

2020

# ESTUDIO HIDROLÓGICO QUEBRADA MEMBRILLO GUAICO MUNICIPIO DE PASTO



Equipo Gestión Ambiental del Riesgo  
Subdirección de Conocimiento y Evaluación  
Ambiental  
CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE  
NARIÑO

**ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA MEMBRILLO GUAICO, MUNICIPIO  
DE PASTO**

**Elaboró:**

**Brayan Julián Torres Chazatar**

Mg. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

**Mario Andrés Quiroz Burbano**

Geógrafo

**Revisó:**

**Luis Carlos Rosero López**

Geólogo - Profesional Universitario

**Aprobó:**

**María Nathalia Moreno Santander**

Subdirectora de Conocimiento y Evaluación Ambiental

**Hugo Mideros López**

Director general COPORNARIÑO

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. OBJETIVOS .....   | 7  |
| 1.1 Objetivo general .....                                   | 7  |
| 1.2 Objetivos específicos. ....                              | 7  |
| 2. FUNDAMENTO TEORICO.....                                   | 7  |
| 2.1 Definición de los estudios hidrológicos.....             | 7  |
| 2.2 Modelo AFINS 2.0.....                                    | 8  |
| 2.3 Modelación pseudodistribuida de crecidas en Hec-HMS..... | 9  |
| 2.3.1 Componentes del sistema .....                          | 10 |
| 3. CARACTERÍSTICAS DE LA MICROCUENCA .....                   | 11 |
| 3.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - SIG.....            | 12 |
| 3.2 Modelo Digital de Elevación (DEM).....                   | 14 |
| 3.3 Red de drenaje y puntos de desagüe.....                  | 15 |
| 3.4 Características hidromorfométricas .....                 | 16 |
| 4. ESTUDIO HIDROLÓGICO .....                                 | 18 |
| 4.1 Análisis de datos pluviométricos .....                   | 18 |
| 4.2 Características del Clima y régimen de lluvias .....     | 24 |
| 4.3 Análisis de Homogeneidad.....                            | 26 |
| 4.4 Análisis estadístico de las precipitaciones máximas..... | 29 |
| 4.4.1 Función Gumbel.....                                    | 29 |
| 4.4.2 Función SQRT- et MÁX.....                              | 30 |
| 4.4.3 Función GEV.....                                       | 31 |
| 4.4.4 Función TCEV.....                                      | 32 |
| 4.5 Calculo de la curva IDF de la microcuenca .....          | 34 |
| 4.6 Ajuste a curvas sintéticas.....                          | 36 |
| 4.7 Tiempo de concentración .....                            | 38 |
| 4.8 Modelo de producción de escorrentía: modelo SCS.....     | 39 |
| 4.8.1 Umbral de escorrentía.....                             | 40 |
| 4.8.2 Clasificación hidrológica del suelo.....               | 42 |
| 4.8.3 Tipo de usos de suelo .....                            | 45 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.8.4 | Calculo de Po y CN para el área de estudio .....                        | 49 |
| 5.    | MODELACIÓN PSEUDODISTRIBUIDA DE CRECIDAS CON HEC-HMS.....               | 52 |
| 5.1   | Modelo de la cuenca. ....   | 52 |
| 5.2   | Método de modelación (Modelo de infiltración S.C.S. Curve Number) ..... | 53 |
| 5.3   | Hietogramas de Tormenta.....  | 53 |
| 5.4   | Resultados obtenidos en Hec-HMS.....                                    | 56 |
| 6.    | CONCLUSIONES.....   | 58 |
| 7.    | RECOMENDACIONES .....   | 60 |

## TABLA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Interfaz AFINS 2.0 .....   | 9  |
| Figura 2. Interfaz Hec -HMS .....  | 10 |
| Figura 3. Ubicación y delimitación del área de estudio de la quebrada Membrillo Guaico.<br>..... | 12 |
| Figura 4. Plan de Vuelo y Características de la ortofotografía EMPOPASTO. ....                   | 13 |
| Figura 5. Modelo Digital de Elevación - DEM. ....  | 14 |
| Figura 6. Red de drenaje del área de estudio .....   | 15 |
| Figura 7. Drenaje dendrítico. ....   | 16 |
| Figura 8. Polígonos de Thiessen para las Estaciones .....  | 19 |
| Figura 9. Serie de datos de precipitación Estación Botana .....                                  | 20 |
| Figura 10. Serie de datos de precipitación Estación Abonuco. ....                                | 21 |
| Figura 11. Regresión Lineal para el relleno de datos.....  | 22 |
| Figura 12. Régimen bimodal de lluvias en la ciudad de Pasto. ....                                | 26 |
| Figura 13. Resultados función de distribución Gumbel.....  | 30 |
| Figura 14. Resultados función de distribución SQRT-ET max. ....                                  | 31 |
| Figura 15. Resultados función de distribución GEV.....   | 32 |
| Figura 16. Resultados función de distribución TCEV.....  | 33 |
| Figura 17. Curva IDF a partir de los coeficientes en Brasil. ....                                | 36 |
| Figura 18. Ajuste de la curva IDF. ....  | 37 |
| Figura 19. Mapa de Suelos-IGAC.....  | 43 |
| Figura 20. Mapa tipologías de suelos hidrológicos. ....  | 45 |
| Figura 21. Mapa de usos de suelo .....   | 47 |
| Figura 22. Mapa del Numero de Curva CN (II) del área de estudio .....                            | 51 |
| Figura 23. Esquema del Área de drenaje de la quebrada Membrillo Guaico. ....                     | 52 |
| Figura 24. Diagrama de bloques alternos para T=2 años .....                                      | 54 |
| Figura 25. Diagrama de bloques alternos para T=5 años .....                                      | 54 |
| Figura 26. Diagrama de bloques alternos para T=25 años .....                                     | 55 |
| Figura 27. Diagrama de bloques alternos para T=50.....   | 55 |
| Figura 28. Hidrograma para T=2 años.....   | 56 |
| Figura 29. Hidrograma para T=5 años.....   | 57 |
| Figura 30. Hidrograma para T=25 años.....  | 57 |
| Figura 31. Hidrograma para T=50 años.....  | 58 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Características morfométricas del área de drenaje.....                 | 16 |
| Tabla 2. Información de las Estaciones cercanas.....                            | 18 |
| Tabla 3. Disponibilidad de datos de las Estaciones.....                         | 20 |
| Tabla 4. Precipitación máxima anual de la serie final. ....                     | 22 |
| Tabla 5. Datos de precipitación media mensual.....                              | 24 |
| Tabla 6. Estadísticos de la serie de precipitación máxima diaria. ....          | 26 |
| Tabla 7. Resultados prueba de Buishand.....                                     | 27 |
| Tabla 8. Resultados prueba de Pettitt.....                                      | 27 |
| Tabla 9. Resultados prueba SNHT.....  | 28 |
| Tabla 10. Coeficientes de distribución.....                                     | 34 |
| Tabla 11. Valores de precipitación para la distribución en 24 horas. ....       | 35 |
| Tabla 12. Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.....           | 35 |
| Tabla 13. Condiciones de humedad según el S.C.S.....                            | 41 |
| Tabla 14. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S. ....                 | 42 |
| Tabla 15. Tabla de conversión para tipos de usos de suelo.....                  | 44 |
| Tabla 16. Datos finales de suelos hidrológicos.....                             | 44 |
| Tabla 17. Relación de variables del S.C.S.....                                  | 48 |
| Tabla 18. Valores de CN (II) para el área de drenaje. ....                      | 50 |
| Tabla 19. Caudales máximos de diseño seleccionados para el área de estudio..... | 59 |

## INTRODUCCIÓN

En el marco de la formulación de las acciones de recuperación y conservación de la ronda hídrica de la quebrada Membrillo Guaico, en cumplimiento del fallo judicial dentro de la acción popular 2009-0150 proferido por el Tribunal Administrativo de Nariño, la Corporación Autónoma Regional de Nariño, se reunió el día 13 de agosto de 2018 en las instalaciones de la Alcaldía Municipal de Pasto para evaluar la situación de la quebrada en cuestión y de esta manera apoyar en las actuaciones requeridas para dar solución a la problemática ambiental. En este sentido, CORPONARIÑO asumió como compromiso la elaboración de un estudio hidrológico detallado, como insumo esencial para actuaciones que a futuro se pueden plantear en pro de la protección y conservación de esta fuente hídrica.

El desarrollo de este estudio comenzará con la definición de las características de la microcuenca, llevando a cabo un proceso de delimitación y consolidación de los parámetros propios de esta zona a partir de información a detalle. Seguido a esto, se analizará los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas, caracterizando el régimen de lluvias y obteniendo los valores máximos de lluvia interanual; con este proceso, se logrará obtener las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), a partir del análisis estadístico de las lluvias máximas.

Llevado a cabo el procesamiento de estos insumos, se construirá el modelo hidrológico caracterizando las coberturas del suelo, la tipología del terreno y la humedad de la zona. De esta manera se obtendrá al final los caudales generados en el área de drenaje a partir del uso de un software de simulación hidrológica para los diferentes periodos de retorno. Al final se mencionara algunas conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado para su posterior implementación.

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo general

Elaborar un estudio hidrológico detallado de la quebrada Membrillo Guaico, como insumo para el planteamiento de soluciones ambientales dirigidas al cuidado y preservación de esta fuente hídrica.

## 1.2 Objetivos específicos.

- Determinar los parámetros morfométricos principales de la corriente y su correspondiente área de drenaje.
- Analizar la información correspondiente a datos pluviométricos, identificando el régimen de lluvias de la zona de estudio y los valores máximos de precipitación.
- Obtener las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia IDF a partir de los datos de las estaciones.
- Elaborar el modelo de producción de escorrentía a partir de la metodología planteada por el Soil Conservation Service (S.C.S), aplicando la caracterización de coberturas vegetales, suelos y condiciones de humedad de la zona.
- Construir el modelo hidrológico y simulación de la lluvia de diseño a través del Software Hec-HMS.
- Obtención de los hidrogramas para diferentes periodos de retorno ( $T=2$ ,  $T=5$ ,  $T=25$ ,  $T=50$ )

# 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

## 2.1 Definición de los estudios hidrológicos

La modelación hidrológica hace referencia a la representación de los componentes del ciclo hidrológico o de algunas de ellas, en este documento se hace referencia de manera expresa a relaciones matemáticas de tales componentes para la evaluación de la dinámica del agua superficial. (IDEAM, 2018)

La hidrología juega un papel importante en la vida, planificación y uso de los recursos hídricos en todo el mundo, llegando a convertirse en una pieza clave en todo tipo de proyectos de ingeniería que están relacionados con este ámbito. Para ello, es necesario

conocer el comportamiento del agua que fluye a través de los ríos, quebradas, lagos y arroyos en la cuenca. (ENVIROSOIL, 2020)

Los estudios hidrológicos se construyen a partir del enfoque de la necesidad, por ejemplo, en el caso de estudios de gestión del riesgo, donde se analizan fenómenos de amenaza como inundaciones y avenidas torrenciales, la visión del componente hidrológico está basado en definir cuáles son las condiciones extremas que desencadenan estos eventos, en tal sentido, se analizan los valores máximos de las variables y se construyen modelos que transformen esas fuertes lluvias en caudales finales. No obstante, para casos como los estudios de disponibilidad y gestión del recurso hídrico, el análisis está encaminado a determinar la cantidad de lluvia promedio en el año, distinguiéndose los periodos de mayores y menores precipitaciones, de tal manera que se pueda realizar un buen aprovechamiento del agua y evitar el desabastecimiento.

## **2.2 Modelo AFINS 2.0**

Este modelo fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia. Este es un programa para el análisis de la frecuencia de extremos hidrológicos (caudal o lluvia) en un punto y utilizando información sistemática y/o no sistemática. Se entiende por información Sistemática aquella que es observada de forma sistemática en una estación de aforos o pluviómetro. Por otra parte, se entiende por información no Sistemática aquella que no se ha obtenido en una estación de medición, por análisis de eventos históricos o mediante técnicas de paleohidrología. La información no Sistemática sólo es posible con caudales, y suele asociarse a un límite de percepción, por lo que desde el punto de vista estadístico es una información censurada (IIAMA, 2019).

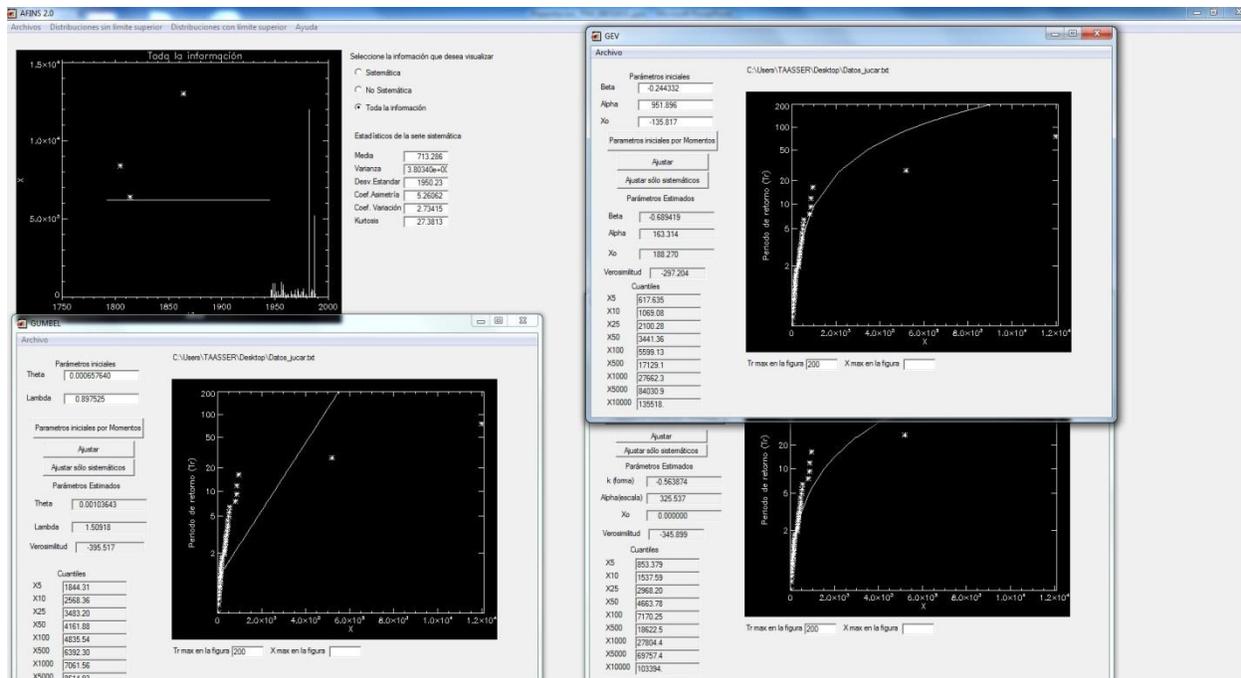


Figura 1. Interfaz AFINS 2.0

El método de estimación del programa AFINS, es el de Máxima Verosimilitud, así mismo el programa ofrece la posibilidad de estimar inicialmente los parámetros por el método de los Momentos.

### 2.3 Modelación pseudodistribuida de crecidas en Hec-HMS

Se trata de un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico), a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

Es un programa complejo, el cual permite el cálculo del hidrograma producido por una cuenca mediante inputs como: datos físicos de la cuenca, datos de precipitaciones...etc; además, permite establecer varias subcuencas, realizando los cálculos de escorrentía directa particularizados donde finalmente es capaz de componer los hidrogramas generando un hidrograma de salida de la cuenca.

Debido a que el área de estudio se analizará como una única área de drenaje, se tendrá una disposición en el programa y un único hidrograma final. En este sentido, se estudiarán los caudales proporcionados por esta zona, siendo estos los causantes de algún fenómeno de amenaza.

Por otro lado, en cuanto a la escogencia del periodo de retorno adecuado para las simulaciones del programa, se debe considerar que la microcuenca tiene una superficie pequeña y por lo tanto, un tiempo de concentración corto, de este modo es recomendable diseñar para tiempos de concentración medios y cortos. Atendiendo esta recomendación, se decidió trabajar con los valores hasta los 50 años de periodo de retorno.

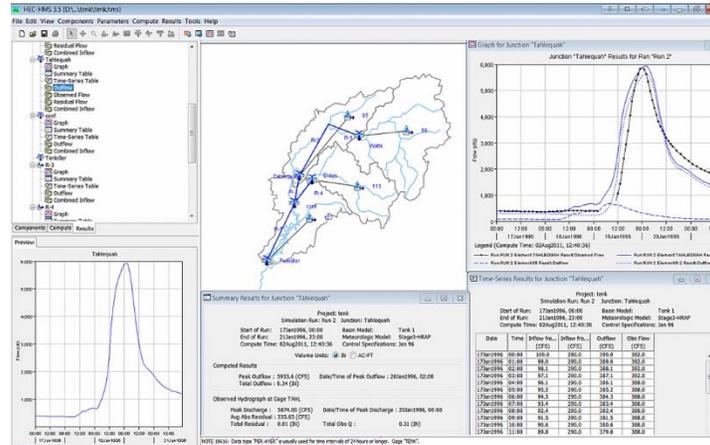


Figura 2. Interfaz Hec -HMS

### 2.3.1 Componentes del sistema

U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System es un software diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en sistemas hidrológicos. El programa posee un completo entorno de trabajo integrado: base de datos, utilidades de entrada de datos, simulación y herramientas interactivas de consulta de resultados.

El programa consta de tres partes principales:

- Modelo de cuencas
- Modelo meteorológico
- Especificaciones de control

En el modelo de cuencas, se debe especificar las características físicas de la cuenca; en la segunda, modelo meteorológico, se introducen los datos pluviométricos y en la tercera, especificaciones de control, los tiempos computacionales. A continuación, se expone brevemente en qué consiste este software y los modelos que simula. (Orio, 2011)

**a) Modelo de cuenca (Basin Model):** Esta es la parte más importante del programa, donde se definen las características hidrológicas y geomorfológicas de las cuencas y los métodos de cálculo. En él se conceptualiza el sistema hidrológico (cuencas, subcuencas, cursos fluviales, etc.).

Los elementos disponibles son: Subcuencas (subbasin), Tramos de propagación (reach), Embalses (reservoir), Confluencias de flujo (junction), Divergencias de flujo (diversion), Fuentes (source) y Sumideros (sink).

Los componentes básicos de la modelación son: Submodelo de precipitación (precipitation model), Submodelo de generación o infiltración (loss rate method), Submodelo de transformación de lluvia neta en escorrentía (runoff transformation method), Submodelo de propagación en cauces (routing reach method).

**b) Modelo Meteorológico (Precipitation Model):** Implementa el análisis de datos meteorológicos, incluyendo precipitación y evapotranspiración.

Los componentes básicos son: Submodelo de precipitación (precipitation model) y Submodelo de evapotranspiración (evapotranspiration method).

Entre los modelos de precipitación se encuentran los siguientes: User Hyetograph, User Gage Weighting, Inverse-Distance Gage Weighting, Gridded Precipitation, Frequency Storm, Standard Project Storm- Eastern U.S, S.C.S. Hypothetical Storm.

**c) Parámetros de control de simulación (Control Specifications):** En esta utilidad se especifican los parámetros temporales de la simulación.

Fecha y hora de inicio de la simulación, fecha y hora de fin de la simulación, lapso de tiempo computacional.

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA MICROCUENCA

Este estudio se desarrolló en el municipio de Pasto, en el centro oriente del departamento de Nariño, al sur occidente de Colombia. Siendo San Juan de Pasto la capital del departamento, "...tiene una división político-administrativa de 12 comunas y 17 corregimientos. Así mismo ocupa una superficie de 1.181 kilómetros cuadrados, su cabecera municipal se ubica a una altitud de 2.527 metros sobre el nivel del mar." (*Alcaldía de Pasto, 2020*)"

Por otro lado, la ciudad se sitúa fisiográficamente en el Valle de Atriz, destacando su ubicación en el denominado "Nudo de los Pastos" en la cordillera de los andes y su principal componente denominado como Volcán Galeras; presentándose en ella

precipitaciones moderadas, diferenciándose de zonas como el lago Guamuéz donde las lluvias son mayores debido a la influencia del régimen de lluvias del Amazonas.

La quebrada Membrillo Guaico pertenece a la cuenca hidrográfica del río Juanambú, teniendo como cauce mayor el río Pasto a donde vierte sus aguas. Así mismo, la quebrada está ubicada al sur-oriente de la Ciudad de Pasto en el corregimiento de Jamondino. Este último, con una población aproximada de 3.500 habitantes, está a una altura de 2820 m.s.n.m., su temperatura promedio es de 8° C y posee una humedad que varía del 74% al 82%, además, se evidencian algunas coberturas de suelo como verdes praderas y sembradíos en su mayoría legumbres.

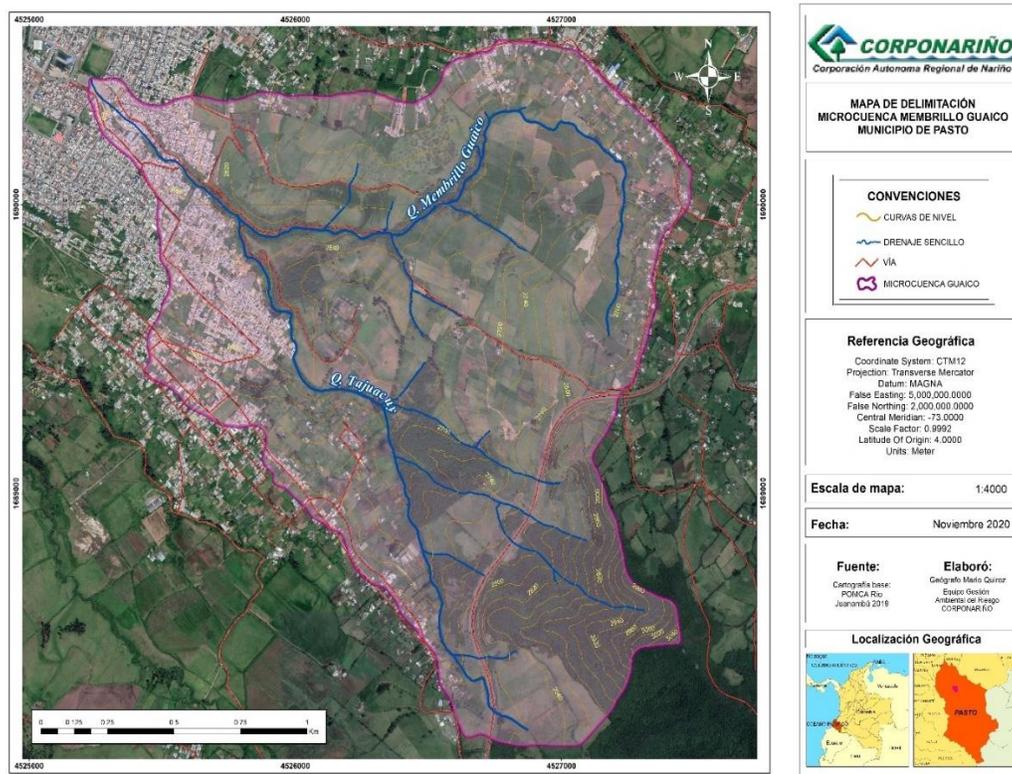


Figura 3. Ubicación y delimitación del área de estudio de la quebrada Membrillo Guaico.

### 3.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - SIG.

Debido a la necesidad de integrar el conocimiento técnico de manera interdisciplinaria, los Sistemas de Información Geográfica – SIG, son una herramienta idónea que permite utilizar información variada de distintas fuentes, y que, a su vez, facilita el análisis simultáneo de un mismo problema, en este sentido, los SIG suelen aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales, constituyéndose en una

herramienta para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales. (Díaz & Teobaldis , 2017).

Contar con un software especializado en SIG, ya sea de versión libre o de aquellos que requieran de la compra de una licencia, es cuestión de afinidad para la manipulación de la información. En nuestro caso se utilizó el software ArcGis Versión 10.2, debido a que el geoprocesamiento de los datos permite la creación de herramientas especializadas como lo es el Arc toolbox. En este sentido, para el desarrollo del estudio en la quebrada Membrillo Guaico, en el municipio de Pasto, los Sistemas de Información Geográfica – SIG, juegan un papel importante, debido a que por medio de esta herramienta se ha logrado integrar de manera espacial, el contexto natural del área de drenaje de la quebrada en cuestión.

Para el desarrollo de las temáticas ambientales y geoespaciales, se requiere contar con información actual, para lo cual, se solicitó la ayuda de EMPOPASTO referente a la ortofotografía<sup>1</sup> de la zona de estudio. Las características de la imagen suministrada por la entidad se presentan a continuación:

Figura 4. Plan de Vuelo y Características de la ortofotografía EMPOPASTO.

|                            |  |                                     |
|----------------------------|--|-------------------------------------|
| LUGAR                      | Fecha                                      | 25 mayo de 2017                     |
|                            | Nombre                                     | Membrillo Guaico                    |
|                            | Área Cubierta(ha)                          | 603.3                               |
| UNIDAD DE VUELO            | Plataforma de vuelo                        | Cessna                              |
|                            | Velocidad de vuelo(m/s)                    | 27                                  |
| CAMARA FOTOGRAFICA         | Marca                                      | Nikon D800                          |
|                            | Resolución de las fotografías(megapíxeles) | 36                                  |
|                            | Distancia Focal de lente(mm)               | 50                                  |
| ESPECIFICACIONES DEL VUELO | Ground Sample Distance-GSD (cm)            | 5                                   |
|                            | Altura de vuelo sobre el terreno (m)       | 512                                 |
|                            | Separación de las líneas de vuelo (m)      | 147                                 |
|                            | Distancia entre fotos (m)                  | 49                                  |
|                            | Longitud de todas las líneas de vuelo (km) | 730                                 |
| FORMATO                    | Comprimido                                 | Geo Tiff                            |
|                            | Resolución                                 | 5 cm por pixel                      |
|                            | Programas a utilizar                       | ArcGis,<br>AutoCad,Global<br>Mapper |
| PRODUCTOS                  | Modelo digital de Terreno y de Superficie  |                                     |
| SISTEMA DE COORDENADAS     | MAGNA_Pasto_Narino_2008                    |                                     |

<sup>1</sup> La información de la ortofotografía e insumos SIG usados en este estudio son propiedad intelectual de EMPOPASTO S.A. E.S.P

### 3.2 Modelo Digital de Elevación (DEM).

Referente a la topografía (descripción y delineamiento de la superficie de terreno) del área de drenaje, se cuenta con las curvas de nivel, las cuales permiten identificar la altitud del terreno, o en su defecto, es la altura a la cual se encuentra un punto de interés, medido en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Las curvas de nivel se encuentran a escala 1:1.000, es decir, que la distancia entre curvas es de 1 m. En este sentido, dentro de la información recibida por EMPOPASTO se encontraba este modelo digital de elevaciones, con esta escala detallada.

Es importante resaltar, que para realizar el estudio hidrológico en la quebrada Membrillo Guaico tanto las curvas de nivel, el ortomosaico, y el Modelo Digital de Elevaciones – DEM (figura 5), son insumos brindados por EMPOPASTO y de gran importancia, considerando el nivel de detalle que aportan, lo cual permite identificar la realidad del territorio con un grado elevado de precisión, permitiendo una adecuada interpretación geográfica del entorno natural.

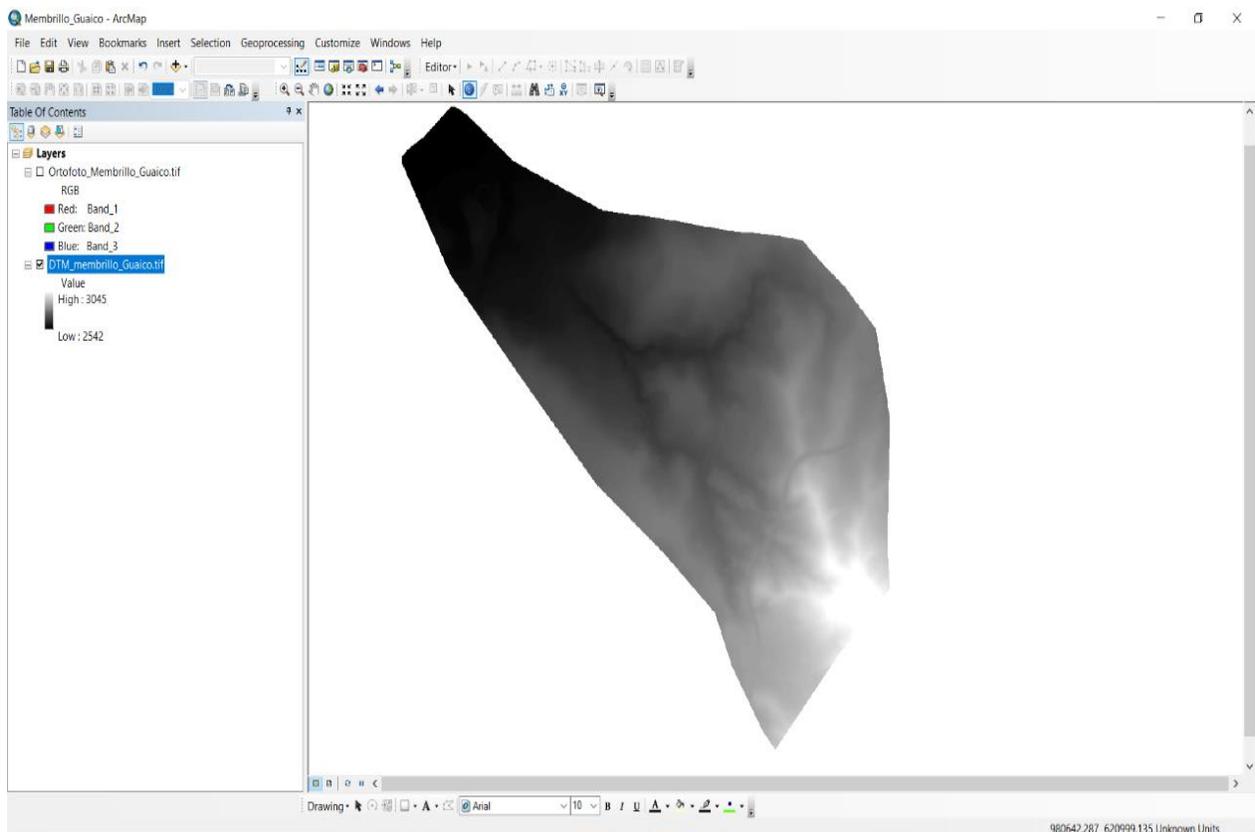


Figura 5. Modelo Digital de Elevación - DEM.

### 3.3 Red de drenaje y puntos de desagüe

El área de estudio pertenece a la cuenca Hidrográfica del río Juanambú, de la cual se cuenta con información oficial, concerniente al Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Juanambú obteniendo resoluciones a escala 1:25.000 de esta zona. No obstante, para la elaboración de este estudio se vio la necesidad, como se mencionó anteriormente, de obtener una mejor resolución en los insumos (productos de sensores remotos) del área de estudio para una mejor precisión, de tal manera que se pueda realizar una mejor caracterización de los parámetros correspondientes. En este sentido, con el uso de la información obtenida de EMPOPASTO, la red de drenaje está determinada por un cauce principal que nace a 2850 m.s.n.m, con algunas aportaciones de quebradas más pequeñas a lo largo de su recorrido hasta la ciudad de Pasto. El flujo va en dirección sur-norte teniendo como punto final la canalización de la misma en el barrio Miraflores la cual finaliza en la red de colectores de la ciudad donde aguas abajo confluye con el río Pasto.

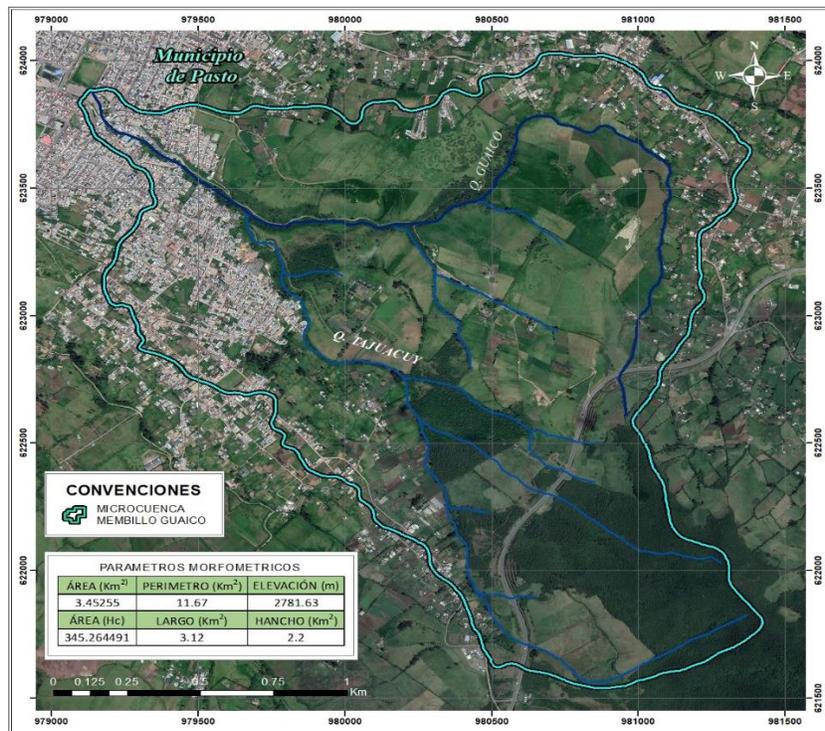


Figura 6. Red de drenaje del área de estudio

En cuanto a la morfología del drenaje, encontramos que el área de drenaje es de tipo dendrítico, donde las corrientes se asemejan a las ramificaciones de un árbol frondoso.

Este tipo de drenaje se desarrolla cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen un control sobre la dirección de crecimiento del valle.

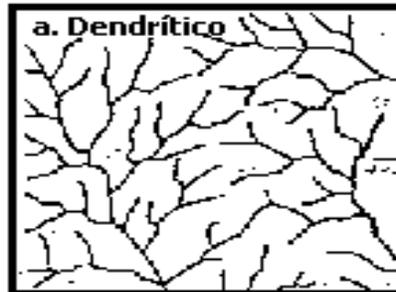


Figura 7. Drenaje dendrítico.

Debido a la relativa uniformidad del sustrato y similar resistencia a la erosión, la forma del patrón dendrítico está determinado básicamente por la dirección de la pendiente del terreno (TARBUCK & LUTGENS, 2005).

### 3.4 Características hidromorfométricas

Las características hidromorfométricas sirven para caracterizar una cuenca desde el punto de vista físico. De esta manera, el área de drenaje tiene como afluente principal la quebrada Membrillo Guaico y como punto de desagüe el río Pasto. En la determinación de la cuenca influye la escala de trabajo, por lo que el error cometido se traslada a la determinación de las características hidromorfométricas de la cuenca. A fin de disminuir el error en la determinación de la cuenca, se trabajó con la información obtenida por el vuelo del dron a escala 1:1.000 y los datos proporcionados por el IGAC a escala 1:25.000.

En la siguiente tabla se presentan las características del área de drenaje y el punto de desagüe correspondiente a la canalización aguas abajo.

Tabla 1. Características morfométricas del área de drenaje.

| COTA                 |                      | DESNIVEL<br>(m) | LONG.<br>CAUCE<br>PRINCIPAL | ÁREA<br>(Km <sup>2</sup> ) | PENDIENTE<br>MEDIA<br>(%) | PERÍMETRO<br>(km) | COEFICIENTE<br>DE<br>COMPACIDAD |
|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|
| MÁXIMA<br>(m.s.n.m.) | MÍNIMA<br>(m.s.n.m.) |                 |                             |                            |                           |                   |                                 |
| 3050                 | 2569                 | 481             | 4.85 km                     | 3.45                       | 19%                       | 11.67             | 1.76                            |

**Longitud del cauce principal:** La definición de cauce principal viene asociada a una característica hidrológica, siendo el curso de la red de drenaje que vincula mayor flujo de agua, es decir, por el que circula un mayor caudal.

Habitualmente suele coincidir con el cauce de mayor longitud, pero no siempre es así, puesto que pueden existir superficies más generadoras de escorrentía asociadas a tramos más cortos.

La longitud de la quebrada Membrillo Guaico es de  $4.85 \text{ km}$

**Área:** Es el parámetro más importante de una cuenca y aunque no es posible medir la superficie real de la cuenca en un mapa, se aproxima por el área de la proyección de la cuenca.

El área de drenaje de la quebrada Membrillo Guaico es:  $A = 3,45 \text{ km}^2$

**Pendiente media:** Una vez obtenida la longitud, se determinan las cotas de los puntos de inicio y final de cauce principal, obteniéndose así la pendiente media como la relación entre la diferencia de cotas y la longitud del cauce.

$$J = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{ppal}}$$

Siendo  $H_{max}$  y  $H_{min}$  las alturas máximas y mínimas de la quebrada Membrillo Guaico.  $L_{ppal}$  es la longitud del cauce principal y  $J$  la pendiente media, en este caso de la Quebrada en cuestión.

La pendiente de del cauce total de la Quebrada Membrillo Guaico es del 19%.

**Perímetro:** Es la longitud del límite exterior de la cuenca. Su magnitud depende de la superficie y la forma de la cuenca.

El perímetro del área de drenaje tiene una longitud aproximada de:  $P = 11.67 \text{ km}$

**Coefficiente de compacidad:** Este coeficiente se debe a Gravelius, y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el círculo de la misma área que la cuenca.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$K_c = 1.76$$

Se trata de un coeficiente que da idea sobre la configuración geométrica de la cuenca, y por tanto del hidrograma de crecida (puesto que la forma de la cuenca afecta directamente al tiempo de respuesta).

Si son cuencas alargadas, tienen hidrogramas más laminados ya que todo debe pasar por un mismo cauce; en cambio, en cuencas más redondeadas el hidrograma de respuesta esperado es brusco. Este coeficiente es siempre mayor que la unidad, tanto más próximo a ella cuanto la cuenca se aproxime más a la forma circular, pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas (Orio, 2011).

## 4. ESTUDIO HIDROLÓGICO

### 4.1 Análisis de datos pluviométricos

El municipio de Pasto cuenta con varias estaciones tanto climáticas, pluviométricas y meteorológicas, sin embargo, se ha tenido en cuenta para el cálculo, el área de influencia de 4 estaciones cercanas para evaluar la afectación de la lluvia en cada una de ellas. La información se presenta a continuación.

*Tabla 2. Información de las Estaciones cercanas*

| ESTACIÓN                                     | CATEGORÍA                 | MUNICIPIO | LONG   | LAT    |
|--|---------------------------|-----------|--------|--------|
| BOTANA<br>[52055040]                         | Agrometeorológica         | Pasto     | -77,28 | 1,16   |
| OBONUCO<br>[52045010]                        | Agrometeorológica         | Pasto     | -77,30 | -77,30 |
| VIVERO<br>CORFONAR<br>[52045060]             | Meteorológica<br>Especial | Pasto     | -77,23 | 1,22   |
| UNIVERSIDAD DE<br>NARINO - AUT<br>[52045080] | Climática<br>Ordinaria    | Pasto     | -77,28 | 1,23   |

Con esta información, se procede a la creación de polígonos de Thiessen, los cuales se crean al unir los puntos de ubicación de las estaciones entres si, y trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. Este

procedimiento se realizó a través de la herramienta Polígonos de Thiessen del Programa ArcGis 10.2.

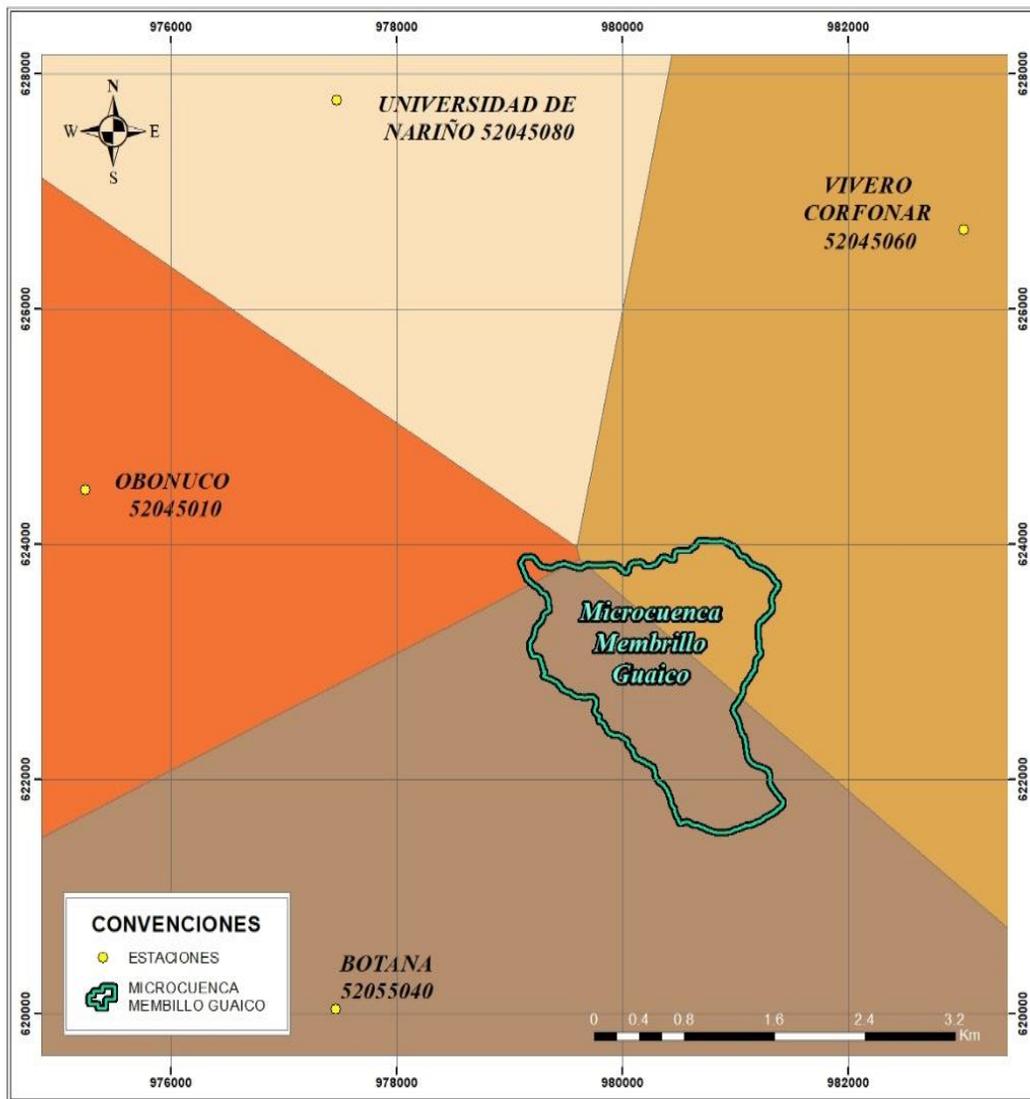


Figura 8. Polígonos de Thiessen para las estaciones

Observando los polígonos generados por Arc Gis, notamos que el área de influencia de la estación de Botana abarca gran parte del área de drenaje, por lo tanto, será esta la estación base del modelo hidrológico; no obstante, para el relleno de los datos faltantes, se priorizará las más cercanas y que posean un número suficiente de datos, recomendable mínimo con 30 años de mediciones. De este modo, se ha descartado la estación de Vivero Corfonar y Universidad de Nariño por la ausencia de datos disponibles y distancia de la estación base. De este modo, se eligió la estación de Obonuco, la cual si cuenta con datos necesarios, resultando el siguiente análisis:

Tabla 3. Disponibilidad de datos de las Estaciones

| ESTACIÓN              | Rango de series de Precipitación máximas diarias | No días faltantes |
|-----------------------|--|-------------------|
| BOTANA<br>[52055040]  | 01/01/1980 - 31/12/2019                          | 668               |
| OBOUUCO<br>[52045010] | 01/01/1980 - 31/12/2019                          | 1271              |

La tabla anterior nos muestra que existen varios meses faltantes en la estación de Botana, sobre todo en los años 1983 y 1991 como se muestra a continuación:

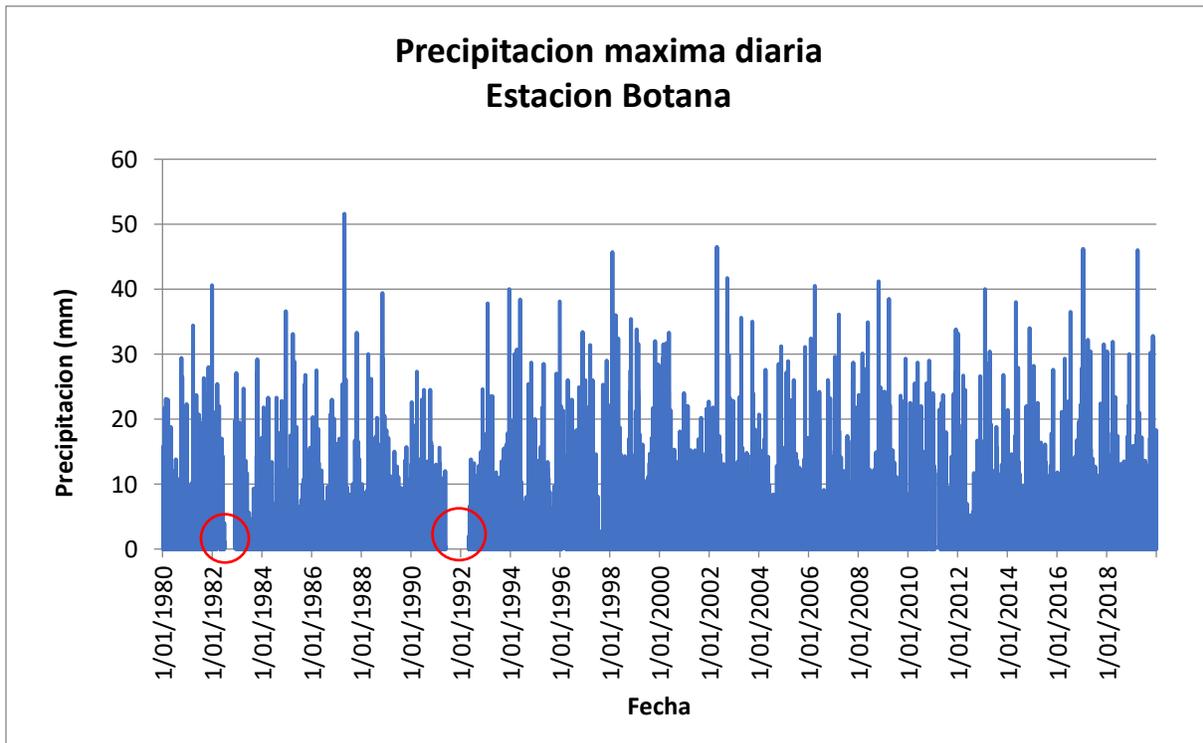


Figura 9. Serie de datos de precipitación Estación Botana.

En cuanto a la estación de Obonuco, los datos faltantes de precipitación se ubican en años diferentes a la estación de Botana, sobre todo en los años 2013 y 2017, como se observa a continuación:

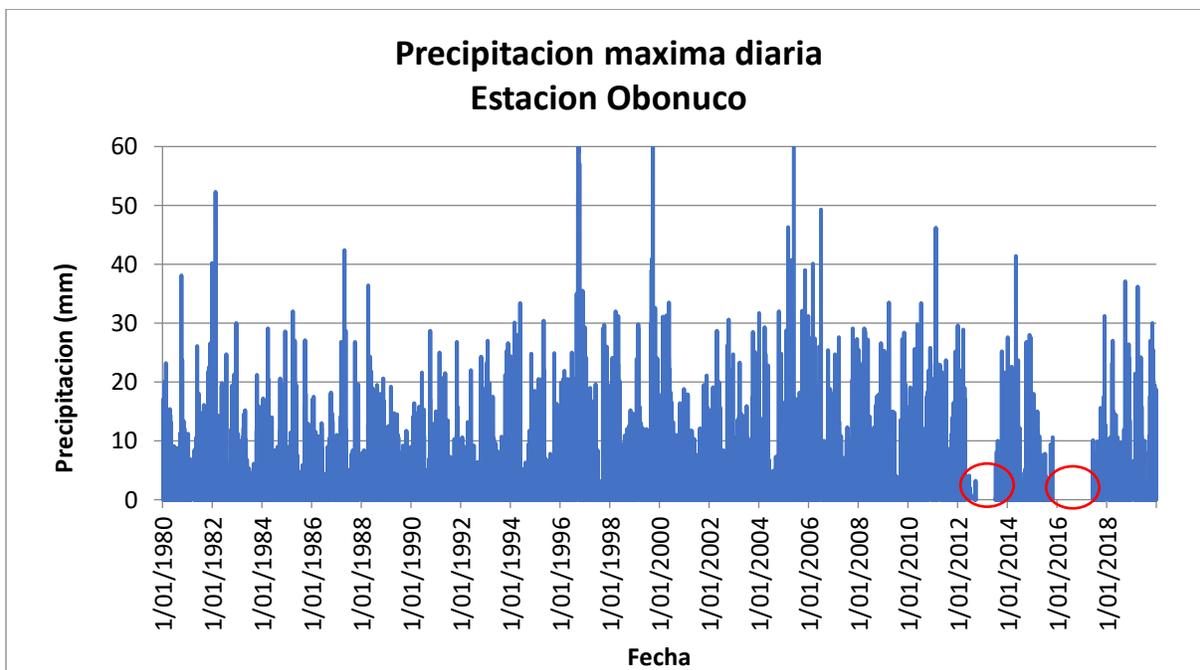


Figura 10. Serie de datos de precipitación Estación Abonuco.

A pesar de los datos faltantes en la estación Botana, los valores correspondientes al periodo 1/01/1980 – 31/12/2019 se usarán para poder rellenar los días faltantes en la estación base. Así, para llevar a cabo este procedimiento, se usó el método de Regresión Lineal, el cual está basado en el uso de datos de estaciones cercanas estableciendo la siguiente relación:

$$Y = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + \dots + n \cdot X_i$$

Dónde:

Y: valor de precipitación estimada

Xi: valor de precipitación en estaciones con información completa

a,b,c: constantes de regresión

De este modo, se graficó los registros de las dos estaciones como se muestra en la Figura 3, donde se calculó a través de la herramienta línea de tendencia la ecuación lineal correspondiente.

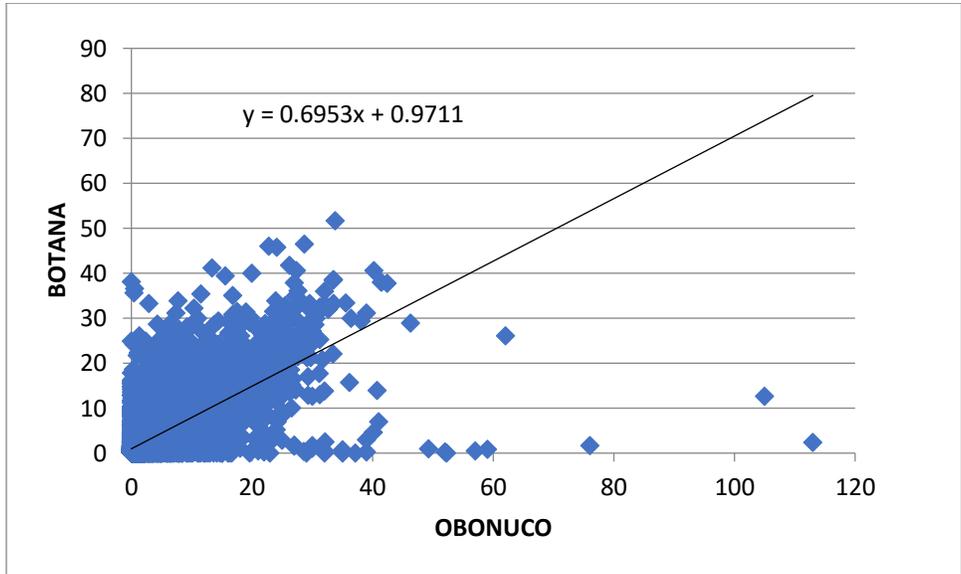


Figura 11. Regresión Lineal para el relleno de datos.

La ecuación resultante que relaciona las dos estaciones, está dada por la siguiente expresión:

$$y = 0.6953x + 0.9711$$

Siendo Y el valor de precipitación de la estación de Botana y X el valor correspondiente a la estación de Obonuco. Aplicando este método se logró encontrar los datos faltantes en nuestra estación principal, descartando así el año 2017 por la ausencia de datos en las dos estaciones. De este modo resulta la siguiente tabla con los máximos valores de precipitación anuales:

Tabla 4. Precipitación máxima anual de la serie final.

| AÑO  | P MAX ANUAL |
|------|-------------|
| 1980 | 29.4        |
| 1981 | 40.6        |
| 1982 | 27.1        |
| 1983 | 29.2        |
| 1984 | 36.6        |
| 1985 | 33.1        |
| 1986 | 27.5        |
| 1987 | 51.6        |

|      |      |
|------|------|
| 1988 | 39.4 |
| 1989 | 18.3 |
| 1990 | 27.3 |
| 1991 | 26.8 |
| 1992 | 24.6 |
| 1993 | 40.0 |
| 1994 | 38.4 |
| 1995 | 38.1 |
| 1996 | 33.4 |
| 1997 | 31.4 |
| 1998 | 45.7 |
| 1999 | 33.8 |
| 2000 | 33.3 |
| 2001 | 22.7 |
| 2002 | 46.5 |
| 2003 | 35.6 |
| 2004 | 31.2 |
| 2005 | 31.1 |
| 2006 | 40.5 |
| 2007 | 36.1 |
| 2008 | 41.2 |
| 2009 | 38.5 |
| 2010 | 29.0 |
| 2011 | 46.2 |
| 2012 | 33.2 |
| 2013 | 40.0 |
| 2014 | 38.0 |
| 2015 | 28.2 |
| 2016 | 36.5 |

|      |      |
|------|------|
| 2017 | 46.2 |
| 2018 | 31.9 |
| 2019 | 46.0 |

## 4.2 Características del Clima y régimen de lluvias

El clima se define como el conjunto de los fenómenos atmosféricos que se producen a lo largo del año en una zona, definiendo sus características mediante sus elementos. Los elementos principales del clima son la precipitación y la temperatura, pero es necesario tener en cuenta otros como el brillo solar, el recorrido del viento, la humedad, relativa etc., los cuales en conjunto permiten caracterizar una o varias zonas en la superficie de la tierra.

El régimen climático del municipio de Pasto y el de la región Andina de Nariño, está regulado por las variaciones de los fenómenos ecuatoriales. Después del solsticio de verano, ocurrido el 22 de junio en el hemisferio boreal, la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) se encuentra en el norte del País, razón por la cual, en el sur, lejos de su influencia, se acrecienta el buen tiempo. Como causas y efecto de este estado, los vientos alisios del sureste penetran al país azotando con sus corrientes las montañas y valles de las áreas sureñas.

El desplazamiento de estas masas de aire, determinan la temperatura de verano, caliente y seca, del municipio y en general en la zona norte del Departamento, en los meses de julio, agosto y septiembre y es el origen de la presencia de los vientos estivales que se intensifican en el mes de agosto. (CORPONARIÑO, 2011).

En cuanto al régimen de lluvias de la ciudad de Pasto, este tiene un comportamiento bimodal, donde se empieza con lluvias moderadas al inicio del año, incrementándose en el mes de abril y descendiendo su magnitud en los meses de julio a septiembre. Por último, en los últimos meses del año las lluvias se intensifican, sobre todo en los meses de noviembre y diciembre.

*Tabla 5. Datos de precipitación media mensual*

| Año/mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Septiem | Octubre | Noviem | Diciembre |
|---------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|--------|-----------|
| 1980    | 92.3  | 117.6   | 92.1  | 115.2 | 56.3  | 61.7  | 67.1  | 41     | 68.4    | 119.5   | 105.4  | 81.6      |
| 1981    | 40.3  | 28.6    | 111.1 | 75.9  | 110.2 | 58.6  | 79.3  | 86.3   | 20.5    | 43.7    | 156    | 133.8     |
| 1982    | 86    | 90.2    | 122.1 | 135.3 | 65.7  | 39.4  | 62.9  | 13.1   | 15.3    | 64.9    | 69.9   | 154.4     |
| 1983    | 36.1  | 74.4    | 96.8  | 126.8 | 82.4  | 25.6  | 25.4  | 20.9   | 54      | 151.6   | 50.3   | 122.3     |
| 1984    | 174.3 | 89.1    | 74.6  | 142.1 | 84.1  | 26.1  | 33.2  | 46.3   | 69      | 165.3   | 116.9  | 60.1      |

|      |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1985 | 108.1 | 46.7  | 64.9  | 87.7  | 113.1 | 44.9  | 38.9  | 37.3 | 79.3  | 74.9  | 57.1  | 99.3  |
| 1986 | 70.8  | 69.3  | 110.1 | 76.4  | 79.8  | 43.3  | 42.2  | 39.1 | 14    | 175.6 | 126   | 51.3  |
| 1987 | 48.9  | 50    | 88.3  | 168.9 | 98.8  | 29.8  | 41.7  | 39.5 | 31.7  | 144.9 | 49.6  | 67.9  |
| 1988 | 45.4  | 42.4  | 37.3  | 124.5 | 87.3  | 79.1  | 46.7  | 79.8 | 58.5  | 98.5  | 191.6 | 100   |
| 1989 | 108.2 | 83    | 69.9  | 42.9  | 50.5  | 108.1 | 47.2  | 45.5 | 30    | 67.9  | 25.5  | 54.8  |
| 1990 | 69.9  | 91.1  | 85.2  | 75.3  | 73.2  | 68    | 69.6  | 30.9 | 37.1  | 124.4 | 79.1  | 61.1  |
| 1991 | 71.2  | 74    | 84.3  | 44.8  | 20.8  | 28    | 38    | 24.8 | 18.7  | 25.8  | 114.5 | 45.2  |
| 1992 | 22.1  | 32    | 30.4  | 52.3  | 53.5  | 21.7  | 50.4  | 34.2 | 50.2  | 24.9  | 64.3  | 42.9  |
| 1993 | 71.1  | 90.2  | 139   | 84.4  | 70.2  | 52.6  | 56.4  | 27.2 | 37.6  | 59.2  | 130.4 | 133.9 |
| 1994 | 80.3  | 18.8  | 115.5 | 159.9 | 97.6  | 49.2  | 32.7  | 56   | 54.7  | 66    | 111.4 | 90.4  |
| 1995 | 27.1  | 37.6  | 46.6  | 72.6  | 92.7  | 72.7  | 58    | 29   | 0     | 42.4  | 131.5 | 109.4 |
| 1996 | 82.9  | 118.4 | 132.4 | 86.6  | 111.2 | 64.2  | 38.1  | 45.4 | 25.9  | 127   | 88.1  | 77.1  |
| 1997 | 140.4 | 61.2  | 116.2 | 86.5  | 57.6  | 64.6  | 32.3  | 16.6 | 47.7  | 56.4  | 84.9  | 58.2  |
| 1998 | 27    | 61    | 82.8  | 42.2  | 149   | 64.6  | 53.9  | 58.4 | 29    | 118.4 | 132.9 | 76.3  |
| 1999 | 130.6 | 217.3 | 71.1  | 102.7 | 58.1  | 66.4  | 44.5  | 43.7 | 128.8 | 95.2  | 129.1 | 204.3 |
| 2000 | 122.8 | 182.8 | 52.7  | 143.5 | 184.5 | 90.7  | 47    | 47.1 | 71.4  | 50.7  | 65.6  | 61.7  |
| 2001 | 77.1  | 68.5  | 50.4  | 69.9  | 48.4  | 71.8  | 53.2  | 25.1 | 48.1  | 26.1  | 86.3  | 105.4 |
| 2002 | 75.2  | 50    | 70.4  | 97.2  | 78.1  | 64.6  | 57.5  | 30.1 | 59.9  | 110.5 | 116.3 | 83.1  |
| 2003 | 9.8   | 35.6  | 103   | 107.8 | 62.3  | 56.2  | 61.2  | 10.3 | 74.1  | 82.8  | 96.2  | 68.7  |
| 2004 | 57    | 12.5  | 82.6  | 74.3  | 70.1  | 75.2  | 47    | 27   | 37.8  | 127.7 | 111.8 | 40.6  |
| 2005 | 61.6  | 104.4 | 114   | 135.4 | 82.4  | 66.3  | 62.3  | 27.3 | 29.6  | 97.2  | 77.7  | 144   |
| 2006 | 71.5  | 59.2  | 155.8 | 128.9 | 37.3  | 76.4  | 40.2  | 40.2 | 23    | 100.5 | 116.9 | 81.9  |
| 2007 | 60.7  | 39.7  | 117.7 | 78.9  | 45.1  | 85.7  | 52.7  | 56   | 24.1  | 170.5 | 176.8 | 156.6 |
| 2008 | 122.5 | 99.5  | 148.5 | 108.8 | 159.7 | 48.5  | 34.2  | 53.1 | 48.5  | 160.1 | 121.5 | 137.4 |
| 2009 | 134.6 | 101.3 | 137.1 | 75    | 45    | 46.3  | 49    | 33.8 | 45.6  | 78    | 104   | 61.6  |
| 2010 | 5.4   | 96.2  | 55.6  | 169   | 114.4 | 57.5  | 78.8  | 17.2 | 41.5  | 129.3 | 211.7 | 107.7 |
| 2011 | 117.6 | 136.6 | 129.9 | 130.4 | 135.1 | 72.3  | 104.4 | 37.1 | 43.6  | 104.1 | 98.8  | 201.2 |
| 2012 | 175.1 | 95.2  | 110.1 | 122   | 49.3  | 33.7  | 29.1  | 39.4 | 20.2  | 73.3  | 91.7  | 59.2  |
| 2013 | 39    | 131.9 | 75.6  | 87.1  | 121.9 | 34.8  | 105.6 | 63.5 | 30.8  | 77.9  | 101.2 | 76.3  |
| 2014 | 93.4  | 32.8  | 96.5  | 65.9  | 170   | 103.3 | 60.7  | 32   | 32.2  | 99.8  | 162.8 | 128.5 |
| 2015 | 85    | 47.1  | 111   | 49.1  | 63.8  | 81.7  | 83.6  | 48.6 | 10.7  | 51.1  | 94    | 13.7  |
| 2016 | 58.7  | 32.3  | 67.6  | 150.6 | 46.4  | 86.9  | 106.9 | 31.1 | 75.1  | 59.8  | 89.2  | 126.8 |
| 2017 | 141.6 | 69.1  | 210.9 | 101.8 | 134.2 | 78.8  | 45.4  | 63.8 | 19.7  | 58.1  | 127.5 | 126.9 |
| 2018 | 148.6 | 58.8  | 80.4  | 97    | 84.5  | 68.4  | 63.3  | 33.1 | 54.4  | 54.3  | 142.4 | 50.7  |

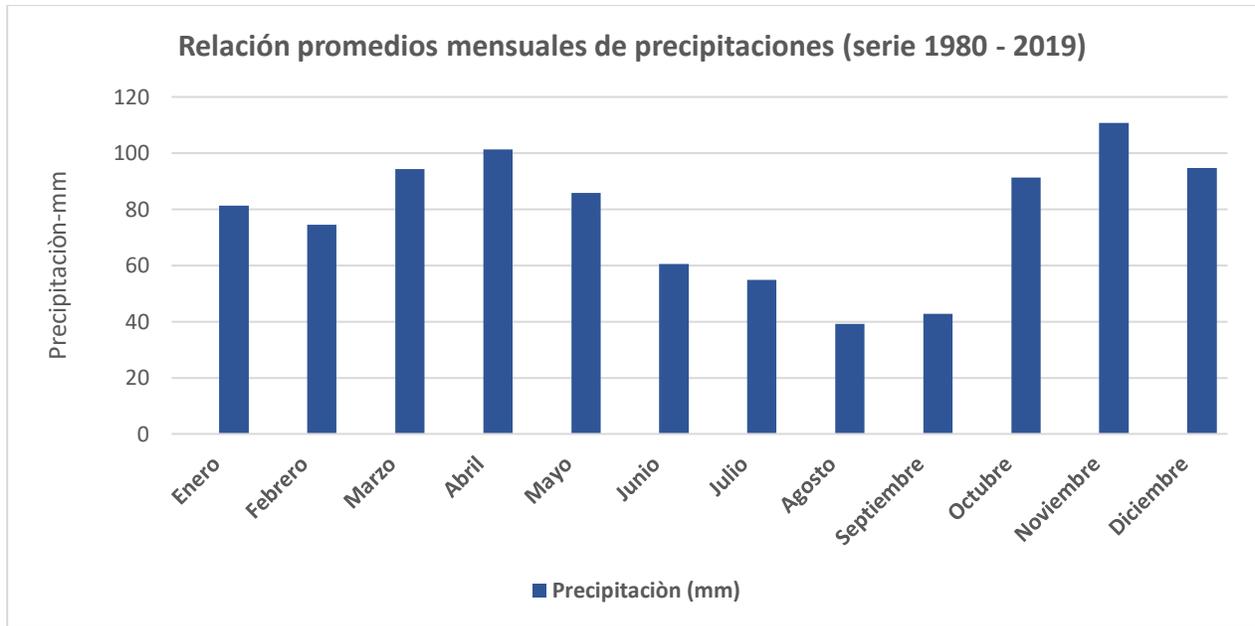


Figura 12. Régimen bimodal de lluvias en la ciudad de Pasto.

### 4.3 Análisis de Homogeneidad.

Obtenido la serie final de precipitación máximos diarios, es necesario analizar la homogeneidad de los mismos, comprobando por lo tanto si los datos presentan variaciones bruscas o si sufren modificaciones progresivas; para ello se usó la herramienta de Excel XLSTAT, donde se realizó este procedimiento para toda la serie de precipitación máxima diaria, encontrando los siguientes resultados:

Tabla 6. Estadísticos de la serie de precipitación máxima diaria.

| Variable               | Observaciones | Obs. con datos perdidos | Obs. sin datos perdidos | Mínimo | Máximo | Desv. típica |
|------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|--------------|
| SERIE MAX DIARIA ANUAL | 40            | 0                       | 40                      | 18.3   | 51.6   | 7.35         |

Existen varias pruebas de homogeneidad aplicables a series de datos, entre ellas la prueba Normal Estándar (SNHT), Pettitt y Buishand (Moreno 2011). Aplicando por ejemplo el método de Buishand, que puede ser empleado en variables con cualquier

tipo de distribución, propone identificar un cambio en la media de la serie de datos. De esta forma, se realiza la prueba con un intervalo de confianza del 99% y nivel de significancia 5%, usando simulaciones Monte Carlo. Los resultados se presentan a continuación:

*Tabla 7. Resultados prueba de Buishand.*

| Prueba de Buishand<br>(SERIE MAX DIARIA): |       |
|---|-------|
| Q   | 6.179 |
| t   | 1992  |
| valor-p<br>(bilateral)                    | 0.212 |
| alfa                                      | 0.05  |

Interpretación de la prueba:

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

El postulado concluye que para que exista homogeneidad en una serie de datos el número de Buishiand (B), debe ser muy próximo a cero, por lo cual interpretando esta prueba se obtuvo buenos resultados, es decir que la serie de datos era homogénea.

Por otro lado, la prueba de Pettitt no es una prueba paramétrica y se basa en rangos, haciendo caso omiso a la normalidad de la serie. Esta prueba se aplicó con un nivel de significancia del 5% y un intervalo de confianza del 99% arrojando los siguientes resultados:

*Tabla 8. Resultados prueba de Pettitt*

| Prueba de Pettitt (SERIE<br>MAX DIARIA): |      |
|--|------|
| K  | 155  |
| t  | 1992 |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| valor-p<br>(bilateral) | 0.311 |
| alfa                   | 0.05  |

Interpretación de la prueba:

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

El resultado de la prueba muestra que la serie de datos es homogénea, debido a que el valor p es mayor a 0.05. Por último, la prueba SHNT es un test muy difundido y del cual se han desarrollado versiones para analizar cambios en la media, la varianza y la tendencia de la serie. Aplicando este método se encontró lo siguiente:

*Tabla 9. Resultados prueba SNHT*

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| Prueba SNHT (SERIE<br>MAX DIARIA): |       |
| T0                                 | 4,243 |
| t                                  | 1992  |
| valor-p<br>(bilateral)             | 0,398 |
| alfa                               | 0,05  |

Interpretación de la prueba:

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

La prueba concluye que la hipótesis nula será aceptada si para el valor T0 y para el tamaño de la muestra se supera el nivel de significación impuesto. Evidentemente el

valor  $-p$  es mayor que el de significancia alfa, por lo cual se concluye que la serie de datos es homogénea.

En vista de los resultados obtenidos, donde se tiene todas las pruebas resultaron favorables, se concluye por lo tanto que la serie de precipitación máxima diaria anual es homogénea.

#### **4.4 Análisis estadístico de las precipitaciones máximas**

Es necesario elaborar un análisis estadístico de las precipitaciones máximas para relacionar esos eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia, por lo cual se ha planteado los cálculos de cuatro funciones de distribuciones para calcular la precipitación máxima asociada a un periodo de retorno.

Las cinco funciones a analizar son las siguientes:

- Gumbel: Basado en el método de los momentos.
- SQRT: por el método de máxima verosimilitud.
- GEV (General Extreme Value).
- TCEV (Two Component Extreme Value).

##### **4.4.1 Función Gumbel**

Para la estimación de los parámetros de la función Gumbel se utiliza el Método de los Momentos, igualando los parámetros muestrales (media, varianza y coeficiente de asimetría) a las expresiones de estos estadísticos, en función de los parámetros de la distribución.

Gumbel es la particularización de la función “General Extreme Value” cuando uno de sus parámetros toma el valor cero. De esta forma, la ley de probabilidad queda definida por la siguiente función de distribución, siendo  $x$  el valor de la precipitación diaria máxima anual (IIAMA, 2019)

$$F_x(x) = e^{-\lambda e^{-\theta x}}$$

Donde  $\lambda$  Y  $\theta$  son los parámetros de la función de distribución. De este modo, los valores encontrados por el programa son los siguientes:

$$\lambda = 93.51$$

$$\theta = 0.143$$

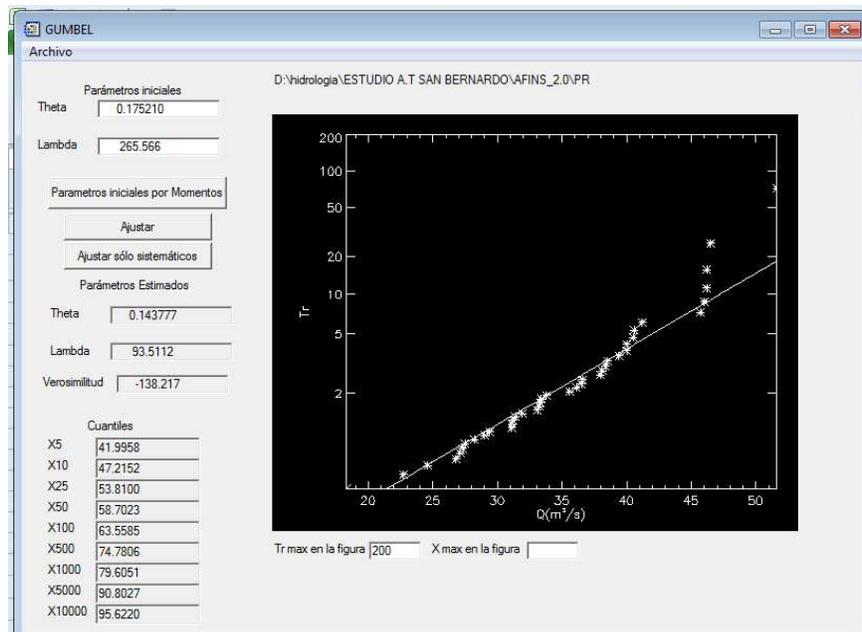


Figura 13. Resultados función de distribución Gumbel.

#### 4.4.2 Función SQRT- et MÁX

Esta distribución propuesta por Etoh, T. et al en 1986, está derivada explícitamente para precipitaciones máximas diarias. En la función SQRT-ET máx, los cuantiles estimados son similares a los de la distribución Gumbel para períodos de retorno bajos y medios.

La función que describe esta probabilidad es:

$$F(x) = \exp[-k (1 + \alpha x) \cdot \exp(-\alpha x)]$$

Dónde:  $F(x)$  = probabilidad de que se presente un valor inferior a  $x$

$k, \alpha$  = parámetros de la distribución, que dependen de la media y desviación típica

El valor de los parámetros para esta función fueron los siguientes:

$$k = 1487.49$$

$$\alpha = 2.99$$

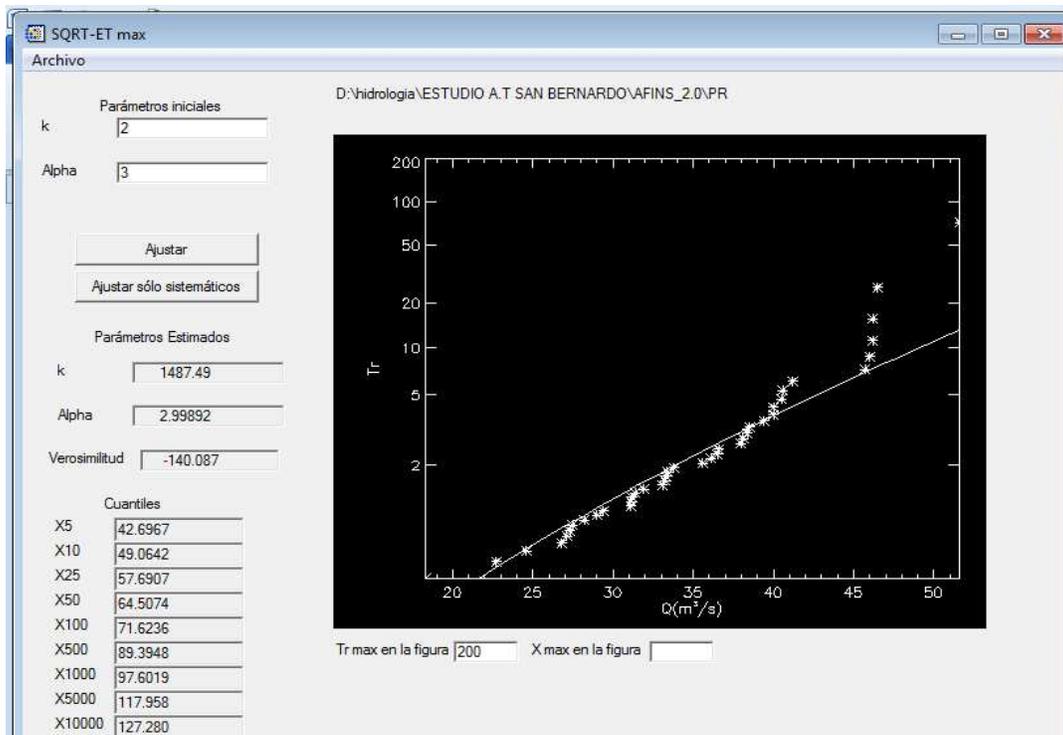


Figura 14. Resultados función de distribución SQRT-ET max.

#### 4.4.3 Función GEV

El modelo para el que se desarrolla la teoría de valores extremos está enfocado a describir el comportamiento estadístico de  $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$  donde  $X_1, \dots, X_n$  es una secuencia de variables aleatorias independientes con distribución común  $F$  y  $M_n$  representan el máximo del proceso sobre  $n$  unidades de tiempos de observación (IIAMA, 2019). Esta función tiene el siguiente estadístico:

$$F_{(x)} = \exp \left[ - \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

$$f_{(x)} = F_{(x)} \left[ \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} \right]$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de escala,  $\beta$  es el parámetro de forma y  $x_0$  es el parámetro de localización. De este modo, el programa nos muestra los siguientes resultados para los parámetros y cuantiles correspondientes:

| Estación | $\beta$ | $\alpha$ | $X_0$ |
|----------|---------|----------|-------|
| Botana   | 0.27    | 7.16     | 32.58 |

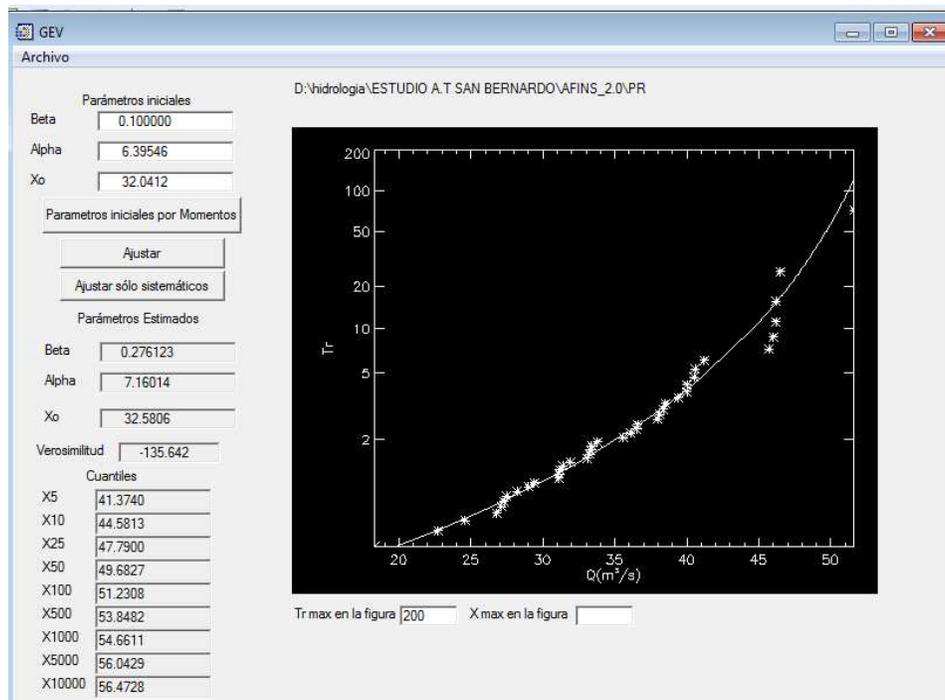


Figura 15. Resultados función de distribución GEV.

#### 4.4.4 Función TCEV

Esta función asume que las poblaciones de las avenidas máximas anuales ordinarias ( $X_1$ ) y extraordinarias ( $X_2$ ) derivan de poblaciones Gumbel independientes. Por tanto, la avenida máxima anual será la máxima de estas dos, siendo su función de distribución el producto de las funciones de distribución originales (IIAMA, 2019).

$$F_{X(x)} = \exp(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x})$$

donde  $\lambda_1$  y  $\theta_1$  son los parámetros de forma y escala correspondientes a las avenidas ordinarias, y  $\lambda_2$  y  $\theta_2$  los de las avenidas extraordinaria. De este modo se encontraron los siguientes resultados:

| Estación | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|
| Botana   | 19.04      | 0.12       | 284.43      | 45.38       |

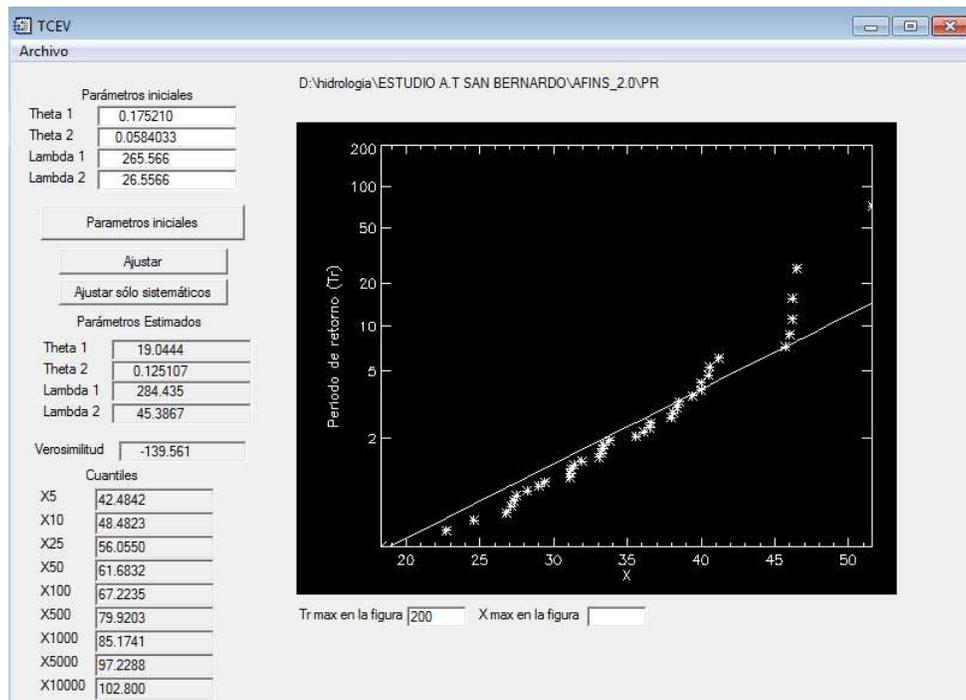


Figura 16. Resultados función de distribución TCEV.

Obtenidos los cuantiles para cada función de distribución, es importante observar el comportamiento de la probabilidad de nuestra serie de datos en relación a nuestras funciones calculadas y analizar cuál de ellas es la que mejor se ajusta a los datos de precipitación correspondientes.

Al analizar los datos obtenidos por el programa, se nota claramente que las funciones Gumbel, SQRT y TCEV presentan los cuantiles más altos, mientras que la función GEV los valores más bajos y como se ve en el gráfico, la tendencia de los datos de la serie de precipitación es muy similar a esta función de distribución.

Como se mencionó al principio de este apartado, el programa AFINS 2.0 usa el método de Verosimilitud, la cual es una prueba de hipótesis que compara la bondad de ajuste de dos modelos, un modelo no restringido con todos los parámetros libres y su modelo correspondiente restringido por la hipótesis nula a menos parámetros, para determinar cuál ofrece un mejor ajuste para los datos de muestra. De esta manera, para la escogencia de la función de distribución con mayor ajuste, se consideró el valor de la verosimilitud brindada por el programa. En conclusión, se ha considerado los valores de la función GEV como los que más se ajustan al comportamiento de la microcuenca, los cuales presentan los valores de verosimilitud más alta (-135.642).

#### 4.5 Cálculo de la curva IDF de la microcuenca

Una de las partes más importantes del estudio tiene que ver con el cálculo de los procesos hidrológicos que se llevan en la microcuenca. En este punto es importante determinar los caudales de aportación y encontrar el hidrograma respectivo que nos dé idea de cuánta agua de escorrentía puede producirse como respuesta a un evento de precipitación.

Este estudio partirá de la serie de precipitación máxima diaria anual encontrada en el capítulo anterior, y con ella se calculará los valores de intensidad correspondientes asociados a un periodo de retorno, concluyendo en las curvas IDF de la microcuenca. Después de obtenida esta información, se procederá a calcular el modelo de producción de escorrentía a través del programa Hec- HMS obteniendo los hidrogramas respectivos. Cabe resaltar que para la elaboración del modelo de producción se apoyara de trabajo de campo, uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis geomorfológico e información adicional de entidades gubernamentales como es el caso del IDEAM.

Como se observó en el apartado del análisis de precipitación, se logró obtener los cuantiles para diferentes periodos de retorno según la función de probabilidad GEV, sin embargo, será necesario distribuir ese valor de precipitación máximo durante el día. Esto se logra haciendo uso de coeficientes de lluvia que representan la distribución de la lluvia máxima en 24 horas durante el día. Para este cálculo se ha considerado los siguientes coeficientes para cuencas en Brasil.

Tabla 10. Coeficientes de distribución

| Relación       | La Suela | Córdoba | Brasil | Denver | U.S. W. Bureau |
|----------------|----------|---------|--------|--------|----------------|
| 5 min/ 30 min  | 0,25     | 0,35    | 0,34   | 0,42   | 0,37           |
| 10 min/ 30 min | 0,45     | 0,57    | 0,54   | 0,63   | 0,57           |
| 15 min/ 30 min | 0,62     | 0,72    | 0,7    | 0,75   | 0,72           |
| 20 min/ 30 min | 0,77     | 0,84    | 0,81   | 0,84   |                |
| 25 min/ 30 min | 0,89     | 0,93    | 0,91   | 0,92   |                |
| 30 min/ 1 h    | 0,69     | 0,79    | 0,74   |        | 0,79           |
| 45 min/ 1 h    | 0,87     | 0,92    | 0,83   |        |                |
| 1 h / 24 h     | 0,54     | 0,60    | 0,42   |        |                |
| 6 h / 24 h     | 0,88     | 0,85    | 0,72   |        |                |
| 8 h / 24 h     | 0,91     | 0,88    | 0,78   |        |                |
| 10 h / 24 h    | 0,93     | 0,90    | 0,82   |        |                |
| 12 h / 24 h    | 0,95     | 0,92    | 0,85   |        |                |
| 24 h / 1 día   | 1,1      | 1,1     | 1,1    |        | 1,13           |

Estos valores también son bastante usados para estudios hidrológicos en Colombia, por la similitud con el área Andina. De este modo los valores de precipitación que se

encontraron fueron calculados de acuerdo a la relación correspondiente mostrada anteriormente. Los valores de precipitación para cada periodo de retorno distribuido durante el día se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores de precipitación para la distribución en 24 horas.

| Tiempo de Duración | Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración |         |         |         |         |          |
|--------------------|--|---------|---------|---------|---------|----------|
|                    | 2 años   | 5 años  | 10 años | 25 años | 50 años | 100 años |
| 24 hr              | 33.9598  | 41.2196 | 46.0263 | 52.0994 | 56.6049 | 61.0770  |
| 12 hr              | 28.8659  | 35.0367 | 39.1223 | 44.2845 | 48.1141 | 51.9155  |
| 60 min             | 14.2631  | 17.3122 | 19.3310 | 21.8818 | 23.7740 | 25.6523  |
| 30 min             | 10.5547  | 12.8111 | 14.3050 | 16.1925 | 17.5928 | 18.9827  |
| 25 min             | 9.6048   | 11.6581 | 13.0175 | 14.7352 | 16.0094 | 17.2743  |
| 20 min             | 8.5493   | 10.3770 | 11.5870 | 13.1159 | 14.2502 | 15.3760  |
| 15 min             | 7.3883   | 8.9677  | 10.0135 | 11.3348 | 12.3150 | 13.2879  |
| 10 min             | 5.6995   | 6.9180  | 7.7247  | 8.7440  | 9.5001  | 10.2507  |
| 5 min              | 3.5886   | 4.3558  | 4.8637  | 5.5055  | 5.9815  | 6.4541   |

Obtenidos los datos de precipitación ya se puede calcular los valores correspondientes a la intensidad de precipitación para la posterior construcción de las curvas IDF. Para ello, la intensidad será el valor de la precipitación dividido por el tiempo de duración para cada periodo de retorno:

Tabla 12. Valores de intensidad para la distribución en 24 horas.

| Tiempo de duración |         | Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno |        |         |         |         |          |
|--------------------|---------|--|--------|---------|---------|---------|----------|
| Hr                 | min     | 2 años   | 5 años | 10 años | 25 años | 50 años | 100 años |
| 24 hr              | 1440 hr | 1.41   | 1.72   | 1.92    | 2.17    | 2.36    | 2.54     |
| 12 hr              | 720 hr  | 2.41   | 2.92   | 3.26    | 3.69    | 4.01    | 4.33     |
| 1 hr               | 60 min  | 14.26  | 17.31  | 19.33   | 21.88   | 23.77   | 25.65    |
| 0.5 hr             | 30 min  | 21.11  | 25.62  | 28.61   | 32.39   | 35.19   | 37.97    |
| 0.42 hr            | 25 min  | 23.05  | 27.98  | 31.24   | 35.36   | 38.42   | 41.46    |
| 0.33 hr            | 20 min  | 25.65  | 31.13  | 34.76   | 39.35   | 42.75   | 46.13    |
| 0.25 hr            | 15 min  | 29.55  | 35.87  | 40.05   | 45.34   | 49.26   | 53.15    |
| 0.17 hr            | 10 min  | 34.20  | 41.51  | 46.35   | 52.46   | 57.00   | 61.50    |
| 0.08 hr            | 5 min   | 43.06  | 52.27  | 58.36   | 66.07   | 71.78   | 77.45    |

Con los valores de la intensidad para los diferentes periodos de retorno se puede graficar las diferentes curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la serie de precipitación máxima anual en la estación de Botana.

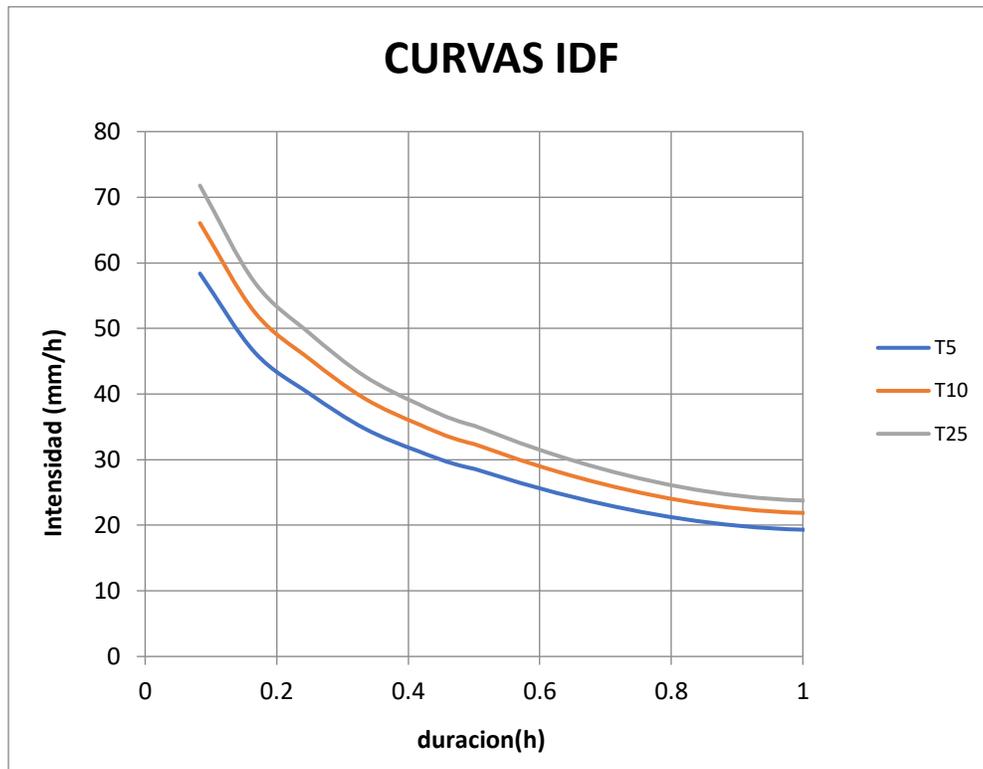


Figura 17. Curva IDF a partir de los coeficientes en Brasil.

#### 4.6 Ajuste a curvas sintéticas

Estos valores de intensidad posteriormente deben ser ajustados a una curva IDF sintética, las cuales existen en gran variedad, no obstante, se ha considerado para el cálculo de ajuste la función de Aparicio (1997) la cual esta expresada como se muestra a continuación:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

Donde **K**, **m** y **n** son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, T corresponde al periodo de retorno y en tanto que I y t corresponden a la intensidad de precipitación y la duración respectivamente. Estos parámetros se los calculo a partir de la ecuación de regresión múltiple, donde se crea un sistema de ecuaciones que dependen del número de incógnitas a encontrar:

$$\begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1^2) + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2^2) \end{aligned}$$

Donde N es el número de datos y las incógnitas son  $a_0, a_1, a_2$ ,  $x_1, x_2$  y  $y$  son respectivamente los logaritmos del período de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Una vez calculados los valores de  $a_0, a_1, a_2$  es posible evaluar los parámetros  $k, m, n$  aplicando el antilogaritmo a estos valores.

Para el cálculo se tiene la siguiente ecuación y las curvas IDF correspondientes:

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{103.835 * T^{0.129308}}{t^{0.44197}}$$

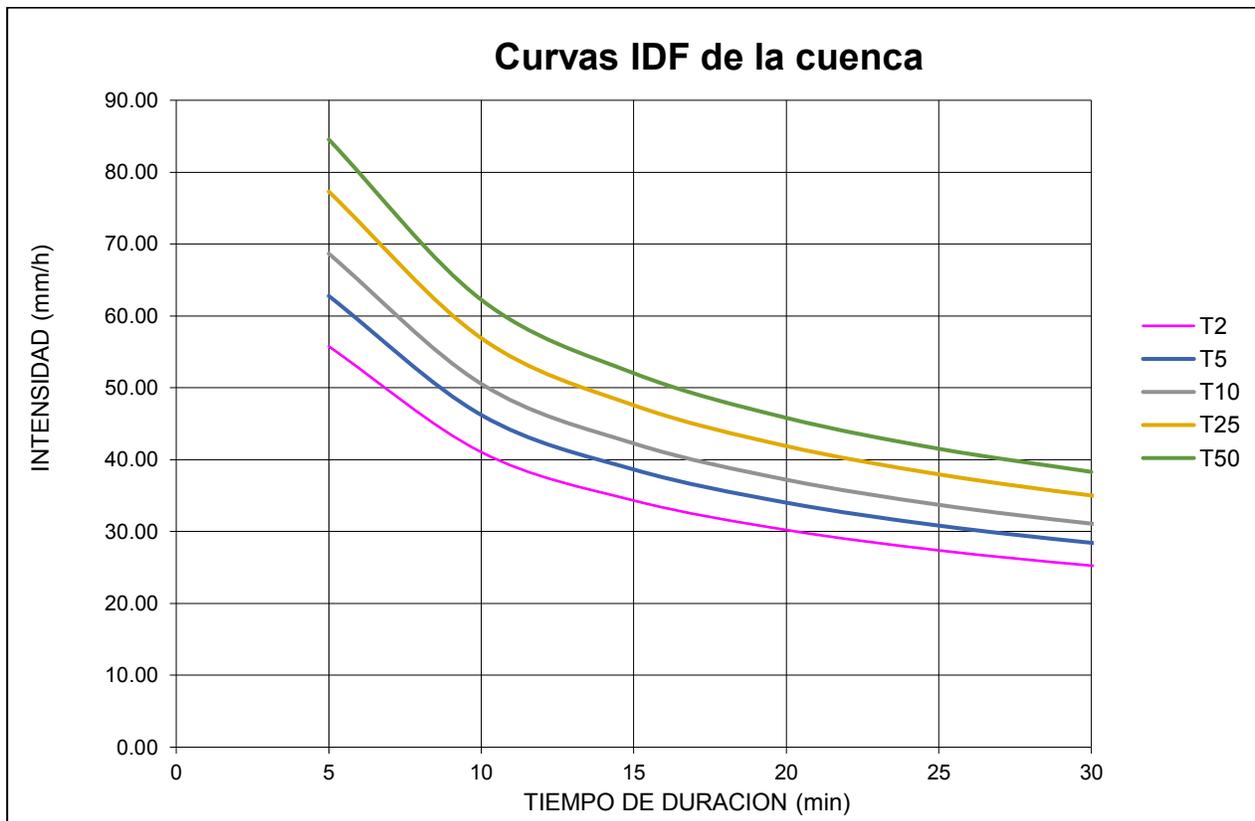


Figura 18. Ajuste de la curva IDF.

## 4.7 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. El tiempo de concentración también es importante para el estudio hidrológico porque suministra una idea del tiempo de duración que deberá tener la lluvia de diseño que se usará para el modelamiento. (VELEZ UPEGUI & BOTERO GUTIERREZ, 2010)

Para este procedimiento se ha calculado el tiempo de concentración a partir de varias ecuaciones, aunque algunas son aplicables para ciertas condiciones, se ha hecho el ejercicio para el análisis comparativo:

- **Metodo de Kirpich:** Utilizable en cuencas de tamaño medio, pendiente considerable y diseñada para suelos dedicados al cultivo. La fórmula viene dada por:

$$T_c = 0.06 (L^{0.77} S^{-0.385})$$

Dónde:

L: longitud del cauce más largo

S: pendiente media del lecho

tc: Tiempo de concentración en horas

La cuenca de estudio posee una longitud de cauce L= 4.85 km y una pendiente media del lecho del 19%. Con esta información, el tiempo de concentración será:

$$T_c = 0.06 ((4.85)^{0.77} (0.19)^{-0.385})$$

$$\mathbf{T_c=23.23 \text{ min}}$$

- **Temez:** ampliamente utilizado en la península Ibérica, válido para cuencas de 1 km<sup>2</sup> hasta 3.000 km<sup>2</sup> y con tiempos de concentración desde los 15 minutos hasta las 24 horas.

$$T_c = 0.3 \left( \frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

L: longitud del cauce más largo

i : Pendiente media del lecho

tc: Tiempo de concentración en horas

**Tc=1.3 horas**

Los resultados obtenidos varían considerablemente debido al perfil del área de drenaje, por lo tanto, entendiendo que esta es de tipo rural dedicada al cultivo y ganadería, se decidió que el tiempo de concentración que más se ajusta es el proporcionado por Kirpich. Así mismo, para los cálculos de hietogramas se aproximó este valor de 23 a 30 min.

#### **4.8 Modelo de producción de escorrentía: modelo SCS**

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía ( $P_o$ ) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Número de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad.

El modelo SCS contempla dos hipótesis conceptuales:

1. La existencia de un umbral por debajo del cual la precipitación no produce escorrentía.

$$E(t)=0 \text{ si } P(t)\leq S_o$$

Dónde:

$E(t)$  es la escorrentía en un tiempo  $t$

$P(t)$  es la precipitación en un tiempo  $t$

$S_o$  es el umbral de abstracción inicial

2. Rebasado el umbral los valores de Filtración y Escorrentía se igualan:

$$\frac{F(t)}{S} = \frac{E(t)}{P(t) - S_o} \text{ si } P(t)$$

Por continuidad:

$$P(t) = S_o + F$$

$$E(t) = \frac{(P(t) - S_o)^2}{P(t) - S_o + S} \text{ si } P(t) > S_o$$

Siendo S la abstracción potencial del sistema (UPV, 2015).

En cuanto al número de curva (CN), es una variable que depende principalmente de las características lito-edaforológicas, características de la cubierta del suelo que se calculan mediante tablas, pendiente del terreno y humedad antecedente. Cabe resaltar que el método fue desarrollado a partir de registros de lluvia y escorrentía en 24 horas, por lo que no considera explícitamente la variación temporal de la escorrentía.

#### **4.8.1 Umbral de escorrentía**

El umbral de escorrentía es la precipitación acumulada a partir de la cual, una vez empapado el terreno, el agua empieza a circular por la superficie. Este valor depende del estado inicial del suelo de la cuenca, puesto que un suelo seco absorbe más que uno saturado (UPV, 2015).

Atendiendo a algunas recomendaciones, el SCS ha definido el estado previo de humedad del suelo en tres rangos:

- Suelo tipo I(Seco)
- Suelo tipo II(Medio)
- Suelo tipo III(Húmedo)

La tabla de tipología de usos de suelo proporciona el valor de umbral de escorrentía ( $P_o$ ), suponiendo un grado de humedad de suelo medio (previo a la precipitación). Si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones (retenciones superficiales, infiltración) serán menores, por lo que el valor real de  $P_o$  será menor al proporcionado en la tabla. En sentido contrario, si los días anteriores no ha llovido nada, el suelo estará seco, y todas las abstracciones serán mayores: hay que corregir el valor aumentándolo (Sánchez, 2017).

El estado de humedad se encuentra determinado por la lluvia total en el periodo de 5 días anterior a la tormenta. El S.C.S. usa tres intervalos de condición de humedad antecedente (CHA) denominados: seco, medio o húmedo I, II y III respectivamente (Villon Bejar, 2002).

CHA – I, es el límite inferior de humedad o el límite superior infiltración. Hay un mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.

CHA – II, es el grado medio de humedad del suelo, calculado a partir de los datos de potencial de escorrentía proporcionados en la tabla de tipología de usos de suelo.

CHA – III, es el límite superior de humedad o el límite inferior de infiltración. Hay máximo potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores.

Teniendo en cuenta la precipitación antecedente, se calibra el valor de CN considerando los criterios que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 13. Condiciones de humedad según el S.C.S.

| <i>Precipitación total en mm en los 5 días anteriores</i> |                      |                         |
|---|----------------------|-------------------------|
| CONDICIÓN   | ESTACIÓN DE LATENCIA | ESTACIÓN DE CRECIMIENTO |
| I SECO  | $P \leq 13$          | $P \leq 36$             |
| II MEDIO  | $13 \leq P \leq 28$  | $36 \leq P \leq 53$     |
| III HÚMEDO  | $P \geq 28$          | $P \geq 53$             |

Está comprobado que los resultados de caudales son muy sensibles al estado de humedad considerado. Muchos autores calculan para condiciones medias de humedad inicial del complejo suelo-vegetación, no obstante, estos valores pueden modificarse en función de dicha variable.

La relación entre el umbral de escorrentía ( $P_o$ ) y el Número de Curva (CN) es:

$$CN(II) = \frac{5080}{50.8 + P_o}$$

Las equivalencias de CN entre las distintas condiciones de humedad son:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 - 0.13 * CN(II)}$$

Para el presente proyecto se asume como más adecuados para la zona los valores de umbral de escorrentía correspondientes a unas condiciones de humedad tipo II

(medias), sin embargo, se calculan y comparan los valores para las tres condiciones de humedad definidas por el SCS.

#### 4.8.2 Clasificación hidrológica del suelo.

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifica en una de las siguientes categorías según el NRCS, 2009 (*Diaz & Teobaldis , 2017*):

Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.

- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.

- Grupo C: Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.

- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

Para una mejor interpretación, se diseñó la siguiente tabla con la información correspondiente a los grupos hidrológicos del suelo:

Tabla 14. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S.

| GRUPO | INFILTRACIÓN | POTENCIA     | TEXTURA   | DRENAJE          |
|-------|--------------|--------------|---|------------------|
| A     | Rápida       | Grande       | Arenosa<br>Areno-limosa                                       | Perfecto         |
| B     | Moderada     | Media grande | Franco-Arenosa<br>Franca<br>Franca-Arcillosa<br>Franco-limosa | Bueno a moderado |

|   |           |  |                                    |                      |
|---|-----------|--|------------------------------------|----------------------|
| C | Lenta     | Media a pequeña                                  | Franco-Arcillosa<br>Franco-Arcillo | Imperfecto           |
| D | Muy lenta | Pequeño(litosuelo)<br>u horizontes de<br>arcilla | Limosa<br>Arcillo-arenosa          | Pobre o muy<br>pobre |

Teniendo en cuenta lo anterior, la caracterización de estos grupos hidrológicos se llevó a cabo a través del uso de la información suministrada por el IGAC, correspondiente a la tipología de suelos de la zona (Figura 19).

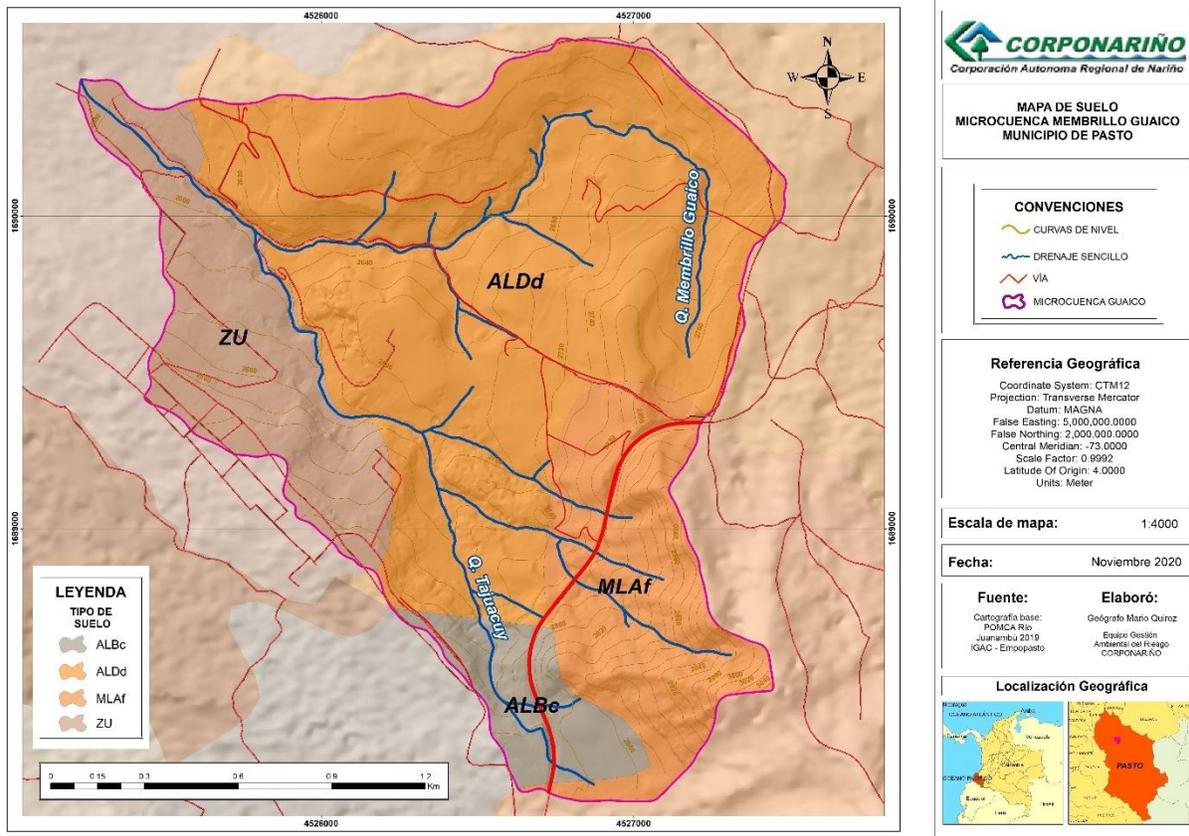


Figura 19. Mapa de Suelos-IGAC

Teniendo presente estas unidades, se realizó la conversión a las tipologías de suelos hidrológicas determinadas por el S.C.S, teniendo en cuenta las características lito-edafológicas de cada una de ellas. En este sentido la tabla de conversión (Lopez, 2006) se muestra a continuación:

Tabla 15. Tabla de conversión para tipos de usos de suelo

| CODIGO                        | LEYENDA<br>(tipo de suelo)                                    | INSTRUCCIÓN<br>(grupo de suelo) |
|-------------------------------|---|---------------------------------|
| $\beta$                       | Basaltos  | D                               |
| $\epsilon_4$                  | Metabasitas   | D                               |
| P-T <sub>Al</sub>             | Cuarcitas blancas micaesquistos plateados y gneises albiticos | B                               |
| P-T <sub>Al</sub>             | Diabasas  | D                               |
| P-T <sub>VA</sub>             | Filitas con cuarcitas y yesos intercalados                    | A                               |
| QT                            | Terrazas  | B                               |
| Q                             | Indiferenciado  | C                               |
| Q <sub>15</sub>               | Conglomerados   | B                               |
| QAI                           | Aluviones y colusiones actuales                               | A                               |
| QCd                           | Conos de deyección  | A                               |
| QL                            | Derribos de ladera  | A                               |
| T <sub>Al</sub>               | Cuarcitas micaceas  | D                               |
| T <sub>A</sub> <sup>d</sup>   | Mármoles calizos y dolomíticos                                | C                               |
| T <sub>AM</sub> <sup>d</sup>  | Mármoles fajeados y mármoles blancos y crema                  | C                               |
| T <sub>VA</sub>               | Anfibolitas epidoticas y gneises                              | D                               |
| T <sub>Al</sub>               | Pizarras micaceas y micacitas                                 | D                               |
| T <sub>A22 AH</sub>           | Rocas carbonatadas y pizarras                                 | D                               |
| T <sub>A22</sub>              | Rocas carbonatadas  | D                               |
| T <sub>A22</sub> <sup>W</sup> | Rocas carbonatadas y yesos                                    | C                               |
| T <sub>Al</sub> <sup>d</sup>  | Mármoles calizo-dolomíticos blancos y crema                   | D                               |
| T <sub>VA</sub>               | Rocas carbonatadas con filitas y pizarras intercaladas        | C                               |
| T <sub>C2-Q</sub>             | Margas rojas y caliche  | A                               |

Desarrollando la conversión, se encontró que el 59.7% corresponde a suelo hidrológico tipo A, que en esta zona de drenaje es la más predominante. Así mismo el tipo B, con un área de 23 % es el segundo más abundante y por último el tipo D con un porcentaje de 16,6% del total es la menos predominante. A continuación, se recoge la información final sobre los suelos hidrológicos presentes en el área de drenaje de la quebrada Membrillo Guaico y su correspondiente mapa.

Tabla 16. Datos finales de suelos hidrológicos

| Tipo de suelo | Suelos hidrológicos (S.C.S) | Área (has) |
|---------------|-----------------------------|------------|
| ALDd y MLAf   | A                           | 196.76     |
| ZU            | B                           | 77.69      |
| ALBc          | D                           | 55         |

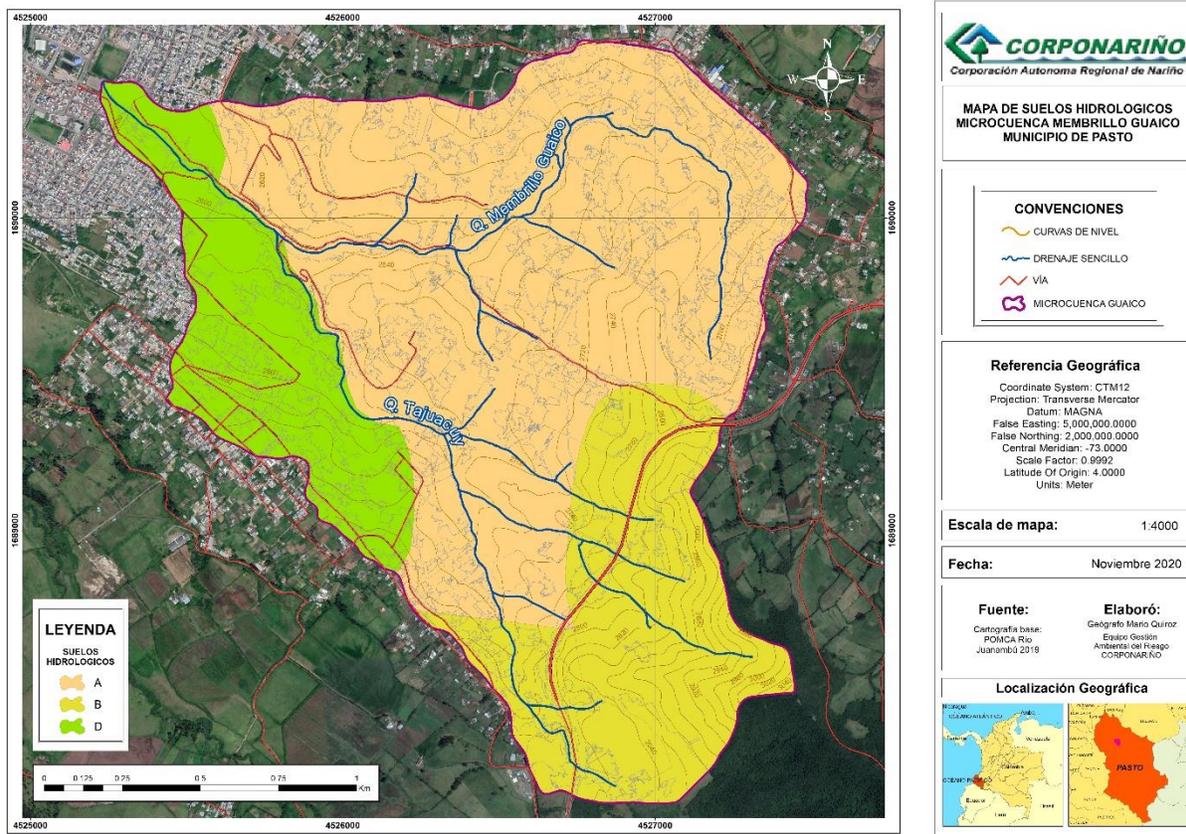


Figura 20. Mapa tipologías de suelos hidrológicos.

### 4.8.3 Tipo de usos de suelo

Uno de los elementos importantes para definir el comportamiento hidrológico de una cuenca, tiene que ver con los usos de suelo, los cuales están definidos según el S.C.S en varias categorías, entre las que se destacan los cultivos, las praderas, masas forestales entre otras.

En este orden de ideas, para obtener las coberturas vegetales se utilizó el conocimiento de profesionales idóneos para la interpretación visual de productos de sensores remotos (imagen de Drone) y posteriormente, se constató con el trabajo de campo. Seguidamente con la ayuda del Software ArcGIS 10.4, se realizó la creación de las denominadas firmas espectrales, las cuales "...son una descripción estadística de las clases que derivaron de las muestras identificadas en el ráster de entrada o los datos de muestra de la entidad". ESRI (2016). La anterior herramienta genera un archivo de firma que se utilizó como entrada para otras herramientas de análisis multivariado. El principal ejemplo es la herramienta de Clasificación "Máximo Likelihood

Classification”, que en español significa “máxima verosimilitud”, la cual realizó la clasificación correspondiente. Por otro lado, los archivos requeridos para obtener el resultado son los vectores tipo punto de valor medio de la clase, de los cuales se obtuvieron las cuatro clasificaciones propuestas.

En este sentido, se logró identificar cuatro tipos de usos de suelos en el área de estudio, las cuales se describen a continuación:

- Masas Forestales: Se denominan así las superficies de terreno en las cuales se desarrolla vegetación leñosa arbórea o arbustiva, tales como el monte alto o los bosques. De acuerdo con la densidad de dicha vegetación se divide en a) muy espesas b) espesas; c) medias; d) claras y e) muy claras (árboles o arbustos diseminados). Dentro de la categoría “masas forestales” en la Tabla tipología de usos de suelo, no se han establecido diferencias en cuanto a pendiente, por considerar que no es frecuente que exista este tipo de aprovechamiento en terrenos llanos.
- Praderas: Se agrupan en esta categoría el conjunto de cultivos cuyo aprovechamiento constituye la base de alimentación de ganado. Estas praderas pueden ser “pobres” si existe un intenso régimen de pastoreo, “medias” si se presenta un moderado régimen de pastoreo, “buenas” si el pastoreo es ligero y por último pueden ser “muy buenas” si se encuentran praderas artificiales, naturales o mixtas densas y con cierta altura.
- Cultivos: Tierras sembradas de cultivos plantados formando hileras, lo que permite realizar entre ellas determinadas labores agrícolas, destinadas a mullir el terreno, quitar las malas hierbas, etc., mientras que las plantas se desarrollan.

A continuación, se presenta el mapa de usos de suelos o coberturas vegetales a partir de la metodología del S:C:S:

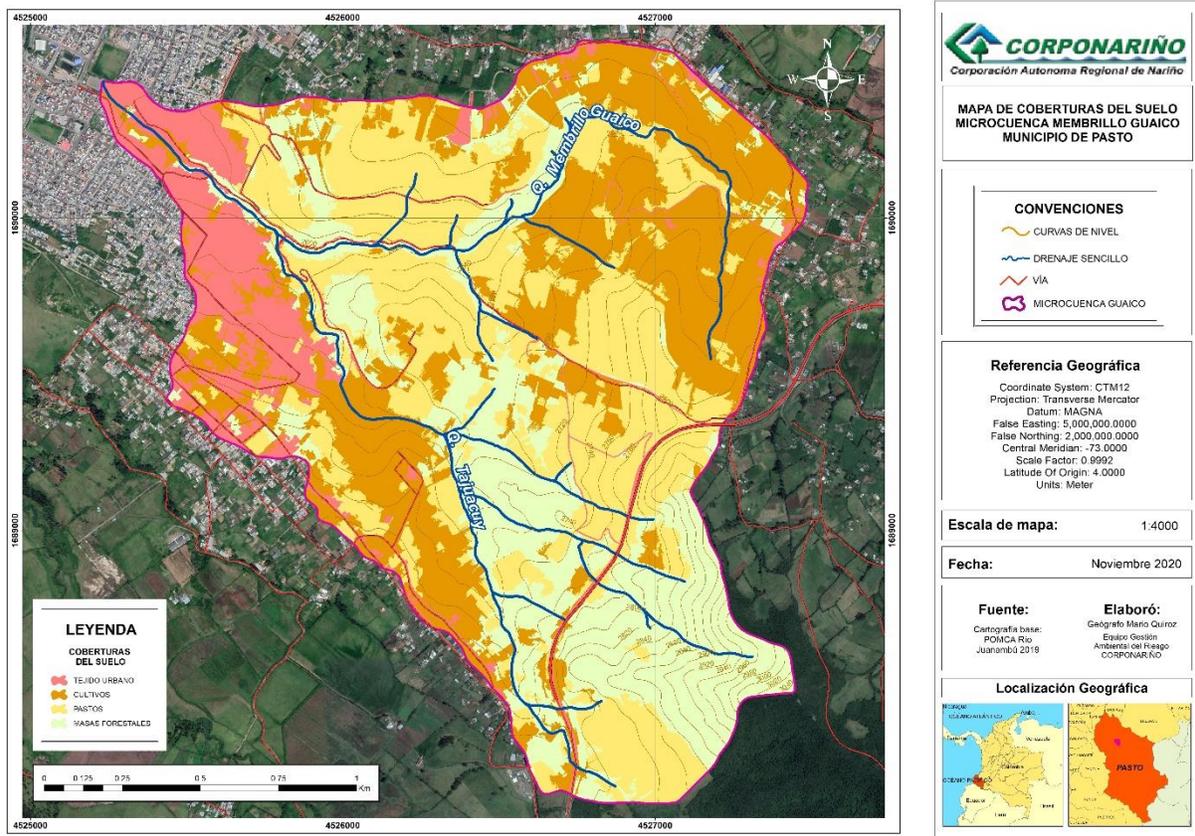


Figura 21. Mapa de usos de suelo

El mapa anterior muestra que la cobertura más predominante son los pastos, con el 32.6 % del total del área de drenaje, caracterizados por ser pastos naturales y con baja densidad, destinados principalmente al pastoreo de ganado. Esta tipología se encuentra en la parte media del área de estudio, alternándose en zonas con algunos cultivos.

Los cultivos ocupan el 30.1% y se encuentran ubicados en los extremos norte y sur del área, con sistemas de siembra a favor de la pendiente del terreno sin prácticas de conservación de suelos. Los sembradíos se basan principalmente de hortalizas, tubérculos y maíz.

En cuanto a las masas forestales, ocupan el 26% y se encuentran básicamente en la parte alta. Es evidente por lo tanto que la mayor parte del área de estudio ha sido utilizada para el aprovechamiento humano, por lo cual es importante resaltar que a medida que nos acercamos al área urbana, las masas forestales desaparecen.

Por último, se tiene el área urbana o tejido urbano que corresponde al 10.7 %, ubicada principalmente en la parte baja de la cuenca, donde predominan las viviendas y las vías de transporte.

Teniendo la información de estas variables, es importante mencionar que, para cada grupo de suelo, el umbral de escorrentía ( $P_o$ ) depende de las características hidrológicas del suelo, de la pendiente y del uso al que se destina. Para el cálculo del CN en una cuenca de superficie total A, se divide ésta en diferentes subáreas  $A_i$  correspondientes a combinaciones de tipo y usos del suelo distintos y se obtiene un  $P_{o,i}$  asociado a cada subárea.

Para condiciones de humedad media, los valores de  $P_o$  habitualmente utilizados se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 17. Relación de variables del S.C.S

| USO DE LA TIERRA            | PENDIENTE (%) | CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS | GRUPO DE SUELO |    |    |    |
|-----------------------------|---------------|------------------------------|----------------|----|----|----|
|                             |               |                              | A              | B  | C  | D  |
| Barbecho                    | >3            | R                            | 15             | 8  | 6  | 4  |
|                             |               | N                            | 17             | 11 | 8  | 6  |
|                             | <3            | R/N                          | 20             | 14 | 11 | 8  |
| Cultivos en hilera          | >3            | R                            | 23             | 13 | 8  | 6  |
|                             |               | N                            | 25             | 16 | 11 | 8  |
|                             | <3            | R/N                          | 28             | 19 | 14 | 11 |
| Rotación de cultivos pobres | >3            | R                            | 26             | 15 | 9  | 6  |
|                             |               | N                            | 28             | 17 | 11 | 8  |
|                             | <3            | R/N                          | 30             | 19 | 13 | 8  |
| Rotación de cultivos densos | >3            | R                            | 37             | 20 | 12 | 9  |
|                             |               | N                            | 42             | 23 | 14 | 11 |
|                             | <3            | R/N                          | 47             | 25 | 16 | 13 |
| Praderas                    | >3            | Pobre                        | 24             | 14 | 8  | 6  |
|                             |               | Media                        | 53             | 23 | 14 | 9  |
|                             |               | Buena                        | *              | 33 | 18 | 13 |

|  |    |            |    |    |    |    |
|--|----|------------|----|----|----|----|
|  | <3 | Muy buena  | *  | 41 | 22 | 15 |
|  |    | Pobre      | 58 | 25 | 12 | 7  |
|  |    | Media      | *  | 35 | 17 | 10 |
|  |    | Buena      | *  | *  | 22 | 14 |
|  |    | Muy buena  | *  | *  | 25 | 16 |
| <b>Plantaciones<br/>regulares</b><br><br><b>Aprovechamiento<br/>forestal</b> | >3 | Pobre      | 62 | 26 | 15 | 10 |
|  |    | Media      | *  | 34 | 19 | 14 |
|  |    | Buena      | *  | 42 | 22 | 15 |
|  | <3 | Pobre      |    | 34 | 19 | 14 |
|  |    | Media      |    | 42 | 22 | 15 |
|  |    | Buena      |    | 50 | 25 | 16 |
| <b>Masas forestales<br/>(bosques, monte<br/>bajo, etc)</b>                   |    | Muy clara  | 40 | 17 | 8  | 5  |
|  |    | Clara      | 60 | 24 | 14 | 10 |
|  |    | Media      | *  | 34 | 22 | 16 |
|  |    | Espesa     | *  | 47 | 31 | 23 |
|  |    | Muy espesa | *  | 65 | 43 | 33 |

1. *N: denota cultivo según las curvas de nivel.*
2. *R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente.*
3. *\*: denota que esa parte de cuenca debe considerarse inexistente a efectos de cálculo de caudales*
4. *Las zonas abancaladas se incluyen entre las de pendiente menor del 3%.*

#### 4.8.4 Calculo de Po y CN para el área de estudio

El umbral de escorrentía depende de los siguientes factores:

- Tipo de suelo
- Grado de desarrollo y tipo de cubierta vegetal
- Pendiente del terreno
- Estado de humedad inicial del complejo suelo-vegetación

Obtenidos los mapas de coberturas y suelos se procede a calcular el valor del Número de Curva de la microcuenca, asociando a cada cobertura su respectivo tipo de suelo. De esta manera, por tablas se obtiene el valor del umbral de escorrentía  $P_o$  para cada masa forestal y se calcula por lo tanto la curva número respectiva. En la siguiente tabla se ha calculado el CN (II) para toda la microcuenca:

Tabla 18. Valores de CN (II) para el área de drenaje.

| <b>COBERTUR<br/>A</b> | <b>GRUPOS HIDROLÓGICOS DE<br/>SUELO</b> | <b>ÁREA</b>    | <b>%</b> | <b><math>P_o</math></b> | <b>CN(II)</b> |
|-----------------------|---|----------------|----------|-------------------------|---------------|
| cultivos              | A-B-D                                   | 99.294117      | 30.1     | 19.1                    | 72.5          |
| masas<br>forestales   | A-B-D                                   | 87.390898      | 26.5     | 53.6                    | 48.6          |
| área urbana           | A-B-D                                   | 35.353355      | 10.7     | 2                       | 96.2          |
| pastos                | A-B-D                                   | 107.41872<br>1 | 32.6     | 42.6                    | 54.3          |

El cálculo del CN (II) general de toda la microcuenca se realizó a partir de la media ponderada de todos los valores encontrados en la tabla anterior:

$$CN(II) = 62.8$$

Así mismo se calculó los demás valores del CN considerando las condiciones de humedad inicial, resultando los siguientes valores:

$$CN(I) = 41.5$$

$$CN(III) = 79.5$$

Con esta información se procedió a calcular el mapa de CN para condiciones de humedad media, como se muestra a continuación:

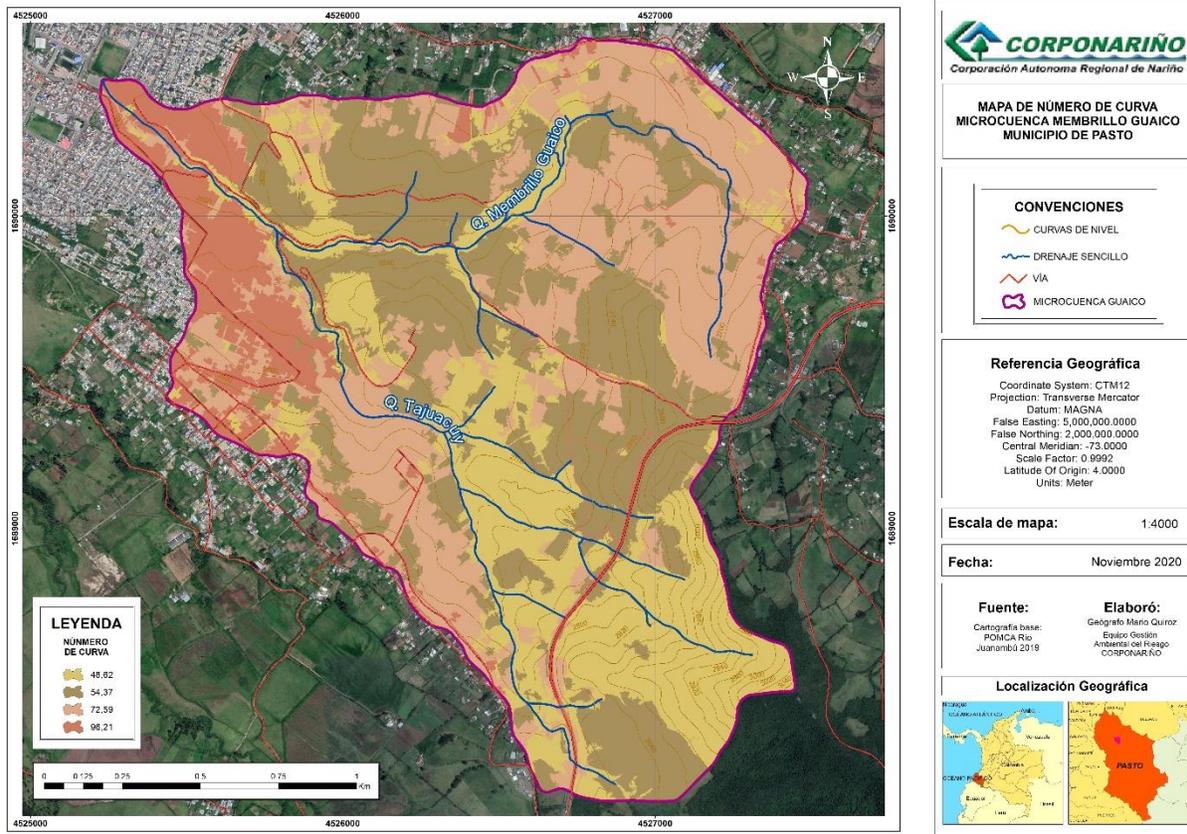


Figura 22. Mapa del Numero de Curva CN (II) del área de estudio

Los resultados obtenidos señalan que a medida que aumenta la densidad de la vegetación, menor es la escorrentía. El efecto de la vegetación sobre la respuesta hidrológica se relaciona con retardar el flujo de agua sobre el terreno mediante las abstracciones que hace la estructura aérea de las plantas, así mismo se ve la influencia de la materia orgánica, la cual permite mayor retención de humedad. Sin embargo, se evidencia que aún bajo las mismas condiciones de vegetación, las características propias del suelo tienen un efecto importante sobre la producción de escorrentía.

Las variaciones del número de curva corresponden a la distribución de las coberturas y grupos hidrológicos de suelo; por lo cual se observa que el CN con mayor valor es el de la zona urbana, siendo este coherente con la alta capacidad de esta cobertura de generar escorrentía, debido a los casi nulos procesos de infiltración y abstracciones que puede generar. Así mismo el valor más bajo del Numero de Curva corresponde a las masas forestales, concordando con esa capacidad de las plantas para abstraer la lluvia y con los procesos normales de infiltración.

Por otro lado, como se ha mencionado a través de este documento, el modelo utilizado para simular la transformación de la lluvia en escorrentía es el modelo del S.C.S: (S.C.S. Unit Hydrograph). Para ello, el modelo simplemente requiere conocer el área, el número de curva del SCS, el porcentaje impermeable del total de la superficie y el tiempo Tlag (Tiempo de desfase al Pico). Respecto a este último, su valor se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{lag} = 0.6T_c$$

Siendo Tc el tiempo de concentración

Por lo anterior, reemplazado el valor del tiempo de concentración que para la zona de estudio tiene un valor de 23.3 min se tiene:

$$T_{lag} = 14 \text{ min}$$

## 5. MODELACIÓN PSEUDODISTRIBUIDA DE CRECIDAS CON HEC-HMS

### 5.1 Modelo de la cuenca.

A partir de los datos elaborados, se realiza a continuación un análisis exhaustivo de las crecidas a partir del software informático HEC- HMS. En este sentido, la geometría del modelo de cuenca se elabora a partir de un elemento subbasin y por lo tanto se genera un solo hidrograma final. Con esta consideración el modelo que representa a la cuenca en estudio es el siguiente:

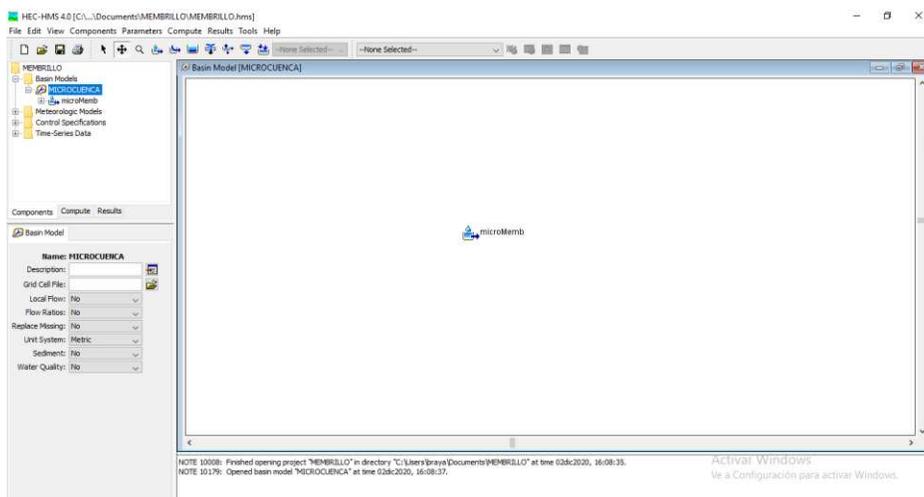


Figura 23. Esquema del Área de drenaje de la quebrada Membrillo Guaiico.

## 5.2 Método de modelación (Modelo de infiltración S.C.S. Curve Number)

El modelo que se utiliza para simular la infiltración en la cuenca es el modelo del número de curva del S.C.S. (S.C.S. Curve Number). La formulación original del S.C.S. fue desarrollada a partir del número de curva (CN) pero en algunos países suele utilizarse dicho método en función de un parámetro diferente,  $P_0$  (Umbral de escorrentía). En general, Números de curva  $CN = 0$  indican permeabilidad total mientras que  $CN = 100$  corresponden al caso totalmente impermeable.

El modelo de mayor aceptación para la propagación de hidrogramas en cauces naturales es el de Muskingum. El método de Muskingum fue presentado por McCarthy (1938) y maneja relaciones caudal-almacenamiento variable.

Este método modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos:

- Un almacenamiento prismático, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático.
- Un almacenamiento en cuña, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o bien, por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado. (Orio, 2011)

## 5.3 Hietogramas de Tormenta

Obtenido el valor del tiempo de concentración, se puede considerar ya la duración de la tormenta para el cálculo de los caudales de la microcuenca. El tiempo de concentración nos marca la duración crítica en la cual toda la microcuenca está aportando escorrentía al desagüe, dando idea sobre el tiempo que puede tardar una crecida en llegar a ese punto y provocar una emergencia. El tiempo de duración para la lluvia se tomó como 30 minutos, de este modo todos los hietogramas tendrán esta duración.

El programa requiere como input el hietograma de precipitación, por lo cual se calculó estos a partir de la metodología de los bloques alternos para periodos de 2, 5, 25 y 50 años. A continuación, se presentan los hietogramas para estos periodos de retorno.

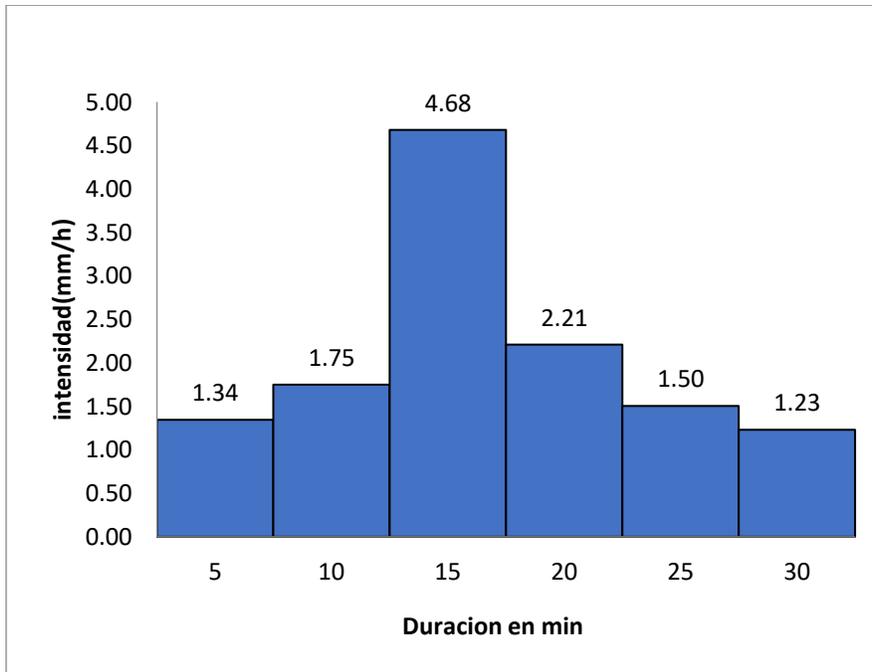


Figura 24. Diagrama de bloques alternos para T=2 años

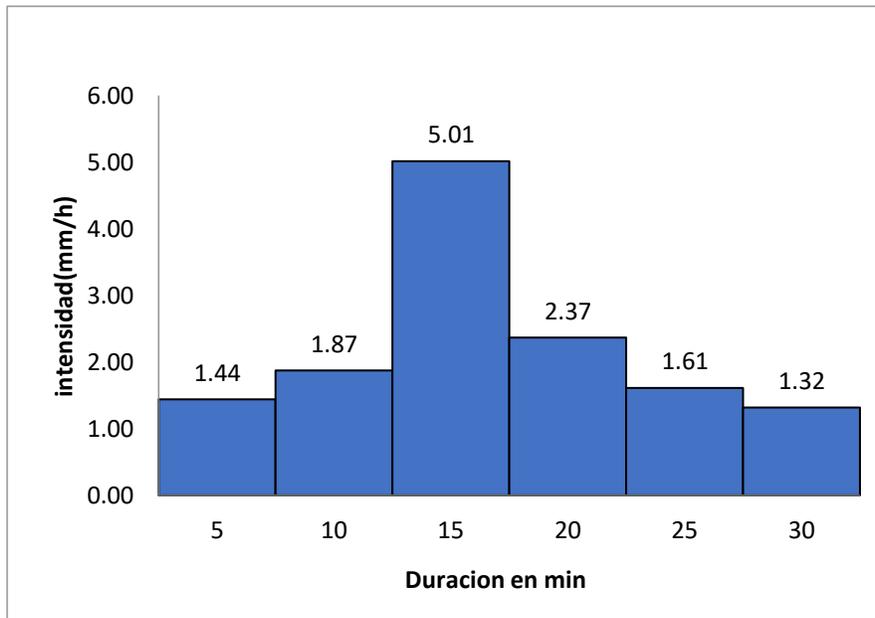


Figura 25. Diagrama de bloques alternos para T=5 años

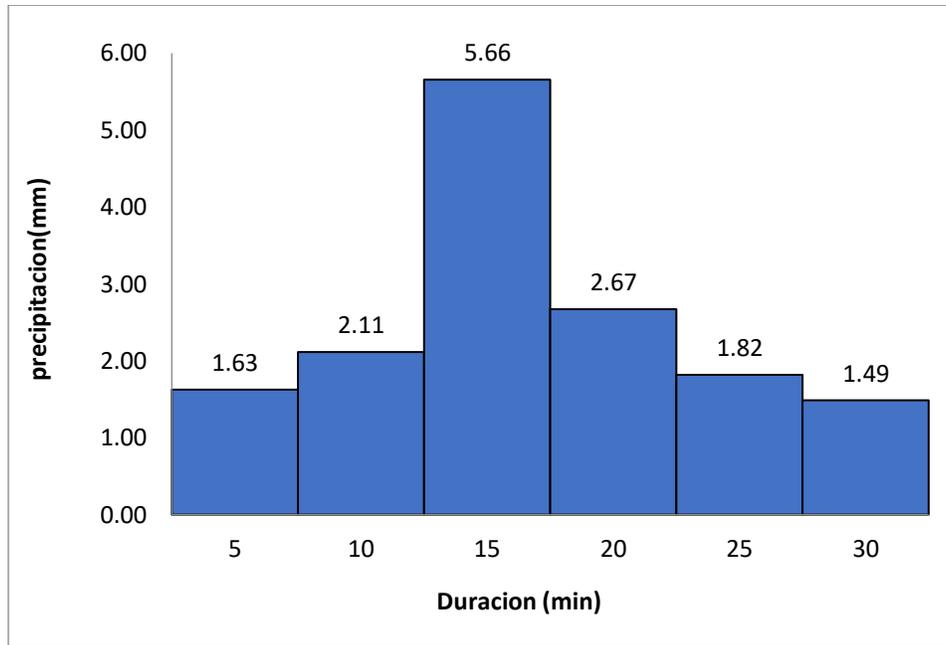


Figura 26. Diagrama de bloques alternos para T=25 años

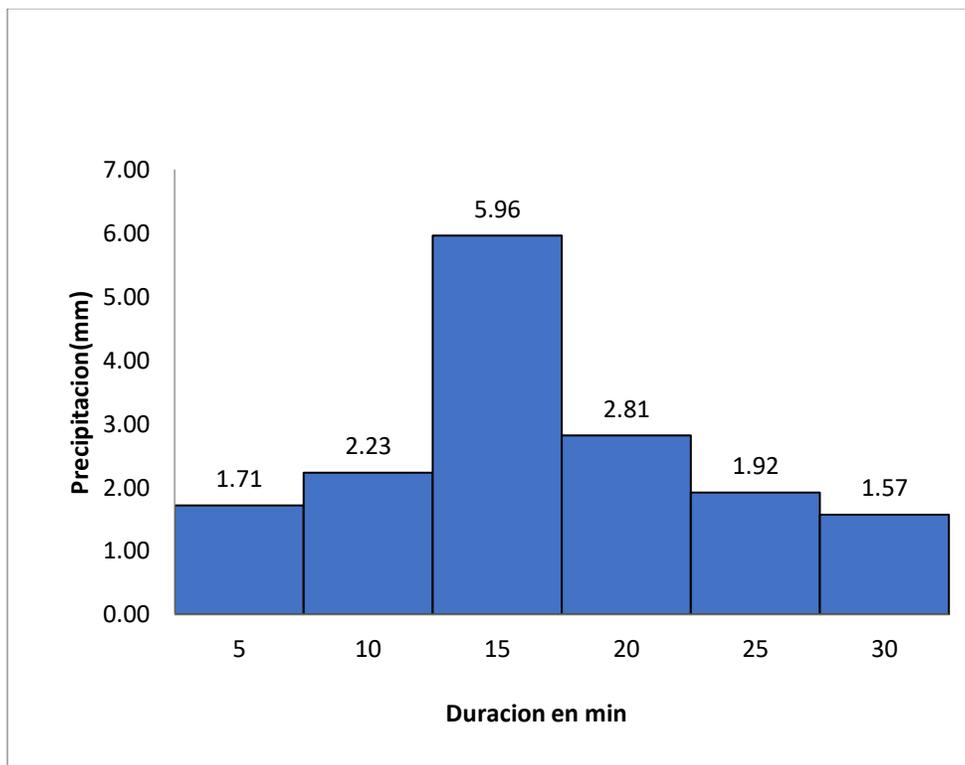


Figura 27. Diagrama de bloques alternos para T=50

## 5.4 Resultados obtenidos en Hec-HMS

Ingresados los valores al programa, este calculo los caudales del area de estudio a partir de la metodologia del S.C.S. teniendo como referencia que la discretizacion temporal sera cada 5 minutos y una duracion de 1 hora y 30 minutos.

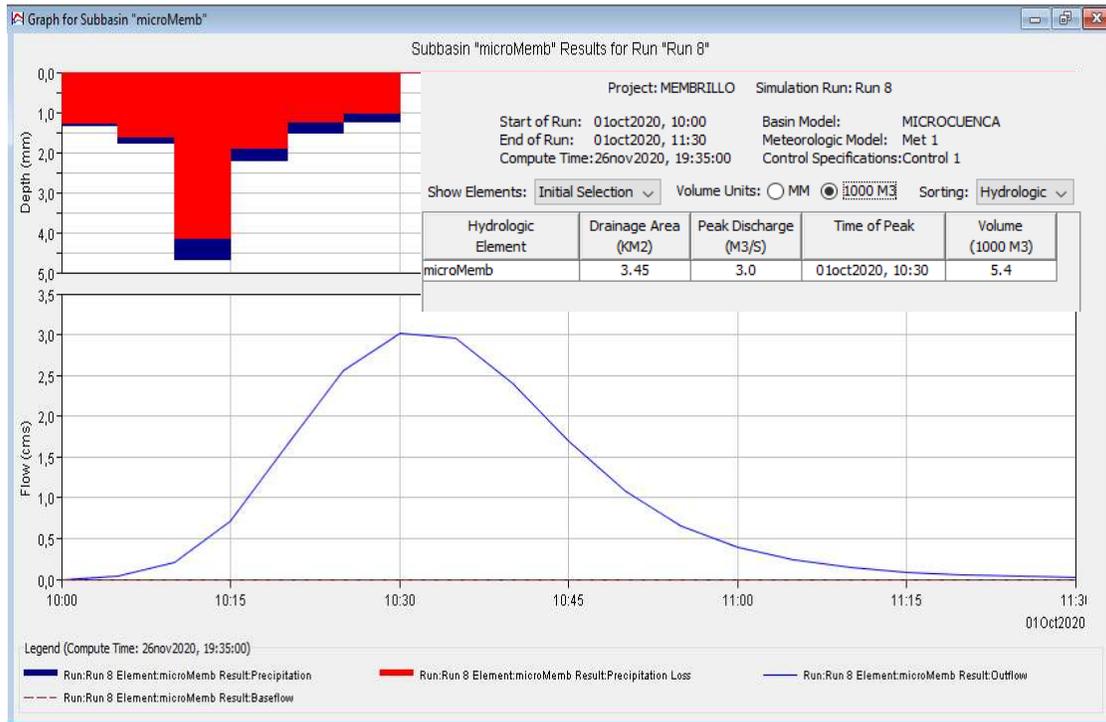


Figura 28. Hidrograma para T=2 años

Los resultados nos muestran que el volumen generado en toda el área de drenaje fue de 5.400 m<sup>3</sup>/s, con un caudal pico de 3 m<sup>3</sup>/s a los 30 min después de haber iniciado el evento de lluvia. En este contexto, es notorio que los caudales que se depositaran en el río son relativamente bajos y el tiempo al pico coincide evidentemente con el tiempo de concentración. A continuación, se presenta el hidrograma para T= 5 años:

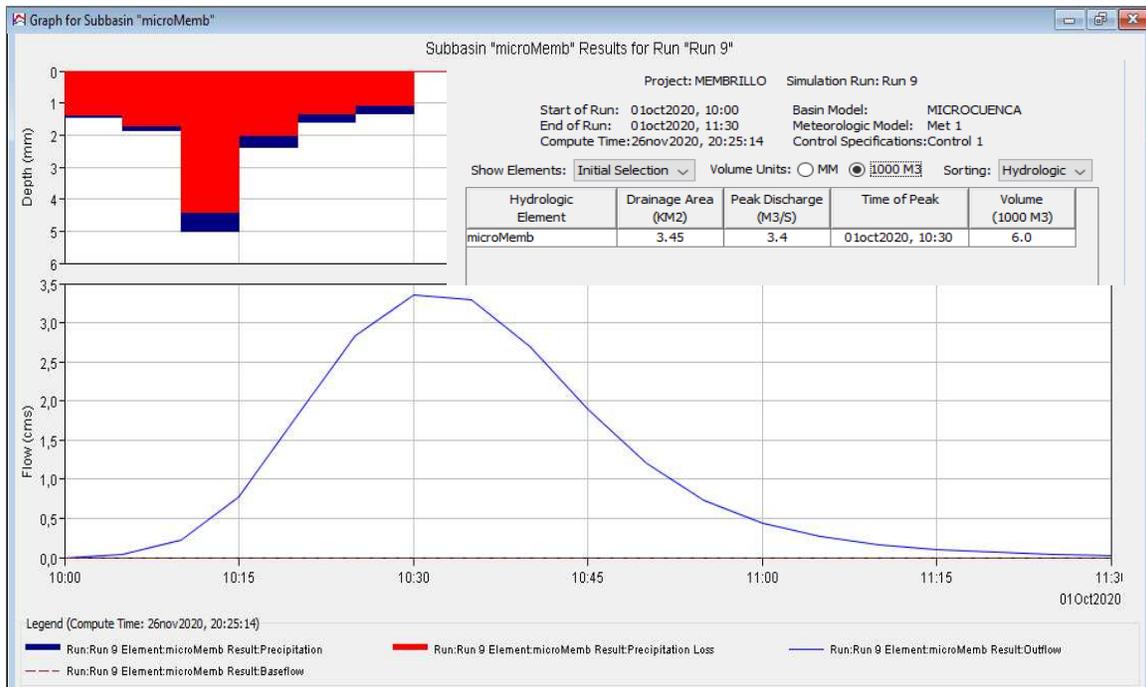


Figura 29. Hidrograma para T=5 años

Como vemos en la Figura 29, el caudal aumento hasta los 3.4 m<sup>3</sup>/s a los 30 minutos de haber empezado el evento de lluvia. También se evidencia un aumento en el volumen de agua, llegando hasta los 6.000 m<sup>3</sup>. A continuación, se presenta el hidrograma para T= 25 años.

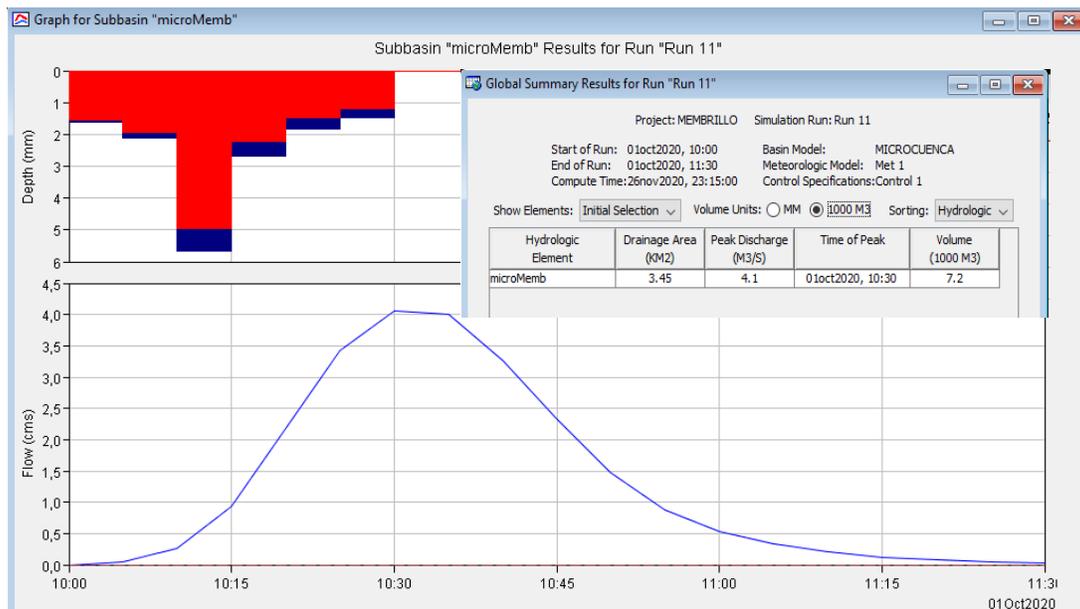


Figura 30. Hidrograma para T=25 años.

Analizando los valores encontrados para este periodo de retorno se puede evidenciar que el caudal aumento hasta los 4.1 m<sup>3</sup>/s, generando volúmenes de 7.200 m<sup>3</sup> a los 30 minutos de haber iniciado la lluvia. Por último, el hidrograma para un periodo de retorno de 50 años se muestra a continuación:

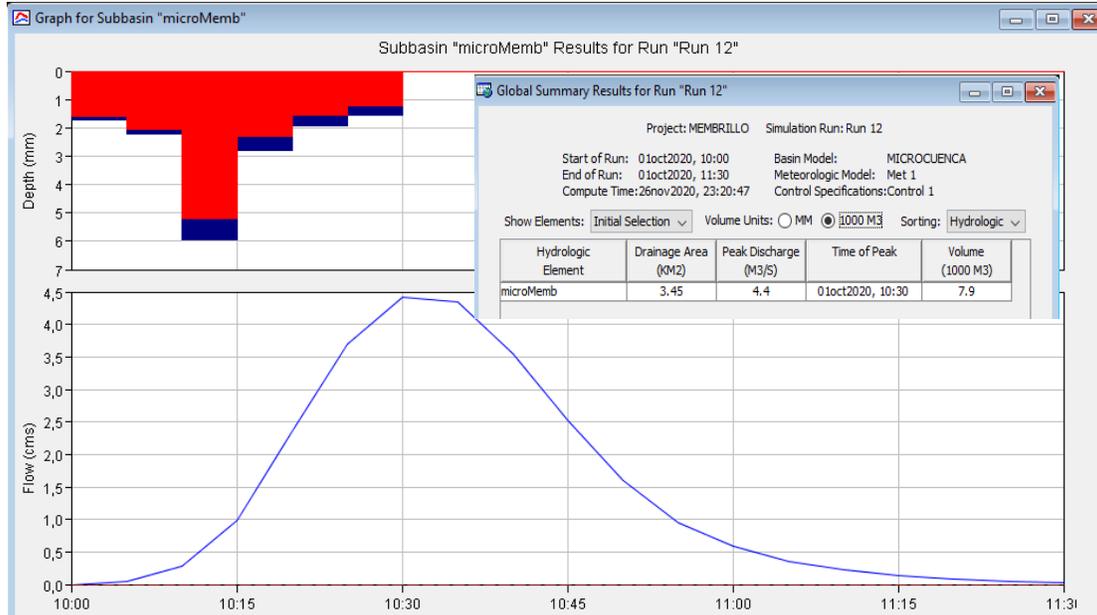


Figura 31. Hidrograma para T=50 años

Por último, se observa que, para un periodo de retorno de 50 años, el volumen de agua generado es de 7.900 m<sup>3</sup> y un caudal pico de 4.4 m<sup>3</sup>/s a los 30 minutos. En este sentido, se observa que los valores no cambiaron trascendentalmente respecto a T= 25 años, debido a que los cuantiles de lluvia encontrados y ajustados a la función de distribución GEV, tienden asintóticamente al valor extremo superior cada vez que el periodo de retorno aumente.

## 6. CONCLUSIONES

- Para llevar a cabo este estudio hidrológico, fue necesario complementar los datos de la estación de Botana a partir de los registros de la estación de Obonuco, para así calcular los valores máximos de precipitación y determinar el régimen de lluvias del lugar.
- La metodología escogida en este estudio para la transformación lluvia-caudal fue la propuesta por el Soil Conservation Service (S.C.S.), la cual usa la

caracterización de coberturas vegetales, humedad antecedente y suelos hidrológicos.

- El programa de simulación escogido para la elaboración de los hidrogramas finales fue HEC- HMS, el cual incluye el modelo de producción de esorrentía a través del uso de algunos parámetros entre ellos el CN.
- No fue posible llevar a cabo la calibración y validación del modelo hidrológico, debido a la falta de información de aforos de la quebrada, de manera que el modelo carece de ajustes matemáticos de sus parámetros. No obstante, se realizó trabajo de campo para recopilar información de registros históricos, de lo cual nose tuvo mayor información.
- Este estudio puede servir como insumo importante para la conservación de los recursos naturales, específicamente del cumplimiento de normativas como la de rondas hídricas, enmarcada en el Decreto 2245 de 2017.
- Debido a la emergencia sanitaria causada por el COVID 19, no fue posible recorrer toda el área de estudio y llevar a cabo algunos procesos de campo, entre ellos la verificación de los suelos hidrológicos del modelo. De esta manera se usó al máximo la información secundaria brindada por la Corporación y las autoridades públicas.
- Es importante señalar que insumos como la ortofotografía fueron suministrados por EMPOPASTO S.A. E.S.P, al cual se agradece su apoyo con esta información indispensable para la elaboración de este estudio.
- Al final los caudales encontrados para diferentes periodos de retorno fueron los siguientes:

*Tabla 19. Caudales máximos de diseño seleccionados para el área de estudio*

| Río/Quebrada                        | Tiempo de Retorno Tr (años) |     |     |     |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|
|                                     | 2                           | 5   | 25  | 50  |
| Área de drenaje<br>Membrillo Guaico | 3                           | 3.4 | 4.1 | 4.4 |

## 7. RECOMENDACIONES

- Para el uso de este estudio se debe considerar que, los resultados de la modelación hidrológica presentan limitaciones en cuanto a la calibración y validación, debido a la carencia de información relacionada.
- Se sugiere para motivos de evaluación actual del recurso en la quebrada Membrillo Guaico el levantamiento de información concerniente a inventario de eventos de riesgo como inundaciones y avenidas torrenciales. Así mismo, el monitoreo para conocimiento de la calidad del afluente a través de aforos a través de todo el cauce.
- Teniendo en cuenta las coberturas vegetales o usos de suelos, donde el valor predominante o con mayor presencia en el área de drenaje correspondió a pastos, es necesario llevar a cabo procesos de restauración ecológica en la microcuenca, especialmente en las riveras y partes altas de la quebrada. Estos procesos ayudan a la prevención y reducción del riesgo ante fenómenos como movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, permitiendo además, una adecuada funcionalidad de la ronda hídrica, la cual necesita de favorables condiciones ambientales para llevar a cabo los procesos ecosistémicos.

## Bibliografía

- Alcaldia de Pasto. (13 de Julio de 2020). *Pasto la Gran Capital*. Obtenido de <https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestro-municipio/informacion-general>
- CORPONARIÑO. (2011). *Plan de Ordenacion del Rio Pasto*. Pasto.
- Diaz, A., & Teobaldis , M. (2017). *Determinación del número de curva en Betancí (Cordoba, colombia) mediante teledeteccion y SIG*. Cordoba.
- ENVIROSOIL. (noviembre de 2020). *Envirosoil ingenieria* . Obtenido de <https://new.envirosoil.es/que-es-un-estudio-hidrologico-y-cual-es-su-utilidad/>
- ESRI. (2019). *Argis Pro*. Recuperado el Diciembre de 2019
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelacion hidrológica e hidráulica*.
- IIAMA. (2019). *Instituto de Ingenieria del Agua y medio Ambiente*. Recuperado el 05 de 2019, de <https://www.iiama.upv.es/iiama/es/transferecia/software/afins-2-0-e>
- Lopez, M. I. (2006). *Analisis de los principales parametros de un metodo hidrometeorológico para el calculo de avenidas torrenciales*. Cartagena.
- Orio, M. (2011). *Polibuscador upv*. Recuperado el 2019
- Sánchez, J. (2017). *Calculo de la precipitacion neta mediante el metodo del S.C.S. Salamanca*.
- TARBUCK, E., & LUTGENS, F. (2005). *Ciencias de la Tierra*.
- UPV. (2015). *Hidrologia superficial y subterranea*. valencia, España.
- VELEZ UPEGUI, J. J., & BOTERO GUTIERREZ, A. (2010). *researchgate*. Recuperado el 2019, de <https://www.researchgate.net/>
- Villon Bejar, M. (2002). *Metodo del numero de curva, caudales maximos*. Lima Peru: Villon.