

EFFECTOS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS  
RECURSOS HIDRICOS EN LA SUBCUENCA DEL RIO LAS PIEDRAS  
DEPARTAMENTO DEL CAUCA

ANGELA MARYENITH DELGADO VIVEROS

104911010618

EMMANUEL ANTONIO GOMEZ FRANCO

49101128



UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2017

EFFECTOS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS  
HIDRICAS EN LA SUBCUENCA DEL RIO LAS PIEDRAS DEPARTAMENTO DEL  
CAUCA

ANGELA MARYENITH DELGADO VIVEROS

EMMANUEL ANTONIO GOMEZ FRANCO

Modalidad de Investigación para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Director

Ing. Luis Jorge González M. Departamento de Hidráulica

Asesor PhD. Javier Álvarez Rodríguez Coordinador de Programa Técnico Científico  
del Área de Recursos Hídricos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX  
España.



UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2017

## CONTENIDO

	Pág.
1.INTRODUCCIÓN.....	14
2. ANTECEDENTES .....	<u>16</u>
3. JUSTIFICACIÓN .....	<u>17</u>
3.1. GESTIÓN Y PLANEACIÓN SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS .....	17
3.2. UTILIZACIÓN DE NUEVAS HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE ORDEN HIDROMETEREOLÓGICO .....	18
3.3. PLANEACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	18
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
5. HIPOTESIS .....	20
6. OBJETIVOS .....	21
6.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
7. METODOLOGIA.....	22
8. MARCO TEORICO .....	24
8.1. OFERTA HÍDRICA. ....	24
8.2. CICLO HIDROLÓGICO (O DEL AGUA).....	<u>24</u>
8.4. ArcGIS.....	25
8.5. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	<u>24</u>
8.6. ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA .....	<u>24</u>
8.7. PROMES .....	<u>24</u>
8.8. IPCC.....	<u>25</u>
8.9. CHAC .....	<u>25</u>
8.10. SHAPEFILE.....	25
8.11. PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA AREAL (MEDIA).....	25
9. ESTADO DEL ARTE .....	<u>25</u>

9.1. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	25
<u>6</u>	
9.2. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES EN LOS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN.....	25
<u>6</u>	
9.3. ESTUDIO DEL IMPACTO DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS. APLICACIÓN EN DIECINUEVE PEQUEÑAS CUENCAS.....	26
<u>6</u>	
10. BASES TÉCNICAS.....	27
10.1. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	27
10.1.1. Modelos climáticos y técnicas de proyección regional.....	27
10.1.2. Ensamble de Modelos Climáticos Globales.....	27
10.1.3. Escenarios de emisiones cambio climático.....	27
10.1.4. Proyecciones climáticas consideradas en este trabajo.....	29
11. MODELOS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO DEL IMPACTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS.....	30
11.1. POLÍGONOS DE THIESSEN.....	30
11.2. METODOS PARA COMPLETAR DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN.....	31
11.2.1. Temperatura.....	31
11.2.2. Precipitación.....	32
11.3. METODO PARA EL CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POR THORNTHWAITE.....	32
11.4. CALCULO DE APORTACIONES CON EL MODELO TEMEZ EN CHAC.....	33
11.4.1. Calibración.....	35
11.4.2. Simulación.....	37

11.5. METODO DE LAS ISOYETAS.....	37
12. PROGRAMA CHAC (CALCULO HIDROMETEREOLOGICO DE APORTACIONES Y CRECIDAS).....	39
13. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	41
13.1. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA.....	41
13.2. INFORMACIÓN BÁSICA.....	42
14. APLICACIÓN A LA CUENCA DE ESTUDIO.....	43
14.1. PRESELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	43
14.2. FORMACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL ArcGIS.....	43
14.3. TRATAMIENTO DE DATOS INCOMPLETOS.....	47
14.3.1.Completado de datos de temperatura.....	47
14.3.1.1.Estimación de datos de temperatura para la estación Arrayanales basada en la estación Guillermo León Valencia.....	47
14.3.1.2.Estimación de datos de temperatura en la estación Guillermo León Valencia basada en la estación Arrayanales.....	48
14.3.1.3.Estimación de datos de temperatura en la estación Puracé basada en la estación Guillermo León Valencia.....	49
14.3.2. Precipitación.....	50
14.3.2.1.Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación Arrayanales a partir de los datos de la estación Poliandra ubicada en el municipio de Totoró mediante el método de regresión lineal.....	50
14.3.2.2.Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación Guillermo León Valencia a partir de los datos de la estación Sate ubicada en el municipio de Popayán mediante el método de regresión lineal.....	52
14.3.2.3.Estimación de datos faltantes de precipitación para la estación de Puracé a partir de los datos de la estación de Coconuco en el municipio de Puracé mediante el método de regresión lineal.....	53

14.4. APLICAR FORMULA DE POLÍGONOS DE THIESSEN.....	56
14.4.1. Precipitación media areal.....	56
14.4.2. Temperatura media areal.....	58
14.4.3. Calculo evapotranspiración media areal.....	59
14.5. GENERACIÓN DE FICHEROS LEMA.....	60
14.6. CALIBRACIÓN.....	62
14.7. APLICACIÓN DE MÉTODO DE THIESSEN MODIFICADO.....	65
14.7.1. Creación de Isoyetas en la cuenca.....	65
14.8. CALIBRACIÓN DE CHAC CON PRECIPITACIÓN CORREGIDA.....	69
14.9. PROYECCIÓN DE DATOS A PARTIR DEL ESTUDIO DEL IDEAM, CON PERIODO DE REFERENCIA (1995-2016).....	71
14.9.1. Proyección de precipitación.....	71
14.9.1.1. Escenario RCP 2.6.....	71
14.9.1.2. Escenario RCP 8.5.....	73
14.9.2. Proyección de evapotranspiración.....	74
14.9.2.1. Escenario RCP 2.6.....	74
14.9.2.1.1. Proyección de temperatura.....	74
14.9.2.1.2. Calculo evapotranspiración con temperatura proyectada.....	76
14.9.2.2. Escenario RCP 8.5.....	77
14.9.2.2.1. Proyección de Temperatura.....	77
14.9.2.2.2. Calculo evapotranspiración con temperatura proyectada.....	78
14.10. SIMULACIÓN DE CAUDALES.....	78
15. RESULTADOS.....	80
15.1. EVAPOTRANSPIRACION REAL (ETR).....	80

15.2. HUMEDAD EN EL SUELO (HMS).....	84
15.3. CAUDAL SUBTERRANEO.....	86
15.4. CAUDALES SIMULADOS.....	88
16. ANALISIS DE RESULTADOS.....	90
17. CONCLUSIONES.....	91
18. LIMITACIONES DEL TRABAJO.....	93
19. RECOMENDACIONES.....	94
20. BIBLIOGRAFIA.....	95
20.1. REFERENCIAS DE INTERNET.....	96

## LISTA DE TABLAS.

Pág.

<b>Tabla 10.1</b> Los cuatro caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100.....	28
<b>Tabla 11.1</b> Formulario de cálculo de la ETP por Thornthwaite.....	33
<b>Tabla 11.2.</b> Formulario del modelo de Témez.....	34
<b>Tabla 11.3.</b> Formulario del modelo de Témez.....	35
<b>Tabla 11.4.</b> Formulario de los términos de error.....	36
<b>Tabla 11.5.</b> Gráficos de calibración.....	36
<b>Tabla 11.6.</b> Gráficos de simulación.....	37
<b>Tabla 13.1.</b> Información base para la realización de este estudio.....	42
<b>Tabla 13.2.</b> Parámetros morfométricos de la cuenca.....	42
<b>Tabla 14.1.</b> Estaciones preseleccionadas.....	43
<b>Tabla 14.2.</b> Datos para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina, para diciembre del año 2002.....	48
<b>Tabla 14.3.</b> Datos para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina, para junio del año 1997.....	48
<b>Tabla 14.4.</b> Datos para la estación Puracé por medio del gradiente para la región andina, para junio del año 1995.....	49
<b>Tabla 14.5.</b> Regresión Lineal para estación Arrayanales con la estación Polindara en el año 2015.....	51
<b>Tabla 14.6.</b> Regresión Lineal para estación Guillermo León Valencia con la estación Sate en el año 1997.....	53
<b>Tabla 14.7.</b> Regresión Lineal para estación Puracé con la estación Coconuco para el año 1997.....	55
<b>Tabla 14.8.</b> Área (Ha) de influencia de cada estación sobre la cuenca, obtenidos de ArcGIS.....	56
<b>Tabla 14.9.</b> Datos temperatura media areal (°C) mensual del año 1995.....	59
<b>Tabla 14.10.</b> Estaciones seleccionadas para la caracterización de precipitación en la cuenca.....	66
<b>Tabla 14.11.</b> Cambios porcentuales (%) de la precipitación escenario RCP 2.6 para la región Alto Cauca para cada periodo.....	71
<b>Tabla 14.12.</b> Precipitación media areal de los 4 trimestres para el año 1995.....	72
<b>Tabla 14.13.</b> Proyección de precipitación para los 4 trimestres para el periodo 2011-2040.....	72
<b>Tabla 14.14.</b> Promedio mensual de todos los años de referencia del trimestre DEF para el periodo 2011-2040.....	73
<b>Tabla 14.15.</b> Cambios porcentuales (%) de la precipitación escenario RCP 8.5 para la región Alto Cauca para cada periodo.....	74
<b>Tabla 14.16.</b> Cambios de temperatura (°C) en el escenario RCP 2.6 para la región Alto Cauca para cada periodo.....	74



<b>Tabla 14.17.</b> Temperatura media areal (°C) del trimestre DEF y MAM para el año 1995.....	75
<b>Tabla 14.18.</b> Proyección de Temperatura para todos los trimestres y para el periodo 2011-2040 (°C).....	75
<b>Tabla 14.19.</b> Promedio mensual de todos los años de referencia del trimestre DEF para el periodo 2011-2040.....	76
<b>Tabla 14.20.</b> Cambios de temperatura (°C) en el escenario RCP 8.5 para la región Alto Cauca para cada periodo.....	77
<b>Tabla 15.1.</b> Evapotranspiración Potencial (ETP): Periodo de Referencia y Proyecciones.....	80
<b>Tabla 15.2.</b> Evapotranspiración Potencial: Periodo de Referencia y Proyecciones.....	72
<b>Tabla 15.3.</b> Humedad del suelo: periodo de referencia y proyecciones.....	84
<b>Tabla 15.4.</b> Caudal Subterráneo (QSUB): periodo de referencia y proyecciones..	86
<b>Tabla 15.5.</b> Caudal Subterráneo: periodo de referencia y proyecciones.....	88

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 7.1.</b> Metodología a desarrollar para el presente trabajo de grado.....	22
<b>Figura 10.1.</b> Valores actuales de Radiación para el municipio de Popayán.....	29
<b>Figura 11.1.</b> Esquema del Modelo de Témez.....	34
<b>Figura 11.2.</b> Método de las isoyetas.....	38
<b>Figura 12.1.</b> Ventana para formación de ficheros programa CHAC.....	39
<b>Figura 12.2.</b> Ventana para calculo ETP programa CHAC.....	40
<b>Figura 12.3.</b> Ventana simulación de datos iniciales programa CHAC.....	40
<b>Figura 12.4.</b> Ventana para simulación de crecidas programa CHAC.....	40
<b>Figura 13.1.</b> Ubicación de la cuenca.....	38
<b>Figura 14.1.</b> Estaciones preseleccionadas en modelo computacional ArcGIS.....	44
<b>Figura 14.2.</b> Polígonos de Thiessen proyectados para cada una de las estaciones con influencia sobre la Sub Cuenca Rio las Piedras.....	45
<b>Figura 14.3.</b> Estaciones seleccionadas para el estudio por medio de los polígonos de Thiessen.....	46
<b>Figura 14.4.</b> Ubicación espacial de las estaciones Arrayanales y Poliandra para completar datos de precipitación.....	50
<b>Figura 14.5.</b> Regresión Lineal Precipitación Polindara vs Arrayanales.....	51
<b>Figura 14.6.</b> Ubicación espacial de las estaciones Guillermo León Valencia y Sate para completar datos de precipitación.....	52
<b>Figura 14.7.</b> Regresión Lineal Precipitación Guillermo León Valencia vs Sate.....	53
<b>Figura 14.8.</b> Ubicación espacial de las estaciones Puracé y Coconuco para completar datos de precipitación.....	54
<b>Figura 14.9.</b> Regresión Lineal Precipitación Puracé vs Coconuco.....	55
<b>Figura 14.10.</b> Multiplicación de datos de precipitación de las estaciones Arrayanales, Puracé y Guillermo león Valencia por su área de influencia. Ejemplo mes de enero del año 1995.....	57
<b>Figura 14.11.</b> Sumatoria de todas las $P_i \times A_i$ dividido entre el área total de la cuenca.....	57
<b>Figura 14.12.</b> Multiplicación de datos de temperatura de las estaciones Arrayanales, Puracé y Guillermo león Valencia por su área de influencia.....	58
<b>Figura 14.13.</b> Sumatoria de todas las $P_i \times A_i$ dividido entre el área total de la cuenca.....	58
<b>Figura 14.14.</b> Calculo evapotranspiración media areal, año 1995.....	59
<b>Figura 14.15.</b> Generación ficheros LEMA.....	60
<b>Figura 14.16.</b> Pegado desde el portapapeles de ficheros Excel.....	60
<b>Figura 14.17.</b> Generación de ficheros LEMA. Primera fila en blanco o títulos.....	61
<b>Figura 14.18.</b> Resultado de la transformación a Fichero LEMA de Evapotranspiración media areal.....	61
<b>Figura 14.19.</b> Ventana inicial de calibración.....	62
<b>Figura 14.20.</b> Calibración del programa.....	63

<b>Figura 14.21.</b> Calibración Programa con Hmax = 100.....	64
<b>Figura 14.22.</b> Corte de la cuenca Rio las Piedras del DEM.....	65
<b>Figura 14.23.</b> Curvas de nivel de la SubCuenca Rio Las Piedras.....	66
<b>Figura 14.24.</b> Curvas de nivel con Estaciones influenciadas.....	67
<b>Figura 14.25.</b> Isoyetas de precipitación Sub cuenca Rio Las Piedras.....	68
<b>Figura 14.26.</b> Parámetros de calibración sin alterar.....	69
<b>Figura 14.27.</b> Parámetros de calibración Ajustados.....	70
<b>Figura 14.28.</b> Calculo de evapotranspiración de los promedios de temperatura para el periodo 2011-2040 para RCP 2.6.....	77
<b>Figura 14.29.</b> Calculo de evapotranspiración de los promedios de temperatura para el periodo 2011-2040 para RCP 8.5.....	78
<b>Figura 14.30.</b> Ventana inicial de simulación de caudales.....	79
<b>Figura 15.1.</b> Comparación de ETP para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.....	81
<b>Figura 15.2.</b> Comparación de ETP para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.....	81
<b>Figura 15.3.</b> Comparación de ETR para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.....	83
<b>Figura 15.4.</b> Comparación de ETR para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.....	83
<b>Figura 15.5.</b> Comparación de HMS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.....	85
<b>Figura 15.6.</b> Comparación de HMS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.....	85
<b>Figura 15.7.</b> Comparación de Q SUB para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.....	87
<b>Figura 15.8.</b> Comparación de Q SUB para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.....	87
<b>Figura 15.9.</b> Comparación de Q SIMULADOS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.....	89
<b>Figura 15.10.</b> Comparación de Q SIMULADOS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.....	89

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Ing. Carlos Armando Gallardo Barrera**  
**Jurado**

---

**Ing. Alberto José Caldas Constain**  
**Jurado**

---

**Ing. Luis Jorge Gonzalez M.**  
**Director**

**Popayán, de 2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradecemos a Dios por habernos acompañado y guía a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y brindarnos una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le damos gracias a nuestros padres por apoyarnos en todo momento, por los valores que han inculcado en nosotros, y por habernos dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestra vida y sobre todo por ser unos excelentes ejemplos de vida a seguir.

A nuestros hermanos y demás familiares por ser parte fundamental de nuestras vidas, por su apoyo incondicional en cualquier situación y por representar la unidad familiar.

Gracias a el Ing. LUIS GORGE GONZALEZ por su apoyo, paciencia y conocimientos aportados durante el transcurso de este trabajo. A el Ing. CARLOS ARMANDO GALLARDO y AL Ing. ALBERTO JOSE CALDAS por guiarnos y aportarnos conocimientos de gran importancia para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A nuestros amigos que se convirtieron en personas importantes, porque llenaron muchos momentos de felicidad durante este camino

Por ultimo y no menos importante al PhD. Javier Álvarez Rodríguez Coordinador de Programa Técnico Científico del Área de Recursos Hídricos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX España, por su paciencia y pedagogía que tuvo con nosotros para poder transmitirnos conocimientos fundamentales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se define el cambio climático como la alteración de todos los parámetros climáticos: temperaturas, precipitaciones, fenómenos climatológicos en general. Normalmente este tipo de cambios se producen a lo largo de varios siglos, permitiendo a las especies animales y vegetales adaptarse gradualmente a las nuevas condiciones climatológicas. Durante los últimos 2.000 años el clima ha sido relativamente estable con un ligero enfriamiento de la tierra durante el periodo comprendido entre 1500 y 1850 (*FISO.2016. ¿Qué es el cambio climático?*).

Sin embargo, la Era Industrial ha supuesto a lo largo de los últimos doscientos años, un grave impacto cultural, económico y climático. Junto con la paulatina industrialización, se ha impuesto una cultura consumista, que genera cada vez más productos desechables y que prioriza el consumo barato frente al consumo responsable. Todo ello genera una emisión de gases que se concentran en la atmósfera agravando el efecto invernadero, contribuyendo a la subida de las temperaturas y al calentamiento global de la tierra.

La Tierra se ha calentado durante los últimos 100 años 0,74 °C, y durante las dos próximas décadas ese proceso continuará y la temperatura media del planeta habrá aumentado en 0,2 grados más. En estudios actuales sobre el clima se considera que la actividad humana es en mayor medida la responsable del aumento de temperatura de las últimas décadas, los científicos consideran que un aumento de 0,2 °C con respecto a la temperatura de la era preindustrial es el límite más allá del cual hay un riesgo mucho mayor de que se produzcan cambios peligrosos y catastróficos para el medio ambiente global (*Vide, J. M. 2011. Si la temperatura media del planeta sube un grado más podría ser catastrófico*).

En consecuencia es el hombre el mayor responsable del cambio climatológico tan brusco que ha tenido el planeta debido al uso de combustibles fósiles, como el carbón, el gas, el petróleo, utilizados como fuentes de energía, para diversos medios de transporte y desarrollar procesos de manufactura de todo tipo de bienes o el desarrollo de otras actividades como la deforestación, la agricultura y la ganadería que son las principales causas del efecto invernadero y sitúan a este como el mayor problema medio ambiental al que se ve enfrentado el planeta actualmente (*ECODES.2014. Qué es el cambio climático*).

El cambio climático afectará al planeta en general dejando a su paso proyecciones como la falta de agua potable, grandes cambios en las condiciones para la producción de alimentos, extinción de especies, amenazas en la salud de las personas por el incremento de enfermedades tropicales y desnutrición según lo ha determinado la OMS, derretimiento de los polos y como consecuencia aumento en el nivel del mar, erosión costera, pérdida de seguridad alimentaria y un aumento en los índices de mortalidad debido a inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor. En definitiva, el cambio climático no es un fenómeno sólo ambiental sino de

profundas consecuencias económicas y sociales (*MINAMBIENTE.2015. Cambio climático*).

Hay muchos gases de efecto invernadero responsables del calentamiento de la atmósfera, pero el gas responsable de la mayoría del calentamiento es el dióxido de carbono, también llamado CO<sub>2</sub>. Otros contribuyentes son el metano expulsado de los vertederos y de la agricultura (especialmente de los sistemas digestivos de los animales que pastan), óxido nitroso de los fertilizantes, los gases usados para la refrigeración y procesos industriales, y de la pérdida de bosques que de otra forma almacenarían CO<sub>2</sub> (*EKOenergy.2015.CAMBIO CLIMÁTICO: causas y consecuencias*).

El agua ya sea dulce, salobre o de mar es el motor que impulsa la vida, pero también es un recurso estratégico para el desarrollo de cualquier país, esta es vital para el desarrollo de las diferentes facetas de la vida, las actividades industriales, el progreso económico, etc. El cambio climático tiene una clara incidencia en la oferta hídrica, convirtiéndola en una de las mayores preocupaciones de la sociedad, debido a que afecta directamente a los ecosistemas, la agricultura, el sector industrial y toda actividad humana, por mínima que sea, ya que el clima y el ciclo hidrológico están tan íntimamente relacionados que es difícil definir las fronteras entre ellos; el clima depende de variables relevantes del ciclo hidrológico, tales como la humedad ambiente y la precipitación. Así, el incremento de temperatura esperado en los escenarios más probables de cambio climático tendrá importantes repercusiones en el ciclo hidrológico, global y local, y por consiguiente, en la disponibilidad de los recursos hídricos en las zonas más vulnerables de Colombia (*Alegría, G, J.2012*).

El desarrollo sin regulación de las actividades humanas en los últimos tiempos ha producido grandes problemas de contaminación medioambiental que con el transcurso del tiempo dejara ver cambios en la calidad del agua de los ríos y con mayor intensidad, en los lagos, humedales y ecosistemas costeros, que a su vez terminara afectando la salud del ser humano (*SÁNCHEZ, S. F. 1995*)

Al aumentar la temperatura del planeta también aumenta la evapotranspiración, salinizando los suelos e impidiendo el crecimiento de la vegetación generando problemas de desertificación. Todo lo anterior afecta el ciclo natural de las lluvias, produciendo sequías prolongadas en unas regiones y fuertes inundaciones en otras, lo que modificara en gran medida el ciclo hidrológico y afectara directamente los recursos de agua dulce (*VENTURA, F. GUEVARA, E., 2014*).

## 2. ANTECEDENTES

La fundación Rio las Piedras encargada del mantenimiento de la subcuenca Rio Las Piedras, tiene avances importantes en los procesos de fortalecimiento social de sus actores representado en comunidades campesinas e indígenas, quienes a través de sus organizaciones trabajan activamente de los procesos en la zona, donde se destacan los avances en Planificación Ambiental, medidas de adaptación frente al cambio climático, entre otros. (*Acueducto y alcantarillado de Popayán.2015. Cuenca Piedras*)

Por su parte el IDEAM realizo estudios relacionados con los posibles escenarios de cambio climático que se podrían presentar para todas las regiones hidroclimaticas presentes en Colombia, donde sus variables a evaluar fueron precipitación y temperatura máximas, medias y mínimas utilizando modelos climáticos que permitieron generar escenarios futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 tomando como periodo de referencia 1976-2005. Se analizaron los periodos trimestrales, al igual que el periodo Anual. Los resultados dejan ver posibles aumentos en la temperatura media, para Colombia, en el periodo 2011-2040 de aproximadamente 1.0°C; en el periodo 2041-2070 de alrededor de 1.0-1.5°C; y para 2071- 2100 cerca de 1.0°C. Por su parte los resultados en la precipitación muestran para el periodo 2011-2100, que en la cuenca alta del río Cauca, las precipitaciones no son significativas, ya que las alteraciones de esta variable son del orden de  $\pm 10\%$  (*IDEAM.2016.Escenarios de cambio climático*)

En España se realizó un trabajo sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos, utilizando el modelo climático PROMES, este estudio la evolución hidrológica, en un régimen natural, para el año 2050, frente a la evolución de un periodo base sin modificar, esto permitirá realizar estudios sobre los impactos relativos a la calidad, la intensidad y frecuencia de las avenidas y sequias o al uso, gestión y planificación del agua.

Para las simulaciones hidrológicas se empleó el modelo hidrológico SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación-Aportación), este modelo simula los procesos del ciclo hidrológico en su fase terrestre mediante ecuaciones de balance y transferencia, que se aplican en un mallado regular compuesto por celdas de igual tamaño en el que se divide la cuenca.

Este estudio fue aplicado a 19 cuencas distribuidas por la península Ibérica. Para cada una se llevó acabo dos simulaciones hidrológicas con el modelo SIMPA. La primera utiliza datos mensuales de precipitación y temperatura del periodo 1945 a 1955. La segunda emplea los datos de precipitación y temperatura mensual del mismo periodo modificado por los campos climáticos para el año 2050 obtenidos en las simulaciones 1xCO<sub>2</sub> y 2xCO<sub>2</sub> del modelo climático regional PROMES (*Fernández, C, P.2002*).



### 3. JUSTIFICACIÓN

La realización del presente trabajo de investigación se realiza bajo diferentes puntos de vista.

#### 3.1. GESTIÓN Y PLANEACIÓN SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El agua es un recurso económico, ambiental, cultural y de bienestar social limitado. Los seres humanos necesitamos del recurso agua para consumirla y utilizarla en las diferentes actividades productivas por ello, el conocimiento de la oferta hídrica es necesario para lograr atender los requerimientos básicos de una población. Sin duda el cambio climático será un gran precedente en la disminución de la oferta hídrica en Colombia (*ECODES. 2015. ALIANZA POR EL AGUA: El Día Mundial del Agua*).

Según las previsiones del cambio climático realizadas por el IDEAM, el impacto sobre el agua es de carácter negativo: reducción de los recursos hídricos y aumento de la magnitud y frecuencia de fenómenos extremos como inundaciones y sequías (*IDEAM.2016.Escenarios de cambio climático*).

El municipio de Popayán capta el agua para abastecimiento de consumo humano de cuatro fuentes hídricas (río Piedras, Molino, Pisojé y Palacé) lo cuales se consideran de vital importancia para el sostenimiento y desarrollo de la ciudad y la región.

El río Las Piedras es la mayor fuente de abastecimiento para la ciudad de Popayán, manejando un caudal promedio multianual de 2.44 m<sup>3</sup>/s y teniendo una concesión de 850 L/s. Además es importante resaltar que este río es una fuente de abastecimiento para muchas veredas que están ubicadas en su cuenca.

Dentro de las actividades económicas representativas se encuentra la agricultura, la ganadería extensiva, la piscicultura. Actualmente actores sociales de la Cuenca desarrollan sistemas de planificación ambiental que permiten disminuir los conflictos por uso del suelo y mejorar las condiciones de regulación hídrica de la Subcuenca (*Acueducto y alcantarillado de Popayán.2015. Cuenca Piedras*).

El estado de la gestión de los recursos hídricos en Colombia, que se describe, es fruto del análisis de evaluaciones adelantadas por diversos organismos estatales, de la experiencia del Consultor y de las observaciones recogidas en las entrevistas con algunos funcionarios que tienen a su cargo la definición de políticas y el establecimiento de planes, programas y proyectos, en materia de agua.

En el trabajo de investigación se pretende realizar una detallada evaluación de todas las aportaciones de agua en la cuenca del río Las Piedras teniendo en cuenta las proyecciones de temperatura y precipitación de cambio climático hasta finales del siglo XXI y así simular los futuros caudales más críticos. Esto con el fin de que los

resultados se conviertan en una herramienta para la planificación en la gestión de los recursos hídricos y para la toma de decisiones en las entidades gubernamentales y en la comunidad para realizar acciones que ayuden a la disminución de los impactos del cambio climático para el Departamento del Cauca.

### **3.2. UTILIZACIÓN DE NUEVAS HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE ORDEN HIDROMETEREOLÓGICO**

Los modelos hidrológicos constituyen una herramienta indirecta de simulación de los procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico. Permiten estimar los distintos componentes del ciclo cuando faltan registros reales o cuando no hay posibilidad de realizar medidas. El programa computacional que se pretende utilizar es CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Este modelo se ha utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en la planificación hidrológica de España, pero nunca se ha utilizado en Colombia.

### **3.3. PLANEACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Los últimos datos con los que contaba el país respecto a los gases causantes de tal problemática los entregó el IDEAM en el 2010. El dato más actual, que surge a partir de información el 2012, es que el país emite 178.258.000 de toneladas de dióxido carbono equivalente, una cifra que disminuyó en un 20 por ciento respecto a la última medición. (2015.MINAMBIENTE)

El mayor responsable en este sector es el transporte, específicamente el transporte terrestre que emite el 32, 6 por ciento. “Básicamente esto se explica porque Colombia es un país que se mueve a punta de camión y bus. No se tienen trenes ni otro tipo de sistemas más limpios como los trenes eléctricos en Europa”, señala Javier Mendoza, coordinador de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. (Artículo El Tiempo. 6 de noviembre de 2015)

El Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Gabriel Vallejo López, explicó los detalles de este compromiso de Colombia con el mundo. Se espera que a finales de este año, la meta de Colombia, sumada a las de todos los países del mundo, nos acerquen a la meta de frenar el cambio climático, y evitar las consecuencias catastróficas que implica sobrepasar los 2 grados centígrados de aumento de temperatura global.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En el campo de la ingeniería ambiental se abarcan infinidad de temas de interés sobre los recursos hidrológicos para la planificación y gestión de estos en los territorios. Para la gestión de este recurso es de vital importancia tener en cuenta los efectos que causa el cambio climático para así tener una responsable intervención sobre ellos

Para dar respuesta a la gestión de recursos hídricos y sus implicaciones derivadas del impacto del cambio climático, que está teniendo lugar, ya no es suficiente evaluar los recursos hídricos a través de modelización hidrológica de series temporales meteorológicas, es necesario, además, introducir esquemas basados en los escenarios futuros planteados por el IPCC, los cuales han sido implementados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) en Colombia para tener una herramientas del comportamiento meteorológico futuro en el País, de tal forma que los estudios hidrológicos en el contexto de la variabilidad y del cambio climático permitan la aplicación de la información meteorológica en la planificación y gestión de los recursos hídricos (*IDEAM.2016.Escenarios de cambio climático*).

Los estudios de impacto del cambio climático evalúan los cambios en un futuro respecto a un periodo de referencia o de control. El periodo de control elegido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para los escenarios regionalizados de cambio climático para Colombia ha sido 1976-2005. El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos se ha evaluado por medio de las desviaciones de los valores de las diferentes variables hidrológicas simuladas para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 respecto a los valores simulados para el periodo de control.

Para la simulación hidrológica de la Subcuenta del Río Las Piedras se van a tener en cuenta datos reales de precipitación temperatura y caudales para la calibración, para luego utilizar las proyecciones meteorológicas del IDEAM y realizar la simulación de aportaciones de caudales.

## 5. HIPOTESIS

Las proyecciones pronostican un aumento generalizado de la precipitación conforme avanza el siglo XXI. El conjunto de proyecciones del escenario de emisiones RCP 8.5 y RCP2.6 supone aumentos de precipitación media en la región Hidroclimática del Alto Cauca que comprende la subcuenta del río Las Piedras durante los trimestres de los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Aunque aumente la precipitación, el aumento de temperatura tendrá mayor influencia sobre la disponibilidad del recurso hídrico. Este aumento de temperatura conlleva a una mayor evaporación y transpiración por las plantas (evapotranspiración) para los escenarios de proyecciones RCP2.6 y RCP8.5, teniendo un mayor aumento en este último. Por lo tanto, esto podría conllevar a una disminución de los caudales, teniendo una mayor problemática en los meses secos de los años (*IDEAM. 2016. Escenarios de cambio climático*).

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar los impactos del Cambio Climático sobre las aportaciones a la subcuenca del Río las Piedras en el departamento del Cauca para los periodos de proyecciones: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100, cada uno dividido en cuatro periodos estacionales y bajo el escenario de RCP 2.6 y RCP 8.5.

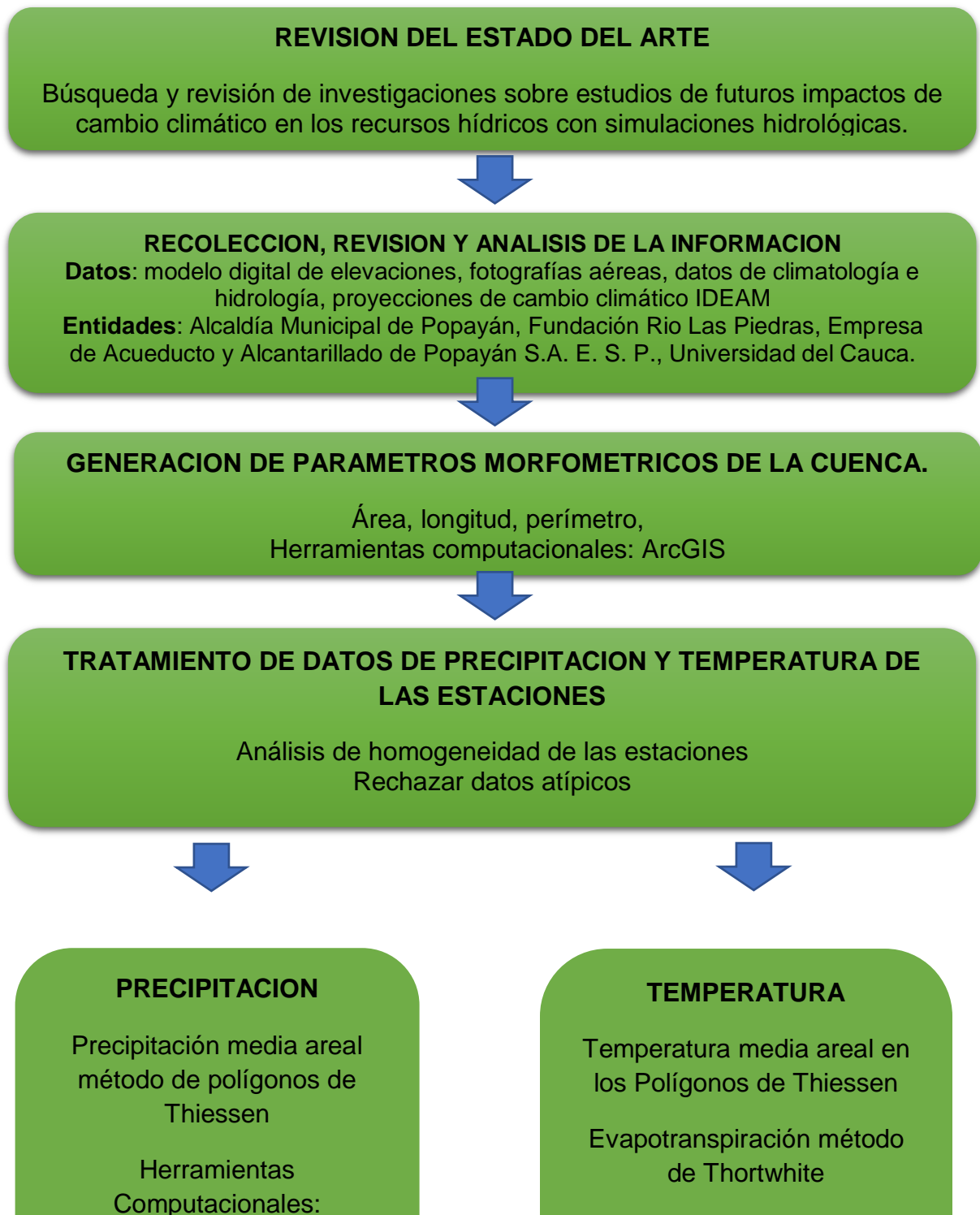
### **6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

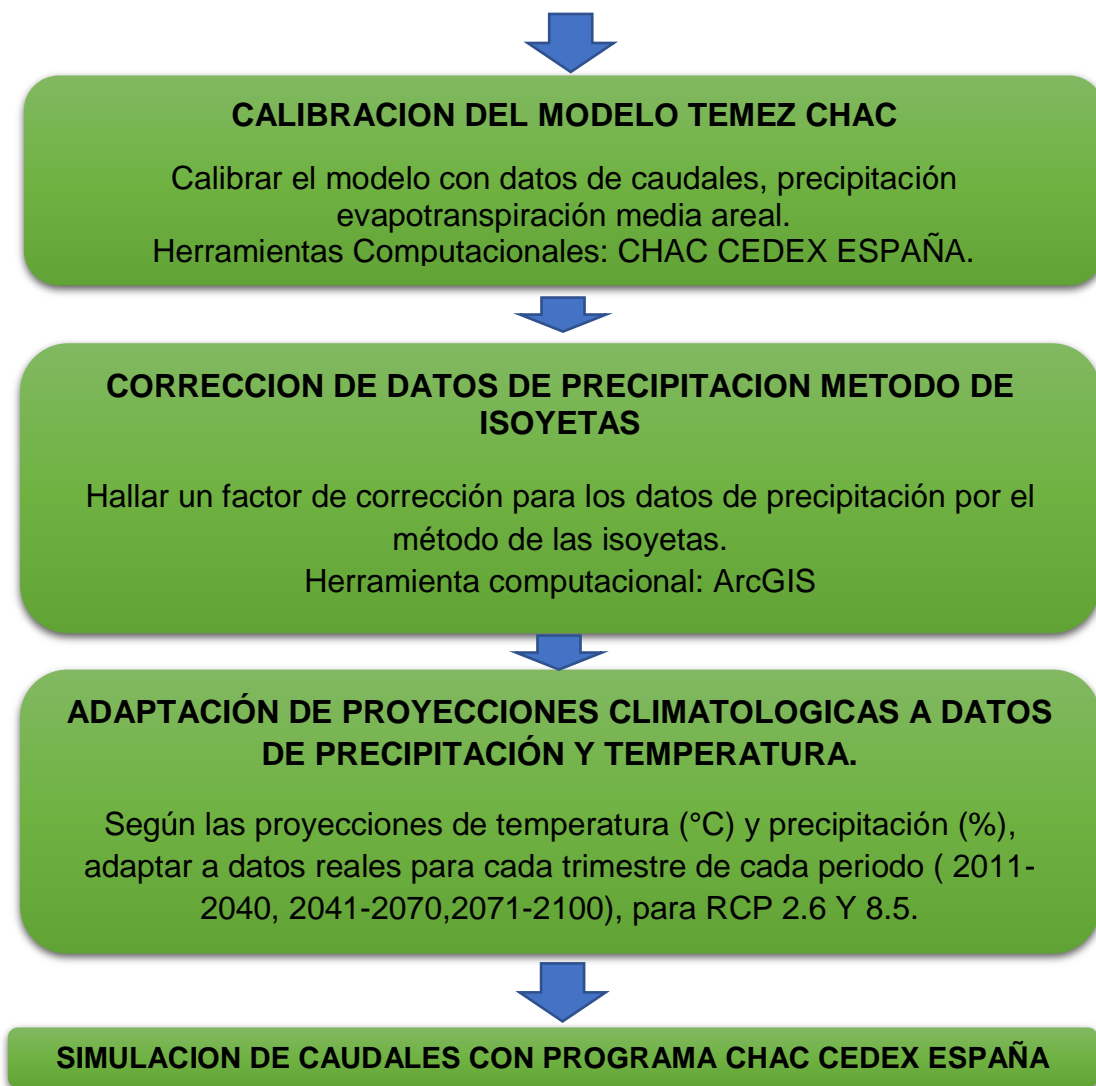
- Analizar los eventos más críticos donde se presentaría la mayor reducción de aportaciones de agua utilizando los datos con mayor temperatura y menor precipitación para cada uno de los periodos, divisiones estacionales y escenarios RCP2.6 Y RCP 8.5.
  
- Evaluar el impacto del cambio climático en el conjunto de variables tratadas: precipitación, ETR, caudal subterráneo, humedad en el suelo, hallados mediante el modelo Teméz con el programa CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas), desarrollado por el CEDEX de España.
  
- Calcular los caudales mediante la implementación del modelo Teméz utilizando el programa CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas), desarrollado por el CEDEX de España.

## 7. METODOLOGIA.

El siguiente diagrama resume la metodología a seguir para esta investigación. Considerando que existen varias ayudas computacionales para hallar los parámetros generales de la cuenca y sus estaciones, la ponderación de los datos de precipitación y temperatura las cuales se llevaran a cabo con el programa ArcGIS; La simulación de las aportaciones de agua al caudal del Rio, se va a trabajar con el software CHAC (Cálculo Hidrometeoro lógico de Aportaciones y Crecidas), desarrollado por el CEDEX de España.

**Figura 7.1.** Metodología a desarrollar en este estudio





*Fuente: Propia.*

## 8. MARCO TEORICO

Para el mayor entendimiento de este trabajo se darán a conocer los términos relacionados a cambio climático, fuentes hídricas y programas computacionales utilizados en el presente documento.

- 8.1. OFERTA HÍDRICA:** Es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar (*CorpoNariño. 2014*).
- 8.2. CICLO HIDROLÓGICO (O DEL AGUA):** Describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años (*Foro Peruano para el agua.2011*).
- 8.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN:** se produce a través de la evaporación del agua presente en la superficie terrestre, junto con la que está en mares, ríos y lagos y la que procede también de la tierra, incluyendo la transpiración de los seres vivos, en especial de las plantas. Como resultado de este proceso se determina la formación de vapor atmosférico. Por tanto la evapotranspiración es la consideración conjunta de los procesos de evaporación y transpiración. (*Foro Peruano para el agua.2011*).
- 8.4. ArcGIS:** Sistema de información geográfica (SIG) integrado que consiste en tres partes claves: el software ArcGIS Desktop o un conjunto integrado de aplicaciones SIG avanzadas; el ArcSDE Gateway que es una interfaz para administrar las geodatabase (forma corta para base de datos geográfica) en un sistema de administración de bases de datos (DBMS); el software ArcIMS que es un SIG orientado al Internet para distribuir datos y servicios (*Que es ArcGIS. 2012*).
- 8.5. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL:** Son los flujos del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua. A la escorrentía que ocurre en la superficie antes de alcanzar un canal se le llama fuente no puntual (*Hidrología superficial y subterránea. 2013*).
- 8.6. ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA:** Es El agua que desciende por gravedad – percolación y alcanza la zona saturada constituye ‘la recarga de agua subterránea. El agua subterránea puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno (*Hidrología superficial y subterránea. 2013*).
- 8.7. PROMES:** (pronóstico a mesoescala), es un modelo numérico de ecuaciones primitivas de área limitada, utiliza variables de pronóstico como temperatura,



viento, humedad, agua de nube, presión en superficie, entre otros (CEDEX.2013).

- 8.8. IPCC:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, es una organización internacional, constituido a petición de los gobiernos miembros. Su misión es proveer con evaluaciones científicas comprensivas sobre la información científica, técnica y socioeconómica actual sobre el riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana, sus potenciales consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y las posibles opciones para adaptarse a esas consecuencias o mitigar sus efectos (IPCC.1988).
- 8.9. CHAC:** (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) es una aplicación informática desarrollada por el CEDEX para la estimación de recursos hídricos mediante modelos precipitación – aportación.
- 8.10. SHAPEFILE:** Es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas) (Gonzales., 2015).
- 8.11. PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA AREAL (MEDIA):** Son las temperaturas y precipitaciones que se presentan en toda la cuenca y no en puntos determinados que es la información que nos dan las estaciones por separado (Gonzales., 2015).

## 9. ESTADO DEL ARTE

Para la presente investigación se busca tener en cuenta proyectos anteriores en donde se hayan realizado análisis de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos o con objetivos similares. La revisión bibliográfica realizada principalmente en internet, llevó a encontrar varios estudios.

### 9.1. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

El estudio fue llevado a cabo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el cual tenía como propósito analizar las afectaciones de los cambios en los regímenes de precipitación cambios en los regímenes de precipitación, escurrimiento, requerimientos para los usos agrícola, urbano e industrial, y sobre los procesos medio ambientales en los ríos, lagos y lagunas costeras.

### 9.2. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES EN LOS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN

El objetivo del trabajo es determinar la evolución del recurso disponible superficial en tres períodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 respecto al período de control para dos escenarios de emisiones, A2 y B2, definidos en los informes del

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). De manera muy simplificada, el primero corresponde a no adoptar medidas de control de emisiones, mientras que el segundo corresponde a un desarrollo más sostenible. Los escenarios, modelos de circulación global y procedimientos de regionalización considerados han sido los establecidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la evaluación de la repercusión del cambio climático sobre los recursos hídricos en régimen natural. El análisis se ha llevado a cabo para cada una de las demarcaciones hidrográficas peninsulares y, a partir de estos resultados, para el conjunto de la España peninsular (*Fernández, C, P.2002*).

### **9.3. ESTUDIO DEL IMPACTO DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS. APLICACIÓN EN DIECINUEVE PEQUEÑAS CUENCAS**

El estudio fue realizado por el ingeniero especialista en caminos canales y puertos Pedro Fernández Carrasco de la Universidad Politécnica de Madrid – España en el año 2002. Este trabajo de investigación estudio el impacto que el cambio climático que puede producir en los recursos hídricos en España, empleando los campos climáticos elaborados para la Península Ibérica por el modelo climático regional PROMES. Se estima la vulnerabilidad al cambio climático de los recursos hídricos en su aspecto cuantitativo al comparar la evaluación hidrológica, en régimen natural, para el año 2050 frente a la evaluación hidrológica de un periodo base son modificar de 50 años (*Fernández, C, P.2002*).

## **10. BASES TÉCNICAS**

### **10.1. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

#### **10.1.1. Modelos climáticos y técnicas de proyección regional.**

Un modelo climático o Modelos de Circulación General, es una representación matemática simplificada del sistema climático de la Tierra. Resuelve, en términos de ecuaciones diferenciales sobre una rejilla tridimensional, la dinámica de la atmósfera considerando ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier- Stokes., 2011), la conservación de masa y energía y las interacciones de la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera. La dinámica atmosférica es función de variables como la presión atmosférica, la temperatura, el contenido de vapor de agua y el viento, son la herramienta disponible más avanzada que actualmente se tiene para simular la respuesta futura del sistema climático global a los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, 2013). Los MCG representan el clima usando una rejilla tridimensional sobre el globo, la cual típicamente tiene una resolución horizontal de alrededor de 200 - 600km y de resolución vertical de unas 10 a 20 capas para la atmósfera y unas 30 capas en la vertical oceánica (IDEAM.2011).

#### **10.1.2. Ensamble de Modelos Climáticos Globales.**

Un ensamble de modelos climáticos globales, o ensamble multimodelo, corresponde a la combinación individual de un conjunto de modelos climáticos. Esta combinación da como resultado un conjunto de proyecciones para una variable dada que cubren los futuros más probables. Se hacen ensambles multimodelo para intentar reducir la incertidumbre asociada a las proyecciones y conocer su rango alrededor de la media del ensamble. Cuantificar estas incertidumbres en la proyección de escenarios climáticos futuros sirve para evaluar el impacto que estos escenarios tendrán y han sido un punto crítico identificado por la comunidad científica, dada su utilidad en la evaluación de diversos temas (IDEAM., 2011).

### **10.1.3 Escenarios de emisiones cambio climático**

El objetivo de trabajar con escenarios no es predecir el futuro, más sí entender las incertidumbres con el fin de llegar a decisiones que sean robustas en una amplia gama de posibles futuros (escenarios cambio climático IDEAM., 2011)

En el Quinto Informe del IPCC (AR5), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados “Caminos Representativos de Concentración” (RCPs, por sus siglas en inglés). Éstos se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>). La palabra “representativo” significa que cada RCP proporciona sólo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características de ese Forzamiento Radiativo. El término “camino” hace hincapié en que no sólo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la trayectoria que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado. En resumen, el nuevo proceso en paralelo comienza con la selección de cuatro RCPs, cada uno de los cuales corresponde a un camino de Forzamiento Radiativo específico (Figura 10.1) Para obtener resultados a partir de dichos modelos globales en el contexto nacional y regional, se estudiaron diversos métodos de ensamble. Finalmente se trabajó con el método Ensamble Promedio de Fiabilidad Conjunta (“Reliability Ensemble Averaging” REA Method, por sus siglas en inglés), ya que este método permitió construir el ensamble a través de dos criterios, por un lado el desempeño de los modelos con respecto a la climatología de referencia y por otro lado un criterio de convergencia de los modelos hacia el futuro, dando un peso a cada modelo en el ensamble final en la generación de los cambios de las variables climatológicas para los cuatro RCP. Con los datos obtenidos mediante el método de ensamble REA, finalmente se procedió a representarlos cartográficamente, aplicando metodologías de interpolación espacial con ayudas de coberturas como la topografía y el uso del suelo. Además, se realizaron ensambles multimodelo y multiescenario que permiten promediar cada una de las respuestas de los diferentes escenarios RCP en cada uno de los periodos de tiempo considerados (2011-2040; 2041-2070 y 2071-2100) (NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO PARA COLOMBIA., 2015)

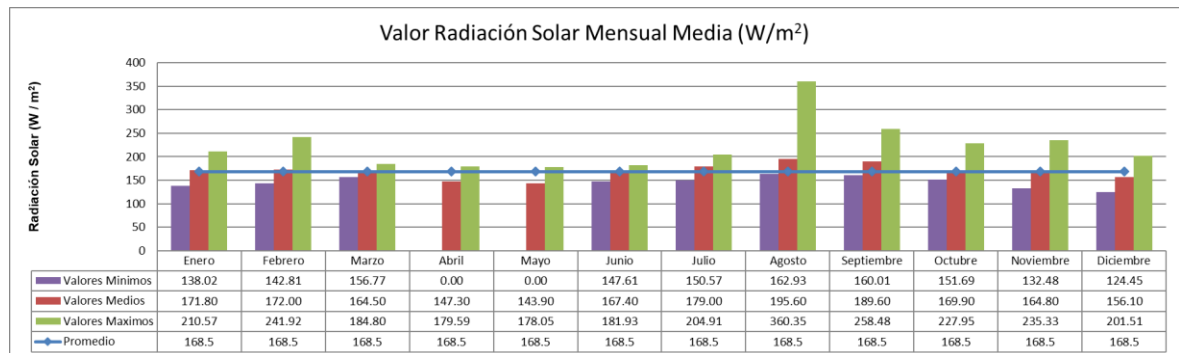
**Tabla 10.1** Los cuatro caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100.

Escenario	Forzamiento Radianteo (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2eq</sub> atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

**Fuente:** Nuevos escenarios de cambio climático (IDEAM 2011).

En la siguiente grafica se observan los valores medios de Radiación Solar entre los años 2007 a 2016, los cuales servirían como punto de comparación en el aumento de los posibles escenarios anteriormente planteados.

**Figura 10.1.** Valores Actuales de Radiación Solar para el municipio de Popayán.



**Fuente.** Estación Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca.

#### 10.1.4. Proyecciones climáticas consideradas en este trabajo

Para la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la Sub Cuenca Rio las Piedras, los datos de partida para las proyecciones climáticas son los suministrados por el IDEAM, estos datos fueron generados por modelos climatológicos para Colombia, donde se utilizó una técnica dinámico-estadística;

este método es utilizado para acoplar las escalas espaciales de los modelos de circulación global (MCG) con las de circulación regional y local. Para realizar el downscaling dinámico se utilizó el modelo regional PRECIS, con una resolución espacial de 25kmx25km. Para obtener la escala local, se realizó la comparación entre el dato de la estación con el punto de la grilla más cercana que ofreció el modelo (Ruiz., 2010) y finalmente, se ajustó su resultado usando el Método del Factor de Cambio a la escala local.

Los modelos climáticos Globales o también denominados Modelos de Circulación General (MCGs), son las herramientas disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. El IDEAM realizó una evaluación de 20 MCG utilizados en el cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC. En esta evaluación se analizó la capacidad de los mismos para representar el clima de referencia dado por el ERA40 y la variabilidad climática interanual de Colombia (Rodríguez., 2010).

Las variables climáticas utilizadas para la evaluación de recursos hídricos procedentes de los modelos y proyecciones anteriores son la precipitación y temperaturas máximas y mínimas, respectivamente. Estas proyecciones incluyen dos escenarios climáticos de emisión: RCP2,6 y RCP8,5 (IDEAM.2011)

## **11. MODELOS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO DEL IMPACTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS**

Gracias a las facilidades dadas por el manejo de la información territorial por los sistemas de información geográfica, hoy se tiende a desarrollar modelos distribuidos que permiten considerar la variabilidad espacial tanto en los datos como en los parámetros hidrológicos, así como modelos que formulan las ecuaciones diferenciales que rigen los distintos procesos hidrológicos, planteadas bajo bases teóricas.

Conocidos los campos climáticos y las características hidrológicas futuras en la zona a evaluar, podríamos estimar los recursos hídricos en ese horizonte temporal, al aplicar el modelo hidrológico del Teméz, y de esta forma cuantificar las modificaciones en la disponibilidad de agua futura con respecto al presente.

### **11.1. POLÍGONOS DE THIESSEN**

Los polígonos de Thiessen nombrados en honor al meteorólogo estadounidense Alfred H. Thiessen son una construcción geométrica que permite construir una partición del plano euclídeo.

Los polígonos de Thiessen son uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos. Se crean al unir los puntos entre sí, 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.

El dominio estudiado se divide en G subregiones o zonas de influencia en torno a cada estación. La precipitación medida (o calculada) en cada pluviómetro se pondera entonces por la fracción del área total de la cuenca comprendida en cada zona de influencia. Las subregiones se determinan de manera tal que todos los puntos incluidos en esa subregión estén más cercanos al pluviómetro correspondiente que a cualquier otra estación. Una vez delimitadas las G zonas de influencia, y calculadas sus áreas (dentro de la cuenca), se obtiene el promedio espacial según:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times A_i)}{A} \quad (11.1)$$

Dónde:

P = precipitación media sobre la cuenca

P<sub>i</sub> = precipitación observada en la Estación i

A<sub>i</sub> = área del polígono correspondiente a la Estación i

A = área total de la cuenca

n = número de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas con influencia en la cuenca

Una vez calculados, los coeficientes de Thiessen ( $a_i / A$ ) no cambian, por lo que es fácil usar el método para muchos eventos o períodos distintos. Si en algún caso faltaran datos en una estación, es más fácil estimarlos que rehacer todos los polígonos obviando tal pluviómetro. Si se altera la red hidrometeorológica, sí deben recalcularse los coeficientes del método.

Para la aplicación de los polígonos de Thiessen se requiere el conocimiento de la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, identificando el área de influencia de cada pluviómetro y/o pluviógrafo. Así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí y tratando que los triángulos sean lo más equiláteros posibles.

A partir de allí se trazan líneas bisectoras perpendiculares a todos los lados de los triángulos, las que al unirse en un punto común dentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación (Facultad de Ingeniería Departamento de Hidráulica). El área de influencia de cada estación considerada "Polígono" está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca (Bateman. 2007).

## **11.2. METODOS PARA COMPLETAR DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN**

### **11.2.1. Temperatura.**

Para las proyecciones de temperatura faltantes se utilizó un gradiente dado para la región andina de Colombia está determinado no sólo por su posición intertropical, sino también por las variaciones en altura que ocurren en esta región de montañas. Es así como el régimen de temperaturas de la región andina se caracteriza por la presencia de pisos térmicos, que consisten en la disminución de la temperatura a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar. En promedio la temperatura disminuye 0.625 °C cada 100 metros de altura (Conferencias de Jorge Gonzales). Esta disminución ocasiona cambios en las condiciones ambientales a medida que se asciende y por consiguiente cambios en los ecosistemas y las formas de vida (Conferencias de clase Ingeniero Luis Jorge Gonzales)

### **11.2.2. Precipitación.**

Para los datos de precipitación faltantes se utilizó el **Método de regresión lineal**, esta metodología permite hallar el valor esperado de una variable aleatoria **a** cuando **b** toma un valor específico. La aplicación de este método implica un supuesto de linealidad cuando la demanda presenta un comportamiento creciente o decreciente, por tal razón, se hace indispensable que previo a la selección de este método exista un análisis de regresión que determine la intensidad de las relaciones entre las variables que componen el modelo.

El pronóstico de regresión lineal simple es un modelo óptimo para patrones de demanda con tendencia (creciente o decreciente), es decir, patrones que presenten una relación de linealidad entre la demanda y el tiempo.

Se recomienda para estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, en base a datos pluviométricos consistentes de una estación cercana.

Se establece una correlación como esta:

$$Y = a + b*X1 + c*X2 + \dots + n*Xi \quad (11.2)$$

Dónde:

Y: valor de precipitación estimada

Xi: valor de precipitación en estaciones con información completa

a, b, c: constantes de regresión

Es más recomendable que el método de regresión Lineal, pero siempre que se cuente con estaciones cercanas y confiables, para esa simulación se tomó estaciones diferentes a Arrayanales, Guillermo León Valencia y Puracé, para completar los datos, debido a que estas estaciones tienen datos completos del mes y año faltantes y tienen una cercanía considerable a cada una de las tres estaciones escogidas para este trabajo (Cardona-Gonzales.2013).

### **11.3. METODO PARA EL CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POR THORNTHWAITE**

Además de la evaporación que ocurre desde las superficies de agua o desde el suelo húmedo, las plantas también regresan agua a la atmósfera por medio de un proceso llamado transpiración. El agua es absorbida por las raíces de las plantas junto con otros nutrientes y es transportada a través de esta para dar lugar a la evaporación, que ocurre en los espacios intercelulares en el interior de las hojas. El intercambio de vapor con la atmósfera que realizan las plantas (transpiración) es regulado por los estomas. Aunque casi toda el agua que la planta absorbe desde el suelo regresa a la atmósfera por medio del proceso de transpiración, hay una pequeña parte de ésta (menor al 1%) que se incorpora al tejido vegetal (FAO, 2006).

Se considera como evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia a la tasa máxima a la que se podría evapotranspirar agua bajo condiciones óptimas de suministro con el suelo existente. Accediendo al menú de ETP dentro de la opción de Cálculo de aportaciones, el programa permite el cálculo de la evapotranspiración potencial por tres métodos diferentes, dos de ellos experimentales (Thornthwaite y Blaney-Criddle) y un tercero físicamente basado (Penman Monteith)

**Tabla 11.1** Formulario de cálculo de la ETP por Thornthwaite.



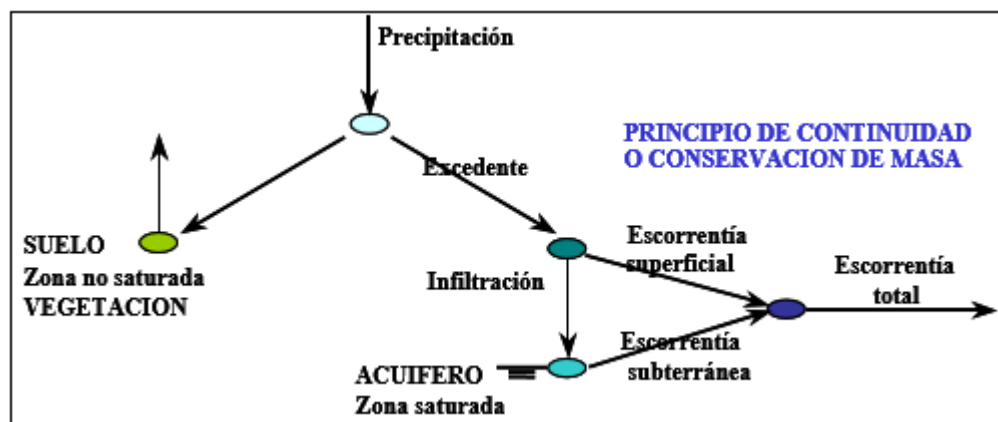
<b>CÁLCULO DE LA ETP</b>	
<b>Método de Thornthwaite.</b>	
$ETP = C \cdot T^a \quad ETP = 16,2 \cdot b \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I}\right)^a$	
Donde: I: índice de calor anual	$T_i > 0^\circ C : I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,51}$
a: exponente de la formulación	$a = f(I) = 0,49 + 0,0179 \cdot I - 0,000077 \cdot I^2 + 0,000000675 \cdot I^3$
b: número de horas de sol mensuales	$b = f(lat, dec)$

**Fuente:** CEDEX. 2013. Manual CHAC.

#### 11.4. CALCULO DE APORTACIONES CON EL MODELO TEMEZ EN CHAC

Para llevar a cabo la transformación de precipitaciones en escorrentías, CHAC aplica en el apartado de Cálculo de aportaciones el modelo de Témez (Témez., 1977). Se trata de un modelo agregado de simulación continua de pocos parámetros y de paso mensual. Simula los principales procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico considerando dos almacenamientos, suelo y acuífero (CEDEX.2013 Manual CHAC).

**Figura 11.1.** Esquema del Modelo de Témez



**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC.

**Tabla 11.2.** Formulario del modelo de Tézmez

PROCESO DE CÁLCULO MENSUAL DEL MODELO DE TÉZMEZ	
Siendo:	<p><math>P_0</math>: Umbral de escorrentía. mm</p> <p><math>H_{m\acute{a}x}</math>: Parámetro de humedad máxima. mm/mes</p> <p>C: Parámetro de excedente.</p> <p><math>I_{m\acute{a}x}</math>: Parámetro de infiltración máxima. mm/mes</p> <p><math>\alpha</math>: Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup></p> <p>K: Parámetro coeficiente de uso de suelo medio sobre ETP</p> <p><math>P_i</math>: Precipitación; mes (i). mm</p> <p><math>H_{i-1}</math>: Humedad antecedente; mes (i-1). mm</p> <p><math>EP_i</math>: Evapotranspiración potencial, afectada por el coeficiente de usos de suelo; mes (i). mm</p> <p><math>ER_i</math>: Evapotranspiración real; mes (i). mm</p> <p><math>T_i</math>: Excedente; mes (i). mm</p> <p><math>V_i</math>: Volumen almacenado; mes (i). mm</p> <p><math>I_i</math>: Infiltración; mes (i). mm</p> <p><math>A_{SUP\_i}</math>: Escorrentía superficial; mes (i). mm</p> <p><math>A_{SUB\_i}</math>: Escorrentía subterránea; mes (i). mm</p> <p><math>Q_i</math>: Caudal subterráneo; mes (i). m<sup>3</sup>/s</p> <p><math>A_{TOT\_i}</math>: Escorrentía total; mes (i). mm</p>
Umbral de escorrentía, $P_0$	$P_0 = C \cdot (H_{m\acute{a}x} - H_{i-1})$
Excedente, $T_i$	$P_i \leq P_0 \Rightarrow T_i = 0$ $P_i > P_0 \Rightarrow T_i = \frac{P_i - P_0}{P_i + \delta - 2P_0} \text{ siendo}$ $\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + EP_i$

**Fuente:** CEDEX., 2013. Manual CHAC.

**Tabla 11.3.** Formulario del modelo de Tézmez

Balance de agua en el suelo, $H_i$	$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$
Evapotranspiración real, $ER_i$	$ER_i = \text{min}(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$
Infiltración, $I_i$	$I_i = I_{m\acute{a}x} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{m\acute{a}x}}$
Aportación superficial, $A_{SUP\_i}$	$A_{SUP\_i} = T_i - I_i$
Caudal drenado por el acuífero, $Q_i$	$Q_i = \alpha \cdot V_i$ $Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + \alpha \cdot R_i \cdot e^{-\alpha \frac{t}{2}}$
Aportación subterránea, $A_{SUB\_i}$	$A_{SUB\_i} = V_{i-1} - V_i + R_i \cdot t$
Aportación total, $A_{TOT\_i}$	$A_{TOT\_i} = A_{SUP\_i} + A_{SUB\_i}$
VARIANTES DEL MODELO	
Siendo	<p>Parámetro número de días con precipitación</p> <p>Dos ramas de descarga del acuífero:</p> <p><math>\alpha_1</math>: Coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup></p> <p><math>\alpha_2</math>: Coeficiente de descarga del acuífero. días<sup>-1</sup></p> <p>Parámetro de reparto de recarga: tanto por uno</p>

**Fuente:** CEDEX., 2013. Manual CHAC.

#### 11.4.1. Calibración.

Este apartado facilita el ajuste del modelo mediante la calibración de los parámetros, apoyándose en evaluación de errores y en la comparación visual de los hidrogramas registrados y simulados. Bajo el epígrafe de Calibración, CHAC permite llevar a cabo dos procesos básicos en la aplicación de modelos para el cálculo de aportaciones. Son:

- Calibración: Ajuste de los parámetros del modelo durante un periodo por comparación entre valores simulados y los caudales reales medidos en estaciones de aforo. Comprobación de la capacidad descriptiva del modelo
- Validación: Comprobación de la capacidad predictiva del modelo aplicando los parámetros de la calibración durante un periodo no empleado para ésta

Los errores calculados entre caudales simulados y reales CHAC corresponden a la siguiente formulación:

(CEDEX.2013 Manual CHAC).

**Tabla 11.4.** Formulario de los términos de error

<b>Términos de error</b>	
<p><b>Error medio relativo:</b> Para cuadrar volúmenes medios</p>	$emr = \frac{1}{n_{i \text{ en meses}}} \sum \frac{Q_{sim\_i} - Q_{reg\_i}}{Q_{reg}}$
<p><b>Error cuadrático-estandarizado medio, relativo al caudal medio registrado:</b> Índice del ajuste en caudales altos</p>	$esmr = \sqrt{\frac{1}{n_{i \text{ en meses}}} \sum \left( \frac{Q_{sim\_i} - Q_{reg\_i}}{Q_{reg}} \right)^2}$
<p><b>Error cuadrático-estandarizado medio, relativo a cada caudal registrado:</b> Índice del ajuste en caudales bajos</p>	$esmr_l = \sqrt{\frac{1}{n_{i \text{ en meses}}} \sum \left( \frac{Q_{sim\_i} - Q_{reg\_i}}{Q_{reg\_i}} \right)^2}$

**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC.

Desde Gráficos se accede a las pantallas básicas para el ajuste de los parámetros. Éstos pueden ser:

**Tabla 11.5.** Gráficos de calibración

---

<b>GRÁFICOS CALIBRACIÓN</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hidrograma de año medio</li><li>• Caudal registrado menos Caudal simulado (Datos anuales)</li><li>• Caudal registrado y Caudal simulado (Datos anuales)</li><li>• Caudal registrado y Caudal simulado (Datos mensuales)</li><li>• Residuos (Datos mensuales)</li><li>• Precipitación (Datos mensuales)</li><li>• Precipitación y ETP (Datos mensuales)</li><li>• ETP y ETR (Datos mensuales)</li><li>• Precipitación y ETR (Datos mensuales)</li><li>• Caudales registrados (Datos mensuales)</li><li>• Caudales simulados y Caudales subterráneos (Datos mensuales)</li></ul>

---

**Fuente:** CEDEX. 2013 Manual CHAC.

#### **11.4.2. Simulación.**

Una vez calibrado y validado el modelo de evaluación de recursos, se pasa a la simulación con los parámetros ajustados previamente cuyo fin puede ser: – Completar y ampliar las series de registros históricos de caudales –Simular los recursos hídricos en cuencas no aforadas –Predicción de caudales considerando series meteorológicas dadas Tras acceder al módulo de Simulación en Cálculo de aportaciones, se despliega la ventana de selección de ficheros de cálculo para la simulación.

**Tabla 11.6.** Gráficos de simulación.

---

<b>GRÁFICOS SIMULACIÓN</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hidrograma de año medio</li><li>• Precipitación (datos mensuales)</li><li>• Precipitación y ETP (datos mensuales)</li><li>• ETP y ETR (datos mensuales)</li><li>• Precipitación y ETR (datos mensuales)</li><li>• Caudales simulados y Caudales subterráneos (datos mensuales)</li></ul>

---

**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC.

### 11.5. METODO DE LAS ISOYETAS

Se definen las isoyetas como las líneas o curvas que unen puntos de igual cantidad de lluvia (igual precipitación). En el dibujo de las isoyetas debe tenerse en cuenta la variación de la precipitación con la altura y toda la información de las condiciones de la zona que se tenga acerca de la lluvia (efectos orográficos, morfología de tormentas, circulación de la atmósfera, condiciones sinópticas de la zona). A partir de éstas se puede obtener una precipitación media ponderada de la siguiente manera (Figura 11.2):

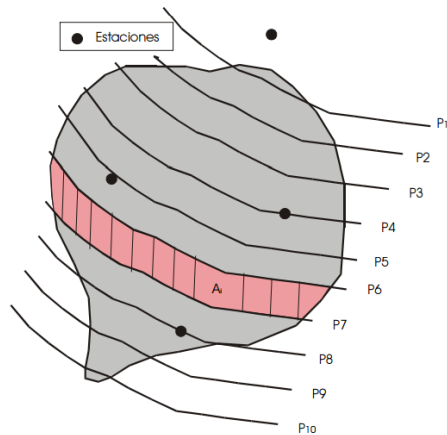
- a) A partir de los datos de las estaciones se dibujan las isoyetas
- b) Se le asigna a cada isoyeta una superficie igual a la suma de la mitad de las superficies existentes entre dos isoyetas contiguas, o bien se le asigna a cada superficie existente entre dos isoyetas un valor medio de precipitación de las mismas.
- c) Se planimetran las superficies.
- d) Se calcula el valor medio utilizando la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^{n \text{ super}} \left( A_i \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \quad (11.3)$$

Donde  $P_m$  es la precipitación media,  $P_i$  es la precipitación de la isoyeta  $i$ ,  $n_{\text{super}}$  es el número de superficies entre isoyetas comprendidas en la cuenca,  $A_i$  es el área existente entre las isoyetas  $i$  e  $i+1$  y  $A_t$  es el área total de la zona, respectivamente.

Este método es el más exacto ya que la media ponderada se calcula asignando áreas de influencia de precipitación más realista que en el caso de los Polígonos de Thiessen, en donde los polígonos se construyen sin tener en cuenta las características de la cuenca. Existe un método mixto entre los anteriores utilizando los módulos pluviométricos medios anuales de cada estación, las isoyetas y los polígonos de Thiessen, y, asignando un coeficiente corrector entre la altura media de precipitación calculada por el método de las isoyetas en un determinado polígono y la altura media de precipitación en dicho polígono, se calcula la precipitación media (*Precipitación. Universidad de Coruña*)

**Figura 11.2.** Método de las isoyetas



**Fuente.** *Precipitación. Universidad de Coruña*

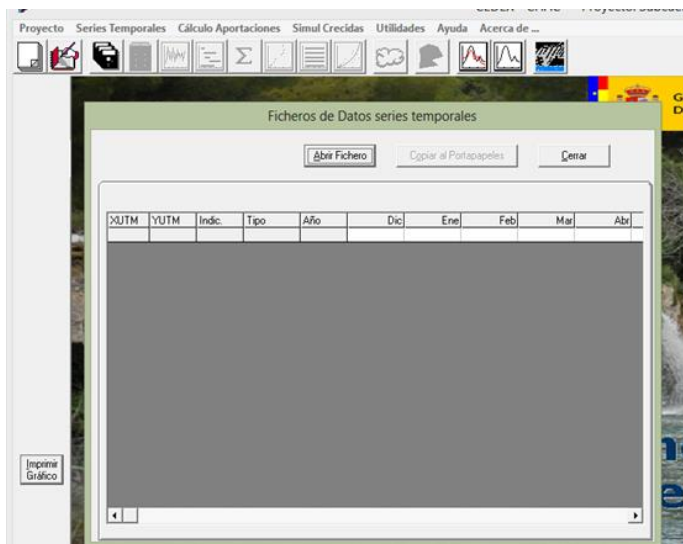
## 12. PROGRAMA CHAC (CALCULO HIDROMETEREOLÓGICO DE APORTACIONES Y CRECIDAS)

La aplicación CHAC ha sido desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX con metodologías propias con el fin de proporcionar una herramienta útil para el desarrollo de trabajos hidrológicos dentro del Curso Internacional de Hidrología General y Aplicada del CEDEX. Se trata de una aplicación desarrollada en Visual Basic para MS WINDOWS, con subrutinas de cálculo en Fortran 77, de fácil manejo a través de una interfaz gráfica.

Esta aplicación es de libre distribución, respondiendo a uno de los fines del CEDEX, como es la transferencia tecnológica a la sociedad. Sin embargo, el CEDEX no se hace responsable del uso que pueda hacerse de esta aplicación por parte de los usuarios finales (**CEDEX.2013**).

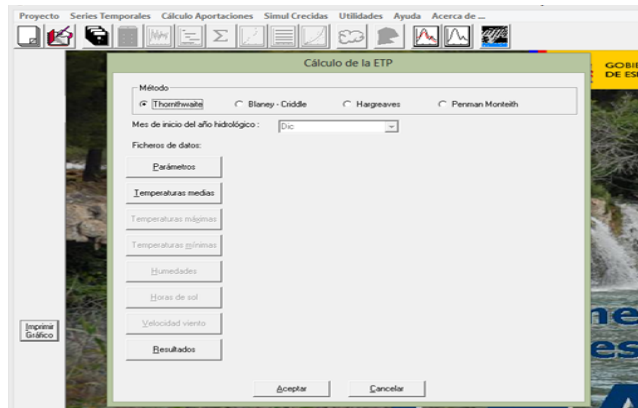
- Manejo de series temporales.
- Completado de datos Calculo de la ETP por diferentes métodos.
- Calculo de aportaciones por el modelo Temez (caudal simulado, caudal subterráneo y ETR).
- Simulación de crecidas por el método Racional.

**Figura 12.1.** Ventana para formación de ficheros programa CHAC.



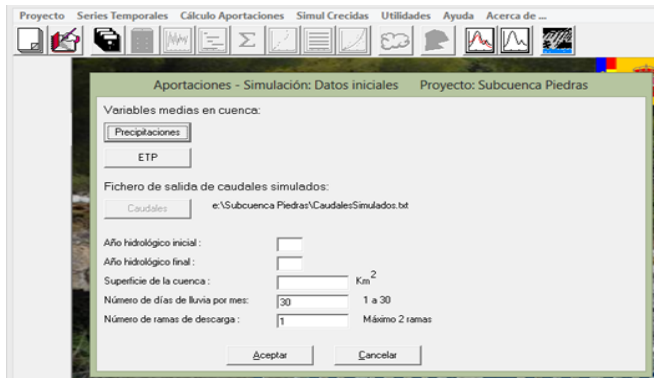
**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC

**Figura 12.2.** Ventana para calculo ETP programa CHAC.



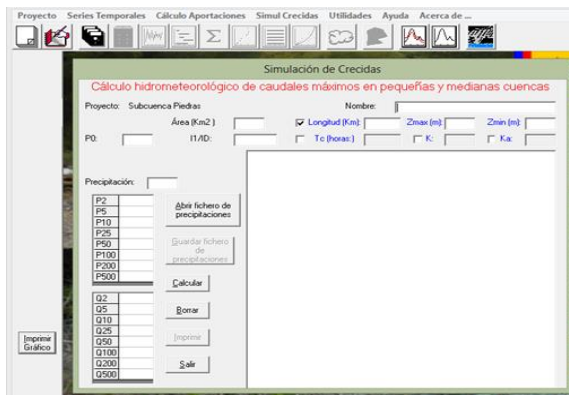
**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC

**Figura 12.3.** Ventana simulación de datos iniciales programa CHAC.



**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC

**Figura 12.4.** Ventana para simulación de crecidas programa CHAC.



**Fuente:** CEDEX.2013 Manual CHAC

### 13. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

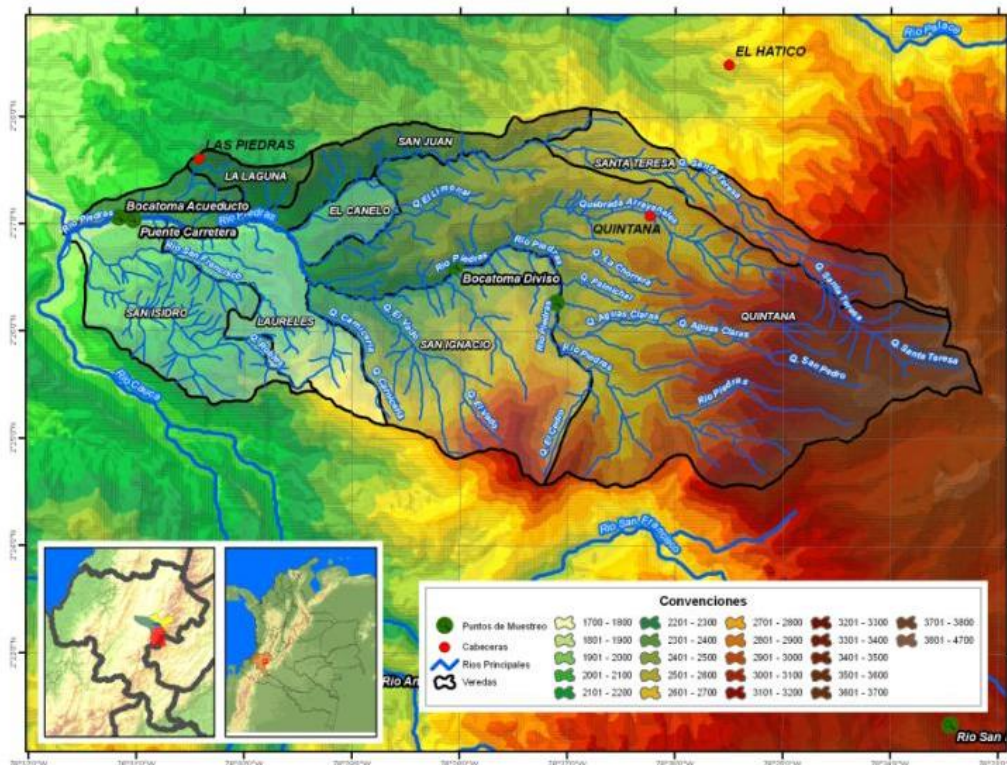


### 13.1. LOCALIZACIÓN DE LA SUBCUENCA

La cuenca del río Piedras está ubicada en el municipio de Popayán y Totoró, al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Se encuentra a  $76^{\circ} 31' 10''$  al Oeste de Greenwich y  $2^{\circ} 21' 45''$  de latitud Norte, en el nacimiento del río y a  $76^{\circ} 23' 45''$  longitud Oeste y  $2^{\circ} 25' 40''$  de latitud Norte en la desembocadura del río Cauca.

Limita al norte con la divisoria de aguas de la cuenca del río Palacé, al sur con la divisoria de aguas del río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el departamento del Cauca (*Acueducto y alcantarillado de Popayán.2015. Cuenca Piedras*).

**Figura 13.1.** Ubicación de la cuenca.



**Fuente.** Imagen tomada de la página de la Universidad de Cauca. Artículo titulado “Estudio de la composición química de ácidos húmicos y su contribución a la mitigación del cambio climático en suelos alto andinos con diferente uso”.

### 13.2. INFORMACIÓN BÁSICA

Los datos básicos requeridos son hidrológicos y cartográficos. La información recolectada para la investigación fue suministrada por las siguientes entidades: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., Fundación Río Las Piedras, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia –IDEAM-. Se reconoce la colaboración para el suministro de información prestada por estas entidades anteriormente mencionadas para la elaboración de este proyecto.

**Tabla 13.1.** Información base para la realización de este estudio.

INFORMACIÓN	DESCRIPCIÓN	DEPENDENCIA	FUNCIONARIO(S)
<b>Cartografía digital Escalas de trabajo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mapa digitalizado del departamento del Cauca, municipio de Popayán, municipio de Totoro, municipio de Puracé, Cuencas Hidrológicas del Cauca.</li> </ul>	Acueducto y Alcantarillado de Popayán- Fundación Pro-Cuenca Río Las Piedras	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga Silva</li> </ul>
<b>Información climatológica de las estaciones dentro de la cuenca.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Localización de las estaciones meteorológicas más cercanas a/sobre la Subcuenca del Río las Piedras</li> <li>Datos meteorológicos tales como precipitación, temperatura media</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acueducto y Alcantarillado de Popayán- Fundación Pro-Cuenca Río Las Piedras</li> <li>IDEAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga.</li> <li><b>Bibiana Lisette Sandoval Báez</b> Coordinadora Grupo de Atención al Ciudadano - IDEAM</li> </ul>
<b>Información de Caudales</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Acueducto y Alcantarillado de Popayán- Fundación Pro-Cuenca Río Las Piedras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga.</li> </ul>
<b>Modelo Digital de Elevación (DEM)</b>	Un <b>modelo digital de elevación</b> es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar,	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acueducto y Alcantarillado de Popayán- Fundación Pro-Cuenca Río Las Piedras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga.</li> </ul>

**Fuente:** Acueducto y Alcantarillado de Popayán, IDEAM.

**Tabla 13.2.** Parámetros morfométricos de la cuenca.

Subcuenca	P(km)	Largo (km)	Ancho (Km)	A(Ha)
<b>Río Las Piedras</b>	37.892	15.81	6.39	6551.9

**Fuente:** Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

## 14. APLICACIÓN A LA CUENCA DE ESTUDIO.

## 14.1. PRESELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Para la selección de la información necesaria en el procesamiento de datos climatológicos de la sub cuenca del Rio Las Piedras, se analizaron las diferentes estaciones que se encuentran aproximadamente a 15 Km de cualquier punto de la cuenca, descartando las que no tengan datos históricos desde el año 1995, debido a que se tomara un periodo de referencia de 21 años (1995-2016), ya que la única estación con mayor influencia en la cuenca presentaba este rango de datos históricos y además tomar un rango menor a 20 años conduciría a una indebida caracterización de la cuenca, por otra parte también se descartaron aquellas estaciones que no poseen mínimo un 90% de registro de datos (Conferencias de clase Ing. Luis Jorge Gonzales).

**Tabla 14.1.** Estaciones preseleccionadas.

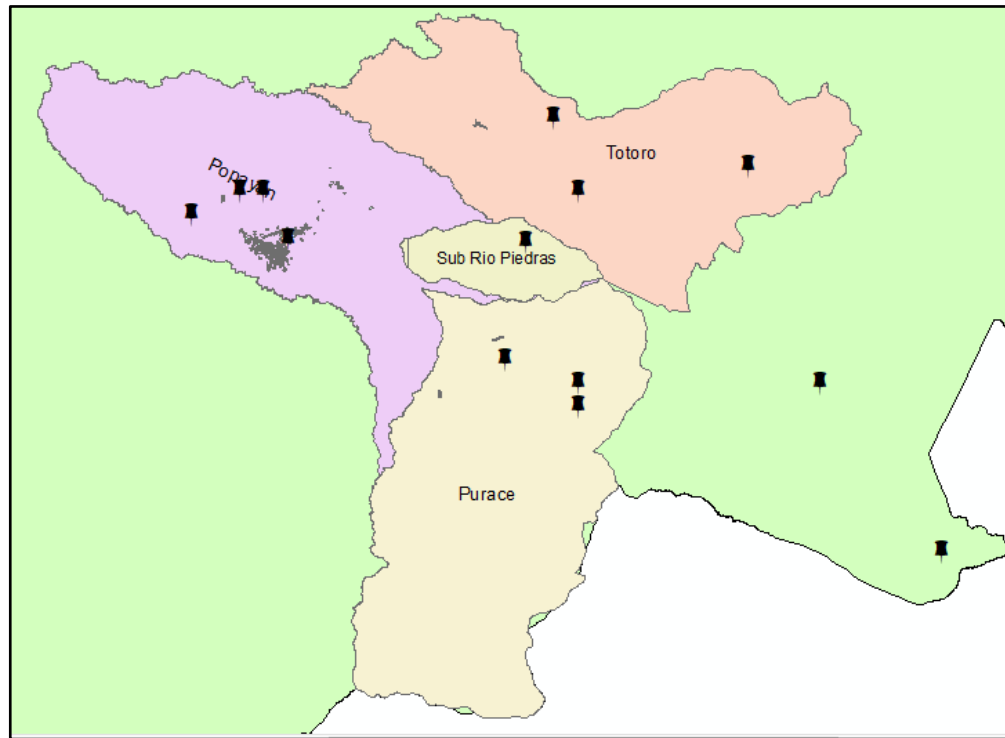
ID	ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	MUNICIPIO
1	CAMP CEDELCA	2.0° 28.0'	76.0° 40.0'	1730	POPAYAN
2	JULUMITO ALERTAS	2.0° 29.0'	76.0° 37.0'	1500	POPAYAN
3	APTO G L VALENCIA	2.0° 27.0'	76.0° 36.0'	1757	POPAYAN
4	BODEGA CEDELCA	2.0° 29.0'	76.0° 35.0'	2020	POPAYAN
5	SATE	2.0° 29.0'	76.0° 38.0'	1748	POPAYAN
6	POLINDARA	2.0° 29.0'	76.0° 24.0'	2515	TOTORO
8	GABRIEL LOPEZ	2.0° 30.0'	76.0° 17.0'	3069	TOTORO
9	TOTORO	2.0° 32.0'	76.0° 25.0'	2422	TOTORO
10	COCONUCO	2.0° 20.0'	76.0° 24.0'	2424	PURACE
11	PURACE	2.0° 22.0'	76.0° 27.0'	2654	PURACE
12	STA LETICIA	2.0° 21.0'	76.0° 14.0'	2310	PURACE
13	STA LETICIA	2.0° 14.0'	76.0° 9.0'	2085	PURACE
15	TERMALES PILIMBALA	2.0° 21.0'	76.0° 24.0'	3478	PURACE
16	ARRAYANALES	2° 26' 53.0"	76° 26' 8.60"	2561	POPAYAN

**Fuente.** IDEAM

## 14.2. FORMACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL ArcGIS

Una vez seleccionadas las estaciones con los anteriores criterios, se procedió a convertir coordenadas geográficas en planas. Estas coordenadas se cargan a la herramienta computacional ArcGIS, donde se convierten de WGS84 a MAGNA Colombia oeste, por medio de una de sus funciones (herramienta transformación que se encuentra en propiedades de layer), el fin de este procedimiento es que todos los shapefile queden con el mismo tipo de coordenadas (Gonzales.2015).

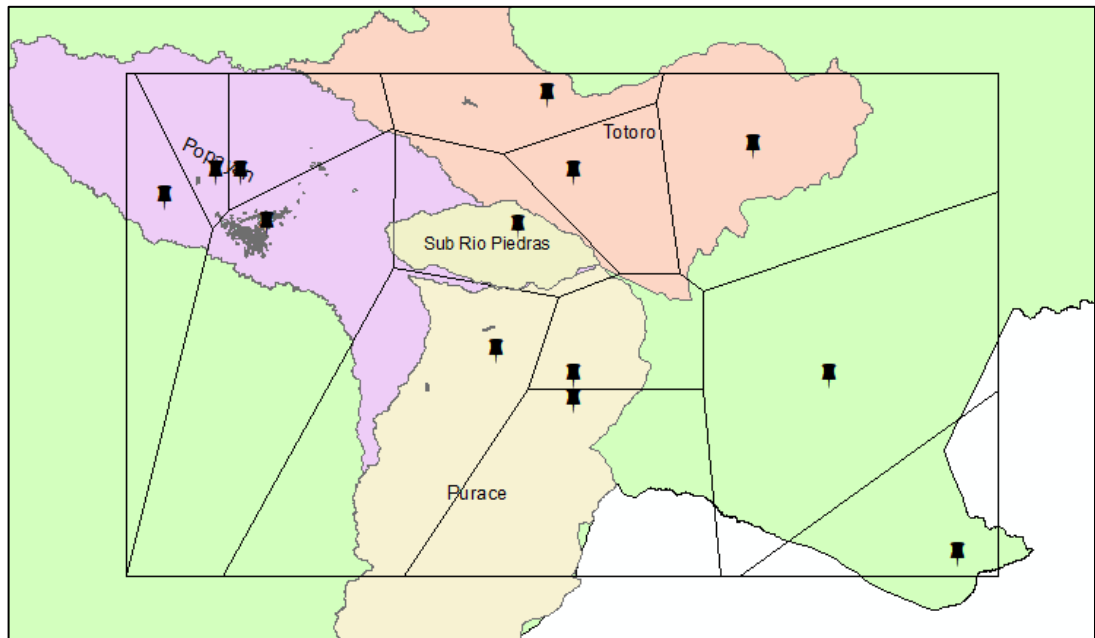
**Figura 14.1.** Estaciones preseleccionadas en modelo computacional ArcGIS.



**Fuente:** Fundación río las Piedras.

El software ArcGIS, dentro de sus funciones tiene la herramienta para el cálculo de los polígonos Thiessen. Para este cálculo se parte de una nube de puntos sobre los que se generan una serie de polígonos. Los puntos se unen entre sí y se proyectan mediatrices entre los segmentos de unión siendo dichas mediatrices los lados de los polígonos resultantes. La principal regla que se establece en este caso es que, los lados de los polígonos generados, son equidistantes a los puntos vecinos y tratan de encontrar la menor distancia posible (Gonzales., 2015). Por medio de este modelo se calculó las estaciones que realmente tienen influencia sobre la cuenca.

**Figura 14.2.** Polígonos de Thiessen proyectados para cada una de las estaciones con influencia sobre la Sub Cuenca Río las Piedras.

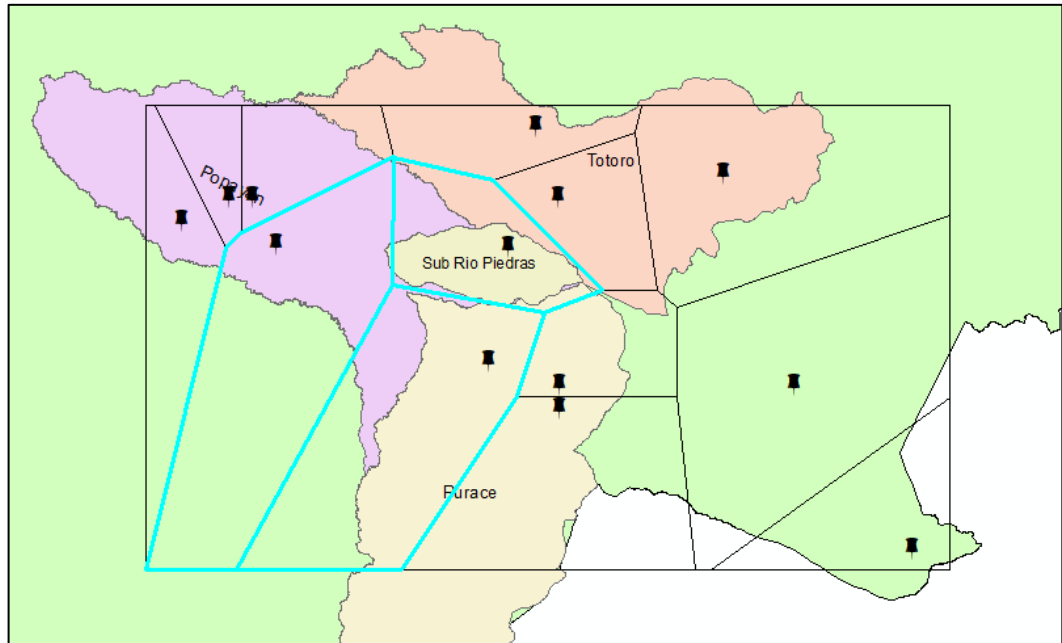


**Fuente:** Fundación río las Piedras

Por medio de los polígonos de Thiessen, se descartan todas aquellas estaciones que por su lejanía no tienen zonas de influencia sobre la cuenca, se debe tener en cuenta que los puntos más externos de la extensión de la capa ofrecerán polígonos desvirtuados ya que no disponen de otros puntos cercanos a ellos y representan los elementos más externos de la nube de puntos (GEOINNOVA).

Los polígonos de Thiessen arrojan como resultado que las estaciones disponibles y que tienen influencia en la cuenca son 3: la ubicada en el municipio de Popayán (estación Aeropuerto-Guillermo León Valencia), la ubicada en el municipio de Puracé (estación Puracé) y la última con mayor área de influencia en la cuenca también ubicada en el municipio de Popayán (estación Arrayanales).

**Figura 14.3.** Estaciones seleccionadas para el estudio por medio de los polígonos de Thiessen.



**Fuente.** Fundación río las Piedras.

Se procede a calcular el área de cada uno de los tres polígonos que se seleccionaron para el presente estudio, estas áreas las arroja ArcGIS mediante sus herramientas integradas, permitiendo comprobar que la estación con mayor área de influencia en la cuenca es la estación Arrayanales.

En los anexos A, B, C, D, E, se encuentra los datos iniciales de precipitación y temperatura para cada estación seleccionada. Cabe destacar que la estación de Puracé no presentaba datos de temperatura.

Anexo A. Datos iniciales de precipitación estación de Puracé.

Anexo B. Datos iniciales de precipitación estación de Aeropuerto.

Anexo C. Datos iniciales de temperatura estación de Aeropuerto.

Anexo D. Datos iniciales de precipitación estación de Arrayanales.

Anexo E. Datos iniciales de temperatura estación de Arrayanales.

### 14.3. TRATAMIENTO DE DATOS INCOMPLETOS

Luego de la selección definitiva de las estaciones, se procedió a la verificación de los datos y se completaron los faltantes por los métodos que se describirán a continuación, esto con el fin de completar los meses faltantes a partir de algunas estaciones tanto para temperatura como para precipitación.

#### **14.3.1. Completado de datos de temperatura.**

Debido a que la estación Guillermo León Valencia, es la que cuenta con la mayor parte de datos completos de temperatura, se utilizaron para hacer una proyección y completar los datos faltantes de las estaciones Puracé y Arrayanales. Para completar los datos faltantes de la estación Guillermo León Valencia se utilizó la estación Arrayanales.

Es necesario resaltar que la estación de Puracé no presentaba datos de temperatura, por lo que fue necesario hallarlos en su totalidad; este procedimiento está indicado más adelante.

Para las proyecciones de temperatura faltantes se utilizó un gradiente dado para la región andina.

##### **14.3.1.1. Estimación de datos de temperatura para la estación Arrayanales basada en la estación Guillermo León Valencia.**

La estación arrayanales cuenta con una elevación de 2561msnm, mientras que la estación Guillermo León Valencia está ubicada a 1757 msnm.

Para el cálculo lo primero en realizar es la diferencia de elevación entre las dos estaciones.

$$2561\text{msnm} - 1757\text{ msnm} = 804\text{ msnm}$$

Esto lo que permite observar es que la estación arrayanales se encuentra a 804 msnm más que la estación Guillermo León Valencia, posteriormente a esto se utiliza el método de la Regla de Tres para encontrar el aumento de temperatura para cada dato de la estación Guillermo León Valencia

$$0.625^{\circ}\text{C} \longrightarrow 100\text{ msnm (14.1)}$$

$$X \longrightarrow 804\text{ msnm}$$

$$X = \frac{0.625^{\circ}\text{C} \times 804\text{msnm}}{100\text{msnm}}$$

$$X = 5.025^{\circ}\text{C}$$

Este valor se le resta a cada dato faltante de temperatura de la estación del aeropuerto Guillermo león valencia, y se hizo equivalente para los datos faltantes de temperatura de la estación Arrayanales para los mismos años.

A continuación, se da un ejemplo en donde se encuentran la ubicación de los datos faltantes y rechazados con su debido cálculo de estimación de Temperatura.

**Tabla 14.2.** Datos para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina, para diciembre del año 2002.

AÑO	MES	TEMPERATURA AEROPUERTO	DISMINUCION TEMPERATURA	TEMPERATURA ARRAYANALES
2002	Dic	19.4	5.025	14.375

*Fuente. Propia*

En el anexo **F** se encuentran los cálculos para completado de datos faltantes de temperatura para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **G** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina.

#### **14.3.1.2. Estimación de datos de temperatura en la estación Guillermo León Valencia basada en la estación Arrayanales.**

Debido a que los datos faltantes para la estación Guillermo León Valencia son diferentes a los que faltaban en la estación Arrayanales, se utilizó el mismo cálculo del ítem anterior, pero como la estación de referencia se encuentra ubicada a una altura mayor a la estación con los datos faltantes, el valor de  $X = 5.025\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no se restó sino que se sumó a los valores de la estación de Arrayanales y se hicieron equivalentes para la estación Guillermo León Valencia.

**Tabla 14.3.** Datos para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina, para junio del año 1997.

Año	MES	TEMPERATURA ARRAYANALES	AUMENTO TEMPERATURA	TEMPERATURA AEROPUERTO
1997	Jun	13.5	5.025	18.525

*Fuente: Propia*

En el anexo **H** se encuentran los cálculos para completado de datos faltantes de Temperatura para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **I** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina.

#### **14.3.1.3. Estimación de datos de temperatura en la estación Puracé basada en la estación Guillermo León Valencia.**



La estación de Puracé no cuenta con ningún dato de temperatura por lo tanto se estimaron todos los datos para esta estación basándonos en los datos completos de la estación Guillermo León Valencia.

La estación Puracé cuenta con una elevación de 2654 msnm, mientras que la estación Guillermo León Valencia está ubicada a 2561 msnm.

Para el cálculo lo primero en realizar es la diferencia de elevación entre las dos estaciones.

$$2654\text{msnm} - 1757 \text{ msnm} = 897 \text{ msnm}$$

$$0.625^{\circ}\text{C} \longrightarrow 100 \text{ msnm} \quad (14.2)$$

$$X \longrightarrow 897 \text{ msnm}$$

$$X = \frac{0.625^{\circ}\text{C} \times 897\text{msnm}}{100\text{msnm}}$$

$$X = 5.60625^{\circ}\text{C}$$

Este valor se le resta a cada dato de temperatura de la estación Guillermo León Valencia y lo hacemos equivalente para los datos de temperatura de la estación de Puracé.

**Tabla 14.4.** Datos para la estación Puracé por medio del gradiente para la región andina, para junio del año 1995.

AÑO	MES	TEMPERATURA AEROPUERTO	DISMINUCION TEMPERATURA	TEMPERATURA PURACE
1997	Jun	18.525	5.606	12.919

*Fuente. Propia*

En el anexo J se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación Puracé por medio del gradiente para la región andina.

Las estaciones ya contaban con un promedio de temperaturas anual, pero al realizar las estimaciones y completar los datos faltantes, los promedios cambian con respecto a las promedios anuales que tiene el IDEAM. Estos valores de promedios anuales de temperatura se pueden apreciar en el anexo de datos completos para cada estación.

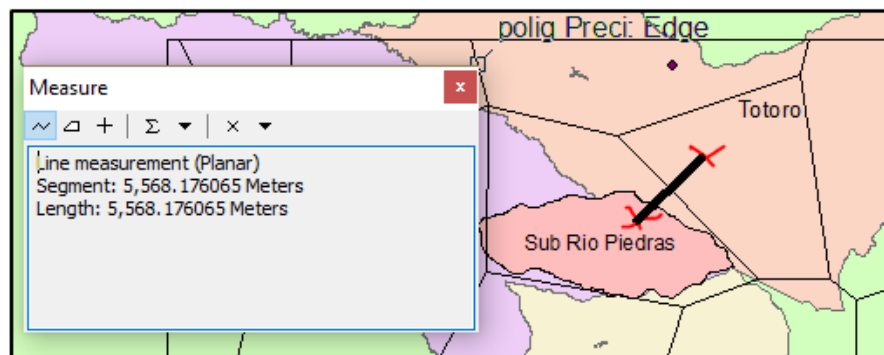
### 14.3.2. Precipitación

Al igual que los datos de temperatura, los de precipitación en algunas de las estaciones se encontraron incompletos, por esta razón se buscó un método que permitiera hallar datos de precipitación faltante a partir de datos de otras estaciones, para estas proyecciones se utilizó el modelo de pronóstico de regresión lineal.

#### 14.3.2.1. Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación Arrayanales a partir de los datos de la estación Polindara ubicada en el municipio de Totoró mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación Arrayanales se escogió la estación de Polindara ubicada en el municipio de Totoró la cual tiene una elevación similar a la de Arrayanales y además están a una distancia de 5.568 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

**Figura 14.4.** Ubicación espacial de las estaciones Arrayanales y Polindara para completar datos de precipitación.



**Fuente:** Fundación Río las Piedras.

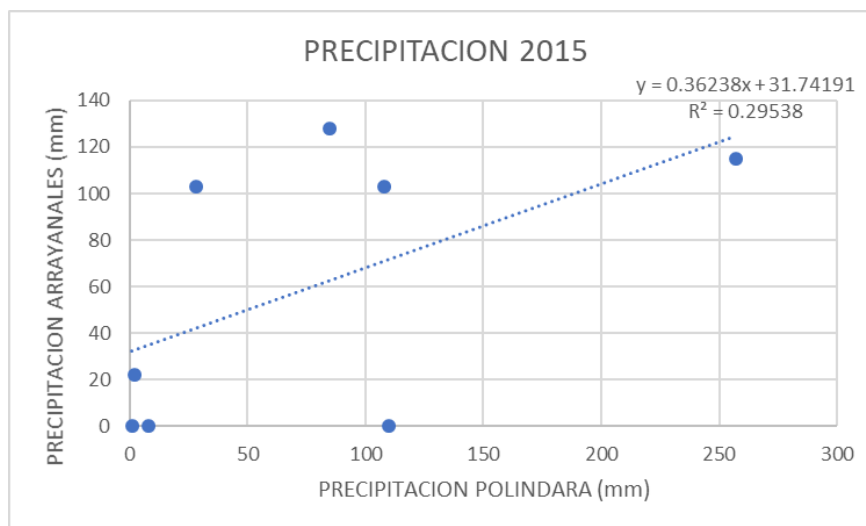
Se tomaron los datos de la estación Polindara (anexo K) y los datos iniciales de la estación Arrayanales (anexo D) del año 2015 el cual presentaba datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación Polindara se tomaron como la variable **INDEPENDIENTE** y los datos de la estación Arrayanales como la variable **DEPENDIENTE** ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En el siguiente cuadro se muestra de color azul a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta; de amarillo se encuentra el dato que fue hallado mediante dicha ecuación.

**Tabla 14.5.** Regresión Lineal para estación Arrayanales con la estación Polindara en el año 2015.

		VARIABLES	
AÑO	MES	INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE
		eje X (axisas) PRECI POLINDARA	eje Y (ordenadas) PRECI ARRAYANALES
2015	Ene	85	128
2015	Feb	257	115
2015	Mar	108	103
2015	Abr	28	103
2015	May	2	22
2015	Jun	8	0
2015	Jul	110	0
2015	Ago	1	0
2015	Sep	1	32,1
2015	Oct	102	51
2015	Nov	143	260
2015	Dic	0	31,7

**Fuente:** Propia

**Figura 14.5.** Regresión Lineal Precipitación Polindara vs Arrayanales.



**Fuente:** Propia

A continuación, se muestra el cálculo para obtener los valores de los recuadros amarillos. El primero corresponde al mes de septiembre del año 2015 y el segundo al mes de diciembre del mismo año.

1.  $y = 0.36238(1) + 31.74191 = 32.1$  **(Ecu 14.3)**
2.  $y = 0.36238(0) + 31.74191 = 31.7$  **(Ecu 14.3)**

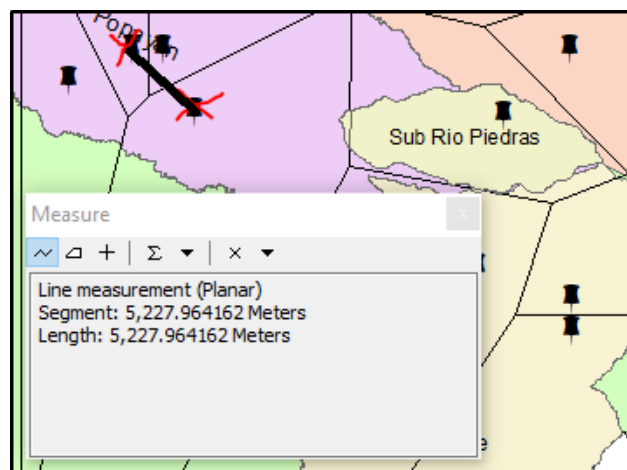
En el anexo L se encuentran las tablas y figuras completa, para los años restantes que se calcularon de la misma manera para la Precipitación de la estación Arrayanales.

En el anexo M se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación de la estación de arrayanales.

#### 14.3.2.2. Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación Guillermo León Valencia a partir de los datos de la estación Sate ubicada en el municipio de Popayán mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación Guillermo León Valencia se escogió la estación de Sate ubicada el municipio de Popayán la cual tiene una elevación similar Guillermo León Valencia y además están a una distancia de 5.227 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

**Figura 14.6.** Ubicación espacial de las estaciones Guillermo León Valencia y Sate para completar datos de precipitación.



**Fuente.** Fundación Rio las Piedras.

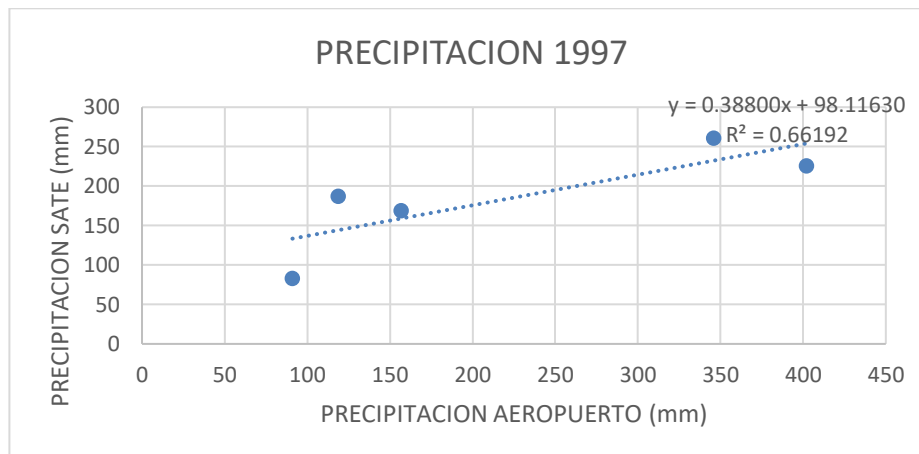
Se tomaron los datos de la estación Sate (anexo N) y los datos iniciales de la estación Guillermo León Valencia (anexo B) de los años 1997, 2006, 2007, 2009, 2011, 2015 y 2016 los cuales presentaban datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación Sate se tomaron como la variable **INDEPENDIENTE** y los datos de la estación de Aeropuerto como la variable **DEPENDIENTE**, ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En los siguientes cuadros se muestra de color azul a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta; de amarillo se encuentra los datos que fueron hallados mediante dicha ecuación.

**Tabla 14.6.** Regresión Lineal para estación Guillermo León Valencia con la estación Sate en el año 1997.

		VARIABLES	
AÑO	MES	INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE
		eje X (axisas) PRECI SATE	eje Y (ordenadas) PRECI AEROPUERTO
1997	Ene	402	225,1
1997	Feb	119	186,6
1997	Mar	346	260,6
1997	Abr	157	168,6
1997	May	91	82,3
1997	Jun	239	190,8
1997	Jul	1	4,2
1997	Ago	0	0
1997	Sep	117	92,6
1997	Oct	139	148,3
1997	Nov	217	176,6
1997	Dic	163	69,1

*Fuente. Propia*

**Figura 14.7.** Regresión Lineal Precipitación Guillermo León Valencia vs Sate.



*Fuente. Propia.*

A continuación, se muestra el cálculo para obtener el valor del recuadro amarillo, el cual corresponde al mes de junio del año 1997.

$$y = 0.38800(239) + 98.11630 = 190.8 \text{ (13.4)}$$

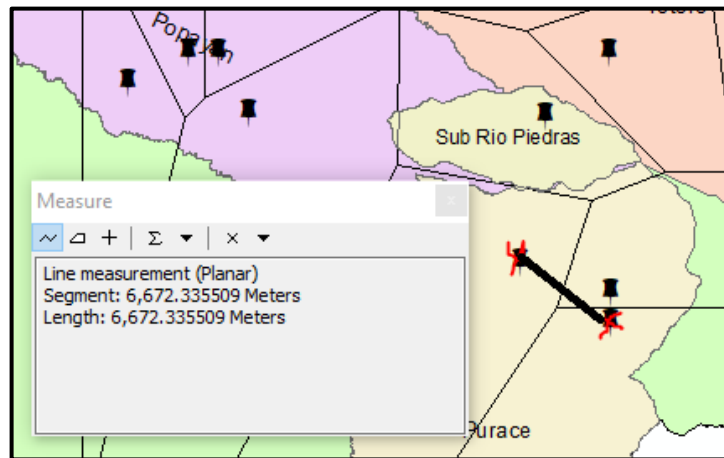
En el anexo O se encuentran las tablas y figuras completa, para los años restantes que se calcularon de la misma manera para la Precipitación de la estación Guillermo León Valencia.

En el anexo P se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación de la estación Guillermo León Valencia.

#### 14.3.2.3. Estimación de datos faltantes de precipitación para la estación de Puracé a partir de los datos de la estación de Coconuco en el municipio de Puracé mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación de Puracé se escogió la estación Coconuco ubicada el municipio de Popayán la cual tiene una elevación similar a la estación Puracé y además están a una distancia de 6.672 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

**Figura 14.8.** Ubicación espacial de las estaciones Puracé y Coconuco para completar datos de precipitación.



**Fuente.** Fundación Rio las Piedras.

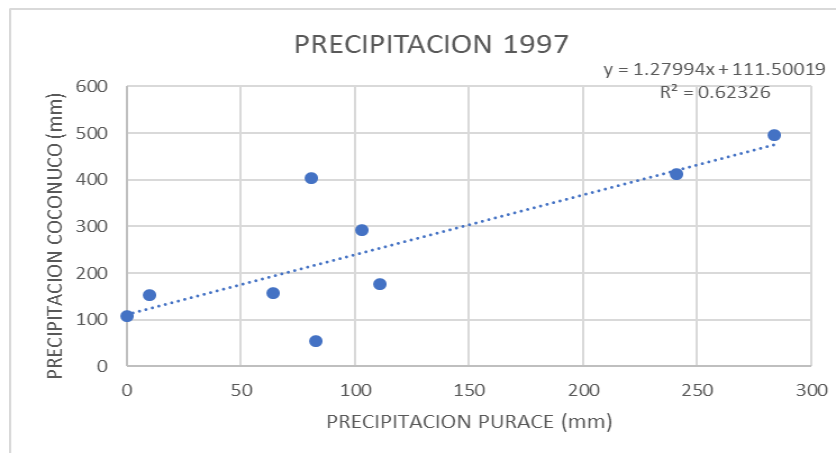
Se tomaron los datos de la estación de Coconuco (anexo Q) y los datos iniciales de la estación de Puracé (anexo A) de los años 1997 y 2006 los cuales presentaban datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación de Coconuco se tomaron como la variable **INDEPENDIENTE** y los datos de la estación Puracé como la variable **DEPENDIENTE** ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En los siguientes cuadros se muestra de color azul a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta, de amarillo se encuentra los datos que fueron hallados mediante dicha ecuación.

**Tabla 14.7.** Regresión Lineal para estación Puracé con la estación Coconuco para el año 1997.

		VARIABLES	
AÑO	MES	INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE
		eje X (axisas) PRECI COCONUCO	eje Y (ordenadas) PRECI PURACE
1997	Ene	284	495
1997	Feb	83	55
1997	Mar	241	412
1997	Abr	111	177
1997	May	81	403
1997	Jun	103	292
1997	Jul	10	153
1997	Ago	0	109
1997	Sep	64	158
1997	Oct	146,3	298,8
1997	Nov	277,3	466,4
1997	Dic	58	148

**Fuente:** Propia

**Figura 14.9.** Regresión Lineal Precipitación Puracé vs Coconuco.



**Fuente:** Propia.

A continuación, se muestra el cálculo para obtener el valor de los recuadros amarillos, los cuales corresponden a los meses octubre y noviembre del año 1997 en los respectivos siguientes ítems.

1.  $y = 1.27994(146.3) + 111.50019 = 298.8$  **(13.5)**
2.  $y = 1.27994(277.3) + 111.50019 = 466.4$  **(13.6)**

En el anexo R se encuentran las tablas y figuras completa, para los años restantes que se calcularon de la misma manera para la Precipitación de la estación Puracé.

En el anexo S se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación de la estación Puracé.

#### 14.4. APLICAR FORMULA DE POLÍGONOS DE THIESSEN

Dentro de cualquier estudio hidrológico es necesario conocer cuál es la precipitación y temperatura media en la toda la cuenca y no en puntos determinados, que es la información que nos dan las estaciones. Para conocer esta precipitación y temperatura (precipitación areal y temperatura areal) disponemos de una serie de estaciones distribuidas por la cuenca (con mayor o menor homogeneidad) que son únicamente una muestra de la precipitación y temperatura que recibe la cuenca (Gonzales.2015).

La fórmula de Thiessen se puede aplicar tanto para precipitación como para temperatura y con ella poder obtener los valores medios de la cuenca, teniendo en cuenta sus áreas de influencia.

##### 14.4.1. Precipitación media areal.

Para hallar la precipitación media areal se utilizó la fórmula de polígonos de Thiessen (Ecu 11.1) y los datos presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 14.8.** Área (Ha) de influencia de cada estación sobre la cuenca, obtenidos de ArcGIS.

Polígono	Estación	Área ha
1	Puracé	12,5
2	Aeropuerto	81,1
3	Arrayanales	6458,2
		6551,8

**Fuente:** Propia

Inicialmente se multiplica cada dato de precipitación por cada mes de cada estación por el valor de área de influencia.



**Figura 14.10.** Multiplicación de datos de precipitación de las estaciones Arrayanales, Puracé y Guillermo león Valencia por su área de influencia. Ejemplo mes de enero del año 1995.

PURACE		$P_i \times A_1$			
ah	ene		→	ah	ene
1995-96	95.0			1995-96	1187.5
AEROPUERTO		$P_i \times A_2$			
ah	ene		→	ah	ene
1995-96	76.6			1995-96	6212.3
ARRAYANALES		$P_i \times A_3$			
ah	ene		→	ah	ene
1995-96	99.0			1995-96	639361.8

**Fuente:** Propia.

Después de tener el cálculo de las  $P_i \times A_i$ , para cada mes de cada año, se realizó una sumatoria de todas las  $P_i \times A_i$  del mismo mes y año de todas las estaciones y se dividieron entre el área total de la cuenca (6551.8 Ha).

**Figura 14.11.** Sumatoria de todas las  $P_i \times A_i$  dividido entre el área total de la cuenca.

PURACE			AEROPUERTO			ARRAYANALES	
ah	ene	+	ah	ene	+	ah	ene
1995-96	1187.5		1995-96	6212.3		1995-96	639361.8
El valor de la suma se divide entre 6551.9							
↓							
ah	dic						
1995-96	287.0						

**Fuente:** Propia.

El anterior procedimiento se realizó para todos los meses de cada uno de los años desde 1995 hasta 2016.

Anexo T. Cálculos de Precipitación (i) por área de influencia (i)

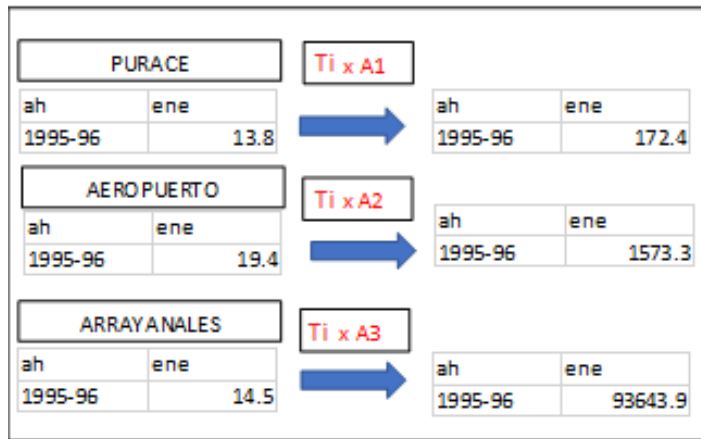
Anexo U. precipitación media areal.

#### 14.4.2. Temperatura media areal

Para hallar la Temperatura media areal se aplica la fórmula de Thiessen (11.1), teniendo en cuenta los datos de la **Tabla 13.7**. Área (Ha) de influencia de cada estación sobre la cuenca, obtenidos de ArcGIS

Inicialmente se multiplica cada dato temperatura de cada mes y de cada estación por el valor de área de influencia.

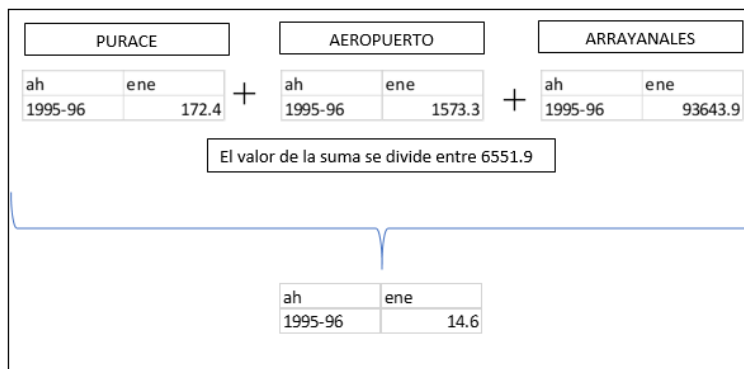
**Figura 14.12.** Multiplicación de datos de temperatura de las estaciones Arrayanales, Puracé y Guillermo León Valencia por su área de influencia.



**Fuente:** Propia.

Después de tener el cálculo de las  $T_i \times A_i$ , para cada mes de cada año, se realizó una sumatoria de todas las  $T_i \times A_i$  del mismo mes y año de todas las estaciones y se dividieron entre el área total de la cuenca (6551.8 Ha).

**Figura 14.13.** Sumatoria de todas las  $T_i \times A_i$  dividido entre el área total de la cuenca.



**Fuente:** Propia.

El anterior procedimiento se realizó para todos los meses de cada uno de los años desde 1995 hasta 2016.

Anexo V. Cálculos de Temperatura (i) por área de influencia (i)

Anexo W. Temperatura media areal.

#### 14.4.3. Cálculo evapotranspiración media areal.

La evapotranspiración media areal se calculó mediante el método de Thornthwaite a partir de la tabla de temperatura media areal (**Anexo W**), las cuales se hallaron en el apartado anterior, mediante las hojas de cálculo de conferencias de clase suministradas por el ingeniero Luis Jorge Gonzales.

A continuación se muestran los datos de temperatura media areal del año 1995, los cuales permiten hallar la evapotranspiración del mismo año.

**Tabla 14.9.** Datos temperatura media areal (°C) mensual del año 1995.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
16,4	13,6	13,6	14,1	14,1	14,6	13,6	13,6	14,1	13,1	13,1	13,1

**Fuente:** Propia

En la siguiente figura se encuentra el resultado (Fila color azul) obtenido de la tabla de cálculo de evapotranspiración areal por el método de Thornthwaite. Esta hoja de cálculo fue realizada por J. Almorox

**Figura 14.14.** Cálculo evapotranspiración media areal, año 1995.

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL SEGUN THORNTHWAITE mm/mes												
Latitud (grados)	2		Introduzca la latitud en grados y las temperaturas medias mensuales en °C Si $t_m > 26.5^\circ\text{C}$ introduzca los valores de ETP sin ajustar: $ETP = L \cdot ETP \text{ sin ajustar}$									
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media °C	14.559	13.5834	13.575	14.061	14.065	14.558	13.571	13.571	14.071	13.069	13.068	13.069
Índice calor mensual "i"	5.04	4.54	4.54	4.78	4.79	5.04	4.53	4.53	4.79	4.28	4.28	4.28
Índice calor anual "I"	55.44											
Parámetro "a"	1.364											
ETP sin ajustar mm/mes	59.71	54.32	54.27	56.94	56.96	59.70	54.25	54.25	56.99	51.53	51.52	51.53
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03
ETP mm/mes	62	51	57	58	60	61	57	57	58	54	52	53
<i>ETP sin ajustar si <math>t_m &gt; 26.5</math></i>												
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03
ETP mm/mes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Fuente:** J. Almorox.

Este mismo cálculo se realiza para todos los años del periodo de referencia y los resultados de los cálculos de la evapotranspiración media areal se muestran en el **Anexo X**

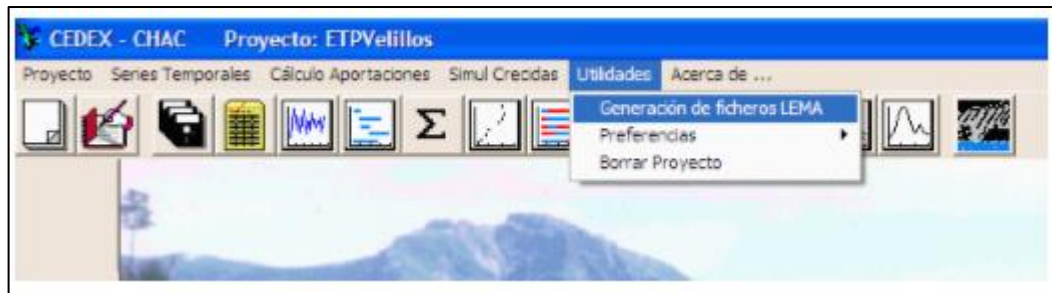
## 14.5. GENERACIÓN DE FICHEROS LEMA

Los ficheros LEMA son archivos de texto los cuales tienen un formato particular de organización de sus datos para que puedan ser leídos y procesados por el programa CHAC del CEDEX. Estos ficheros pueden ser generados por la función “Generación de ficheros LEMA” en el apartado de utilidades (CEDEX.2013 Manual CHAC)

Para la Generación de ficheros LEMA, se siguen los siguientes pasos:

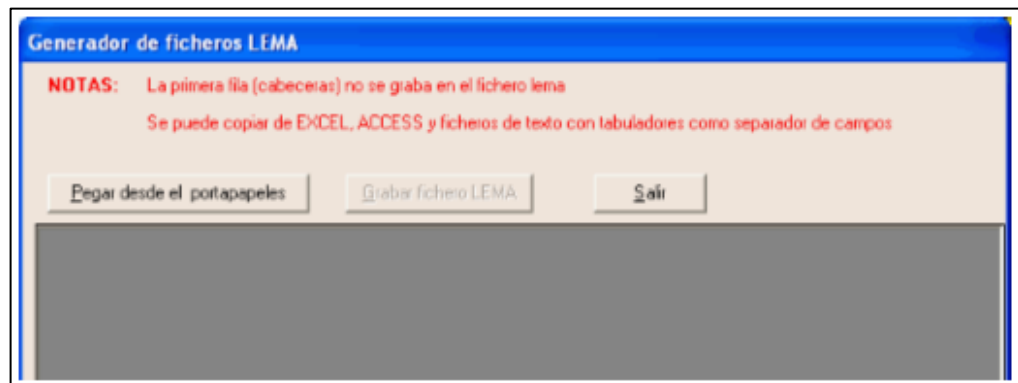
1. Seleccionar la matriz original en Excel o Access con todos los campos necesarios de un fichero LEMA. Deben seleccionarse la matriz de datos y una línea superior en blanco.
2. Seleccionar copiar.
3. Acceder al menú Generación de ficheros LEMA y pegar.

**Figura 14.15.** Generación ficheros LEMA.



*Fuente: CEDEX, España.*

**Figura 14.16.** Pegado desde el portapapeles de ficheros Excel.



*Fuente: CEDEX, España.*

**Figura 14.17.** Generación de ficheros LEMA. Primera fila en blanco o títulos.

Generador de ficheros LEMA

**NOTAS:** La primera fila (cabeceras) no se graba en el fichero lema  
Se puede copiar de EXCEL, ACCESS y ficheros de texto con tabuladores como separador de campos

Pegar desde el portapapeles   Grabar fichero LEMA   Salir

x	y	cod	tipo	ah	dic	ene	feb	mar	abr
-76	2	100	EPA	1995-96	53.3	61.8	50.9	56.5	57.7
-76	2	100	EPA	1996-97	87.3	49.0	46.8	54.8	58.9
-76	2	100	EPA	1997-98	86.3	44.9	48.0	56.3	52.0
-76	2	100	EPA	1998-99	72.9	61.2	58.1	58.6	59.8
-76	2	100	EPA	1999-00	72.1	49.8	47.5	55.6	56.7
-76	2	100	EPA	2000-01	70.9	51.1	46.3	54.2	52.8
-76	2	100	EPA	2001-02	76.8	51.1	51.3	51.5	52.8
-76	2	100	EPA	2002-03	62.2	51.9	47.0	52.2	50.8
-76	2	100	EPA	2003-04	72.1	63.1	46.7	57.6	61.8
-76	2	100	EPA	2004-05	91.1	55.3	51.2	63.5	55.3
-76	2	100	EPA	2005-06	84.5	56.8	51.5	57.2	58.5
-76	2	100	EPA	2006-07	55.4	56.0	53.0	56.0	54.4
-76	2	100	EPA	2007-08	109.6	39.5	77.0	80.9	92.4
-76	2	100	EPA	2008-09	109.6	80.2	68.6	80.7	70.0
-76	2	100	EPA	2009-10	132.3	75.0	75.5	83.9	81.6
-76	2	100	EPA	2010-11	99.1	99.4	77.0	90.3	83.0
-76	2	100	EPA	2011-12	93.5	93.6	78.1	86.8	61.2
-76	2	100	EPA	2012-13	73.5	55.8	45.5	56.2	49.2
-76	2	100	EPA	2013-14	78.4	49.7	55.9	62.3	57.5

Fuente: CEDEX, España.

Figura 14.18. Resultado de la transformación a Fichero LEMA de Evapotranspiración media areal.

-76	2	100	EPA	1995	53.3	61.8	50.9	56.5	57.7	59.9	60.9	57.1	56.9	57.6	53.6	51.6	677.8
-76	2	100	EPA	1996	87.3	49.0	46.8	54.8	58.9	55.4	56.6	55.5	61.0	58.8	49.2	55.5	688.6
-76	2	100	EPA	1997	86.3	44.9	48.0	56.3	52.0	74.9	52.3	59.8	59.7	54.6	56.3	54.2	699.4
-76	2	100	EPA	1998	72.9	61.2	58.1	58.6	59.8	59.1	63.1	59.1	58.9	54.0	52.7	45.4	703.0
-76	2	100	EPA	1999	72.1	49.8	47.5	55.6	56.7	58.9	54.4	64.7	64.5	51.2	52.7	38.1	666.1
-76	2	100	EPA	2000	70.9	51.1	46.3	54.2	52.8	54.7	55.8	60.5	69.1	52.6	59.7	46.9	674.8
-76	2	100	EPA	2001	76.8	51.1	51.3	51.5	52.8	51.9	53.1	60.5	69.0	55.3	51.4	49.5	674.3
-76	2	100	EPA	2002	62.2	51.9	47.0	52.2	50.8	58.3	53.7	64.1	63.9	58.7	54.8	52.8	670.5
-76	2	100	EPA	2003	72.1	63.1	46.7	57.6	61.8	70.3	53.6	58.1	61.5	58.6	55.0	52.5	711.0
-76	2	100	EPA	2004	91.1	55.3	51.2	63.5	55.3	59.2	60.4	55.7	63.9	54.1	53.3	51.9	715.0
-76	2	100	EPA	2005	84.5	56.8	51.5	57.2	58.5	60.7	56.0	57.8	60.6	58.4	59.9	52.2	713.9
-76	2	100	EPA	2006	55.4	56.0	53.0	56.0	54.4	62.3	60.4	64.7	65.7	60.4	60.4	52.6	701.3
-76	2	100	EPA	2007	109.6	39.5	77.0	80.9	92.4	95.9	93.1	73.1	90.8	78.6	89.9	77.8	998.6
-76	2	100	EPA	2008	109.6	80.2	68.6	80.7	70.0	81.5	83.5	86.2	95.5	87.4	80.5	73.4	996.9
-76	2	100	EPA	2009	132.3	75.0	75.5	83.9	81.6	84.7	77.6	84.9	89.5	81.6	83.8	80.8	1031.3
-76	2	100	EPA	2010	99.1	99.4	77.0	90.3	83.0	91.0	79.0	77.0	81.3	78.2	76.1	65.1	996.4
-76	2	100	EPA	2011	93.5	93.6	78.1	86.8	61.2	51.1	49.7	54.3	51.1	64.2	42.2	43.3	769.0
-76	2	100	EPA	2012	73.5	55.8	45.5	56.2	49.2	56.8	60.8	62.7	65.5	69.0	56.1	48.7	699.8
-76	2	100	EPA	2013	78.4	49.7	55.9	62.3	57.5	59.5	57.8	79.9	83.2	70.0	71.9	50.9	777.1
-76	2	100	EPA	2014	71.0	58.8	56.0	56.3	54.8	59.8	63.9	66.1	59.7	60.4	59.1	54.2	720.1
-76	2	100	EPA	2015	65.6	59.1	50.9	59.5	57.9	60.1	58.3	63.2	66.1	64.1	59.4	54.4	718.7
-76	2	100	EPA	2016	84.6	62.2	53.8	59.7	55.2	60.2	55.5	60.2	60.1	57.9	56.5	51.7	717.7

Fuente: CEDEX, España.

En el presente estudio de investigación se realizó esta función para las siguientes tablas de datos, las cuales fueron obtenidas por procedimientos anteriormente expuestos.

- **Evapotranspiración Media Areal:** obtenida en el apartado 13.3.3. Resultado del fichero en el Anexo Y
- **Precipitación media Areal:** Obtenida en el apartado 13.3.1. Resultado del fichero en el anexo Z.
- **Precipitación media Proyectada RCP 2.6:** Obtenida en el apartado 13.9.1.1. Resultado del fichero en el anexo A.A.

- **Precipitación media Proyectada RCP 8.5:** Obtenida en el apartado 13.9.1.2. Resultado del fichero en el anexo A.B.
- **Evapotranspiración media Proyectada RCP 2.6:** Obtenida en el apartado 13.9.2.1. Resultado del fichero en el anexo A.C.
- **Evapotranspiración media Proyectada RCP 8.5:** Obtenida en el apartado 13.9.2.2. Resultado del fichero en el anexo A.D.
- **Caudales medios mensuales medidos en la desembocadura:** Datos aportados por el acueducto en el anexo A.E

## 14.6. CALIBRACIÓN

Este apartado facilitó el ajuste del modelo mediante la calibración de los parámetros Humedad máxima (H<sub>máx</sub>), (C), infiltración máxima (I<sub>máx</sub>), y coeficiente de cultivo, apoyándose en evaluación de errores y en la comparación visual de los hidrogramas registrados y simulados. Bajo el epígrafe de Calibración, CHAC permite llevar a cabo dos procesos básicos en la aplicación de modelos para el cálculo de aportaciones.

La Calibración Ajustó los parámetros del modelo durante el periodo de referencia en estudio por comparación entre valores simulados y los caudales reales medidos en estaciones de aforo. Comprobación de la capacidad descriptiva del modelo.

Dentro del módulo de Cálculo de aportaciones se accede al apartado de Calibración presentándose la siguiente ventana.

**Figura 14.19.** Ventana inicial de calibración.

Aportaciones - Calibración: Datos iniciales Proyecto: subcuencaPiedras

Variables medias en cuenca:

Precipitaciones C:\Users\vemman\Desktop\ejecucion CHAC\1. CALIBRACION\PMA.txt

ETP C:\Users\vemman\Desktop\ejecucion CHAC\1. CALIBRACION\EPA.txt

Caudales registrados para calibración:

Caudales C:\Users\vemman\Desktop\ejecucion CHAC\1. CALIBRACION\amq.txt

Año hidrológico inicial: 1995 / 96

Año hidrológico final: 2016 / 17

Superficie de la cuenca: 65.51 Km<sup>2</sup>

Número de días de lluvia por mes: 30 1 a 30

Número de ramas de descarga: 1 Máximo 2 ramas

Aceptar Cancelar

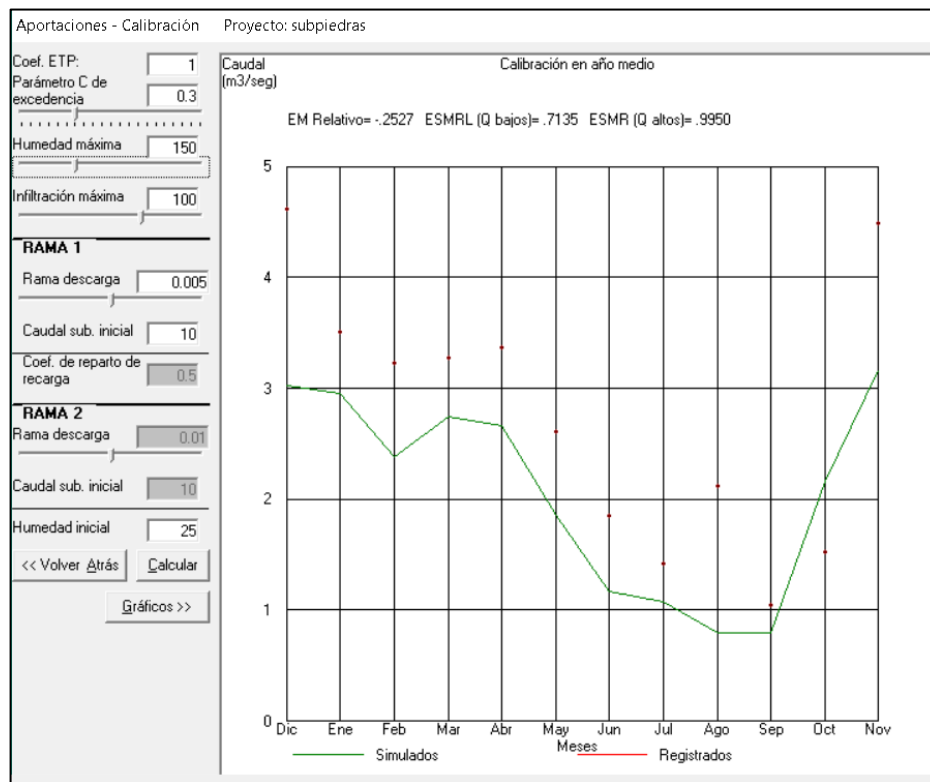
**Fuente:** CEDEX, España.

En la ventana de calibración cargamos los ficheros LEMA .txt de precipitación media areal, evapotranspiración media areal y caudales medios mensuales medidos en la

desembocadura de la fuente hídrica; todos estos datos están comprendidos en el periodo de referencia (1995-2016).

En la casilla “año hidrológico inicial” el programa colocó automáticamente el año donde empieza el periodo de referencia (1995) y en la casilla “año hidrológico final” se cargó el valor de último año de referencia (2016). En la casilla “Superficie de la cuenca” se colocó el área de la cuenca en kilómetros cuadrados es decir 65.51 km<sup>2</sup>. En la casilla “Numero de días de lluvia por mes” se colocó el valor 30. Por último en “Numero de ramas de descarga” se coloca el valor 1. Seguido pulsamos en el botón aceptar y esperamos a que despliegue los resultados. A continuación se muestra la imagen con los resultados de calibración arrojados por el programa.

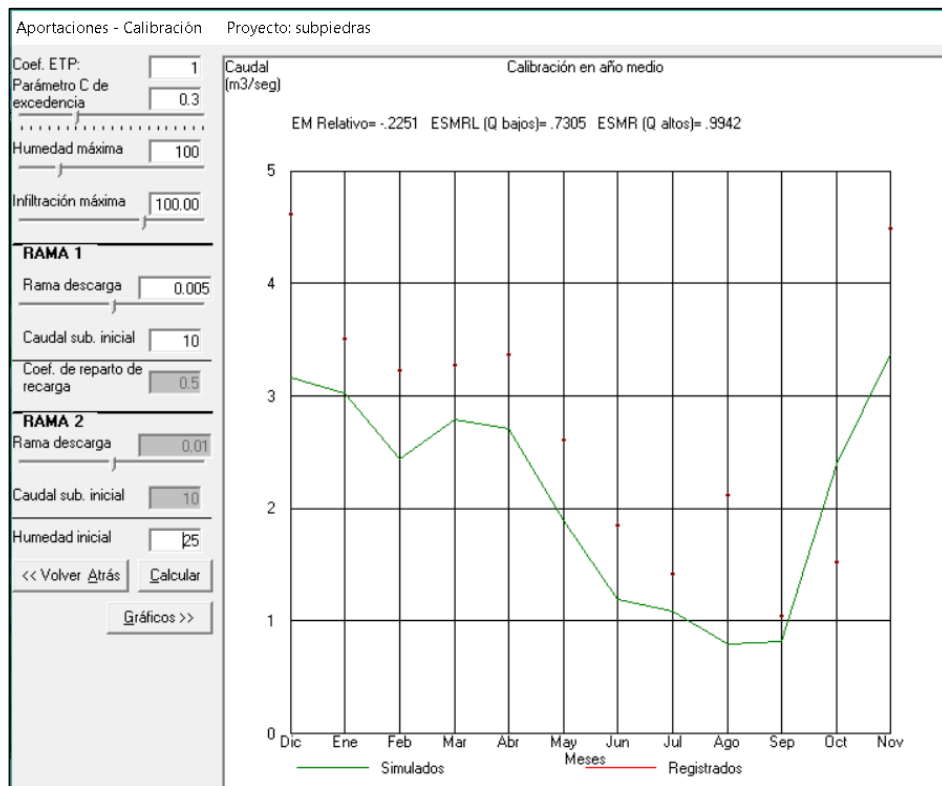
**Figura 14.20.** Calibración del programa.



**Fuente:** CEDEX, España.

En la anterior imagen se observó que los puntos rojos en la gráfica representan los caudales registrados y la línea verde representa los caudales simulados. Al analizar esta gráfica nos damos cuenta que hay una diferencia significativa entre los dos parámetros, por lo tanto, decidimos bajar la Humedad máxima a 100, la cual debe estar entre 100 – 150. En la siguiente imagen se muestra la gráfica con la modificación de humedad máxima.

**Figura 14.21.** Calibración Programa con Hmax = 100.



**Fuente:** CEDEX, España.

Se puede observar en la anterior imagen que se bajó el valor de humedad máxima al mínimo (100), sin embargo es notorio que los datos de caudales registrados con los caudales simulados no coinciden.

Hmax regula la cantidad de agua que se pierde por evaporación, con los datos que poseemos, tendríamos que usar un valor muy bajo de Hmax para poder coincidir los datos de caudales simulados con los registrados, es decir, bajar demasiado la evapotranspiración para ajustar el valor de escorrentía. Esto nos lleva a concluir que hay escasez de registros de lluvia en la cuenca y que normalmente esto supone una infraestimación de la lluvia ya que los pluviómetros se suelen localizar en poblaciones y lugares de fácil acceso, rara vez en las zonas altas donde cabe esperar mayor precipitación. Por lo tanto, se debe hacer una corrección en la precipitación media areal, el cual se va a llevar a cabo mediante el método de Thiessen modificado, que incluye la caracterización de la cuenca por medio de isoyetas.

## 14.7. APLICACIÓN DE MÉTODO DE THIESSEN MODIFICADO

Como se explicó en el apartado anterior y donde se observa que no coinciden los caudales registrados con los caudales simulados en el programa CHAC debido a

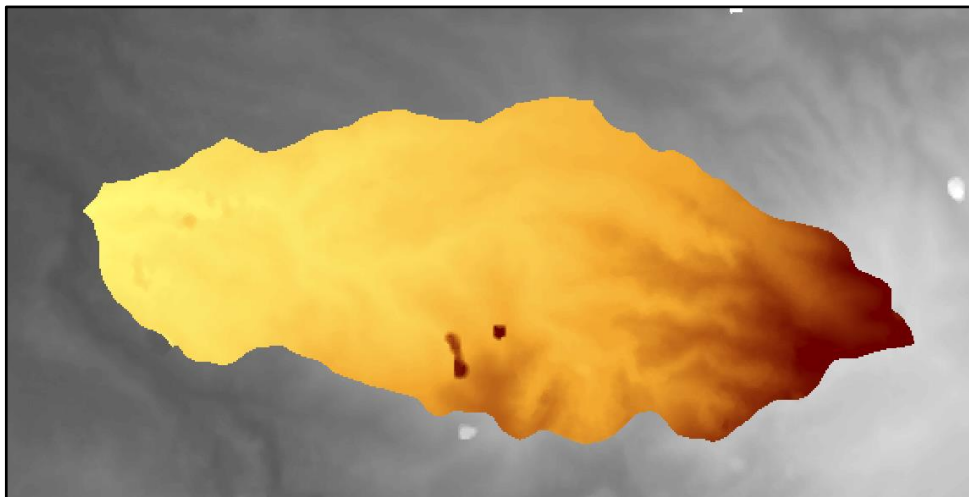


que falta volumen de lluvia en la cuenca. Por tal motivo se realizó el modelo de **Thiessen modificado** por el cual se corrigieron los datos de precipitación areal relacionando Isoyetas realizadas a partir de la elevación de las estaciones con pluviómetros y los polígonos de Thiessen.

#### 14.7.1. Creación de Isoyetas en la cuenca.

Para la creación de las isoyetas primero se realizó el corte con el contorno de la cuenca del Modelo digital de elevación aportado por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A mediante el programa ArcGis 10.3 con la herramienta “extract by mask” la cual me permite realizar el corte del archivo raster (modelo digital de elevación general) con un shapefile (contorno de la cuenca).

**Figura 14.22.** Corte de la cuenca Rio las Piedras del DEM.

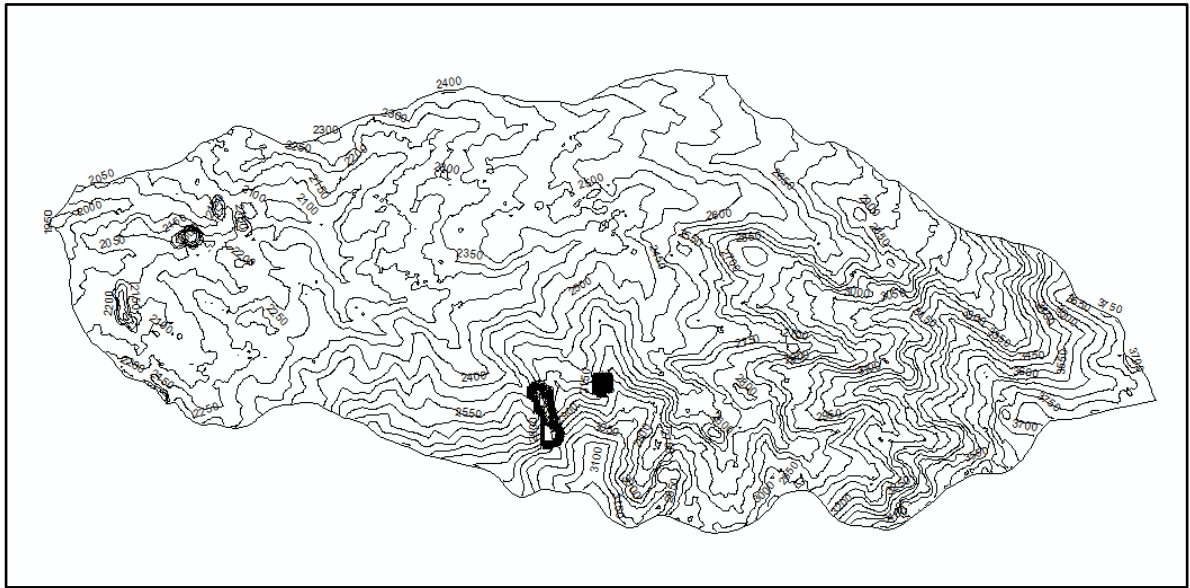


**Fuente:** Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A E.S.P

En la anterior imagen se observa el corte realizado con el programa ArcGis en donde notamos la diferencia de color, indicando un café oscuro las cotas más altas y un dorado las cotas más bajas de la cuenca del Rio las Piedras.

Partiendo del corte del DEM de la cuenca en estudio, con el programa ArcGis y su herramienta integrada “contour” la cual la encontramos en el Arctoolbox - 3D análisis tolos – Rastrer Surface, sacamos las curvas de nivel de la cuenca con una diferencia de 50 metros de elevación entre cada curva.

**Figura 14.23.** Curvas de nivel de la SubCuenca Rio Las Piedras.



**Fuente:** Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A E.S.P

Luego escogimos las estaciones las cuales estén dentro o cerca de la cuenca y que tengan una diferencia de alturas algo notable para poder caracterizar sus pluviómetros con los las curvas de nivel dentro de la cuenca y así poder observar el comportamiento de la precipitación de la cuenca. Además para poder diferenciar hasta que curva de nivel va la influencia de una estación y empieza la otra se halló la diferencia de altura, se dividió en 2 y se resta ese valor a la altura de la estación anterior. También para cada estación escogida se halló la precipitación media anual, es decir el promedio de las sumas mensuales de cada año (1995-2016) En la siguiente tabla se muestran las estaciones escogidas organizadas de mayor a menor altura.

**Tabla 14.10.** Estaciones seleccionadas para la caracterización de precipitación en la cuenca.

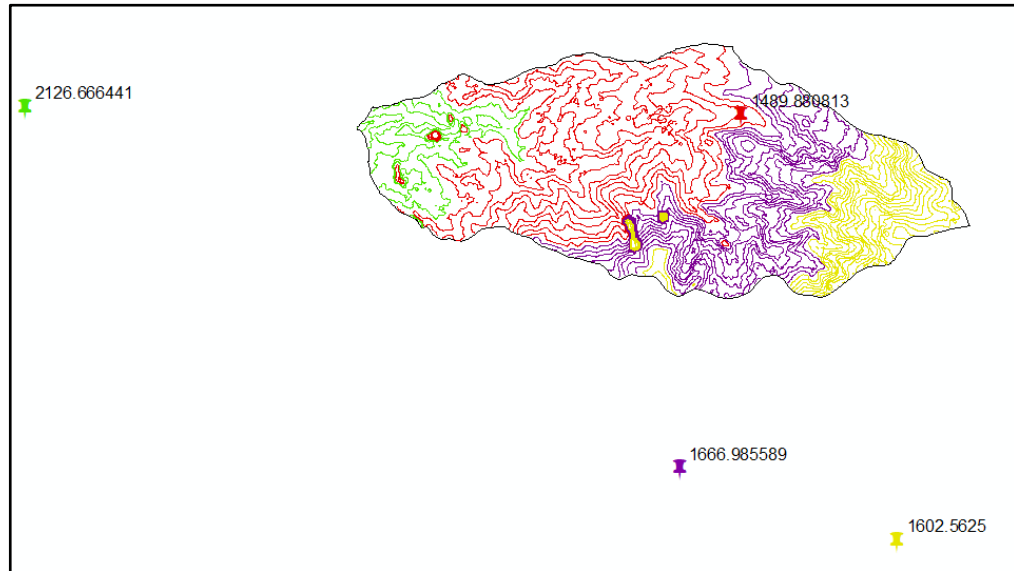
ESTACIÓN	ELEVACION	DIFERENCIA H	MITAD DIFERENCIA	COTA LIMITE	COTAS AJUSTADAS	PRECIPI MEDIA (1995-2016)
TERMALES PILIMBALA PURACE	3478	824	412	3066	3050	1602.56
ARRAYANALES	2654	93	46.5	2607.5	2600	1666.99
GUILLERMO L. V.	2561	804	402	2159	2150	1489.88
	1757					2126.67

**Fuente:** IDEAM

En la siguiente imagen se observa de diferentes colores las curvas de nivel influenciadas por determinadas estaciones. Las curvas de nivel amarillas corresponden a la estación Termales de Pilimbala, las de color morado son de la

estación Puracé, las de color rojo son de la estación Arrayanales y las de color verde son de la estación Guillermo León Valencia.

**Figura 14.24.** Curvas de nivel con Estaciones influenciadas.



**Fuente:** Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A E.S.P

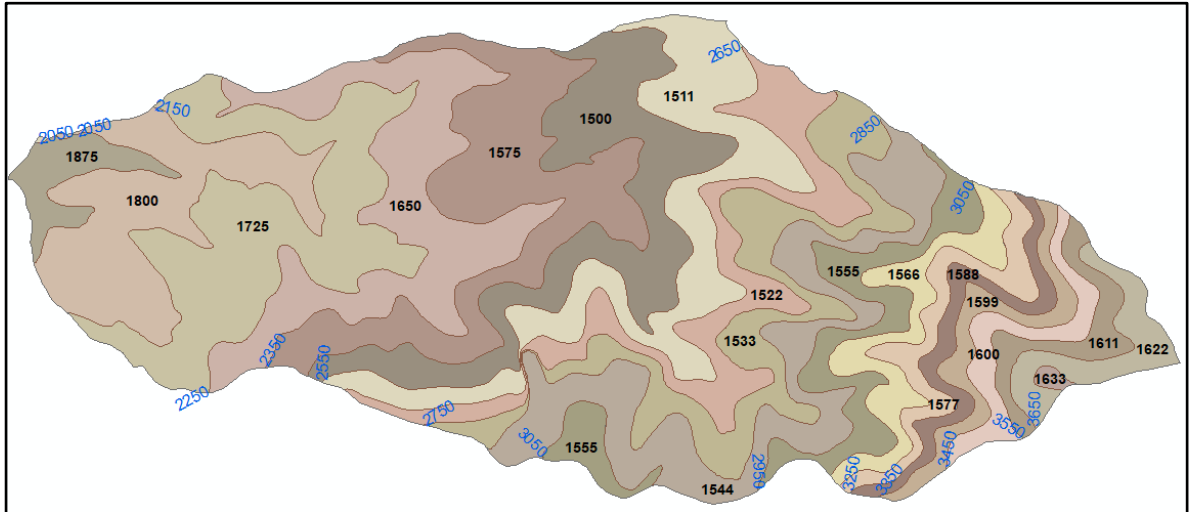
En la anterior imagen se puede observar que el comportamiento de precipitación de la Subcuenca Rio las Piedras no es de manera uniforme, es decir presenta una disminución de precipitación desde la cota 1757 donde se encuentra la estación Guillermo León Valencia hasta la cota 2561 donde se encuentra la estación Arrayanales la cual está ubicada casi en la mitad de la cuenca. Luego se presenta un aumento de precipitación hasta la cota más alta con respecto a la estación Arrayanales.

El anterior análisis fue el punto de partida para realizar el trazo de las isoyetas de precipitación para la Subcuenca. Las pequeñas elevaciones montañosas no se tuvieron en cuenta para el trazo de las isoyetas, es decir se realizaron trazos uniformes siguiendo las curvas de nivel generales.

La cota 1750 de la estación Guillermo León Valencia con una precipitación media de 2100mm es el Límite inferior donde se comenzó el trazo de las isoyetas y la cota 2550msnm con una precipitación media de 1500mm es el límite medio hasta donde se realizaron los trazos de isoyetas con una disminución uniforme de la precipitación para cada curva de nivel con diferencia de 100 metros de elevación. Luego, partiendo de la cota 2550 se realizaron trazos hasta la última curva de nivel de la cuenca con un aumento uniforme de la precipitación para cada curva de nivel con la misma diferencia de elevación. En la siguiente imagen se observa el trazo completo de las isoyetas en donde aparece entre cada curva de nivel el valor de precipitación en milímetros (mm) correspondiente a cada espacio y en los extremos

se muestra de color azul las cotas. Esta imagen se puede observar con mejor detenimiento en el anexo A.F.

**Figura 14.25.** Isoyetas de precipitación Sub cuenca Rio Las Piedras.



**Fuente:** Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A E.S.P

Con las isoyetas realizadas se pasó a la corrección de las precipitaciones media areales con el factor de corrección el cual fue calculado de la siguiente manera.

$$\text{Factor de correccion} = \frac{\text{Precipitacion media Isoyetas}}{\text{Precipitacion media pluviometros}} \quad (13.7)$$

La precipitación media de las isoyetas corresponde al promedio de los valores marcados en cada tramo que se observa en la anterior imagen. El valor de la precipitación media de pluviómetros es el promedio de los valores acumulados de cada año hallado con los polígonos de Thiessen (anexo U)

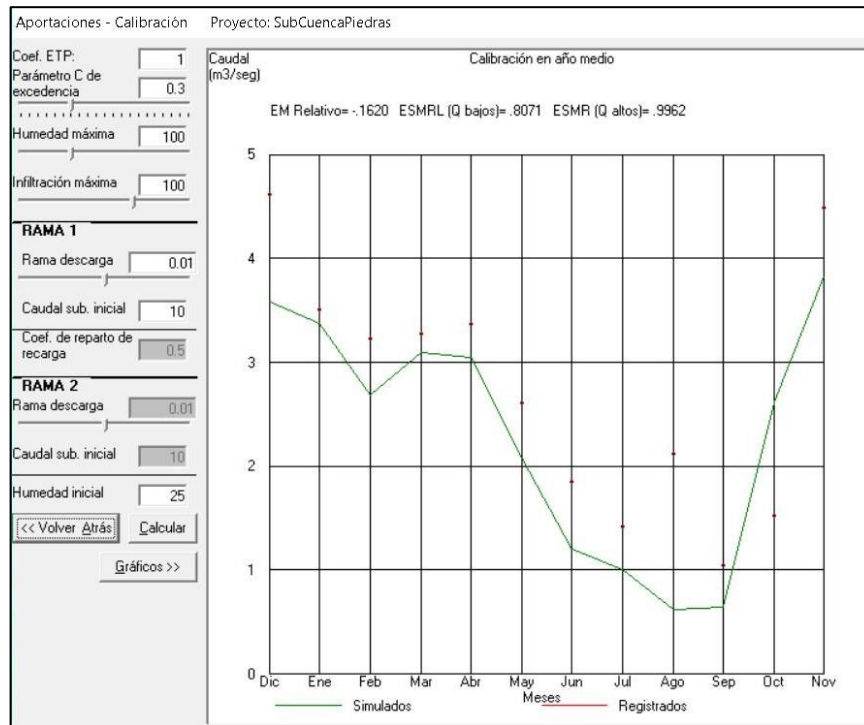
$$\text{Factor de correccion} = \frac{1633}{1498} = 1.09 \text{ se aproxima a } 1.1.$$

El anterior factor de corrección indica que las Precipitaciones media areales deberían ser un 10% mayores a las Precipitaciones medias areales halladas con los polígonos de Thiessen por lo tanto el factor 1.1 se le multiplico a cada valor de la Tabla del anexo U y así se obtuvo un ajuste de la precipitación el cual se ve reflejado en el anexo A.G.

## 14.8. CALIBRACIÓN DE CHAC CON PRECIPITACIÓN CORREGIDA

Una vez se obtuvieron los valores de precipitación media areal corregidos se organizaron los datos de tal manera que se pueda crear un fichero con el programa CHAC, luego se procedió a cargar los ficheros de precipitación corregida, evapotranspiración y caudales medios en el apartado de calibración del programa. En la siguiente imagen se muestra la gráfica de caudales simulados con caudales registrados y sus respectivos parámetros sin alterar.

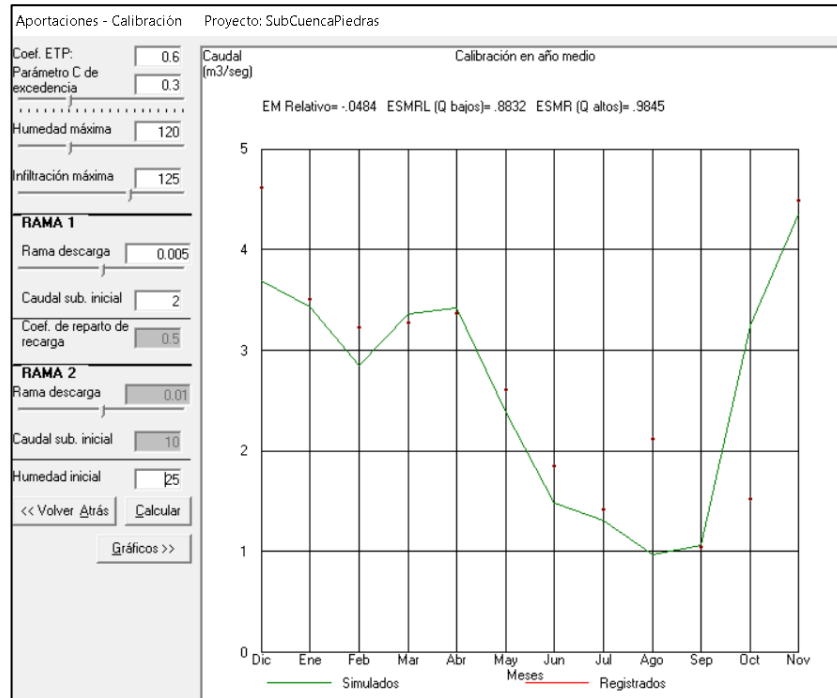
**Figura 14.26.** Parámetros de calibración sin alterar.



**Fuente:** CEDEX, España.

En el apartado de calibración se empezó a modificar los parámetros siguiendo las recomendaciones dadas por el asesor para ajustar los caudales registrados con los simulados. En la siguiente imagen se muestra los parámetros de calibración ajustados con los mejores valores para lograr una mejor coincidencia entre los puntos rojos y línea verde.

**Figura 14.27.** Parámetros de calibración Ajustados.



**Fuente:** CEDEX, España.

En la anterior imagen podemos observar que a los parámetros de los caudales se les dio un mejor ajuste para que pudieran coincidir de mejor manera los caudales simulados con los registrados. El parámetro de humedad máxima en 120mm se asocia a una cuenca con vegetación de suelos y raíces profundas y fuertes, con pendientes como ocurre en áreas de montaña. El coeficiente C de excedencia sirve para concentrar la respuesta de una cuenca y por lo general se recomienda un valor de entre 0.3 y 0.35. El parámetro de infiltración máxima es el que regula la entrada de agua al acuífero; y el valor tomado es un valor que está bien relacionado con el parámetro de 1 rama de descarga del acuífero. El parámetro de caudal subterráneo inicial se recomienda dejarlo en un valor bajo como es en este caso 2. Todos los anteriores parámetros nos permitieron dar un mejor ajuste a los caudales registrados y además nos arrojaron como resultado un Error Medio relativo de -0.0484 que equivale al 4.84%, el cual debe estar en el rango de -0.05 a 0.05.

Es necesario aclarar que todos los anteriores parámetros se ajustaron con las respectivas sugerencias y recomendaciones aportadas por el asesor externo de El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España, Ingeniero PhD. Javier Álvarez Rodríguez Coordinador de Programa Técnico Científico.

## 14.9. PROYECCIÓN DE DATOS A PARTIR DEL ESTUDIO DEL IDEAM, CON PERIODO DE REFERENCIA (1995-2016).

El IDEAM ha venido desarrollando investigación para detectar las evidencias del cambio climático en Colombia y para elaborar los escenarios climáticos que con mayor probabilidad se presentaran en los próximos decenios, para esto se utilizó los forzamientos radiativos RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 de los modelos climáticos globales. Cada uno de los escenarios se generó usando el método de ensamble Reliability Ensemble Averaging (REA) para los periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 tomando como periodo de referencia 1976-2005. Se analizaron los periodos trimestrales DEF, MAM, JJA y SON, al igual que el periodo Anual (IDEAM. 2011).

Para efectos de esta investigación se utilizó como año de referencia el periodo (1995-2016) y como escenarios climáticos RCP2.6 y RCP8.5, ya que estos son los que tienen datos con precipitaciones y temperaturas máximas y mínimas con niveles extremos que son las que interesan para esta investigación.

A partir de los datos de precipitación y temperatura areal hallados anteriormente obtuvimos las proyecciones para cada periodo (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) y de cada periodo para sus cuatro trimestres:

- DEF: Diciembre, enero, febrero.
- MAM: Marzo, abril, mayo.
- JJA: Junio, Julio, agosto.
- SON: Septiembre, octubre, noviembre.

### 14.9.1. Proyección de precipitación.

#### 14.9.1.1. Escenario RCP 2.6.

Con los datos de la siguiente tabla, obtuvimos los cambios en la precipitación para el escenario RCP 2.6. Este cambio porcentual se le aplica para cada valor de cada mes del trimestre y en cada periodo. Los valores negativos indican una disminución y positivos un aumento.

**Tabla 14.11.** Cambios porcentuales (%) de la precipitación escenario RCP 2.6 para la región Alto Cauca para cada periodo.

Trimestre	Periodos		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
DEF	-5,9	-3,8	-2,5
MAM	11,3	13,6	17,5
JJA	16,1	21,8	21,8
SON	13,9	11,8	5,4

**Fuente:** Proyecciones climáticas IDEAM

A continuación se muestra los datos de precipitación media areales del año 1995 organizado en trimestres

**Tabla 14.12.** Precipitación media areal de los 4 trimestres para el año 1995.

<b>DEF</b>			<b>MAM</b>			<b>JJA</b>			<b>SON</b>		
dic	Ene	feb	Mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	Oct	nov
315.6	108.6	117.3	243.4	175.5	178.4	71.2	48.4	6.9	12.6	300.8	309.7

**Fuente:** IDEAM

Para los datos de la precipitación media areal de cada mes, de cada año y separándolos en trimestres le restamos o sumamos el porcentaje que expresa el IDEAM según corresponda. Se realizó el mismo procedimiento para cada periodo propuesto por el IDEAM.

**Tabla 14.13.** Proyección de precipitación para los 4 trimestres para el periodo 2011-2040.

<b>DEF</b>			<b>MAM</b>			<b>JJA</b>			<b>SON</b>		
dic	Ene	feb	Mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	Oct	nov
297.0	102.2	110.4	270.9	195.3	198.6	82.6	56.2	8.0	14.3	342.6	352.8

**Fuente:** IDEAM

Este mismo cálculo se realizó para todos los años del periodo de referencia (1995-2016) y se promedió el valor de cada mes de todos los años de la siguiente manera.

**Tabla 14.14.** Promedio mensual de todos los años de referencia del trimestre DEF equivalente para el periodo 2011-2040.



<b>DEF</b>			
<b>Ah</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>
<b>1995-96</b>	297,0	102,2	110,4
<b>1996-97</b>	167,8	227,5	154,8
<b>1997-98</b>	111,4	466,1	52,5
<b>1998-99</b>	268,9	69,9	178,4
<b>1999-00</b>	370,3	277,1	335,3
<b>2000-01</b>	151,5	492,9	315,0
<b>2001-02</b>	245,3	132,0	148,6
<b>2002-03</b>	238,1	158,4	137,2
<b>2003-04</b>	343,1	120,0	147,7
<b>2004-05</b>	122,8	89,7	39,9
<b>2005-06</b>	160,8	179,8	129,9
<b>2006-07</b>	187,9	53,5	74,6
<b>2007-08</b>	145,1	49,4	44,1
<b>2008-09</b>	115,6	152,5	124,6
<b>2009-10</b>	311,3	28,9	50,4
<b>2010-11</b>	167,6	47,6	144,0
<b>2011-12</b>	323,1	207,8	454,0
<b>2012-13</b>	231,3	379,6	147,6
<b>2013-14</b>	30,9	81,1	136,4
<b>2014-15</b>	36,8	25,2	26,0
<b>2015-16</b>	32,7	132,2	120,9
<b>2016-17</b>	245,7	217,3	66,9
<b>PROMEDIO</b>	195,7	167,8	142,7

**Fuente:** IDEAM

En el anexo A.H se encuentran las proyecciones de precipitación y promedios para todos los trimestres del periodo de referencia para RCP 2.6.

Luego los valores del promedio se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo **A.I**

#### **14.9.1.2. Escenario RCP 8.5**

Con los datos de la siguiente tabla, obtenemos los cambios en la precipitación para el escenario RCP 8.5. Este cambio porcentual se le aplica para cada valor de cada mes del trimestre y en cada periodo. Los valores negativos indican una disminución y positivos un aumento.

**Tabla 14.15.** Cambios porcentuales (%) de la precipitación escenario RCP 8.5 para la región Alto Cauca para cada periodo.

TRIMESTRE	PERIODOS		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
DEF	0.1	3.4	5.8
MAM	13.3	15	19.7
JJA	20.9	25.4	20.7
SON	14	13.7	1.8

**Fuente:** *Proyecciones climáticas IDEAM*

Se realizó el mismo procedimiento del escenario anterior para el escenario RCP 8.5 pero con diferentes valores de cambios porcentuales de precipitación.

En el anexo A.J se encuentran las proyecciones de precipitación y promedios para todos los trimestres del periodo de referencia para RCP 8.5.

Luego los valores del promedio se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo **A.K**

#### **14.9.2. Proyección de evapotranspiración.**

##### **14.9.2.1. Escenario RCP 2.6.**

##### **14.9.2.1.1. Proyección de temperatura.**

Con los datos de la siguiente tabla, obtenemos los cambios en la Temperatura para el escenario RCP 2.6. Este cambio en grados centígrados se le aplica para cada valor de cada mes del trimestre y en cada periodo. Todos los valores son positivos por lo tanto representan un aumento de la temperatura.

**Tabla 14.16.** Cambios de temperatura (°C) en el escenario RCP 2.6 para la región Alto Cauca para cada periodo.

TRIMESTRE	PERIODOS		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
DEF	0.99	1.32	1.35
MAM	0.85	1.2	1.16
JJA	0.95	1.32	1.23
SON	0.91	1.25	1.22

**Fuente:** *Proyecciones climáticas IDEAM*

A continuación se muestra los datos de temperatura media areales del año 1995 organizado en trimestres.

**Tabla 14.17.** Temperatura media areal (°C) organizada en trimestres del IDEAM para el año 1995.

DEF			MAM			JJA			SON		
dic	Ene	feb	mar	Abr	may	jun	jul	ago	sep	Oct	nov
13.1	14.6	13.6	13.6	14.1	14.1	14.6	13.6	13.6	14.1	13.1	13.1

**Fuente:** IDEAM

A los datos de Temperatura media areal de cada mes, de cada año se le sumo el porcentaje que expresa el IDEAM.

**Tabla 14.18.** Proyección de Temperatura para todos los trimestres y para el periodo 2011-2040 (°C).

DEF			MAM			JJA			SON		
dic	Ene	Feb	mar	Abr	may	jun	jul	ago	sep	Oct	nov
14.1	15.5	14.6	14.4	14.9	14.9	15.5	14.5	14.5	15.0	14.0	14.0

**Fuente:** IDEAM

Este mismo cálculo se realizó para todos los años del periodo de referencia (1995-2016) y para todos los periodos (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Además se promedió el valor de cada mes de todos los años y de todos los periodos de la siguiente manera:

**Tabla 14.19.** Promedio mensual de todos los años de referencia del trimestre DEF equivalente para el periodo 2011-2040.

DEF
-----

Ah	Dic	ene	Feb
<b>1995-96</b>	14.1	15.5	14.6
<b>1996-97</b>	20.0	13.6	14.1
<b>1997-98</b>	20.0	13.1	14.6
<b>1998-99</b>	18.0	16.1	16.6
<b>1999-00</b>	17.0	13.1	13.6
<b>2000-01</b>	17.0	13.6	13.6
<b>2001-02</b>	18.0	13.6	14.6
<b>2002-03</b>	15.4	13.6	13.6
<b>2003-04</b>	18.0	16.5	14.6
<b>2004-05</b>	14.9	15.3	15.5
<b>2005-06</b>	20.0	15.5	15.6
<b>2006-07</b>	15.0	15.1	15.6
<b>2007-08</b>	14.3	16.5	16.3
<b>2008-09</b>	14.8	15.0	14.7
<b>2009-10</b>	15.5	14.9	15.4
<b>2010-11</b>	14.1	16.2	16.7
<b>2011-12</b>	17.0	14.9	14.8
<b>2012-13</b>	18.0	15.0	14.1
<b>2013-14</b>	20.0	15.6	17.5
<b>2014-15</b>	18.0	16.0	16.5
<b>2015-16</b>	17.1	16.0	15.6
<b>2016-17</b>	20.1	16.5	16.1
<b>PROMEDIO</b>	17.1	15.1	15.2

**Fuente:** IDEAM

En el anexo A.L se encuentran las proyecciones de Temperatura y promedios para todos los trimestres del periodo de referencia para RCP 2.6.

Luego los valores del promedio se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo **A.M**. Estos valores de promedios de temperatura son el punto de partida para hallar la evapotranspiración.

#### **14.9.2.1.2. Cálculo evapotranspiración con temperatura proyectada.**

Los valores de los promedios de la temperatura se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo **A.M**, para luego calcular la evapotranspiración con cada uno de esos datos utilizando la tabla de Excel suministrada por el Ing. Luis Jorge Gonzales.

**Figura 14.28.** Cálculo de evapotranspiración de los promedios de temperatura para el periodo 2011-2040 para RCP 2.6.

Latitud (grados)	2												Introduzca la latitud en grados y las temperaturas medias mensuales en °C
													Si $t_m > 26.5^\circ\text{C}$ introduzca los valores de ETP sin ajustar: $\text{ETP} = L \cdot \text{ETP sin ajustar}$
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Temperatura media °C	15.063	15.1813	15.095	15.203	15.468	15.428	15.764	16.037	15.763	14.942	14.456	17.111	
Índice calor mensual "i"	5.31	5.37	5.33	5.39	5.53	5.51	5.69	5.84	5.69	5.25	4.99	6.44	
Índice calor anual "I"	66.32												
Parámetro "a"	1.539												
ETP sin ajustar mm/mes	56.53	57.21	56.71	57.34	58.88	58.65	60.63	62.25	60.62	55.83	53.06	68.78	
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03	
ETP mm/mes	58	54	59	58	62	60	64	65	61	58	53	71	
<i>ETP sin ajustar si <math>t_m &gt; 26.5</math></i>													
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03	
ETP mm/mes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Fuente:** J. Almorox.

Este mismo cálculo se realizó para todos los periodos de proyección (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) y se encuentra en el anexo A.N.

#### 14.9.2.2. Escenario RCP 8.5.

##### 14.9.2.2.1. Proyección de Temperatura.

Con los datos de la siguiente tabla, obtenemos los cambios en la Temperatura para el escenario RCP 8.5. Este cambio en grados centígrados se le aplica para cada valor de cada mes del trimestre y en cada periodo. Todos los valores son positivos por lo tanto representan un aumento de la temperatura.

**Tabla 14.20.** Cambios de temperatura (°C) en el escenario RCP 8.5 para la región Alto Cauca para cada periodo.

TRIMESTRE	PERIODOS		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
DEF	1.16	2.45	3.83
MAM	1.01	2.28	3.61
JJA	1.14	2.37	3.9
SON	1.1	2.3	3.66

**Fuente:** Proyecciones climáticas IDEAM

Se realizó el mismo procedimiento del escenario anterior para el escenario RCP 8.5 pero con diferentes valores de cambios porcentuales de temperatura (°C).

En el anexo A.O se encuentran las proyecciones de Temperatura y promedios para todos los trimestres del periodo de referencia para RCP 8.5.

Luego los valores del promedio se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo A.P. Estos valores de promedios de temperatura son el punto de partida para hallar la evapotranspiración.

### 14.9.2.2.2. Cálculo evapotranspiración con temperatura proyectada.

Los valores de los promedios de la temperatura se separaron en una nueva tabla la cual está expuesta en el anexo A.P, para luego calcular la evapotranspiración con cada uno de esos datos utilizando la tabla de Excel suministrada por el Ing. Luis Jorge Gonzales.

**Figura 14.29.** Cálculo de evapotranspiración de los promedios de temperatura para el periodo 2011-2040 para RCP 8.5.

Latitud (grados)	2											
	Introduzca la latitud en grados y las temperaturas medias mensuales en °C											
	Si $t_m > 26.5^\circ\text{C}$ introduzca los valores de ETP sin ajustar: $\text{ETP} = L \cdot \text{ETP sin ajustar}$											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media °C	15.233	15.3513	15.255	15.363	15.628	15.618	15.954	16.227	15.953	15.132	14.646	17.281
Índice calor mensual "i"	5.40	5.46	5.41	5.47	5.61	5.61	5.79	5.94	5.79	5.35	5.09	6.54
Índice calor anual "I"	67.48											
Parámetro "a"	1.558											
ETP sin ajustar mm/mes	56.89	57.58	57.02	57.65	59.20	59.14	61.14	62.78	61.14	56.31	53.51	69.24
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03
<b>ETP mm/mes</b>	<b>59</b>	<b>54</b>	<b>59</b>	<b>58</b>	<b>62</b>	<b>60</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>62</b>	<b>59</b>	<b>54</b>	<b>72</b>
<i>ETP sin ajustar si <math>t_m &gt; 26.5</math></i>												
L	1.03	0.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.05	1.05	1.01	1.04	1.00	1.03
ETP mm/mes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Fuente:** J. Almorox.

Este mismo cálculo se realizó para todos los periodos de proyección (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) y se encuentra en el anexo A.Q

## 14.10. SIMULACIÓN DE CAUDALES

Una vez calibrados todos los parámetros necesarios, se pasó al apartado de simulación en la pestaña de Cálculo de aportaciones del Programa CHAC, en donde se despliega la siguiente imagen, en la cual encontramos los botones para cargar los ficheros de precipitación y evapotranspiración. Encontramos también la dirección en donde se guardaron los resultados de los caudales simulados.

**Figura 14.30.** Ventana inicial de simulación de caudales.

Aportaciones - Simulación: Datos iniciales Proyecto: SubCuencaPiedras

Variables medias en cuenca:

<input type="button" value="Precipitaciones"/>	E:\2. SIMULACION\RCP 2.6\PROYECCIONES PRECIPITACION\PMA2.6.txt
<input type="button" value="ETP"/>	E:\2. SIMULACION\RCP 2.6\PROYECCIONES EVAPOTRANSPIRACION\EPA 2.6.txt

Fichero de salida de caudales simulados:

<input type="button" value="Caudales"/>	d:\SubCuencaPiedras\CaudalesSimulados.txt
---	---

Año hidrológico inicial :  /

Año hidrológico final :  /

Superficie de la cuenca :  Km<sup>2</sup>

Número de días de lluvia por mes:  1 a 30

Número de ramas de descarga :  Máximo 2 ramas

**Fuente:** CEDEX, España.

Como se mencionó en el inicio del trabajo de investigación se realizó la simulación de los caudales con los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, los cuales comienzan su año hidrológico en el 2011 y finalizan en el 2100.

## 15. RESULTADOS

## 15.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

El modelo que simula el ciclo hidrológico estima la evapotranspiración real en función de características climáticas como la ETP e hidrológicas, como el modelo de generación de escorrentía y capacidad de almacenamiento en el suelo. CHAC contabiliza mensualmente disponibilidades de agua en el suelo con las que se calcula la ETR.

Las proyecciones indican que la ETP asciende. En el escenario RCP 2.6 la ETP asciende, pero sin grandes diferencias, presentándose en algunos meses disminuciones como lo son febrero, abril, Junio y noviembre para todos los periodos. En el escenario RCP 8.5 la ETP asciende más notablemente y presentándose tres casos puntuales en donde disminuye, como lo es en el mes de Febrero para los periodos 2011-2040 y 2041-2070, en Abril para el periodo 2011-2040 y el mes de noviembre para los tres periodos (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) en donde la diferencia es mayor respecto al periodo de referencia. Todos los casos expuestos anteriormente se muestran de color rojo en la siguiente tabla.

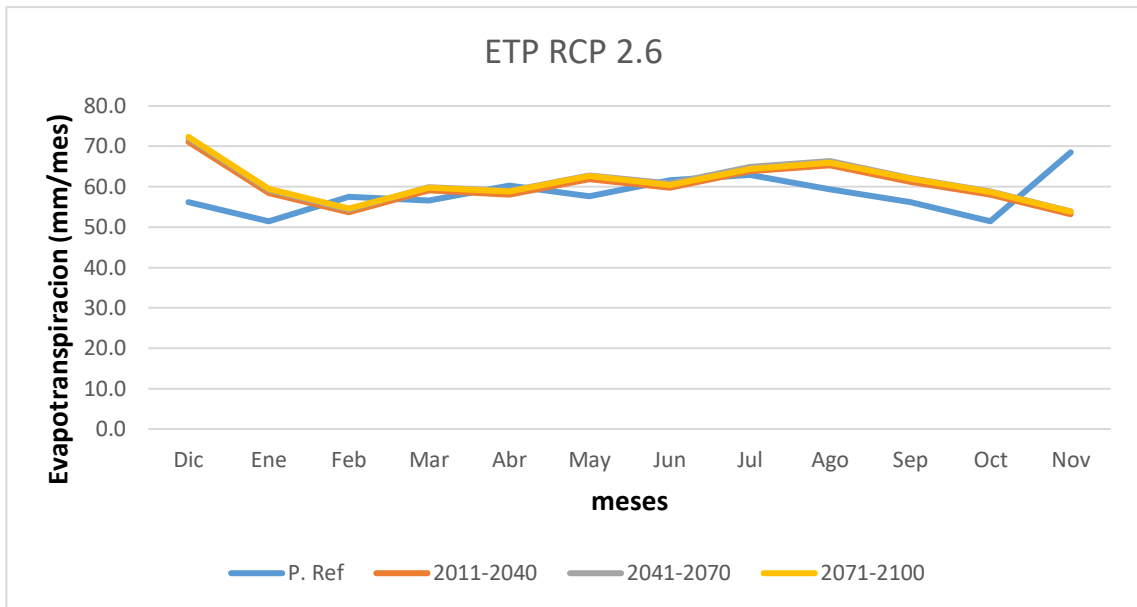
**Tabla 15.1.** Evapotranspiración Potencial (ETP): Periodo de Referencia y Proyecciones.

ETP Periodo R.		ETP RCP 2.6			ETP RCP 8.5		
MES	P. Ref	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dic	56.1	71.1	72.0	72.4	71.6	76.0	81.6
Ene	51.5	58.5	59.2	59.5	58.9	62.4	66.6
Feb	57.5	53.6	54.3	54.6	54.0	57.2	61.1
Mar	56.5	59.1	59.9	59.8	59.4	62.8	66.7
Abr	60.2	58.1	58.9	58.8	58.4	61.7	65.6
May	57.6	61.9	62.8	62.7	62.2	65.8	70.0
Jun	61.6	59.8	60.8	60.4	60.3	63.5	68.9
Jul	63.0	63.8	64.9	64.4	64.4	67.8	73.6
Ago	59.3	65.3	66.4	65.9	65.9	69.4	75.4
Sep	56.2	61.3	62.1	62.0	61.8	64.9	69.3
Oct	51.4	58.1	58.8	58.8	58.5	61.4	65.4
Nov	68.5	53.2	53.9	53.8	53.6	56.3	59.8

*Fuente: Propia*

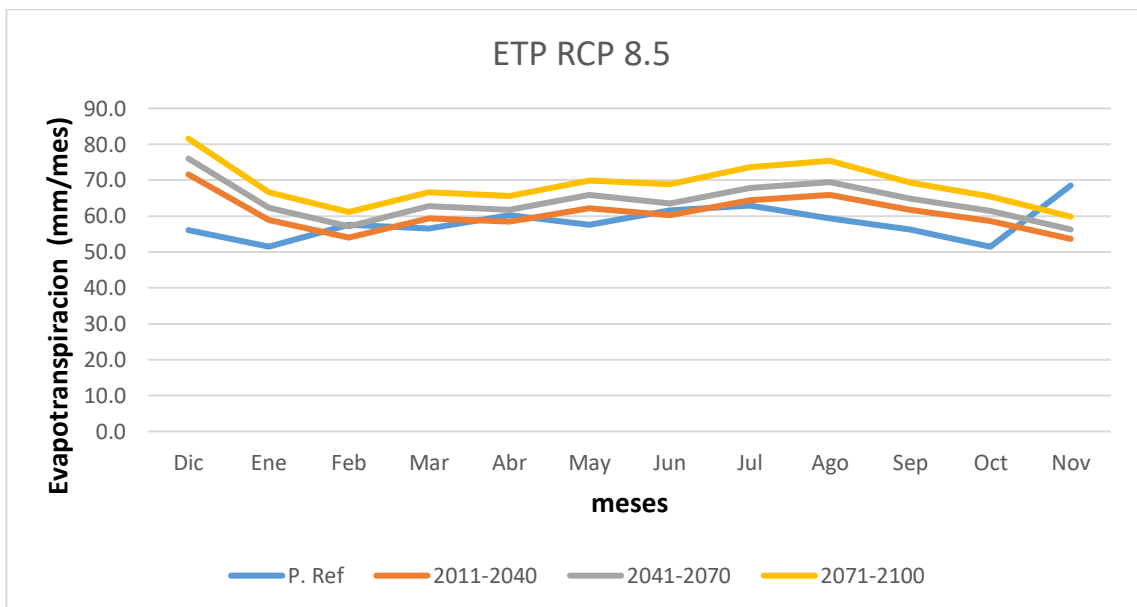


**Figura 15.1.** Comparación de ETP para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.



**Fuente:** Propia

**Figura 15.2.** Comparación de ETP para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.



**Fuente:** Propia

La ETP (evapotranspiración potencial) aumenta de manera general en los dos escenarios, por lo tanto, esto provocaría un aumento de la ETR (evapotranspiración real). Pero se presentan casos de disminución en los meses de febrero, abril, junio y noviembre para los tres periodos en el escenario RCP 2.6. En el mes de febrero en los periodos 2011-2040, 2041-2070 y en el mes de abril para el periodo 2011-2040 también se presentó disminución para el escenario RCP 8.5. Todos los casos expuestos anteriormente se muestran de color rojo en la siguiente tabla.

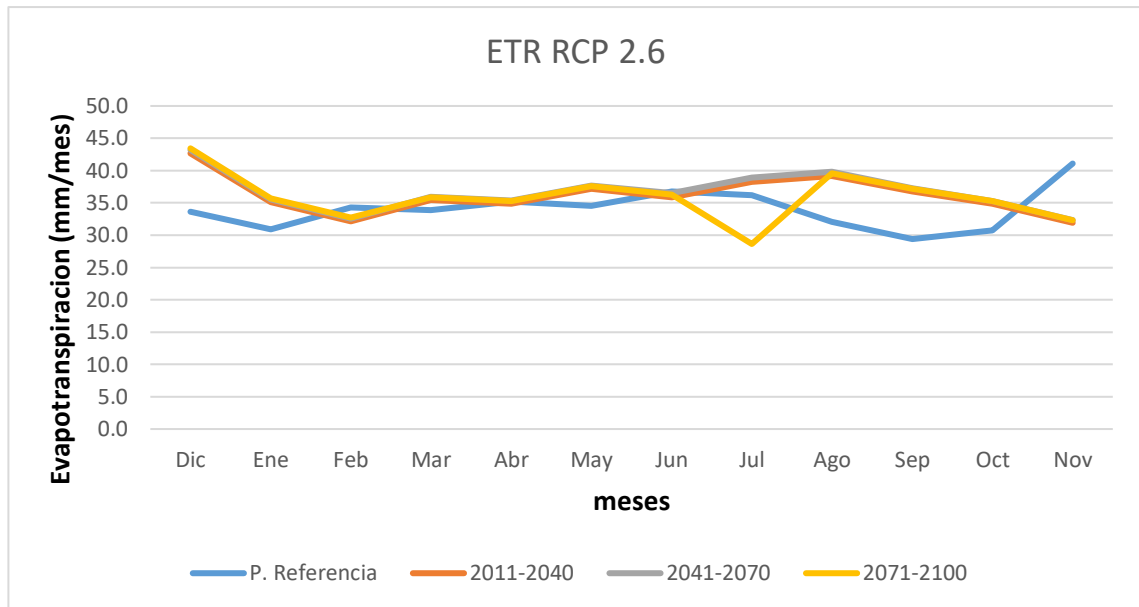
Las disminuciones de los casos están directamente relacionadas con las proyecciones de temperatura expuestos por el IDEAM y por sus valores del periodo de referencia.

**Tabla 15.2.** Evapotranspiración Real: Periodo de Referencia y Proyecciones.

ETR Periodo R.		ETR RCP 2.6			ETR RCP 8.5		
MES	P. Ref.	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dic	33.7	42.7	43.2	43.4	43.0	45.6	49.0
Ene	30.9	35.1	35.5	35.7	35.3	37.4	40.0
Feb	34.3	32.2	32.6	32.8	32.4	34.3	36.7
Mar	33.9	35.5	35.9	35.9	35.6	37.7	40.0
Abr	35.2	34.9	35.3	35.3	35.0	37.0	39.4
May	34.6	37.1	37.7	37.6	37.3	39.5	42.0
Jun	36.8	35.9	36.5	36.2	36.2	38.1	41.3
Jul	36.2	38.3	38.9	28.6	38.6	40.7	44.2
Ago	32.1	39.2	39.8	39.5	39.5	41.6	45.2
Sep	29.4	36.8	37.3	37.2	37.1	38.9	41.6
Oct	30.7	34.9	35.3	35.3	35.1	36.8	39.2
Nov	41.1	31.9	32.3	32.3	32.2	33.8	35.9

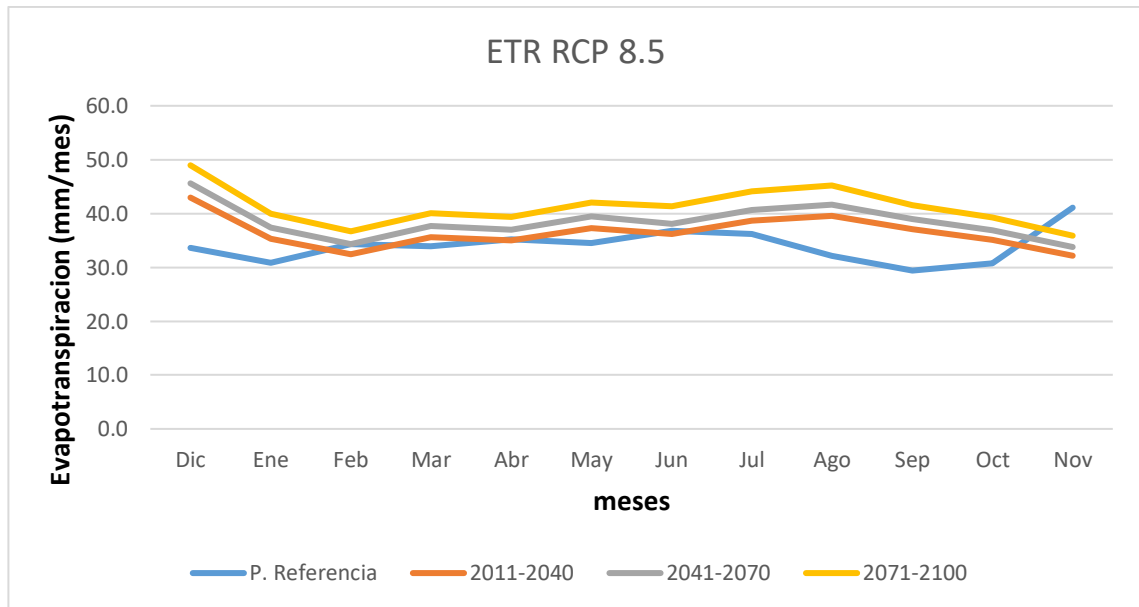
*Fuente: Propia*

**Figura 15.3.** Comparación de ETR para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.



*Fuente: Propia*

**Figura 15.4.** Comparación de ETR para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.



*Fuente: Propia*

## 15.2. HUMEDAD EN EL SUELO (HMS)

El agua procedente de la precipitación se acumula en el suelo en función del esquema de generación de escorrentía y del parámetro humedad máxima almacenable en el suelo (Hm<sub>max</sub>). El suelo se vacía en función de la demanda de agua o ETP. El resultado del modelo en cada mes es el estado final de almacenamiento de agua en el suelo, HMS (mm).

El parámetro Hm<sub>max</sub> es constante en las distintas simulaciones realizadas para la evaluación del impacto. Procede de una reclasificación que tiene en cuenta las texturas del suelo y los usos de suelo. Al no depender únicamente del último factor, cabe esperar que la evaluación del impacto sea robusta ante los cambios de uso de suelo.

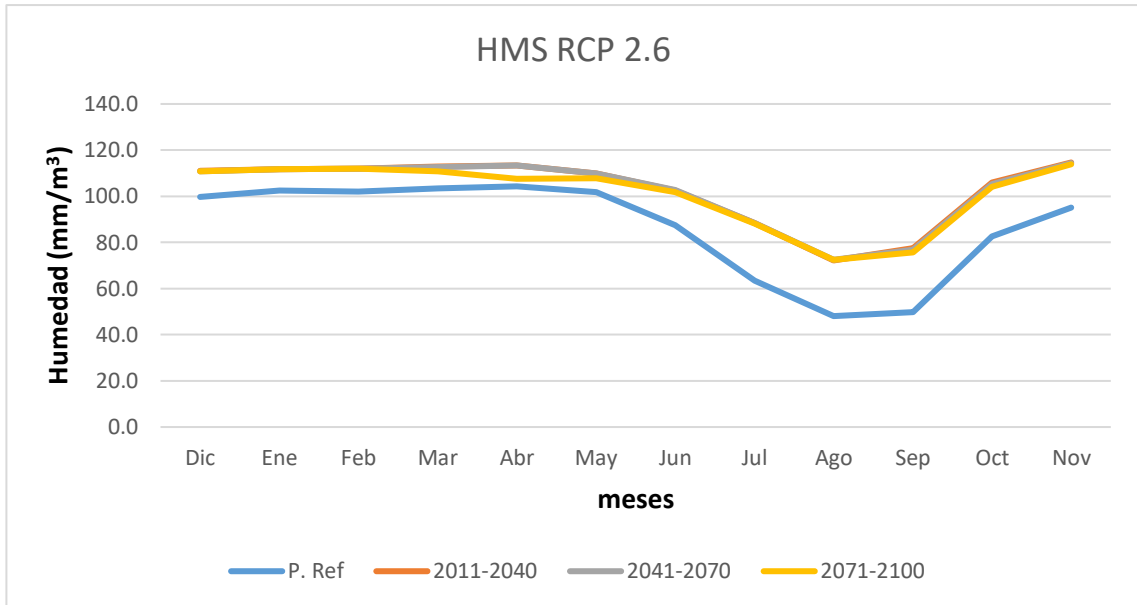
Para las proyecciones, la HMS aumenta progresivamente para los dos escenarios respecto al periodo de referencia, teniendo mayores aumentos para el RCP 8.5 en el periodo 2011-2040 y teniendo los valores más bajos en el periodo 2071-2100. ocurre un caso puntual en donde la sucede una disminución el cual es el mes de mayo en el periodo 2071-2100 y para el escenario 8.5 (color rojo en la tabla).

**Tabla 15.3.** Humedad del suelo: periodo de referencia y proyecciones.

HMS Periodo Refe.		HMS RCP 2.6			HMS RCP 8.5		
MES	P. Ref	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dic	99.7	111.1	110.9	110.8	111.4	110.5	108.7
Ene	102.4	111.7	111.7	111.7	112.1	111.4	110.2
Feb	102.1	111.9	111.9	111.9	112.3	111.6	110.6
Mar	103.4	112.8	112.8	110.9	113.0	112.2	108.6
Abr	104.3	113.4	113.3	107.5	113.5	112.8	104.1
May	101.9	110.0	109.9	107.8	110.1	109.1	89.8
Jun	87.5	102.6	102.7	101.8	102.8	101.5	87.9
Jul	63.4	88.3	88.5	88.1	88.8	86.6	72.6
Ago	48.1	72.2	72.5	72.5	72.9	69.7	53.3
Sep	49.8	77.5	76.8	75.6	77.7	73.8	56.1
Oct	82.6	105.9	105.3	104.2	105.9	104.0	95.1
Nov	95.1	114.7	114.4	113.9	114.6	113.9	110.7

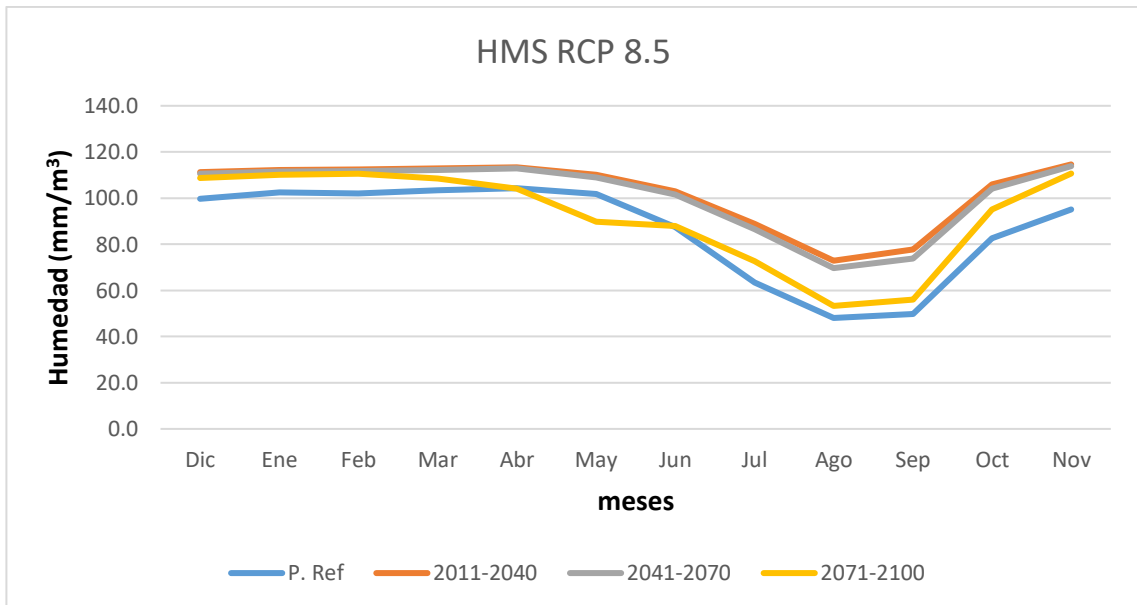
*Fuente: Propia*

**Figura 15.5.** Comparación de HMS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.



**Fuente:** Propia

**Figura 15.6.** Comparación de HMS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.



**Fuente:** Propia

### 15.3. CAUDAL SUBTERRANEO

El caudal subterráneo es la cantidad de agua que se infiltra por el suelo proveniente de la precipitación y se acumula en el nivel freático. En este estudio se tomó como caudal inicial 2 m<sup>3</sup>/s para que CHAC calculara los caudales subterráneos de referencia y de las proyecciones.

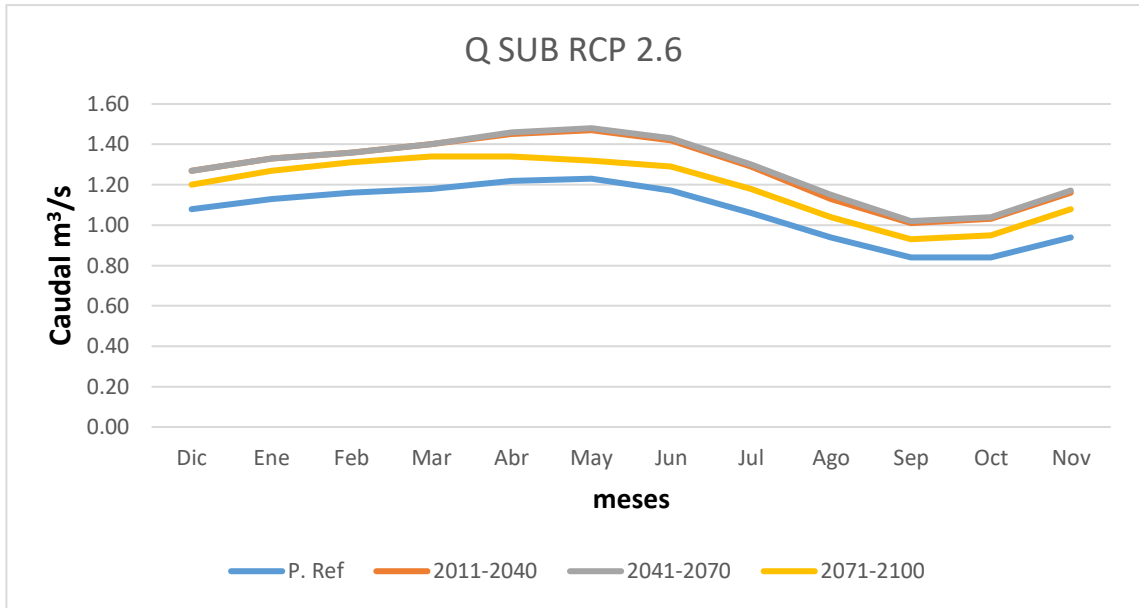
En las proyecciones se observa que lo caudales subterráneos tienen un aumento generalizado debido al aumento de la precipitación, pero a final de siglo, es decir para el periodo 2071-2100 se dan casos de algunos meses donde se esperaría una disminución del caudal subterráneo. Estos meses son mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre los cuales están resaltados de color rojo en la siguiente tabla.

**Tabla 15.4.** Caudal Subterráneo (QSUB): periodo de referencia y proyecciones.

QSUB Periodo Refe.		QSUB RCP 2.6			QSUB RCP 8.5		
MES	P. Ref	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dic	1.08	1.27	1.27	1.20	1.29	1.28	1.07
Ene	1.13	1.33	1.33	1.27	1.35	1.35	1.17
Feb	1.16	1.36	1.36	1.31	1.39	1.39	1.24
Mar	1.18	1.40	1.40	1.34	1.43	1.43	1.28
Abr	1.22	1.45	1.46	1.34	1.48	1.48	1.27
May	1.23	1.47	1.48	1.32	1.50	1.50	1.19
Jun	1.17	1.42	1.43	1.29	1.44	1.45	1.10
Jul	1.06	1.29	1.30	1.18	1.31	1.32	1.00
Ago	0.94	1.13	1.15	1.04	1.16	1.16	0.87
Sep	0.84	1.01	1.02	0.93	1.03	1.03	0.77
Oct	0.84	1.03	1.04	0.95	1.05	1.05	0.80
Nov	0.94	1.16	1.17	1.08	1.18	1.18	0.94

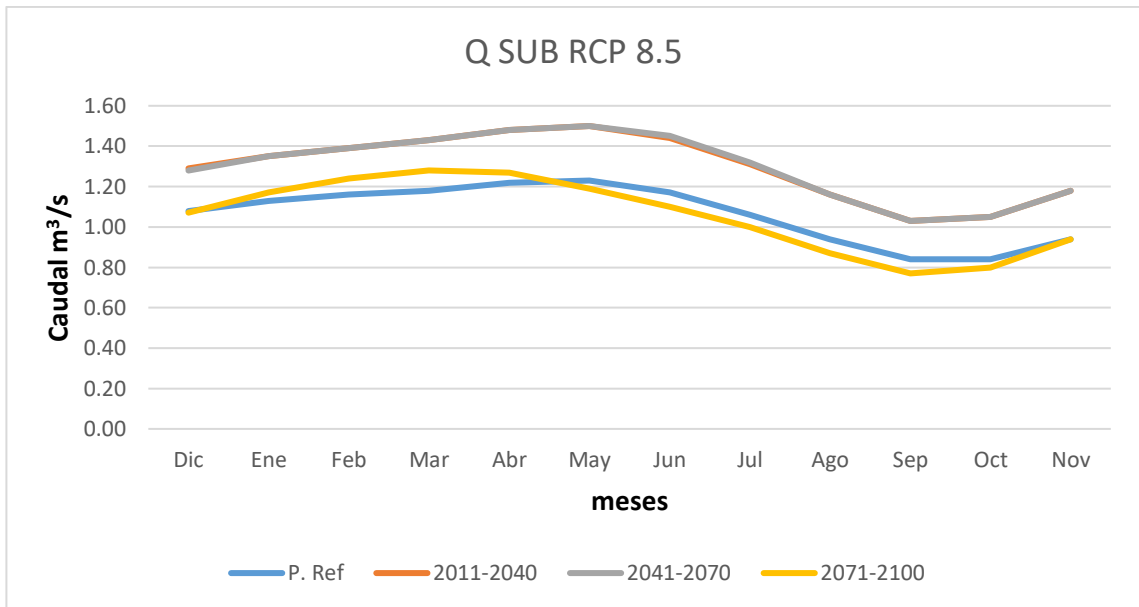
*Fuente: Propia*

**Figura 15.7.** Comparación de Q SUB para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.



**Fuente:** Propia

**Figura 15.8.** Comparación de Q SUB para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.



**Fuente:** Propia

#### 15.4. CAUDALES SIMULADOS

Los caudales simulados a partir de la precipitación y temperatura mediante el modelo Temez plantea una disminución en la mayoría de los periodos, pero se puede observar que también se presentan aumentos de caudal para los dos escenarios. Tanto para el escenario RCP 2.6 como para el 8.5 se presentan aumentos en los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre para los dos primeros periodos (2011-2040 y 2041-2070). En la siguiente tabla se muestran de color rojos los casos con aumentos de caudal.

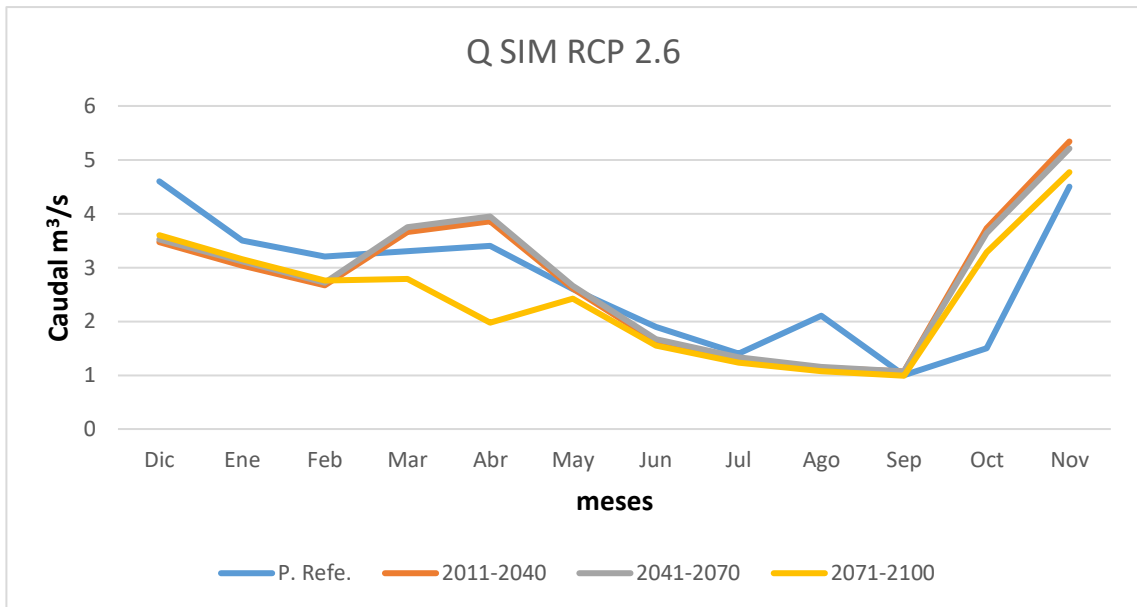
**Tabla 15.5.** Caudal Subterráneo: periodo de referencia y proyecciones.

Q SIM Periodo Refe		Caudales Simulados			Caudales Simulados		
MES	P. Refe.	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dic	4.6	3.47	3.52	3.6	3.73	3.82	3.61
Ene	3.5	3.04	3.11	3.15	3.27	3.34	3.18
Feb	3.2	2.67	2.72	2.76	2.86	2.92	2.79
Mar	3.3	3.66	3.75	2.79	3.77	3.79	2.54
Abr	3.4	3.86	3.95	1.98	3.97	3.99	1.79
May	2.6	2.61	2.66	2.42	2.67	2.68	1.25
Jun	1.9	1.63	1.67	1.55	1.68	1.69	1.23
Jul	1.4	1.31	1.33	1.23	1.34	1.34	1.01
Ago	2.1	1.13	1.15	1.07	1.16	1.16	0.88
Sep	1	1.07	1.07	0.99	1.09	1.08	0.79
Oct	1.5	3.73	3.64	3.28	3.76	3.67	2.67
Nov	4.5	5.34	5.21	4.77	5.36	5.28	4.2

*Fuente: Propia*

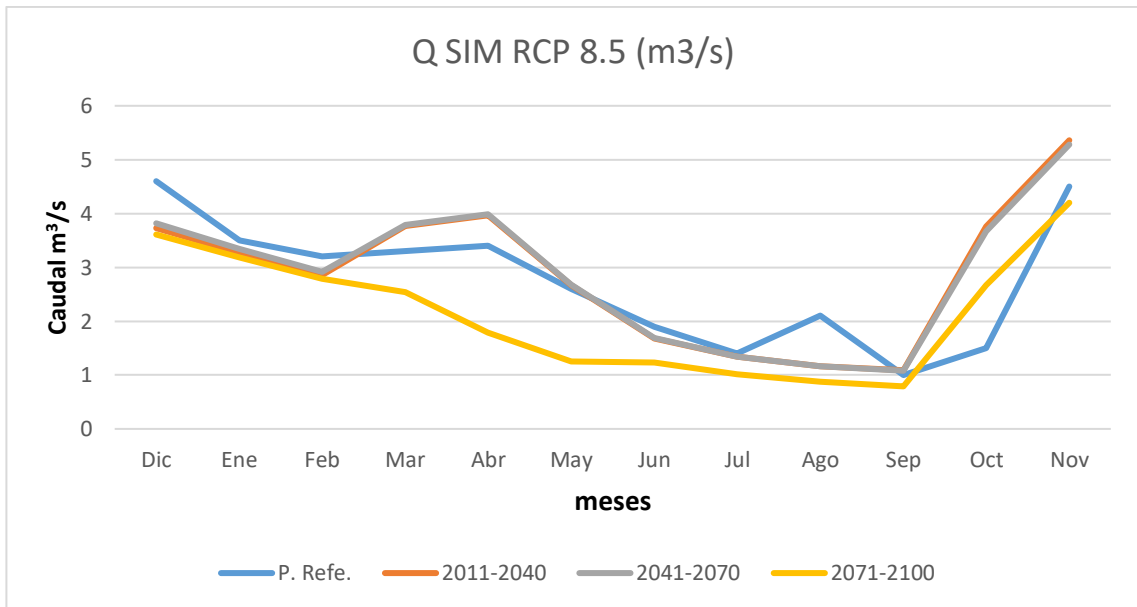


**Figura 15.9.** Comparación de Q SIMULADOS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 2.6.



**Fuente:** Propia

**Figura 15.10.** Comparación de Q SIMULADOS para todos los periodos con el periodo de Referencia para el escenario RCP 8.5.



**Fuente:** Propia

## 16. ANALISIS DE RESULTADOS

Según las proyecciones del IDEAM se espera que la precipitación y temperatura aumenten para los dos escenarios tenidos en cuenta para este estudio (RCP 2.6 Y RCP 8.5).

En el escenario RCP2.6 la precipitación aumenta en promedio 8.5% en el periodo 2011-2040, 10.85% en el periodo 2041-2070 y 10.55% en el periodo 2071-2100. En el mismo escenario la temperatura aumenta en promedio 0.9°C en el periodo 2011-20140, 1.27°C en el periodo 2041-2070 y 1.24°C para el periodo 2071-2100.

En el escenario RCP8.5 la precipitación aumenta en promedio 12.1% en el periodo 2011-2040, 14.4% en el periodo 2041-2070 y 12% en el periodo 2071-2100. En el mismo escenario la temperatura aumenta en promedio 1.1°C en el periodo 2011-20140, 2.35°C en el periodo 2041-2070 y 3.75°C para el periodo 2071-2100.

Según los cambios anteriormente expuestos, la precipitación aumentaría considerablemente ocasionando un aumento en los caudales subterráneos debido a que la capacidad de campo del suelo se saturaría más rápidamente y sucedería la infiltración del agua, pero el agua que se transporta por escorrentía y la que es captada por las plantas estaría expuesta a la evapotranspiración real que aumenta considerablemente y generaría un desfase en las aportaciones de agua al río, ya que prácticamente el río estaría favoreciendo por el caudal subterráneo y no tanto por la escorrentía. Además, se puede inferir a partir de los resultados que la humedad en el aire aumentaría debido a la gran cantidad de vapor de agua que estaría presente en la atmosfera por consecuencia del aumento de temperatura.

Por las anteriores estimaciones se provocaría una disminución generalizada de los caudales, pero teniendo un ligero aumento general de estos en los meses lluviosos (marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre) respecto al periodo de referencia, es decir las condiciones actuales del río. Este pequeño aumento se presenta en los dos escenarios y para todos los periodos, excluyendo el último periodo (2071-2100) del escenario RCP 8.5.

Es importante destacar que existe una mayor disminución generalizada en el escenario RCP2.6 pero esta disminución tiene la ventaja de que no posee cambios bruscos en sus caudales, disminuyendo las posibilidades de eventos extremos (Sequia o Inundaciones), por el contrario en el escenario RCP 8.5 tiene un aumento respecto al escenario RCP2.6, no muy significativo en los caudales, pero presentándose eventos extremos con cambios bruscos del clima con mayores consecuencias a final de siglo (2070-2100) en donde se presentan los datos de caudales más bajos de todas las proyecciones incluyendo las de RCP 2.6, con mayor influencia en los meses secos del año (junio, julio, agosto y septiembre).

## 17. CONCLUSIONES

El ciclo hidrológico, que, estando caracterizado por una pauta de comportamiento estadísticamente estable durante largos periodos de tiempo, están, sin embargo, sometidos en el largo plazo a cambiar esas pautas debido a los cambios de los parámetros ambientales y atmosféricos como lo son la precipitación y la temperatura.

Los eventos extremos podrían ser una de las grandes consecuencias del cambio climático en donde se podrían presentar grandes aumentos de precipitaciones sobre todo en los meses lluviosos del año en determinados intervalos de tiempo, aumentando el caudal del río y sus afluentes cercanos. Además, se podrían presentar eventos de grandes disminuciones de las precipitaciones y alta evapotranspiración en los meses con las más altas temperaturas del año (junio, julio y agosto). Es importante destacar que estos eventos extremos pueden ser aún más desastrosos cuando los fenómenos del Niño y la Niña entran en participación.

La Gestión del riesgo es sector de gran importancia en donde el municipio de Popayán debe colocar mayor prioridad frente a otros temas, debido a que los eventos extremos tendrán como consecuencia pérdidas económicas significativas. Según un estudio del Departamento Nacional de Planeación y el Banco Interamericano de Desarrollo, un aumento del 20% en desastres naturales tendría como resultado una reducción del PIB en un 0.25% a corto plazo y un 1.5% a largo plazo. Por el contrario, aumentar el gasto público en la gestión del riesgo, tendría como resultado un aumento del PIB en un 0.10%, reducción de la tasa de desastres del 6% y aumento del capital en 0.25% (Banco Interamericano de Desarrollo.2016).

El agua subterránea podría convertirse en una de las mayores fuentes de abastecimiento de agua dulce para Popayán y el departamento del Cauca, debido a su amplia acumulación en el nivel freático y su alta evaporación por influencia de las altas temperaturas.

El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero son un factor determinante sobre la disponibilidad del recurso hídrico, es decir el escenario RCP 8.5 es el más crítico, por tal motivo se vuelve necesario la adaptación de políticas públicas que permitan la disminución de las concentraciones de estos gases.

Es necesario conocer los elementos del sistema climático en el que el ciclo del agua está inmerso y determinar aquellos factores naturales y antrópicos que están asociados al cambio climático, con especial influencia en el agua. Por lo tanto, es importante que la intervención sobre las cuencas por parte de las entidades públicas para su conservación se vuelva más eficaz y oportuna, ya que esto garantizara unos menores efectos sobre el ciclo hidrológico.

El programa CHAC proporcionado por el CEDEX en España, resulta una herramienta muy útil, de fácil uso, pero es necesario comprobar su confiabilidad mediante la comparación con otros modelos.

## **18. LIMITACIONES DEL TRABAJO**

El programa CHAC del CEDEX de España no cuenta con la estimación de variables climáticas que existen en diferentes regiones como el fenómeno del Niño y la Niña. Esto podría ser tomado en cuenta por los desarrolladores del programa.

Una de las principales limitaciones que se tuvo en este estudio fue la escasa disponibilidad de datos primarios confiables lo que conlleva a una caracterización escasa de la cuenca.

Escasa información de parámetros asociados al suelo de la cuenca, como infiltración máxima, tipos y usos del suelo, humedad máxima.

Escasa información de las proyecciones específicas para un determinado lugar.

## **19. RECOMENDACIONES.**

Se recomienda para la obtención de unos mejores resultados, la implementación de nuevas estaciones meteorológicas y la automatización de las existentes, para la correcta y eficaz recolección de datos que serán puntos clave de partida para los estudios hidrológicos de las Subcuencas de abastecimiento de agua potable en la ciudad

Se recomienda para estudios futuros la utilización del Método de Thiessen modificado para la caracterización correcta tanto de la Temperatura como de la Precipitación.

Se recomienda la realización de estudios de proyecciones climáticas con los modelos del IPCC exclusivas para el Departamento del Cauca o los municipios que influyen en el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Popayán, esto con el fin de obtener proyecciones de precipitación y temperatura más reales y congruentes con particularidades del departamento.

A raíz de este estudio, se hace necesario ampliar la línea investigativa en este campo, para que en un futuro cercano la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P al igual que las otras entidades ambientales puedan tomar decisiones de Planificación a partir de la confiabilidad de los futuros estudios.

## 20. BIBLIOGRAFIA

- Alegría, G, J., 2012. Conflictos y gestión del agua en contexto de cambio climático: El caso del Perú.
- Bateman, A., 2007. Hidrología básica y aplicada. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
- Cardona, D, Gonzales, J., 2013. Inferencia estadística. Módulo de regresión lineal simple
- CEDEX., 2013. Cálculo hidrometeorológico de aportaciones y crecidas. Manual CHAC
- FAO., 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Fernández, C, P., 2002., Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España.
- Gonzales, F., 2015. MANUAL INTRODUCTORIO ArcGIS 10.2. Universidad Nacional de Colombia.
- Lozano, T, J., 2011. ¿SON COMPATIBLES CIENCIA Y POLÍTICA?
- Molina, M, Sarukhán, J., 2010. El cambio climático: causas, efectos y soluciones.
- Navier-Stoke., 2011. Fluid Dynamics and the Navier-Stokes Equation
- Rodríguez, A., 2010. Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia.
- Ruiz, F., 2010. Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100).
- SÁNCHEZ, S. F., 1995. Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Agronómica. Ibagué. Colombia.
- Taylor, J., 2012. Mecánica Clásica.
- VENTURA, F. GUEVARA, E., 2014. Validación del modelo HEC HMS en la cuenca del río Cabriales para el análisis hidrológico, Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

WOODS, R.,2005. Hydrologic concepts of variability and scale. En: Anderson, M.G., McDonnell, J.J. (eds), Encyclopedia of hydrological sciences. 23-40, John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido.

## **20.1. REFERENCIAS DE INTERNET**

[http://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao\\_/what-is-arcgis-spanish.pdf](http://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao_/what-is-arcgis-spanish.pdf).  
Ultima consulta febrero 25 de 2017.

<https://www.inspiration.org/cambio-climatico/cc-al-detalle>. Ultima consulta febrero 25 de 2017.

<http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuencia-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>. . Ultima consulta febrero 25 de 2017.

[https://ec.europa.eu/clima/change/causes\\_es](https://ec.europa.eu/clima/change/causes_es). . Ultima consulta febrero 26 de 2017.

<https://calentamientoglobalclima.org/2007/01/31/la-temperatura-de-la-tierra-sube/>..  
Ultima consulta febrero 26 de 2017.

<http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>  
f. . Ultima consulta febrero 26 de 2017.

<http://ecodes.org/cambio-climatico-y-ecodes/que-es-el-cambio-climatico>. Ultima  
consulta febrero 26 de 2017

<http://cambioclimatico.minambiente.gov.co/index.php/que-es-cambio-climatico>.  
Ultima consulta febrero 26 de 2017

<http://ecodes.org/archivo/proyectos/archivoecodes/pages/especial/alianzaporelagua/aguaysaneamiento.html>. Ultima consulta febrero 27 de 2017

<https://es.slideshare.net/AADC96/cis-universidad-csar-vallejo-cambio-climtico>.  
Ultima consulta febrero 26 de 2017

<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/CombustFos.htm>. Ultima consulta  
febrero 26 de 2017

<http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>  
f. Ultima consulta febrero 26 de 2017

[http://www.gwp.org/Global/GWP/SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo\\_Hidrologico.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP/SAm_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo_Hidrologico.pdf).  
Ultima consulta febrero 26 de 2017

<http://www.ideam.gov.co/web/entidad/entidad>. Ultima consulta febrero 26 de 2017



[http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml). Ultima consulta febrero 26 de 2017

<http://ceh-flumen64.cedex.es/hidrologia/pub/proyectos/chac.htm>. Ultima consulta febrero 26 de 2017

<https://geoinnova.org/cursos/calcular-poligonos-thiessen-arcgis/?gclid=CI6Ug-XN0tMCFUQehgod1CkHRA>. Ultima consulta abril 25 de 2017

<http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-rcp-2014.pdf>. Ultima consulta abril 25 de 2017

[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento\\_nacional\\_departamental.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf). Ultima consulta abril 25 de 2017

[http://www.urosario.edu.co/Administracion/documentos/Documentos-de-Investigacion/BI\\_147-Web.pdf](http://www.urosario.edu.co/Administracion/documentos/Documentos-de-Investigacion/BI_147-Web.pdf). Ultima consulta abril 27 de 2017

<http://portal.unicauca.edu.co/versionP/noticias/academia/sustentaci%C3%B3n-de-la-primera-tesis-de-la-maestr%C3%AD-en-ciencias-qu%C3%ADmica>. Ultima consulta abril 27 de 2017

[http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_itop/415/pdfs/HSS-2013-3%20Fundamentos%20Hidrologia%20Subterranea-.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/HSS-2013-3%20Fundamentos%20Hidrologia%20Subterranea-.pdf) Última consulta mayo 20 de 2017

<https://publications.iadb.org/handle/11319/7392>. Última consulta Junio 10 de 2017

[http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_itop/415/pdfs/Capitulo%202.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%202.pdf). Última consulta Junio 10 de 2017