,69	94,20	95,21	95,21	0,00	1,48	1,48	0,1841
15	5,70	0,00	5,70	1,69	95,21	99,22	99,00	0,22	1,47	1,47	0,1825
16	0,00	0,00	0,00	1,69	99,00	97,31	97,31	0,00	1,45	1,45	0,1807
17	0,70	0,00	0,70	1,69	97,31	96,32	96,32	0,00	1,44	1,44	0,1789
18	0,00	0,00	0,00	1,69	96,32	94,63	94,63	0,00	1,42	1,42	0,1771
19	4,60	0,00	4,60	1,69	94,63	97,55	97,55	0,00	1,41	1,41	0,1753
20	4,90	0,00	4,90	1,69	97,55	100,76	99,00	1,76	1,41	1,41	0,1757
21	1,00	0,00	1,00	1,69	99,00	98,31	98,31	0,00	1,40	1,40	0,1740
22	0,00	0,00	0,00					0,00			

MES DE SEPTIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
				1,69	98,31	96,62	96,62		1,38	1,38	0,1722
23	5,10	0,00	5,10	1,69	96,62	100,03	99,00	1,03	1,38	1,38	0,1718
24	0,00	0,00	0,00	1,69	99,00	97,31	97,31	0,00	1,37	1,37	0,1701
25	2,70	0,00	2,70	1,69	97,31	98,32	98,32	0,00	1,35	1,35	0,1684
26	1,00	0,00	1,00	1,69	98,32	97,63	97,63	0,00	1,34	1,34	0,1667
27	1,50	0,00	1,50	1,69	97,63	97,45	97,45	0,00	1,33	1,33	0,1650
28	0,00	0,00	0,00	1,69	97,45	95,76	95,76	0,00	1,31	1,31	0,1634
29	1,00	0,00	1,00	1,69	95,76	95,07	95,07	0,00	1,30	1,30	0,1617
30	13,80	0,00	13,80	1,69	95,07	107,18	99,00	8,18	1,37	1,37	0,1703
Promedio mensual											0,1836

Fuente: Autoría propia

Tabla 63. Cálculo de caudales medios diarios - octubre

MES DE OCTUBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	0,00	0,00	0,00	1,77	99,00	97,23	97,23	0,00	1,36	1,36	0,1686
2	6,20	0,00	6,20	1,77	97,23	101,66	99,00	2,66	1,37	1,37	0,1702
3	0,00	0,00	0,00	1,77	99,00	97,23	97,23	0,00	1,35	1,35	0,1685
4	0,00	0,00	0,00	1,77	97,23	95,46	95,46	0,00	1,34	1,34	0,1668
5	5,20	0,00	5,20	1,77	95,46	98,89	98,89	0,00	1,33	1,33	0,1652
6	0,00	0,00	0,00	1,77	98,89	97,12	97,12	0,00	1,31	1,31	0,1635
7	4,60	0,00	4,60	1,77	97,12	99,95	99,00	0,95	1,31	1,31	0,1631
8	0,00	0,00	0,00	1,77	99,00	97,23	97,23	0,00	1,30	1,30	0,1614
9	0,00	0,00	0,00	1,77	97,23	95,46	95,46	0,00	1,28	1,28	0,1598
10	0,00	0,00	0,00	1,77	95,46	93,69	93,69	0,00	1,27	1,27	0,1582
11	14,00	0,00	14,00	1,77	93,69	105,92	99,00	6,92	1,33	1,33	0,1653
12	0,80	0,00	0,80	1,77	99,00	98,03	98,03	0,00	1,32	1,32	0,1636

MES DE OCTUBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
13	0,00	0,00	0,00	1,77	98,03	96,26	96,26	0,00	1,30	1,30	0,1620
14	22,20	0,01	22,19	1,77	96,26	116,68	99,00	17,68	1,47	1,48	0,1840
15	4,20	0,00	4,20	1,77	99,00	101,43	99,00	2,43	1,48	1,48	0,1835
16	0,50	0,00	0,50	1,77	99,00	97,73	97,73	0,00	1,46	1,46	0,1817
17	0,00	0,00	0,00	1,77	97,73	95,96	95,96	0,00	1,45	1,45	0,1799
18	6,80	0,00	6,80	1,77	95,96	100,99	99,00	1,99	1,45	1,45	0,1806
19	1,00	0,00	1,00	1,77	99,00	98,23	98,23	0,00	1,44	1,44	0,1788
20	6,50	0,00	6,50	1,77	98,23	102,96	99,00	3,96	1,46	1,46	0,1819
21	8,60	0,00	8,60	1,77	99,00	105,83	99,00	6,83	1,52	1,52	0,1886
22	0,00	0,00	0,00	1,77	99,00	97,23	97,23	0,00	1,50	1,50	0,1867
23	0,50	0,00	0,50	1,77	97,23	95,96	95,96	0,00	1,49	1,49	0,1848
24	0,00	0,00	0,00	1,77	95,96	94,19	94,19	0,00	1,47	1,47	0,1830
25	0,00	0,00	0,00	1,77	94,19	92,42	92,42	0,00	1,46	1,46	0,1811
26	0,00	0,00	0,00	1,77	92,42	90,65	90,65	0,00	1,44	1,44	0,1793
27	0,00	0,00	0,00	1,77	90,65	88,88	88,88	0,00	1,43	1,43	0,1775
28	2,30	0,00	2,30	1,77	88,88	89,41	89,41	0,00	1,41	1,41	0,1758
29	0,70	0,00	0,70	1,77	89,41	88,34	88,34	0,00	1,40	1,40	0,1740
30	0,00	0,00	0,00	1,77	88,34	86,57	86,57	0,00	1,38	1,38	0,1723
31	0,00	0,00	0,00	1,77	86,57	84,80	84,80	0,00	1,37	1,37	0,1705
Promedio mensual											0,1736

Fuente: Autoría propia

Tabla 64. Cálculo de caudales medios diarios - noviembre

MES DE NOVIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	1,50	0,00	1,50	1,81	84,80	84,49	84,49	0,00	1,36	1,36	0,1688
2	0,00	0,00	0,00	1,81	84,49	82,68	82,68	0,00	1,34	1,34	0,1672
3	0,00	0,00	0,00	1,81	82,68	80,88	80,88	0,00	1,33	1,33	0,1655
4	0,00	0,00	0,00	1,81	80,88	79,07	79,07	0,00	1,32	1,32	0,1638
5	0,00	0,00	0,00	1,81	79,07	77,26	77,26	0,00	1,30	1,30	0,1622
6	1,50	0,00	1,50	1,81	77,26	76,95	76,95	0,00	1,29	1,29	0,1606
7	0,00	0,00	0,00	1,81	76,95	75,14	75,14	0,00	1,28	1,28	0,1590
8	0,00	0,00	0,00	1,81	75,14	73,33	73,33	0,00	1,26	1,26	0,1574
9	5,80	0,00	5,80	1,81	73,33	77,32	77,32	0,00	1,25	1,25	0,1558
10	2,80	0,00	2,80	1,81	77,32	78,31	78,31	0,00	1,24	1,24	0,1542
11	1,60	0,00	1,60	1,81	78,31	78,10	78,10	0,00	1,23	1,23	0,1527
12	0,50	0,00	0,50	1,81	78,10	76,79	76,79	0,00	1,22	1,22	0,1512
13	0,00	0,00	0,00	1,81	76,79	74,98	74,98	0,00	1,20	1,20	0,1497
14	0,70	0,00	0,70	1,81	74,98	73,87	73,87	0,00	1,19	1,19	0,1482
15	0,40	0,00	0,40	1,81	73,87	72,46	72,46	0,00	1,18	1,18	0,1467
16	0,00	0,00	0,00	1,81	72,46	70,65	70,65	0,00	1,17	1,17	0,1452
17	0,60	0,00	0,60	1,81	70,65	69,44	69,44	0,00	1,16	1,16	0,1438
18	0,00	0,00	0,00	1,81	69,44	67,63	67,63	0,00	1,14	1,14	0,1423
19	0,00	0,00	0,00	1,81	67,63	65,82	65,82	0,00	1,13	1,13	0,1409
20	0,00	0,00	0,00	1,81	65,82	64,01	64,01	0,00	1,12	1,12	0,1395
21	1,40	0,00	1,40	1,81	64,01	63,60	63,60	0,00	1,11	1,11	0,1381
22	2,40	0,00	2,40	1,81	63,60	64,19	64,19	0,00	1,10	1,10	0,1367
23	0,00	0,00	0,00	1,81	64,19	62,38	62,38	0,00	1,09	1,09	0,1353
24	0,70	0,00	0,70	1,81	62,38	61,27	61,27	0,00	1,08	1,08	0,1340
25	0,60	0,00	0,60	1,81	61,27	60,06	60,06	0,00	1,07	1,07	0,1327
26	0,00	0,00	0,00	1,81	60,06	58,25	58,25	0,00	1,06	1,06	0,1313
27	0,00	0,00	0,00	1,81	58,25	56,44	56,44	0,00	1,05	1,05	0,1300
28	5,70	0,00	5,70					0,00			

MES DE NOVIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
				1,81	56,44	60,33	60,33		1,03	1,03	0,1287
29	0,00	0,00	0,00	1,81	60,33	58,52	58,52	0,00	1,02	1,02	0,1274
30	17,80	0,00	17,80	1,81	58,52	74,51	74,51	0,00	1,01	1,01	0,1262
Promedio mensual											0,1465

Fuente: Autoría propia

Tabla 65. Cálculo de caudales medios diarios - diciembre

MES DE DICIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía subterránea (mm)	Escurrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
1	0,00	0,00	0,00	1,72	74,51	72,80	72,80	0,00	1,00	1,00	0,1249
2	0,00	0,00	0,00	1,72	72,80	71,08	71,08	0,00	0,99	0,99	0,1236
3	1,50	0,00	1,50	1,72	71,08	70,86	70,86	0,00	0,98	0,98	0,1224
4	2,50	0,00	2,50	1,72	70,86	71,65	71,65	0,00	0,97	0,97	0,1212
5	2,00	0,00	2,00	1,72	71,65	71,93	71,93	0,00	0,96	0,96	0,1200
6	5,40	0,00	5,40	1,72	71,93	75,61	75,61	0,00	0,95	0,95	0,1188
7	0,00	0,00	0,00	1,72	75,61	73,89	73,89	0,00	0,95	0,95	0,1176
8	0,00	0,00	0,00	1,72	73,89	72,18	72,18	0,00	0,94	0,94	0,1164
9	2,40	0,00	2,40	1,72	72,18	72,86	72,86	0,00	0,93	0,93	0,1152
10	0,00	0,00	0,00	1,72	72,86	71,14	71,14	0,00	0,92	0,92	0,1141
11	1,30	0,00	1,30	1,72	71,14	70,73	70,73	0,00	0,91	0,91	0,1129
12	5,50	0,00	5,50	1,72	70,73	74,51	74,51	0,00	0,90	0,90	0,1118
13	0,80	0,00	0,80	1,72	74,51	73,59	73,59	0,00	0,89	0,89	0,1107
14	5,50	0,00	5,50	1,72	73,59	77,37	77,37	0,00	0,88	0,88	0,1096
15	0,50	0,00	0,50	1,72	77,37	76,16	76,16	0,00	0,87	0,87	0,1085
16	0,50	0,00	0,50	1,72	76,16	74,94	74,94	0,00	0,86	0,86	0,1074
17	0,00	0,00	0,00	1,72	74,94	73,22	73,22	0,00	0,85	0,85	0,1063
18	1,10	0,00	1,10	1,72	73,22	72,61	72,61	0,00	0,85	0,85	0,1053
19	1,20	0,00	1,20	1,72	72,61	72,09	72,09	0,00	0,84	0,84	0,1042
20	0,60	0,00	0,60	1,72	72,09	70,97	70,97	0,00	0,83	0,83	0,1032
21	0,00	0,00	0,00	1,72	70,97	69,25	69,25	0,00	0,82	0,82	0,1021

MES DE DICIEMBRE											
DIA	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Infiltración (mm)	Evapotranspiración (mm)	Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	Cálculo humedad del suelo (mm)	Reserva de humedad del suelo final (mm)	Percolación (mm)	Escorrentía subterránea (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal (m ³ /s)
22	0,00	0,00	0,00	1,72	69,25	67,54	67,54	0,00	0,81	0,81	0,1011
23	0,00	0,00	0,00	1,72	67,54	65,82	65,82	0,00	0,80	0,80	0,1001
24	0,00	0,00	0,00	1,72	65,82	64,10	64,10	0,00	0,80	0,80	0,0991
25	0,00	0,00	0,00	1,72	64,10	62,39	62,39	0,00	0,79	0,79	0,0981
26	0,00	0,00	0,00	1,72	62,39	60,67	60,67	0,00	0,78	0,78	0,0971
27	0,00	0,00	0,00	1,72	60,67	58,95	58,95	0,00	0,77	0,77	0,0962
28	4,70	0,00	4,70	1,72	58,95	61,93	61,93	0,00	0,77	0,77	0,0952
29	0,00	0,00	0,00	1,72	61,93	60,22	60,22	0,00	0,76	0,76	0,0943
30	8,80	0,00	8,80	1,72	60,22	67,30	67,30	0,00	0,75	0,75	0,0933
31	0,00	0,00	0,00	1,72	67,30	65,58	65,58	0,00	0,74	0,74	0,0924
Promedio mensual											0,1078

Fuente: Autoría propia

De los resultados obtenidos en las tablas anteriormente calculadas, se puede determinar el caudal medio por mes en m³/s, valores que se pueden apreciar en la tabla No. 66:

Tabla 66. Resultados de caudales medios mensuales (m³/s)

ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
0,08	0,06	0,08	0,07	0,06	0,08	0,15	0,22	0,18	0,17	0,15	0,11

Fuente: Autoría propia

Adicionalmente se pueden obtener los siguientes caudales:

- ❖ Q mínimo diario: 0,0465 m³/s
- ❖ Q mínimo mensual: 0,0600m³/s
- ❖ Q máximo diario: 0,2423 m³/s
- ❖ Q máximo mensual: 0,2200m³/s

7.1.2.11 Cálculo del diagrama de frecuencias.

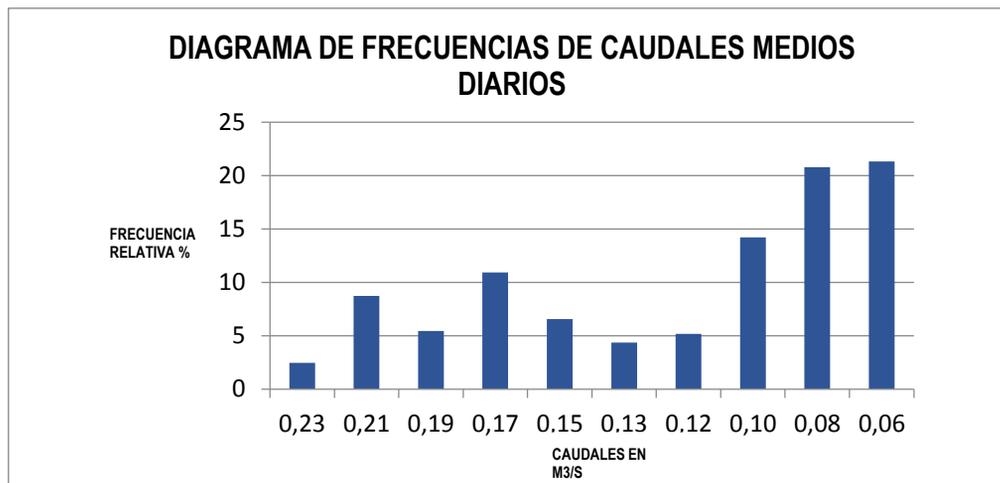
El cálculo de la frecuencia con que ocurren caudales iguales o superiores, para el presente estudio, se pueden observar en la siguiente tabla No. 67:

Tabla 67. Cálculo de frecuencias

	INTERVALOS DE CLASE		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA ABS. ACUMULADA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
	Límite inferior	Límite superior					
1	0,22279	0,2424	0,23257525	9	9	0,024590164	2,46%
2	0,20320	0,2228	0,21298570	32	41	0,087431694	11,20%
3	0,18361	0,2032	0,19339616	20	61	0,054644809	16,67%
4	0,16402	0,1836	0,17380661	40	101	0,109289617	27,60%
5	0,14443	0,1640	0,15421707	24	125	0,06557377	34,15%
6	0,12484	0,1444	0,13462752	16	141	0,043715847	38,52%
7	0,10525	0,1248	0,11503797	19	160	0,051912568	43,72%
8	0,08566	0,1052	0,09544843	52	212	0,142076503	57,92%
9	0,06607	0,0856	0,07585888	76	288	0,207650273	78,69%
10	0,0465	0,0661	0,05626933	78	366	0,213114754	100,00%
				366		1	

Fuente: Autoría propia

A continuación se presenta en la gráfica No. 16 el diagrama de frecuencias de caudales medios diarios:



Gráfica 16. Diagrama de frecuencias de caudales medios diarios.

Fuente: Autoría propia

7.1.2.12 Curva de duración de caudales.

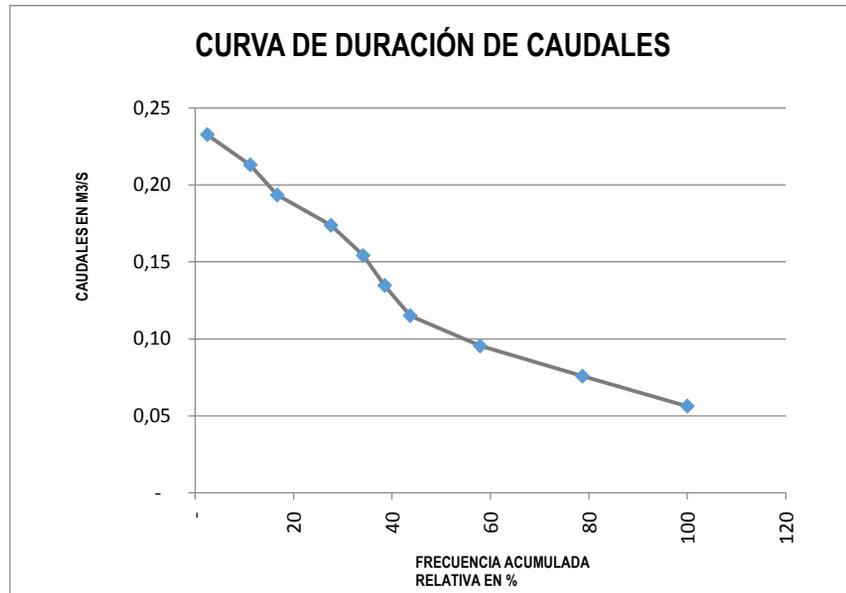
Esta curva representa en orden decreciente la duración o permanencia de caudales observados. Para la construcción de esta curva se grafican los valores de Q contra su frecuencia acumulada relativa correspondiente. Los valores para la construcción de esta curva, se muestran en la tabla No. 68.

Tabla 68. Datos para la curva de duración de caudales

	INTERVALOS DE CLASE		MARCA DE CLASE	FRECUENCIA	FRECUENCIA ABS. ACUMULADA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA %	FRECUENCIA RELATIVA (%)
	Límite inferior	Límite superior						
1	0,22	0,24	0,23	9	9	0,02	2,46	0,02
2	0,20	0,22	0,21	32	41	0,09	8,74	0,11
3	0,18	0,20	0,19	20	61	0,05	5,46	0,17
4	0,16	0,18	0,17	40	101	0,11	10,93	0,28
5	0,14	0,16	0,15	24	125	0,07	6,56	0,34
6	0,12	0,14	0,13	16	141	0,04	4,37	0,39
7	0,11	0,12	0,12	19	160	0,05	5,19	0,44
8	0,09	0,11	0,10	52	212	0,14	14,21	0,58
9	0,07	0,09	0,08	76	288	0,21	20,77	0,79
10	0,05	0,07	0,06	78	366	0,21	21,31	1,00
				366		1		

Fuente: Autoría propia

La curva de duración de caudales obtenida se muestra en la gráfica No. 17.



Gráfica 17. Curva de duración de caudales medios diarios del año promedio.

Fuente: Autoría propia

7.1.3 Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N3 en Cundinamarca.

El método para el cálculo de caudales medios, el autor de este estudio se basa en la siguiente ecuación:

$$Q(i) = K1(P(i) - ET(i)) + K2(P(i-1) - ET(i-1))$$

Dónde:

- K1: Factor que determina el porcentaje de lluvia que directamente se convierte en escorrentía
- k2: Factor que determina el porcentaje de la infiltración del mes anterior que se convierte en escorrentía.
- Q: Es el caudal mensual "Rendimiento"

- P: La precipitación mensual
- ET: La evapotranspiración real mensual

Para el cálculo de la evapotranspiración real se parte de datos conocidos de evaporación que deben ser corregidos por altura y luego convertidos a evaporación real y finalmente a evapotranspiración real.

El cálculo de la corrección por altura la realiza el autor mediante una interpolación lineal de dos datos, que pueden ser de estaciones conocidas o mediante la presunción dada por la experiencia del calculista.

Para el actual estudio la estación climatológica Silos, de la cual se utilizaron los datos de evaporación se ubica a una altura (2.709 m.s.n.m.) muy similar a la altura de la estación limnimétrica Santa Marta (2.700 m.s.n.m.) por lo cual no requiere corrección por altura. Estos datos se muestran en la tabla No. 69.

Tabla 69. Resultados de la evaporación media mensual estación SILOS (mm)

EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL ESTACIÓN SILOS (mm)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1979	152,70	152,00	125,40	97,00	101,20	77,10	74,60	80,20	90,30		91,40	77,50
1980	107,70	128,20	106,40	91,90	82,90	60,50	66,20	77,20	100,20	103,10	106,20	122,70
1981	158,40	110,90	132,60	91,70	90,10	67,40	72,20	83,20	83,10	118,10	128,90	99,80
1983	121,60	115,80	135,00	95,60	88,60	63,30	58,90	61,90	84,20	85,30	107,70	105,30
1984	128,40	112,60	142,80	125,70	102,70	66,80	73,30	77,50	94,50	112,40	88,70	110,10
1985	141,20	123,80	114,00	103,40	91,30	39,70	63,80	80,10	108,30	99,10	96,30	129,20
1986	122,20	103,70	122,50	101,30	96,30	54,50	36,80	69,00	89,10	95,40	104,30	104,30
1987	122,40	97,50	127,90	96,30	88,70	59,70	62,90	64,70	76,10	100,20	83,10	100,10
1989	123,40	118,30	119,20	117,90	87,80	71,80	65,10	71,80	114,70	115,10	103,50	129,10
1990	118,60	129,60	61,60	81,70	66,60	51,80	73,50	73,70	104,50	123,30	97,90	109,20
1991	137,00	128,20	111,40	102,10	101,50	63,60	63,70	63,50	89,60	108,10	96,60	122,10
1992	131,70	127,80	137,30	106,30	103,30	67,70	133,30	64,90		94,10	105,70	123,00
1997	87,10	69,20	48,80	40,80	76,00	60,70		49,30	58,60	75,40	72,70	70,30
1999	67,70	81,00	66,80	64,80	44,20		59,10		58,20	71,80	46,20	72,30
2005	76,60	81,50	116,60	43,90	43,50	67,50	69,10	78,10	89,60	112,90	97,50	109,30
2007	106,30	133,10	122,80	120,80	77,30	61,20	86,80	99,80	89,10	108,70	105,30	120,30
2008	130,30	109,50	131,10	122,70	99,80	94,30	83,90	105,40	84,00	121,20	79,30	131,40
2009	107,00	90,30		114,90	122,80	90,00	159,20	162,10	107,80	104,90	63,10	122,60
2010	148,80	136,50	129,80	120,30	128,10	122,20	132,70	94,40	110,50	143,70	108,70	170,30
2011	157,00	151,40	128,10	136,50	143,30	125,00	97,60	141,40	140,50	122,00	135,70	159,70
2012	154,20	158,10	121,60	110,50	127,60	113,50	85,80	110,90	76,10	124,30	129,90	149,30
2013	151,20	105,50	119,80	132,90	104,70	97,90	108,80	95,50	125,00	177,20	157,10	135,30
Promedio	125,07	116,57	115,31	100,86	94,01	75,06	82,25	85,93	94,00	110,30	100,26	116,96

Fuente: Autoría propia

Para el cálculo de la evapotranspiración real a partir de la evaporación potencial, se aplica un factor de corrección que depende del suelo, el cultivo y el régimen de lluvias, su valor oscila entre 0,5 y 0,9 (Silva Medina Gustavo; Hidrología Básica), debiéndose tomar el valores más bajos para suelos con poca capacidad de retención y escasa cobertura vegetal.

Para la cuenca de la quebrada Granadillo, en donde se ha establecido un suelo de textura limo – arcillosa y cobertura vegetal predominante de arbustos y pastos, se adopta un factor de corrección de 0.6.

Para la casilla calculada como precipitación menos evapotranspiración, el autor estima que cuando la evapotranspiración es mayor que la precipitación, por lo menos un 10% de la precipitación es susceptible de convertirse en escorrentía, en caso contrario la celda calcula la precipitación que es susceptible de convertirse en escorrentía.

De esta precipitación que excede a la evapotranspiración el autor considera que un 35% se convierte en escorrentía directa que llega el mismo día a la corriente y un 15% llega a la corriente un día después infiltrándose en el subsuelo.

Finalmente la suma de estos dos aportes alimenta el cauce de la quebrada, el cálculo del caudal será la multiplicación del rendimiento de la cuenca en $L/s/Km^2$ multiplicado por el área de la cuenca.

La tabla No. 70 muestra los cálculos realizados para hallar los caudales medio mensuales de la cuenca, utilizando esta metodología.

Área	10,75	km ²
Factor ET	0,6	
K1	0,35	
K2	0,15	

Tabla 70. Cálculo de Caudales mensuales método municipio N3 (l/s)

										Captación
MES		P mensual	AÑ OS	Ev mensual	ET mensual	P-Et	k1 (P-ET)	k2 (P-ET)	Rendimiento	Caudal
		1979 - 2013		mm	mm	mm	mm	mm	l/s/km ²	l/s
1		6,6	1979	152,70	76,35	0,66	0,23		0,09	0,94
2		28,2		152,00	76	2,82	0,99	0,42	0,37	0,22
3		53,3		125,40	62,7	5,33	1,87	0,80	0,87	0,30
4		148,6		97,00	48,5	100,10	35,04	15,02	13,60	2,04
5		98,2		101,20	50,6	47,60	16,66	7,14	12,02	0,00
6		143,5		77,10	38,55	104,95	36,73	15,74	16,65	0,00
7		127,5		74,60	37,3	90,20	31,57	13,53	17,96	0,00
8		113,7		80,20	40,1	73,60	25,76	11,04	14,91	0,00
9		19,9		90,30	45,15	1,99	0,70	0,30	4,45	29,40
11		108,8		91,40	45,7	63,10	22,09	9,47	8,49	239,55
12		70		77,50	38,75	31,25	10,94	4,69	7,74	412,69
1		31,8	1980	107,70	53,85	3,18	1,11	0,48	2,20	327,11
2		23,3		128,20	64,1	2,33	0,82	0,35	0,49	48,17
3		31,2		106,40	53,2	3,12	1,09	0,47	0,55	78,50
4		100,7		91,90	45,95	54,75	19,16	8,21	7,45	949,85
5		107,9		82,90	41,45	66,45	23,26	9,97	11,94	1357,90
6		222,8		60,50	30,25	192,55	67,39	28,88	29,36	584,23
7		125,6		66,20	33,1	92,50	32,38	13,88	23,25	2529,30
8		107,9		77,20	38,6	69,30	24,26	10,40	14,47	1012,92
9		86,7		100,20	50,1	36,60	12,81	5,49	8,81	280,04
10		77,3		103,10	51,55	25,75	9,01	3,86	5,50	128,24
11		35,1		106,20	53,1	3,51	1,23	0,53	1,93	60,28
12		20		122,70	61,35	2,00	0,70	0,30	0,47	46,87
1		1,1	1981	158,40	79,2	0,11	0,04	0,02	0,13	13,86
2		38,3		110,90	55,45	3,83	1,34	0,57	0,51	114,74

3		25,4		132,60	66,3	2,54	0,89	0,38	0,56	69,76
4		159,1		91,70	45,85	113,25	39,64	16,99	15,19	1638,68
5		154		90,10	45,05	108,95	38,13	16,34	20,92	1813,59
6		100,5		67,40	33,7	66,80	23,38	10,02	15,07	1165,27
7		76,1		72,20	36,1	40,00	14,00	6,00	9,12	319,96
8		71,1		83,20	41,6	29,50	10,33	4,43	6,20	123,91
9		71,3		83,10	41,55	29,75	10,41	4,46	5,63	6,19
10		79,7		118,10	59,05	20,65	7,23	3,10	4,44	169,91
11		56,3		128,90	64,45	5,63	1,97	0,84	1,92	48,85
12		26		99,80	49,9	2,60	0,91	0,39	0,67	105,93
1		20,9	1983	121,60	60,8	2,09	0,73	0,31	0,43	65,54
2		84,9		115,80	57,9	27,00	9,45	4,05	3,71	372,38
3		50,2		135,00	67,5	5,02	1,76	0,75	2,20	167,71
4		104,4		95,60	47,8	56,60	19,81	8,49	7,80	554,84
5		68,8		88,60	44,3	24,50	8,58	3,68	6,48	461,75
6		89,4		63,30	31,65	57,75	20,21	8,66	9,07	722,50
7		171,5		58,90	29,45	142,05	49,72	21,31	22,16	1247,34
8		105		61,90	30,95	74,05	25,92	11,11	17,92	465,97
9		64,4		84,20	42,1	22,30	7,81	3,35	7,18	150,01
10		85,4		85,30	42,65	42,75	14,96	6,41	6,95	589,86
11		18,8		107,70	53,85	1,88	0,66	0,28	2,68	134,70
12		26,2		105,30	52,65	2,62	0,92	0,39	0,46	47,50
1		16,1	1984	128,40	64,2	1,61	0,56	0,24	0,36	24,97
2		34,5		112,60	56,3	3,45	1,21	0,52	0,55	49,16
3		35		142,80	71,4	3,50	1,23	0,53	0,66	113,41
4		91,7		125,70	62,85	28,85	10,10	4,33	4,03	423,28
5		79,4		102,70	51,35	28,05	9,82	4,21	5,37	345,70
6		189		66,80	33,4	155,60	54,46	23,34	22,26	1901,37
7		93,2		73,30	36,65	56,55	19,79	8,48	16,37	307,73
8		116,2		77,50	38,75	77,45	27,11	11,62	13,51	353,87
9		87,7		94,50	47,25	40,45	14,16	6,07	9,78	157,48
10		45,5		112,40	56,2	4,55	1,59	0,68	2,91	100,29
11		59,7		88,70	44,35	15,35	5,37	2,30	2,30	80,43
12		15,1		110,10	55,05	1,51	0,53	0,23	1,07	98,52
1		8,3	1985	141,20	70,6	0,83	0,29	0,12	0,20	15,58
2		7,4		123,80	61,9	0,74	0,26	0,11	0,15	27,51
3		90,9		114,00	57	33,90	11,87	5,09	4,54	423,58
4		63,2		103,40	51,7	11,50	4,03	1,73	3,46	401,73
5		130		91,30	45,65	84,35	29,52	12,65	11,86	1039,98
6		169,7		39,70	19,85	149,85	52,45	22,48	24,71	1124,10

7		121,3		63,80	31,9	89,40	31,29	13,41	20,40	1218,16
8		78,9		80,10	40,05	38,85	13,60	5,83	10,25	154,77
9		86,8		108,30	54,15	32,65	11,43	4,90	6,55	54,35
10		116,5		99,10	49,55	66,95	23,43	10,04	10,75	79,56
11		108,4		96,30	48,15	60,25	21,09	9,04	11,81	1073,88
12		54,1		129,20	64,6	5,41	1,89	0,81	4,15	262,17
1		9,2	1986	122,20	61,1	0,92	0,32	0,14	0,43	55,92
2		95,3		103,70	51,85	43,45	15,21	6,52	5,82	988,27
3		48,5		122,50	61,25	4,85	1,70	0,73	3,12	378,16
4		53,9		101,30	50,65	3,25	1,14	0,49	0,71	55,84
5		88,3		96,30	48,15	40,15	14,05	6,02	5,52	478,96
6		223,1		54,50	27,25	195,85	68,55	29,38	28,30	3296,87
7		239,9		36,80	18,4	221,50	77,53	33,23	40,57	4397,73
8		97,3		69,00	34,5	62,80	21,98	9,42	20,95	1133,41
9		81		89,10	44,55	36,45	12,76	5,47	8,42	77,43
10		119,6		95,40	47,7	71,90	25,17	10,79	11,63	1107,87
11		62,9		104,30	52,15	10,75	3,76	1,61	5,52	267,76
12		21,7		104,30	52,15	2,17	0,76	0,33	0,90	48,52
1		12,4	1987	122,40	61,2	1,24	0,43	0,19	0,29	25,45
2		32,5		97,50	48,75	3,25	1,14	0,49	0,50	112,06
3		7,7		127,90	63,95	0,77	0,27	0,12	0,29	68,92
4		89,8		96,30	48,15	41,65	14,58	6,25	5,58	542,54
5		127,1		88,70	44,35	82,75	28,96	12,41	13,36	1082,34
6		124,1		59,70	29,85	94,25	32,99	14,14	17,23	2060,62
7		160,2		62,90	31,45	128,75	45,06	19,31	22,47	1413,14
8		97,7		64,70	32,35	65,35	22,87	9,80	16,01	347,40
9		62,3		76,10	38,05	24,25	8,49	3,64	6,94	86,07
10		82,1		100,20	50,1	32,00	11,20	4,80	5,63	183,00
11		59,2		83,10	41,55	17,65	6,18	2,65	4,17	32,08
12		33,1		100,10	50,05	3,31	1,16	0,50	1,44	129,71
1		15,5	1989	123,40	61,7	1,55	0,54	0,23	0,39	50,12
2		32		118,30	59,15	3,20	1,12	0,48	0,51	63,70
3		59,8		119,20	59,6	0,20	0,07	0,03	0,21	33,44
4		45,3		117,90	58,95	4,53	1,59	0,68	0,61	59,90
5		175,4		87,80	43,9	131,50	46,03	19,73	17,72	1104,23
6		133,1		71,80	35,9	97,20	34,02	14,58	20,40	1674,53
7		194,4		65,10	32,55	161,85	56,65	24,28	27,03	1600,23
8		49,8		71,80	35,9	13,90	4,87	2,09	11,06	366,07
9		63,9		114,70	57,35	6,55	2,29	0,98	1,66	25,75
10		50,4		115,10	57,55	5,04	1,76	0,76	1,04	33,35

11		40,5		103,50	51,75	4,05	1,42	0,61	0,82	49,33
12		36,3		129,10	64,55	3,63	1,27	0,54	0,71	32,29
1		17,4	1990	118,60	59,3	1,74	0,61	0,26	0,44	76,78
2		37,2		129,60	64,8	3,72	1,30	0,56	0,59	78,95
3		72,4		61,60	30,8	41,60	14,56	6,24	5,74	1115,33
4		67,5		81,70	40,85	26,65	9,33	4,00	5,91	294,21
5		206		66,60	33,3	172,70	60,45	25,91	24,46	1562,73
6		144		51,80	25,9	118,10	41,34	17,72	25,52	1286,09
7		101,5		73,50	36,75	64,75	22,66	9,71	15,32	620,59
8		105,4		73,70	36,85	68,55	23,99	10,28	12,79	464,32
9		31,4		104,50	52,25	3,14	1,10	0,47	4,32	75,16
10		79,5		123,30	61,65	17,85	6,25	2,68	2,55	94,85
11		42,6		97,90	48,95	4,26	1,49	0,64	1,58	114,53
12		51,7		109,20	54,6	5,17	1,81	0,78	0,93	62,72
1		12,8	1991	137,00	68,5	1,28	0,45	0,19	0,46	95,65
2		37,1		128,20	64,1	3,71	1,30	0,56	0,57	81,45
3		85,5		111,40	55,7	29,80	10,43	4,47	4,17	423,19
4		56,6		102,10	51,05	5,55	1,94	0,83	2,43	256,50
5		65,3		101,50	50,75	14,55	5,09	2,18	2,25	70,60
6		92,1		63,60	31,8	60,30	21,11	9,05	8,84	702,59
7		250,9		63,70	31,85	219,05	76,67	32,86	32,53	1385,69
8		188		63,50	31,75	156,25	54,69	23,44	33,22	1717,65
9		65,1		89,60	44,8	20,30	7,11	3,05	11,59	148,36
10		53,3		108,10	54,05	5,33	1,87	0,80	1,86	69,14
11		47,4		96,60	48,3	4,74	1,66	0,71	0,93	79,77
12		18,7		122,10	61,05	1,87	0,65	0,28	0,52	29,33
1		15	1992	131,70	65,85	1,50	0,53	0,23	0,31	19,96
2		26,6		127,80	63,9	2,66	0,93	0,40	0,44	40,40
3		19,3		137,30	68,65	1,93	0,68	0,29	0,41	102,31
4		82,7		106,30	53,15	29,55	10,34	4,43	4,03	758,55
5		51,4		103,30	51,65	5,14	1,80	0,77	2,36	153,95
6		89,8		67,70	33,85	55,95	19,58	8,39	7,72	411,70
7		212,7		133,30	66,65	146,05	51,12	21,91	22,58	1070,48
8		101,3		64,90	32,45	68,85	24,10	10,33	17,46	326,48
10		38,8		94,10	47,05	3,88	1,36	0,58	4,43	66,52
11		84,9		105,70	52,85	32,05	11,22	4,81	4,48	119,11
12		12,5		123,00	61,5	1,25	0,44	0,19	1,99	38,42
1		50,7	1997	87,10	43,55	7,15	2,50	1,07	1,02	84,42
2		38,2		69,20	34,6	3,60	1,26	0,54	0,89	45,50
3		25,7		48,80	24,4	1,30	0,46	0,20	0,38	33,91

4		17,4		40,80	20,4	1,74	0,61	0,26	0,31	64,90
5		140,5		76,00	38	102,50	35,88	15,38	13,71	1389,19
6		128,1		60,70	30,35	97,75	34,21	14,66	18,82	730,16
8		143,2		49,30	24,65	118,55	41,49	17,78	21,31	1809,29
9		24		58,60	29,3	2,40	0,84	0,36	7,07	88,34
10		26,1		75,40	37,7	2,61	0,91	0,39	0,48	24,50
11		24,5		72,70	36,35	2,45	0,86	0,37	0,47	18,11
12		0		70,30	35,15	0,00	0,00	0,00	0,14	3,58
1		26	1999	67,70	33,85	2,60	0,91	0,39	0,35	6,01
2		29,4		81,00	40,5	2,94	1,03	0,44	0,54	75,66
3		33,2		66,80	33,4	3,32	1,16	0,50	0,61	77,93
4		112,6		64,80	32,4	80,20	28,07	12,03	10,84	1552,51
5		26,6		44,20	22,1	4,50	1,58	0,68	5,16	123,91
7		23,1		59,10	29,55	2,31	0,81	0,35	0,56	14,69
9		74,8		58,20	29,1	45,70	16,00	6,86	6,20	151,94
10		38,2		71,80	35,9	2,30	0,81	0,35	2,91	0,00
11		46,2		46,20	23,1	23,10	8,09	3,47	3,20	83,18
12		5,2		72,30	36,15	0,52	0,18	0,08	1,38	40,69
1		17,2	2005	76,60	38,3	1,72	0,60	0,26	0,26	8,57
2		31,1		81,50	40,75	3,11	1,09	0,47	0,51	57,54
3		37,3		116,60	58,3	3,73	1,31	0,56	0,67	17,89
4		91,5		43,90	21,95	69,55	24,34	10,43	9,45	218,30
5		139,1		43,50	21,75	117,35	41,07	17,60	19,55	1462,05
6		97,7		67,50	33,75	63,95	22,38	9,59	15,17	579,66
7		114,8		69,10	34,55	80,25	28,09	12,04	14,30	660,64
8		140,4		78,10	39,05	101,35	35,47	15,20	18,03	93,76
9		118,3		89,60	44,8	73,50	25,73	11,03	15,53	267,15
10		104,3		112,90	56,45	47,85	16,75	7,18	10,54	327,78
11		88,4		97,50	48,75	39,65	13,88	5,95	7,99	298,04
12		10,3		109,30	54,65	1,03	0,36	0,15	2,39	219,04
1		1,6	2007	106,30	53,15	0,16	0,06	0,02	0,08	11,11
2		26,7		133,10	66,55	2,67	0,93	0,40	0,36	35,54
3		22,1		122,80	61,4	2,21	0,77	0,33	0,45	51,15
4		79,6		120,80	60,4	19,20	6,72	2,88	2,68	375,72
5		89,8		77,30	38,65	51,15	17,90	7,67	7,89	933,03
6		176,5		61,20	30,6	145,90	51,07	21,89	22,29	2324,94
7		70,9		86,80	43,4	27,50	9,63	4,13	11,96	1057,09
8		108,4		99,80	49,9	58,50	20,48	8,78	9,34	96,16
9		59,7		89,10	44,55	15,15	5,30	2,27	5,34	8,55
10		95,6		108,70	54,35	41,25	14,44	6,19	6,34	169,32

11		66,9		105,30	52,65	14,25	4,99	2,14	4,24	93,72
12		37,7		120,30	60,15	3,77	1,32	0,57	1,31	104,43
1		30,9	2008	130,30	65,15	3,09	1,08	0,46	0,63	56,13
2		25,7		109,50	54,75	2,57	0,90	0,39	0,52	91,30
3		44,5		131,10	65,55	4,45	1,56	0,67	0,74	52,28
4		40,6		122,70	61,35	4,06	1,42	0,61	0,79	85,92
5		149,1		99,80	49,9	99,20	34,72	14,88	13,41	800,42
6		144		94,30	47,15	96,85	33,90	14,53	18,51	1769,66
7		128,7		83,90	41,95	86,75	30,36	13,01	17,04	1139,69
8		125,1		105,40	52,7	72,40	25,34	10,86	14,55	548,71
9		120,2		84,00	42	78,20	27,37	11,73	14,51	448,31
10		92,9		121,20	60,6	32,30	11,31	4,85	8,74	224,66
11		150,9		79,30	39,65	111,25	38,94	16,69	16,62	739,39
12		28,4		131,40	65,7	2,84	0,99	0,43	6,71	272,43
1		44,3	2009	107,00	53,5	4,43	1,55	0,66	0,75	111,84
2		36,5		90,30	45,15	3,65	1,28	0,55	0,74	106,13
4		97,2		114,90	57,45	39,75	13,91	5,96	5,49	706,25
5		84,6		122,80	61,4	23,20	8,12	3,48	5,34	668,57
6		115		90,00	45	70,00	24,50	10,50	10,62	1276,33
7		180,5		159,20	79,6	100,90	35,32	15,14	17,39	1615,23
8		150,3		162,10	81,05	69,25	24,24	10,39	14,94	2254,73
9		74,5		107,80	53,9	20,60	7,21	3,09	6,68	189,66
10		83,5		104,90	52,45	31,05	10,87	4,66	5,30	234,65
11		62,1		63,10	31,55	30,55	10,69	4,58	5,83	212,62
12		9,8		122,60	61,3	0,98	0,34	0,15	1,87	181,69
1		2,2	2010	148,80	74,4	0,22	0,08	0,03	0,09	7,19
2		35,1		136,50	68,25	3,51	1,23	0,53	0,48	55,06
3		45,6		129,80	64,9	4,56	1,60	0,68	0,81	145,39
4		148,1		120,30	60,15	87,95	30,78	13,19	11,94	1794,81
5		137,9		128,10	64,05	73,85	25,85	11,08	14,82	1103,77
6		112,1		122,20	61,1	51,00	17,85	7,65	10,98	916,66
7		125,8		132,70	66,35	59,45	20,81	8,92	10,80	670,66
8		72		94,40	47,2	24,80	8,68	3,72	6,68	65,45
9		59,9		110,50	55,25	4,65	1,63	0,70	2,03	4,46
10		138,5		143,70	71,85	66,65	23,33	10,00	9,12	320,02
11		101,9		108,70	54,35	47,55	16,64	7,13	10,11	461,01
12		54,7		170,30	85,15	5,47	1,91	0,82	3,43	508,48
1		11,9	2011	157,00	78,5	1,19	0,42	0,18	0,47	64,74
2		63,1		151,40	75,7	6,31	2,21	0,95	0,91	101,55
3		128,5		128,10	64,05	64,45	22,56	9,67	8,92	1122,11

4		208,7		136,50	68,25	140,45	49,16	21,07	22,32	1607,33
5		212,3		143,30	71,65	140,65	49,23	21,10	26,68	1597,95
6		129,8		125,00	62,5	67,30	23,56	10,10	16,95	2346,97
7		131,2		97,60	48,8	82,40	28,84	12,36	14,78	1505,66
8		80		141,40	70,7	9,30	3,26	1,40	5,93	324,15
9		96,9		140,50	70,25	26,65	9,33	4,00	4,07	48,42
10		123,2		122,00	61	62,20	21,77	9,33	9,78	617,04
11		217,8		135,70	67,85	149,95	52,48	22,49	23,46	3014,33
12		39,2		159,70	79,85	3,92	1,37	0,59	9,06	1890,11
1		25,7	2012	154,20	77,1	2,57	0,90	0,39	0,56	119,84
2		55,3		158,10	79,05	5,53	1,94	0,83	0,88	114,33
3		115,1		121,60	60,8	54,30	19,01	8,15	7,53	987,57
4		237,4		110,50	55,25	182,15	63,75	27,32	27,29	2182,81
5		93,1		127,60	63,8	29,30	10,26	4,40	14,26	1381,86
6		150,7		113,50	56,75	93,95	32,88	14,09	14,15	1742,89
7		225		85,80	42,9	182,10	63,74	27,32	29,54	6432,84
8		121,7		110,90	55,45	66,25	23,19	9,94	19,17	751,30
9		65,3		76,10	38,05	27,25	9,54	4,09	7,39	189,94
10		78,7		124,30	62,15	16,55	5,79	2,48	3,75	207,35
11		72,2		129,90	64,95	7,25	2,54	1,09	1,91	219,28
12		55,2		149,30	74,65	5,52	1,93	0,83	1,15	272,04
1		1,7	2013	151,20	75,6	0,17	0,06	0,03	0,34	31,36
2		24,8		105,50	52,75	2,48	0,87	0,37	0,34	51,10
3		108		119,80	59,9	48,10	16,84	7,22	6,53	1469,26
4		120,1		132,90	66,45	53,65	18,78	8,05	9,86	1200,47
5		154,1		104,70	52,35	101,75	35,61	15,26	16,57	1081,95
6		74		97,90	48,95	25,05	8,77	3,76	9,12	717,70
7		168,2		108,80	54,4	113,80	39,83	17,07	16,54	1194,29
8		131,8		95,50	47,75	84,05	29,42	12,61	17,64	973,84
9		80,7		125,00	62,5	18,20	6,37	2,73	7,20	12,24
10		70		177,20	88,6	7,00	2,45	1,05	1,97	48,75
11		153,6		157,10	78,55	75,05	26,27	11,26	10,37	1119,64
12		41,8		135,30	67,65	4,18	1,46	0,63	4,83	579,77

Fuente: Autoría propia

Producto de los cálculos anteriores, se pueden estimar los valores promedios de los meses a nivel multianual, dando como resultado los datos que se muestran en la tabla No. 71:

Tabla 71. Resultados de caudales medios mensuales método municipio N3 (m³/s)

CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m³/s)	
MES	METODOLOGÍA MUNICIPIO N3
Enero	0,005
Febrero	0,010
Marzo	0,026
Abril	0,084
Mayo	0,133
Junio	0,185
Julio	0,206
Agosto	0,158
Septiembre	0,078
Octubre	0,060
Noviembre	0,064
Diciembre	0,026

Fuente: Autoría propia

Los caudales medios, máximos y mínimos obtenidos se muestran en la tabla No. 72:

Tabla 72. Resumen de caudales mensuales método municipio N3 (m³/s)

CAUDALES OBTENIDOS (m³/s)	
Q medio (m ³ /s)	0,0856852
Q máximo (m ³ /s)	0,4360410
Q mínimo (m ³ /s)	0,0008586

Fuente: Autoría propia

7.1.4 Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N4 en Cundinamarca.

Para el desarrollo de esta metodología, el autor emplea un modelo hidrológico del balance hídrico, partiendo de los valores de temperatura y precipitación de la cuenca.

7.1.4.1 Cálculo del caudal mínimo.

De los datos de la estación SILOS se extraen los valores medios mensuales de precipitación obtenidos en el IDEAM. Estos valores se muestran en la tabla No. 73:

Tabla 73. Valores de precipitación mensual multianual-SILOS (mm)

PRECIPITACIÓN MENSUAL MULTIANUAL SILOS (mm)												
AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1974				114,6	82,7	127,1	166,5	92,7	64,5	53,4	69,9	3,6
1975	9	56,7	38,4	80,5	60,8	146,8					36,2	131,3
1976		32,6	57	127	136,7	204,7	258,4	138,4	84,3	101,8	76,4	24,1
1977	0,2	10,6	28,4	141,7	63,7	112,4	152,9	89,3	111,2	39,1	51,9	14,1
1979	6,6	28,2	53,3	148,6	98,2	143,5	127,5	113,7	19,9		108,8	70
1980	31,8	23,3	31,2	100,7	107,9	222,8	125,6	107,9	86,7	77,3	35,1	20
1981	1,1	38,3	25,4	159,1	154	100,5	76,1	71,1	71,3	79,7	56,3	26
1982	9,8	24,8	81,8	145,4	109,3	110,6	176,1	168,9	86,1	78,6	51,3	23,1
1983	20,9	84,9	50,2	104,4	68,8	89,4	171,5	105	64,4	85,4	18,8	26,2
1984	16,1	34,5	35	91,7	79,4	189	93,2	116,2	87,7	45,5	59,7	15,1
1985	8,3	7,4	90,9	63,2	130	169,7	121,3	78,9	86,8	116,5	108,4	54,1
1986	9,2	95,3	48,5	53,9	88,3	223,1	239,9	97,3	81	119,6	62,9	21,7
1987	12,4	32,5	7,7	89,8	127,1	124,1	160,2	97,7	62,3	82,1	59,2	33,1
1988					74			46,7	54,9	66,5	82,3	67,4
1989	15,5	32	59,8	45,3	175,4	133,1	194,4	49,8	63,9	50,4	40,5	36,3
1990	17,4	37,2	72,4	67,5	206	144	101,5	105,4	31,4	79,5	42,6	51,7
1991	12,8	37,1	85,5	56,6	65,3	92,1	250,9	188	65,1	53,3	47,4	18,7
1992	15	26,6	19,3	82,7	51,4	89,8	212,7	101,3	77,5	38,8	84,9	12,5
1993	25,9	13	78,6	49,7	105,5	168,9	148,9	60,7	74,6	44,4		
1994						60,1	38,6	97	77,4	121,6		1,9
1995				79,1	79,3	91,6	83,6	80,3	36,7	41,1	34,7	48,3
1996	30,8	85,8	97,9	51,9	99,1	106,6	162,2	102,3	67,9	84,1	44	44,3
1997	50,7	38,2	25,7	17,4	140,5	128,1	288,8	143,2	24	26,1	24,5	0
1998	2,6	18,9	70,5	12	159	162,1	137,9	41	24,4	41	42,6	17
1999	26	29,4	33,2	112,6	26,6	59,9	23,1	53,1	74,8	38,2	46,2	5,2
2000	24,6	43,8	93,8	86,3	128,7	157,2	90,9	155,8	112,8	100,9	53,2	
2001			28,8	43,2	76,5	143,5	107,2	195,7	107,7	47,6	77,1	49,7
2002	16	17,9	89,9	103,2	162,9	239,5	194,9	213,5	64	64,4	63,4	20,9
2003			100,8	56,1	130,1	103,5	176	76,4	82,6	96,8	44,4	
2004								125,2	71,2	107	64,5	31
2005	17,2	31,1	37,3	91,5	139,1	97,7	114,8	140,4	118,3	104,3	88,4	10,3
2006	30,7	13,9	60,4	168,4	114,7	199,3	170,3	93,1	42,1	128,6	63,6	29,5
2007	1,6	26,7	22,1	79,6	89,8	176,5	70,9	108,4	59,7	95,6	66,9	37,7
2008	30,9	25,7	44,5	40,6	149,1	144	128,7	125,1	120,2	92,9	150,9	28,4
2009	44,3	36,5	53,4	97,2	84,6	115	180,5	150,3	74,5	83,5	62,1	9,8
2010	2,2	35,1	45,6	148,1	137,9	112,1	125,8	72	59,9	138,5	101,9	54,7
2011	11,9	63,1	128,5	208,7	212,3	129,8	131,2	80	96,9	123,2	217,8	39,2
2012	25,7	55,3	115,1	237,4	93,1	150,7	225	121,7	65,3	78,7	72,2	55,2
2013	1,7	24,8	108	120,1	154,1	74	168,2	131,8	80,7	70	153,6	41,8
Promedio	17,061	36,2875	59,37941	96,55	112,4837	136,291892	149,894444	108,823684	71,9657895	78,2702703	69,3135135	32,6083333

Fuente: Autoría propia

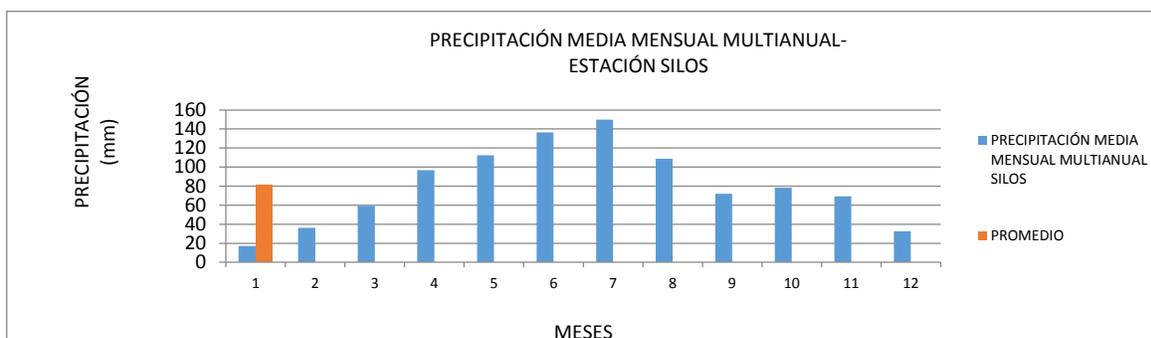
Se extraen los valores promedios mensuales y el promedio mensual multianual, resultados que se pueden apreciar en la tabla No. 74:

Tabla 74. Valores de precipitación media mensual -SILOS (mm)

PROMEDIO PRECIPITACIÓN MENSUAL SILOS (mm)	
ENERO	17,06
FEBRERO	36,29
MARZO	59,38
ABRIL	96,55
MAYO	112,48
JUNIO	136,29
JULIO	149,89
AGOSTO	108,82
SEPTIEMBRE	71,97
OCTUBRE	78,27
NOVIEMBRE	69,31
DICIEMBRE	32,61
PROM	80,74

Fuente: Autoría propia

La gráfica de estos datos se aprecia a continuación:



Gráfica 18. Precipitación media mensual multianual- estación SILOS (mm).

Fuente: Autoría propia

7.1.4.2 Cálculo del balance hídrico.

El balance hídrico se realizó comparando mensualmente la ETP y la precipitación neta, encontrando inicialmente un sobrante o un déficit.

Cuando escasea el agua en el suelo, la evapotranspiración real (ETR) es inferior a la potencial existiendo escasez o falta de agua. Lo contrario, es decir, cuando hay abundancia de agua en el suelo, permiten la ocurrencia de la infiltración y por ende la recarga hacia los acuíferos.

En términos generales, en un balance hídrico se debe cumplir que las entradas de flujo (I) menos las salidas (O), son el equivalente al almacenamiento en la zona de estudio (ΔS), es decir:

$$I - O = \Delta S$$

Es importante resaltar que, la recarga obtenida mediante los balances hídricos, es la cantidad potencial del agua que pudiera ingresar a los acuíferos mediante la infiltración.

7.1.4.3 Cálculo de la Evapotranspiración.

Los datos de evapotranspiración son estimados a partir de los datos de temperatura con la ecuación de Thornthwaite para el cual, la evapotranspiración potencial se define a partir de la siguiente ecuación:

$$E_j = 16 \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

Dónde:

- E_j es la evapotranspiración potencial mensual del mes j, no ajustada
- T_j la temperatura media mensual del mes j (en °C)

– I el índice de calor que se define a partir de la siguiente expresión:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49$$

Los valores de E_j deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días en el mes.

$$E_{j \text{ corr}} = E_j * L$$

$$L = N_{\text{días}}/30 * N_{\text{horassol}}/12$$

En la tabla No. 75, se presenta el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos de temperatura, calculando el índice de calor “I” y el coeficiente “a” para la cuenca de la zona, objeto del presente estudio a nivel mensual.

Tabla 75. Valores de evapotranspiración “Ej corregido” -SILOS (mm)

PARÁMETROS	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	I	a
Temperatura media °C	12,00	12,50	12,70	12,80	12,60	11,80	11,30	11,60	11,80	12,40	12,70	12,20		
I	3,76	4,00	4,10	4,15	4,05	3,67	3,44	3,58	3,67	3,96	4,10	3,86	46,3386758	1,22199803
Ej (cm)	5,12	5,38	5,49	5,54	5,43	5,01	4,76	4,91	5,01	5,33	5,49	5,22		
F. corrección	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02		
Ej corregido(cm)	5,22	5,00	5,65	5,65	5,76	5,17	5,04	5,16	5,07	5,49	5,43	5,32		

Fuente: Autoría propia

7.1.4.4 Balance Hídrico.

Partiendo de los datos de precipitación (mm) y evapotranspiración EVT obtenidos anteriormente, se procede a elaborar el balance hídrico cuyos cálculos se muestran en la siguiente tabla No. 76:

Tabla 76. Cálculo de la recarga por balance hídrico método municipio N4

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T(oC)	12,00	12,50	12,70	12,80	12,60	11,80	11,30	11,60	11,80	12,40	12,70	12,20
l	3,76	4,00	4,10	4,15	4,05	3,67	3,44	3,58	3,67	3,96	4,10	3,86
a	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Ei(mm)	51,18	53,80	54,85	55,38	54,32	50,14	47,56	49,10	50,14	53,27	54,85	52,22
FC	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
TP corr (mm)	52,18	50,00	56,50	56,50	57,61	51,67	50,43	51,58	50,70	54,90	54,29	53,20

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P(mm)	17,06	36,29	59,38	96,55	112,48	136,29	149,89	108,82	71,97	78,27	69,31	32,61
ETR (mm)	17,06	36,29	56,50	56,50	57,61	51,67	50,43	51,58	50,70	54,90	54,29	32,61
Déficit (mm) /Tpcorr-ETR	35,12	13,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,59
Recarga (mm) (P-ETR)	0,00	0,00	2,88	40,05	54,87	84,62	99,46	57,24	21,27	23,37	15,02	0,00
Recarga-Déficit (mm)	-35,12	-13,71	2,88	40,05	54,87	84,62	99,46	57,24	21,27	23,37	15,02	-20,59

Fuente: Autoría propia

Para el cálculo de la evapotranspiración real EVTR, se deben cumplir las siguientes dos condiciones:

- ❖ Si $P \geq ETP$ Entonces $ETR = ETP$
- ❖ Si $P \leq ETP$ Entonces $ETR = P * \Delta$ de almacenamiento

Teniendo en cuenta lo anterior y que 1 mm equivale a 1 l/m² y que el área de la cuenca en estudio es de 10'748.573 m², se obtiene el balance hídrico para la cuenca en estudio, el cual se muestra en la tabla No. 77.

Tabla 77. Cálculo de caudales medios método municipio N4

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
RECARGA (mm)	0,00	0,00	2,88	40,05	54,87	84,62	99,46	57,24	21,27	23,37	15,02	0,00
RECARGA (l/m²)	0,00	0,00	2,88	40,05	54,87	84,62	99,46	57,24	21,27	23,37	15,02	0,00
DÍAS DEL MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
CAUDAL (m³/s)	0,000	0,000	0,012	0,166	0,220	0,351	0,399	0,230	0,088	0,094	0,062	0,000

Fuente: Autoría propia

Los valores de caudales hallados por este método, se muestran en la tabla No. 78.

Tabla 78. Resumen de caudales mensuales método municipio N4

Caudal medio (m³/s)	0,135
Caudal máximo (m³/s)	0,399
Caudal mínimo (m³/s)	0,000

Fuente: Autoría propia

7.1.5 Desarrollo del método empleado en el estudio del municipio N5 en Cundinamarca.

En primer lugar basado en la precipitación media y una ecuación de regionalización desarrollada por el mismo autor, se encuentran los valores de caudal medio y los caudales medios para cada década del año.

Partiendo de la información de la fuente instrumentada, se utilizan los valores de la precipitación de la estación SILOS, obteniéndose los valores mostrados en la tabla No. 79.

Tabla 79. Precipitación mensual multianual (mm) estación SILOS

PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)- ESTACIÓN SILOS														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Número de meses	TOTAL ANUAL (mm)
1974				114,6	82,7	127,1	166,5	92,7	64,5	53,4	69,9	3,6	9	
1975	9	56,7	38,4	80,5	60,8	146,8					36,2	131,3	8	
1976		32,6	57	127	136,7	204,7	258,4	138,4	84,3	101,8	76,4	24,1	11	
1977	0,2	10,6	28,4	141,7	63,7	112,4	152,9	89,3	111,2	39,1	51,9	14,1	12	815,50
1979	6,6	28,2	53,3	148,6	98,2	143,5	127,5	113,7	19,9		108,8	70	11	
1980	31,8	23,3	31,2	100,7	107,9	222,8	125,6	107,9	86,7	77,3	35,1	20	12	970,30
1981	1,1	38,3	25,4	159,1	154	100,5	76,1	71,1	71,3	79,7	56,3	26	12	858,90
1982	9,8	24,8	81,8	145,4	109,3	110,6	176,1	168,9	86,1	78,6	51,3	23,1	12	1065,80
1983	20,9	84,9	50,2	104,4	68,8	89,4	171,5	105	64,4	85,4	18,8	26,2	12	889,90
1984	16,1	34,5	35	91,7	79,4	189	93,2	116,2	87,7	45,5	59,7	15,1	12	863,10
1985	8,3	7,4	90,9	63,2	130	169,7	121,3	78,9	86,8	116,5	108,4	54,1	12	1035,50
1986	9,2	95,3	48,5	53,9	88,3	223,1	239,9	97,3	81	119,6	62,9	21,7	12	1140,70
1987	12,4	32,5	7,7	89,8	127,1	124,1	160,2	97,7	62,3	82,1	59,2	33,1	12	888,20
1988					74			46,7	54,9	66,5	82,3	67,4	6	
1989	15,5	32	59,8	45,3	175,4	133,1	194,4	49,8	63,9	50,4	40,5	36,3	12	896,40
1990	17,4	37,2	72,4	67,5	206	144	101,5	105,4	31,4	79,5	42,6	51,7	12	956,60
1991	12,8	37,1	85,5	56,6	65,3	92,1	250,9	188	65,1	53,3	47,4	18,7	12	972,80
1992	15	26,6	19,3	82,7	51,4	89,8	212,7	101,3	77,5	38,8	84,9	12,5	12	812,50
1993	25,9	13	78,6	49,7	105,5	168,9	148,9	60,7	74,6	44,4			10	
1994						60,1	38,6	97	77,4	121,6		1,9	6	
1995				79,1	79,3	91,6	83,6	80,3	36,7	41,1	34,7	48,3	9	
1996	30,8	85,8	97,9	51,9	99,1	106,6	162,2	102,3	67,9	84,1	44	44,3	12	976,90
1997	50,7	38,2	25,7	17,4	140,5	128,1	288,8	143,2	24	26,1	24,5	0	12	907,20
1998	2,6	18,9	70,5	12	159	162,1	137,9	41	24,4	41	42,6	17	12	729,00
1999	26	29,4	33,2	112,6	26,6	59,9	23,1	53,1	74,8	38,2	46,2	5,2	12	528,30
2000	24,6	43,8	93,8	86,3	128,7	157,2	90,9	155,8	112,8	100,9	53,2		11	
2001			28,8	43,2	76,5	143,5	107,2	195,7	107,7	47,6	77,1	49,7	10	
2002	16	17,9	89,9	103,2	162,9	239,5	194,9	213,5	64	64,4	63,4	20,9	12	1250,50
2003			100,8	56,1	130,1	103,5	176	76,4	82,6	96,8	44,4		9	
2004								125,2	71,2	107	64,5	31	5	
2005	17,2	31,1	37,3	91,5	139,1	97,7	114,8	140,4	118,3	104,3	88,4	10,3	12	990,40
2006	30,7	13,9	60,4	168,4	114,7	199,3	170,3	93,1	42,1	128,6	63,6	29,5	12	1114,60
2007	1,6	26,7	22,1	79,6	89,8	176,5	70,9	108,4	59,7	95,6	66,9	37,7	12	835,50
2008	30,9	25,7	44,5	40,6	149,1	144	128,7	125,1	120,2	92,9	150,9	28,4	12	1081,00
2009	44,3	36,5	53,4	97,2	84,6	115	180,5	150,3	74,5	83,5	62,1	9,8	12	991,70
2010	2,2	35,1	45,6	148,1	137,9	112,1	125,8	72	59,9	138,5	101,9	54,7	12	1033,80
2011	11,9	63,1	128,5	208,7	212,3	129,8	131,2	80	96,9	123,2	217,8	39,2	12	1442,60
2012	25,7	55,3	115,1	237,4	93,1	150,7	225	121,7	65,3	78,7	72,2	55,2	12	1295,40
2013	1,7	24,8	108	120,1	154,1	74	168,2	131,8	80,7	70	153,6	41,8	12	1128,80
Prom	17,06	36,29	59,38	96,55	112,48	136,29	149,89	108,82	71,97	78,27	69,31	32,61		980,44

7.1.5.1 Cálculo del caudal mínimo.

Como análisis preliminar para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico se realizó una estimación del caudal medio a partir del cálculo de caudales con base en valores de rendimientos medios de las cuencas de la región (regionalización).

La regionalización de caudales se basa en las variables de área de drenaje y precipitación y fue desarrollada por este autor para cuencas ubicadas en la región andina colombiana, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Q_{med} = a \times A^b \times P^c$$

Ecuación para el cálculo del caudal medio por regionalización

Dónde:

- Qmed: Caudal Medio (m³/s).
- A: Área de la cuenca (km²).
- P: Precipitación media de la cuenca (mm/año).

Los coeficientes a, b y c fueron determinados a partir de técnicas de ajuste por regresión usando la transformación logarítmica de las variables:

- a: 4,322 x 10-07
- b: 1,009
- c: 1,476

A través de la ecuación de regresión se obtiene el caudal medio multianual asociado a cada una de las subcuencas identificadas para los sitios propuestos de captación.

En la tabla No. 80 se muestran los caudales medios obtenidos para la fuente estudiada:

Tabla 80. Caudal medio anual quebrada Granadillo (m³/s)

QMEDIO ANUAL (m³/s)		
Área cuenca	10,75	km ²
Prep (mm/año)	980,44	(mm/año)
a	4,322E-07	
b	1,009	
c	1,476	
Qmed	0,12351319	m ³ /s

Fuente: Autoría propia

Con la información anterior, se procede a efectuar el cálculo de los caudales decadales y de los caudales medios mensuales, cuyos resultados se muestran en la tabla No. 81.

Para calcular el caudal decadal medio se utilizó la siguiente expresión:

$$Q_x = Q_m * \frac{P_y}{\bar{P}_y}$$

Dónde:

- Qx: Caudal en la década x
- Qm: Caudal medio anual
- Px: Precipitación media en la década x
- \bar{P}_x : Precipitación decadal promedio.

Tabla 81. Caudales decadales y caudales medios mensuales (m³/s)

MES	No. Décadas	Prec. media Decadal (mm)	Caudal (m ³ /s)	Q med mensual (m ³ /s)
Enero	1	4,59	0,02	0,02
	2	5,06	0,02	
	3	6,24	0,03	
Febrero	4	10,39	0,05	0,06
	5	13,83	0,06	
	6	14,02	0,06	
Marzo	7	16,49	0,07	0,09
	8	20,23	0,09	
	9	23,95	0,11	
Abril	10	25,88	0,12	0,14
	11	34,01	0,15	
	12	36,94	0,17	
Mayo	13	35,00	0,16	0,17
	14	36,31	0,16	
	15	41,44	0,19	
Junio	16	35,20	0,16	0,23
	17	46,65	0,21	
	18	72,60	0,32	
Julio	19	52,37	0,23	0,23
	20	48,99	0,22	
	21	51,11	0,23	
Agosto	22	40,69	0,18	0,16
	23	36,13	0,16	
	24	33,10	0,15	
Septiembre	25	28,68	0,13	0,11
	26	22,73	0,10	
	27	20,38	0,09	
Octubre	28	25,69	0,11	0,12
	29	27,62	0,12	
	30	25,00	0,11	
Noviembre	31	23,21	0,10	0,10
	32	24,62	0,11	
	33	21,95	0,10	
Diciembre	34	16,24	0,07	0,05

MES	No. Décadas	Prec. media Decadal (mm)	Caudal (m ³ /s)	Q med mensual (m ³ /s)
	35	8,33	0,04	
	36	8,84	0,04	
Promedio		27,63	0,12	

Caudal medio	0,124	m³/s
Caudal máximo	0,325	m³/s
Caudal mínimo	0,021	m³/s

Fuente: Autoría propia

Capítulo 8

Conclusiones, observaciones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

El presente proyecto ha contribuido de manera importante para identificar y analizar las diferentes metodologías usadas por los hidrólogos respecto a las fuentes de abastecimiento no instrumentadas. Nos deja muchas cosas importantes que reflexionar y muchas otras las ha reforzado como puntos angulares para llevar a cabo un buen estudio hidrológico de una fuente con escasa información hidroclimatológica.

Como mencionamos a lo largo de este documento uno de los problemas más frecuentes para el diseño de un sistema de acueducto y/o riego es el no contar con información hidroclimatológica que permita obtener los caudales de diseño de las diferentes estructuras.

En la introducción de este documento hablamos sobre cuáles son los objetivos que se desean lograr con el proyecto y mencionamos que la falta de información hidrometeorológica y en muchas ocasiones su baja calidad, hacen que los ingenieros hidrólogos se vean obligados a recurrir a diversos medios de cálculo, con el fin de estimar los parámetros necesarios para el cálculo de los caudales de diseño.

Otro punto que consideramos clave para llevar a cabo este proyecto, consistió en revisar la subjetividad de los resultados de cada metodología empleada y analizar de modelos de estimación de caudales de diseño realizados por diferentes autores, con el fin de establecer criterios y recomendar las metodologías más apropiadas para la realización de estos análisis.

Las tablas No. 82 y No. 83, muestran un comparativo de los resultados de caudales medios mensuales calculados por los diferentes métodos y los caudales reales medidos en la estación limnimétrica.

Tabla 82. Comparativo de resultados de caudales (m³/s)

MES	FUENTE INSTRUMENTADA	METODOLOGÍA MUNICIPIO N2	METODOLOGÍA MUNICIPIO N3	METODOLOGÍA MUNICIPIO N4	METODOLOGÍA MUNICIPIO N5
	Q (m ³ /s)				
Enero	0,050	0,079	0,005	-	0,020
Febrero	0,042	0,059	0,010	-	0,060
Marzo	0,058	0,077	0,026	0,012	0,090
Abril	0,223	0,067	0,084	0,166	0,140
Mayo	0,616	0,059	0,133	0,220	0,170
Junio	0,889	0,077	0,185	0,351	0,230
Julio	1,012	0,153	0,206	0,399	0,230
Agosto	1,087	0,216	0,158	0,230	0,160
Septiembre	0,514	0,184	0,078	0,088	0,110
Octubre	0,361	0,174	0,060	0,094	0,120
Noviembre	0,271	0,146	0,064	0,062	0,100
Diciembre	0,153	0,108	0,026	-	0,050
Q medio (m ³ /s)	0,440	0,117	0,086	0,135	0,120
Q máximo (m ³ /s)	1,087	0,242	0,436	0,399	0,320
Q mínimo (m ³ /s)	0,042	0,046	0,001	-	0,020

Fuente: Autoría propia

Tabla 83. Diferencia porcentuales del caudal medido (fuente instrumentada) Vs. Caudales calculados metodologías (%)

MES	METODOLOGÍA MUNICIPIO N2	METODOLOGÍA MUNICIPIO N3	METODOLOGÍA MUNICIPIO N4	METODOLOGÍA MUNICIPIO N5
Enero	57%	-90%	-100%	-60%
Febrero	42%	-76%	-100%	44%
Marzo	33%	-56%	-120%	55%
Abril	-70%	-62%	-174%	-37%
Mayo	-90%	-78%	-136%	-72%
Junio	-91%	-79%	-139%	-74%
Julio	-85%	-80%	-139%	-77%
Agosto	-80%	-86%	-121%	-85%
Septiembre	-64%	-85%	-117%	-79%
Octubre	-52%	-83%	-126%	-67%
Noviembre	-46%	-76%	-123%	-63%
Diciembre	-30%	-83%	-100%	-67%
RESULTADOS				
Caudales	-40%	-78%	-125%	-49%
Q medio (m ³ /s)	-73%	-81%	-131%	-73%
Q máximo (m ³ /s)	-78%	-60%	-137%	-71%
Q mínimo (m ³ /s)	12%	-98%	-100%	-52%

Fuente: Autoría propia

En general todos los métodos estudiados dieron como resultado caudales menores a los promedios extractados de los datos leídos en la estación, incluso para el método del Servicio de Conservación de Suelos, SCS (Municipio N2), que en promedio presentó la mejor aproximación, el cual, en algunos meses, arrojó diferencias superiores al 90%.

El método que arroja resultados más disímiles respecto a los caudales reales medidos en la fuente instrumentada, corresponde al utilizado en el municipio N4 que tiene en cuenta únicamente los datos de precipitación y evapotranspiración teórica calculada con la fórmula de Thornthwaite. Se hace notorio que el no tener en cuenta las características morfológicas de la cuenca, introduce factores amplios de error.

El método utilizado en el análisis del municipio N2 (Servicio de Conservación de Suelos, SCS) fue el que en promedio presentó mejor aproximación respecto a los datos de la fuente instrumentada, aunque en algunos meses, estas diferencias fueron mayores al 90%. El caudal mínimo calculado por este método, difiere únicamente en un 12% del caudal mínimo real que históricamente ha presentado la fuente.

El hecho de que el método de la SCS sea el que utilice un mayor número de parámetros morfológicos de la fuente y que este método sea igualmente el que menor inexactitud presentó, es un indicador de la importancia que tiene parámetros tales como la pendiente de la cuenca, la clase de suelos y el tipo de cobertura vegetal en la forma como la lluvia aporta caudales a las fuentes.

Los autores del presente proyecto de grado, se esforzaron por encontrar fuentes de información veraces para caracterizar los suelos y la cobertura vegetal de la cuenca. Los estudios realizados en desarrollo del presente trabajo, se basaron en foto interpretación de expertos profesionales para el caso de la cobertura vegetal y estudios semi detallados de empresas consultoras contratadas por la gobernación de Cundinamarca para el caso de los suelos. La importancia dada a la determinación de estos factores, puede quizás explicar la aproximación de los resultados encontrados, sin embargo existen métodos de campo que podrían aportar mayor exactitud a la hora de calificar estos factores, métodos que en los estudios hidrológicos deberían ser considerados para lograr mejores resultados.

Muchas veces con el fin de dotar a los estudios de un factor de seguridad acerca de los resultados de caudales encontrados, se definen caudales de trabajo menores a los calculados por alguno de los métodos aquí expuestos. Si se acepta como cierto el hecho de que estos caudales siempre darán menores a los que puede medir una estación limnimétrica en el cauce, esta práctica puede resultar en la descalificación de fuentes de abastecimiento que en realidad podrían llegar a sostener adecuadamente los consumos de un sistemas de acueducto o riego.

Se evidenció en los proyectos estudiados que es práctica muy común que los especialistas se limiten a aportar valores de caudales medios mensuales o mínimos como único factor de valoración de la capacidad de la fuente para abastecer un

sistema. Esto puede inducir a los ingenieros diseñadores o evaluadores a rechazar una fuente por el hecho de que presenta un caudal mínimo inferior al caudal de diseño necesario.

8.2 Observaciones

La Resolución 865 de 2004 del 22 de julio de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece:

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. Según esta resolución, 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.

Bell (1969), estudió las razones entre lluvias de distinta duración e igual período de retorno, y también la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual

duración. Para ello utilizó datos de un gran número de estaciones ubicadas en Estados Unidos Continental, Australia, Alaska, Rusia, Hawai, Puerto Rico y África. Dicho autor concluyó a partir de su estudio, que las razones entre lluvias de distinta duración e igual período de retorno y la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración, son muy constantes en todos los puntos estudiados debido a que las grandes intensidades se producen en tormentas convectivas, las cuales tienen gran independencia geográfica y regional.

Las referencias que realiza el RAS acerca de los estudios en la fuente de captación se encuentra en los capítulos:

- ❖ B.3.3.1.6 Estudios hidrológicos: El diseñador debe tener en cuenta los siguientes estudios hidrológicos: precipitación pluvial, escorrentía superficial, infiltración, evaporación, transpiración, etc. También debe tener en cuenta el resultado de estudios climatológicos que comprendan datos sistemáticos sobre intensidad y dirección de los vientos, intensidad de temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales. También debe conocer las características hidrográficas de la cuenca, datos, informaciones o estimaciones acerca de los niveles de agua máximo y mínimo de la fuente en el lugar donde se construirá la captación, si es posible, con la indicación de los periodos de retorno más probable. Es preferible que los datos de caudales y niveles de la fuente sean obtenidos de una estación limnimétrica ubicada en el mismo sitio de la captación. Igualmente, deben establecerse curvas de excedencia del caudal medio diario y el caudal máximo en épocas de creciente, con base en los registros de estaciones limnimétricas ubicadas en la cuenca en estudio. El diseñador también debe conocer la batimetría del área en donde quedará localizada la captación.
- ❖ B.3.3.2.5 Cantidad y caudal mínimo: En todos los casos, el caudal correspondiente al 95% de tiempo de excedencia en la curva de duración de caudales diarios, Q95, debe ser superior a dos veces el caudal medio diario si la captación se realiza por gravedad o si el sistema de acueducto incluye sistemas de almacenamiento, o superior a dos veces el caudal máximo horario si la captación si la captación se realiza por bombeo. Si el caudal Q95 en la fuente es insuficiente para cumplir el requerimiento anterior, pero el caudal promedio durante un período que abarque el

intervalo más seco del que se tenga registro es suficiente para cubrir la demanda, ésta puede satisfacerse mediante la construcción de uno o más embalses o tanques de reserva.

- ❖ B.3.3.2.6 Caudal mínimo aguas abajo: En todos los casos, la fuente debe tener un caudal tal que garantice un caudal mínimo remanente aguas abajo de las estructuras de toma con el fin de no interferir con otros proyectos, tanto de captación como de agricultura y piscicultura, preservando en todos los casos el ecosistema aguas abajo. Por consiguiente, el diseñador debe conocer los proyectos presentes y futuros que utilicen agua de la misma fuente del proyecto que está diseñando o construyendo.
- ❖ "Artículo 69. Período de diseño: Para todos los componentes del sistema de acueducto y alcantarillado se adoptan los periodos de diseño máximos establecidos en la tabla número 10, según el Nivel de Complejidad del sistema:

TABLA NÚMERO 10	
<i>Nivel de Complejidad del sistema</i>	<i>Período de diseño máximo</i>
<i>Bajo, Medio y Medio alto</i>	<i>25 años</i>
<i>Alto</i>	<i>30 años</i>

Fuente: RAS 2000

- ❖ En cumplimiento de estas disposiciones es posible extraer los siguientes aspectos principales:
- ❖ El estudio hidrológico para la determinación de caudales disponibles se debe realizar con base en caudales medios diarios.
- ❖ El periodo de retorno para caudales máximos debe estar en concordancia con los periodos de diseño recomendados en la tabla 10 (RAS 2000).
- ❖ El valor del caudal mínimo corresponde al 95% de tiempo de excedencia en la curva de duración de caudales diarios, Q_{95} , debe ser superior a dos veces el

caudal medio diario, de no cumplir este requisito se debe implementar un sistema de almacenamiento.

El RAS no hace referencia a la calidad y cantidad de los datos a utilizar para el análisis de caudales y niveles extremos, esto debido, seguramente, a la escases de los mismos en el país, por tanto debe ser criterio del diseñador la adopción de las estaciones pluviométricas, climatológicas o limnimétricas que vaya a utilizar.

Dos son los métodos utilizados por los autores de los estudios para hallar las curvas de intensidad - duración – frecuencia, ambos desarrollados tras regionalizaciones efectuadas por investigadores colombianos que básicamente encuentran valores de las constantes de formulaciones ya conocidas. El primer método explicado en el texto SILVA MEDINA Gustavo A. Hidrología básica, pág. 171. 1 ed. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. 1998, el cual utiliza las curvas normalizadas IDF de Bell (1969) aplicando constantes regionalizadas para las distintas áreas de Colombia.

El segundo método explicado en el texto “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad Duración Frecuencia para Colombia de Vargas M.R., Díaz – Granados D.M.” desestima el trabajo de Bell para su aplicación en Colombia ya que de su estudio se concluye que su aplicación arroja un error de +/- un 40% en el 50% de las estaciones evaluadas. Este segundo método basa sus resultados en una forma generalizada de la ecuación de Kothyari y Garde calibrando en las variables dividiéndolas por regiones de acuerdo a grupos de estaciones de medición reales en Colombia. Este último método es el de uso más popular en Colombia aunque como lo reconoce su propio autor, es necesario disponer de un mayor número de curvas reales ya que la confiabilidad de la calibración de las variables es directamente proporcional a la cantidad de datos con que se trabaje. Para el caso del presente estudio no existen estaciones pluviográficas cercanas a las corrientes de los estudios evaluados ni a la corriente escogida por lo que no fue posible estimar la exactitud de las curvas generadas.

Es los estudios evaluados es común encontrar la mezcla de teorías para el cálculo de tiempos de concentración, cuando se utiliza el método del SCS en el cálculo de los caudales máximos. Los autores de los estudios hidrológicos de los municipios

N2 y N3 optan por el cálculo del T_c mediante la fórmula de Kirpich y no la del SCS, manifestando que por arrojar un resultado menor, el caudal pico se aumenta, con lo que aseguran un mayor factor de seguridad al diseño.

HEC-HMS es un programa de computador que calcula el hidrograma producido por una cuenca si se tienen datos de esta y de las precipitaciones. El programa se esquematiza en diversas fases, las cuales se describen brevemente a continuación:

- ❖ Canopy, Surface, Loss: Separación de la lluvia neta, que equivale a calcular que parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa.
- ❖ Transform: Calcular la escorrentía directa producida por esa precipitación neta.
- ❖ BaseFlow: Sumar a la escorrentía directa la escorrentía básica, si existía previamente. Calcular la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo.
- ❖ Routing: Calcular cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o a través de un depósito o embalse.

El modelo meteorológico utiliza datos de precipitación, evapotranspiración y son asignados a las diversas subcuencas.

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

- ❖ Información acerca de la precipitación histórica o de diseño.
- ❖ Información acerca de las características del suelo.
- ❖ Información morfométrica de las subcuencas.
- ❖ Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
- ❖ Información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito).

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan:

- ❖ Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrógrafas)
- ❖ Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr)

Los autores de este trabajo de grado no encontraron justificación matemática alguna para la metodología de corrección empleada por el autor del estudio N3 para el cálculo de la precipitación en la zona de la captación, relacionada con los datos de precipitación de estaciones pluviométricas en el área cercana a la cuenca. Consideramos que esta corrección debe tener en cuenta principalmente diferencias de altura y no limitarse únicamente a extraer un promedio aritmético.

En dos de los estudios analizados los valores de lluvia puntual, son afectados por coeficientes de corrección de área y tiempo para poder extrapolados a la totalidad del área de la cuenca. En uno de ellos, el autor aduce que en áreas menores a 20 km² es posible que se presente una tormenta generalizada en toda la cuenca con valores promedio cercano a los máximos registrados; por tal razón para estas cuencas se utilizó el valor puntual de la precipitación. Este autor utilizó una curva de reducción en el área para lluvias convectivas deducida para E.U, que de acuerdo al autor, ha demostrado su aplicabilidad para este tipo de lluvias en el país (Wiesner, 1970). El otro autor no realiza selección alguna de áreas para la aplicación del factor de reducción y emplea la ecuación de Fhruling, aunque finalmente adopta un valor medio entre el coeficiente calculado por la fórmula de Fhruling y la unidad.

Solo en uno de los estudios se utilizó un factor de reducción en el tiempo. Para esto se empleó una curva desarrollada por el autor de los estudios, que según el mismo autor, ha sido deducida a partir de una extensa base de datos de precipitación en varias zonas del país.

Un elemento muy importante para la utilización del método del hidrograma del SCS, es la adopción del número de curva, parámetro en el que la mayoría de los autores no se detiene con el suficiente detalle, únicamente en uno de los estudios es considerada la cartografía existente y estudios de suelos para determinar las condiciones que se asignan a la escogencia del número de curva. Los demás

autores no indican las fuentes de consulta, los estudios previos o los criterios que los llevaron a la adopción de este importante parámetro.

Otro aspecto que nos parece relevante tratar aquí, son los criterios que los distintos autores poseen para la escogencia de las estaciones pluviométricas a utilizar en sus estudios. La principal razón para utilizar los datos de una estación, es su cercanía al punto en el que se realizará la obra. Dentro de las más cercanas se opta por escoger la estación que posea una altura sobre el nivel del mar similar a la del sitio de la obra.

Dentro de los criterios de rechazo de datos de una estación el principal, es la ausencia de un número de registros suficientes para llevar a cabo el estudio, aunque no se establece un criterio estricto para este factor.

8.3 Recomendaciones

Debido a que en la práctica de los estudios de hidrología es muy común que los especialistas se limiten a aportar valores de caudales medios mensuales o mínimos como único factor de valoración de la capacidad de la fuente para abastecer un sistema, los autores de este trabajo de grado recomiendan la elaboración de un análisis de frecuencias y un estudio de caudales diarios para tener un mejor conocimiento del comportamiento de la fuente y la evaluación de alternativas, tales como el almacenamiento, que ayuden a mejorar las condiciones hídricas de la fuente.

Con el fin de obtener resultados mucho más confiables, es necesario que los consultores destinen recursos económicos para proveer de información adicional tales como estudios de suelos y zonificación, de tal manera que los valores de cobertura vegetal, por ejemplo, no sean solamente a criterio del profesional en aras de su amplia experiencia, sino basado en un estudio de real de las condiciones del suelo.

Aun cuando los autores del presente trabajo de grado son conscientes de la dificultad que en términos económicos representa la instrumentación de la totalidad

de las fuentes de abastecimiento a lo largo del territorio nacional, se hace oportuno recomendar que en cierto grado se inicie esta labor, toda vez que disponer al menos de información real en fuentes de pequeña o mediana importancia en términos hídricos, teniendo en cuenta que son la gran mayoría de estas fuentes las que abastecen el sector urbano y rural de nuestros departamentos, se puede orientar de una manera más eficaz a los especialistas, para la selección de las fuentes que aseguren la permanencia del recurso durante el periodo de diseño. Tristemente a lo largo de nuestra geografía se pueden observar obras de gran relevancia desde el punto de vista hídrico para una región o regiones, las cuales a lo largo del tiempo se vuelven estructuras inoperantes, sobre diseñadas, costosas en su construcción, operación y mantenimiento y peor aún sin caudal suficiente para cumplir con la función para la cual fueron construidas.

Capítulo 9

Referencias Bibliográficas

Monsalve, S. G (2011). Hidrología en la Ingeniería 2 edición, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Reglamento de agua potable y saneamiento básico, RAS, Bogotá (2000).

Estudio general de suelos y zonificación de tierras en el Departamento de Cundinamarca-Tomo 1, Gobernación de Cundinamarca: IGAC (2000).

Silva, G, (1998). Modelo de Balance Hídrico.

Chow, V. M. (1988). Applied Hydrology. New York, EE.UU: McGraw Hill.

A, Martínez de Azaga, J Monguil y J del río (2003). Pequeña guía de uso del modelo MODIPE.

Jaime, P. J. A. Universidad Nacional de Huancavelica. Perú.