

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 10 de agosto de 2015

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s)

JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ , con C.C. No. 1.075.252.699 ,

ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA , con C.C. No. 1.075.251.457

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

Titulado “Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca del río Aipe”

Presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de

Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

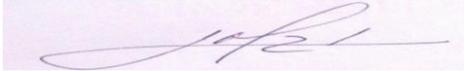
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

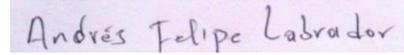
De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ



Firma: _____

ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA



Firma: _____

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RIO AIPE”

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ZÚÑIGA LÓPEZ	JUAN MANUEL
LABRADOR CADENA	ANDRÉS FELIPE

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ROMERO CUELLAR	JONATHAN

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CIFUENTES PERDOMO	MIGUEL GERMAN
PACHÓN BEJARANO	RODRIGO ALBERTO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Agrícola

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2015 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 73

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 4

Diagramas___ Fotografías_X_ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_X_ Grabados___ Láminas___
Litografías___ Mapas_X___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros_X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Microsoft Word ó Adobe Reader, AutoCAD

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

1. WEAP WEAP
2. Escenario cambio climático Climate change scenarios
3. Colombia Colombia
4. Hidrología tropical Tropical hydrology
5. Modelo hidrológico Hidrologic model

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La planificación integral del recurso hídrico ofrece la posibilidad de mayores eficiencias en el uso, conservación y gestión equitativa del agua. Este enfoque permite disminuir las demandas, aumentar el reciclaje y la reutilización de agua residuales tratadas. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo para conocer la oferta hídrica hacia el año 2050 por medio del modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation And Planning) como herramienta para apoyar la toma de decisiones en la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca del Río Aipe, Huila, Colombia. El modelo simula la oferta y la demanda hídrica involucrando datos históricos diarios de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, así como información de cobertura del suelo. La metodología incluyó la calibración y validación el modelo del WEAP a través del coeficiente de determinación R^2 . Además se simularon escenarios de población (+2% y +10%) y clima (seco y húmedo). Los resultados indican que la cuenca del río Aipe presenta un caudal medio mensual multianual de $15.31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La calibración estableció 9 parámetros, encontrándose dentro de los más sensibles el SWC (capacidad de almacenamiento de agua en el suelo) el cual varía en un rango de 230 mm a 330 mm, y el RRF (factor de resistencia a la escorrentía) el cual varía en un rango de 2 a 9.5, según la cobertura del suelo. En la fase de validación se obtuvo un R^2 de 0.57. En la simulación de los escenarios del clima se encontró un caudal de $5.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-66.88%) cuando se hace referencia al clima seco y caudal de $18.98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (+23.97%) cuando existe un clima húmedo para el periodo (2011-2050). Además, cuando la población aumenta un 2% la escorrentía a futuro disminuye $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, (-2.81%), cuando la población aumenta un 10%, la cuenca pierde $4.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-29%).

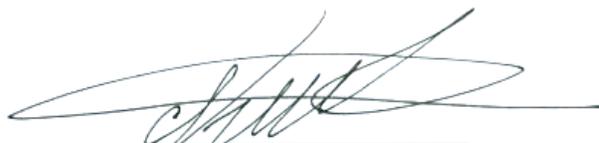
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Integral plan of water resources offers the possibility of greater efficiency in the use; conservation and reasonable management of water. This approach can reduce demands, increase recycling and reuse of treated wastewater. This paper develops a model to know the water supply 2050. The hydrological model WEAP (Water Evaluation and Planning) as a tool to support decision-making in the integral plan of water resources in Aipe basin, Huila, Colombia. The model simulates water supply and demand. It works with precipitation, temperature, relative humidity and wind speed and land cover data. The methodology included the calibration and validation WEAP model through the coefficient of determination R^2 . Besides population scenarios (+ 2% and + 10%) and climate (dry and wet) they were simulated. The results indicate that the Aipe River presents a multiyear monthly average flow of $15.31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Calibration established nine parameters being within the more sensitive the SWC (water storage in soil) which varies in a range of 230 mm to 330 mm, and RRF (resistance factor runoff) it varies in a range of 2 to 9.5 as ground cover. In the validation, they obtained R^2 of 0.57. In the simulated climate scenarios at a flow rate of $5.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-66.88%) was found when referring to dry weather flow of $18.98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (+ 23.97%) when a humid climate exists for the period (2011-2050). In addition, when the population increased by 2% to future runoff decreases $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-2.81%), where the population increased by 10%, the watershed lost $4.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-29%).

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: IA, MSc. Jonathan Romero Cuellar

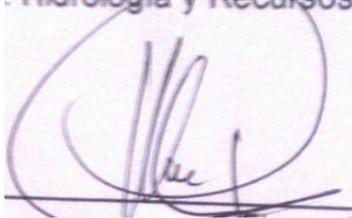

JONATHAN ROMERO CUELLAR
 C.C 1'075.218.964 de Neiva (Huila)

Firma:

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4

Nombre Jurado: Esp. Miguel German Cifuentes

Firma:



Nombre Jurado: Esp. MSc. Rodrigo Alberto Pachón Bejarano

Firma:



**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRAL DEL
RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO AIPE**

**ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA
JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA
JULIO, 2015**

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRAL DEL
RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO AIPE**

**ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA
JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ**

**Tesis, trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Agrícola**

**Director:
IA, MSc. JONATHAN ROMERO CUELLAR**

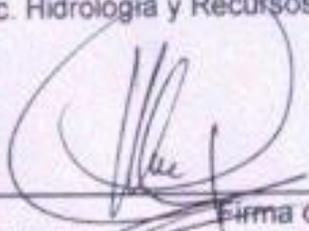
**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA
JULIO, 2015**

Nota de aceptación

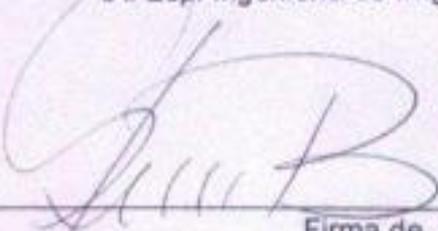


JONATHAN ROMERO CUELLAR
C.C 1'975.218.964 de Neiva (Huila)

Director
Profesor JONATHAN ROMERO CUELLAR
IA. MSc. Hidrología y Recursos Hídricos



Firma de Jurado
Profesor MIGUEL GERMAN CIFUENTES PERDOMO
IA. Esp. Ingeniería de Irrigación



Firma de Jurado
Profesor RODRIGO ALBERTO PACHÓN BEJARANO
Esp. MSc. Educación y desarrollo comunitario

Neiva, Julio de 2015

DEDICATORIA

ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA

A mis padres Manuel Antonio Labrador Villalba y Virgelina Cadena Ramírez por apoyarme en este proceso de formación y brindarme todo el acompañamiento necesario y de esta forma hacer realidad el sueño tan anhelado de ser profesional.

JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ

Primero que todo a Dios y a la Virgen, que sin ellos esto sería imposible. A mis padres, Néstor Zúñiga y Consuelo López por el apoyo, por los valores inculcados y por la paciencia que tuvieron durante este proceso académico. A mi hermano, Jesús David Zúñiga, mi ejemplo a seguir por su responsabilidad y disciplina. A ellos y a todos mis amigos de verdad muchas gracias porque sin ellos este sueño sería difícil de alcanzar.

AGRADECIMIENTOS

ANDRÉS FELIPE LABRADOR CADENA

A Dios, a mis padres, Manuel Antonio Labrador Villalba y Virgelina Cadena Ramírez por el acompañamiento que me brindaron durante esta etapa de mi vida, a mis hermanas Jessica María y Mayra Alejandra.

A Juan Manuel Zúñiga, un excelente compañero y amigo. Gracias por el apoyo que me brindó durante este trabajo de grado.

Al profesor Jonathan Romero Cuellar, gracias por su orientación durante el trabajo de grado y compartir sus conocimientos para llevar a un buen puerto este trabajo.

A la ingeniera Paula Yaneth Anacona que nos dio la posibilidad de realizar este trabajo de grado y nos abrió las puertas de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) para que nos brindaran la información necesaria y orientación profesional para realizar satisfactoriamente este trabajo.

A mis amigos y compañeros de universidad quienes fueron parte importante en mi crecimiento personal y profesional.

JUAN MANUEL ZÚÑIGA LÓPEZ

A Dios y la Virgen, por todas las bendiciones que recibo todos los días. Sin ellos imposible el sueño de ser profesional.

A mis padres, Néstor y Consuelo, a mi hermano Jesús. A María José y a Dora que también son parte importante de esta familia, por el apoyo y la paciencia durante este proceso.

A mi compañero y amigo de tesis, Andrés Felipe, por los años de estudio y además, por el apoyo durante este proyecto.

A nuestro director de tesis, el profesor Jonathan Romero Cuellar, que a pesar de la distancia en esta última etapa, estuvo pendiente de nosotros ayudándonos y guiándonos con sus conocimientos y experiencia.

A la ingeniera Paula Yaneth Anacona, que con sus ideas y conocimientos se llevó a cabo éste proyecto y nos abrió las puertas de la CAM para cumplir nuestro sueño.

A mis amigos que fueron importantes en este proceso universitario, gracias de verdad, porque este logro también es de todos ellos.

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS.....	8
LISTADO DE TABLAS.....	9
ANEXOS	10
1 INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. MARCO CONCEPTUAL	15
3.1. PROTOCOLO DE MODELACIÓN	15
3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS	16
3.3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	16
3.3.1. MODELO WEAP	20
3.4. CAUDAL ECOLÓGICO.....	21
3.4.1. CAUDAL DE ESTIAJE	23
4. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	24
4.1. Localización.....	24
4.2. Usos del suelo	25
5. METODOLOGÍA	26
5.1. Oferta y demanda hídrica	26
5.1.1. Análisis de la demanda hídrica.....	27
5.1.2. Análisis de la oferta hídrica	27
5.2. Modelo WEAP	28
5.2.1. Delimitación de catchments en SIG.....	31
5.2.2. Caracterización de cobertura vegetal	33
5.2.3. Nodos de demanda Urbana	36
5.2.4. Climatología	38
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	45
6.1. Calibración y validación	45
6.1.1. Ajuste de los parámetros del modelo	48
6.2. Estimación del caudal ecológico	49
7. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS.....	53

7.1.	Escenarios de simulación.	54
7.1.1.	Escenario Población.....	56
7.1.2.	Escenario Clima	56
7.1.3.	Escenario caudal ecológico	58
8.	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	62
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
9.1.	CONCLUSIONES	65
9.2.	RECOMENDACIONES.....	66
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Trayectorias representativas de concentración RCP en términos de a. forzamiento radiativo y b. emisiones de CO ₂ de la industria y del consumo energético.....	19
Figura 2. Localización geográfica cuenca río Aipe	24
Figura 3. Usos del suelo cuenca río Aipe.....	25
Figura 4. Diagrama conceptual de elementos hidrológicos modelados en WEAP	30
Figura 5. División subcuencas cuenca río Aipe.....	32
Figura 6. Delimitación de catchments por bandas de elevación en WEAP	32
Figura 7. Modelo conceptual, Sitios de demanda "Demand Site".....	37
Figura 8. Estaciones pluviométricas con más área de influencia	39
Figura 9. Relación Temperatura-Altura	42
Figura 10. Estaciones Meteorológicas Índice-Temperatura cuenca río Aipe.....	44
Figura 11. Vista en WEAP con ecuaciones Read From File para temperatura	45
Figura 12. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la cuenca del río Aipe mediante WEAP	46
Figura 13. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la cuenca del río Aipe mediante WEAP	46
Figura 14. Coeficiente de determinación (R^2) de los caudales simulados y observados para el periodo de calibración.....	47
Figura 15. Coeficiente de determinación (R^2) de los caudales simulados y observados para el periodo de validación.....	48
Figura 16. Caudal río Aipe VS Tiempo (día) periodo (2000-2011).....	50
Figura 17. Textura de la señal	51
Figura 18. Curva de probabilidad Log-Logistic.....	53
Figura 19. Escenarios modelo WEAP	53
Figura 20. Metodología para generar las series climáticas implementadas en este estudio.....	55
Figura 21. Promedio mensual multianual Escenario Población.....	56
Figura 22. Promedio mensual multianual Escenario Clima	57
Figura 23. Curva de probabilidad Logistic.....	58
Figura 24. Curva de probabilidad Normal	59
Figura 25. Curva de probabilidad Lognormal	60
Figura 26. Curva de probabilidad Lognormal	61

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Concesiones otorgadas por la CAM.....	27
Tabla 2. Uso de suelo original y agrupación utilizada en el modelo del rio Aipe ...	33
Tabla 3. Catchments con su respectivo uso del suelo	34
Tabla 4. Componentes del modelo	37
Tabla 5. Estaciones con área de influencia según Polígonos de Thiessen	38
Tabla 6. Estaciones con más influencia por catchment.....	41
Tabla 7. Caudales de estiaje	52

ANEXOS

ANEXO 1. Polígonos de Thiessen	69
ANEXO 2. Código Matlab caudal ecológico	70
ANEXO 3. Resultados Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico	71
ANEXO 4. Resultados Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico aumento población 2%	71
ANEXO 5. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico aumento población 10%	72
ANEXO 6. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico serie MPI- ESM-MR clima seco.....	72
ANEXO 7. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico serie MPI- ESM-MR clima húmedo	73

RESUMEN

La planificación integral del recurso hídrico ofrece la posibilidad de mayores eficiencias en el uso; conservación y gestión equitativa de la demanda compartida entre los usuarios del agua y de un aumento del reciclaje y reutilización del agua de vertimientos para suplir el desarrollo de nuevas demandas. El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un modelo para conocer la oferta hídrica hacia el año 2050 por medio del modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation And Planning) el cual simula la oferta y la demanda hídrica con lo cual se puede lograr la planificación del integral recurso hídrico, involucrando datos históricos de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, así como información de cobertura del suelo. En este sentido se calibró y validó el modelo y se diseñaron escenarios de población y clima. La calibración estableció 9 parámetros, encontrándose dentro de los más sensibles el SWC (capacidad de almacenamiento de agua en el suelo) el cual varía en un rango de 230 mm a 330 mm, lo que indica un alto contenido de humedad y el RRF (factor de resistencia a la escorrentía) el cual varía en un rango de 2 a 9.5, según la cobertura del suelo. La validación se analizó por medio del método estadístico R^2 , así los resultados indican un 57% de predicción en los datos lo que deja un 43% de incertidumbre. La cuenca del río Aipe presenta un caudal medio $15.31 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal ecológico debe ser de $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, con los escenarios del clima se observa una disminución en los caudales de $10.07 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando se hace referencia al clima seco y un aumento de $3.67 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando existe un clima húmedo para el periodo (2011-2050). Además, cuando la población aumenta un 2% la escorrentía a futuro disminuye $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$, (-2.81), cuando la población aumenta un 10%, la cuenca pierde $4.44 \text{ m}^3/\text{s}$ (-29%). Estas predicciones ayudan a la toma de decisiones y son herramientas para hacer un uso racional del agua en la cuenca.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente se entiende por Planificación Integral del Recurso Hídrico, al proceso cuya finalidad consiste en mejorar la eficiencia del uso del agua (razón económica), fomentar la equidad del acceso al agua (razón social) y garantizar la sostenibilidad (razón ambiental). El término “integral” destaca la necesidad de un enfoque global (holístico), con el fin de agrupar varios sectores como la agricultura o la industria. Puede afirmarse que la Planificación Integrada de los Recursos Hídricos es el enfoque empleado para aplicar la gobernanza en lo que respecta a la conservación y la sostenibilidad de los recursos hídricos (Suarez *et al*, 2014). Es por esto que se plantea como una solución para facilitar la toma de decisiones de los entes gubernamentales y privados el modelamiento de las cuencas hidrográficas ya que estas prácticas van a permitir llevar a cabo un ordenamiento de las mismas teniendo en cuenta diferentes variables que influyen sobre la zona de estudio.

Para la comunidad científica los efectos de los cambios del clima sobre el recurso hídrico es una incertidumbre clave para la planificación sostenible. En este sentido, las proyecciones para el Huila muestran un incremento de 2 °C en la temperatura media para el año 2040, que puede ser aún mayor si se parte de las nuevas proyecciones mundiales, así como una disminución de hasta el 30% en la precipitación. Si no se toman medidas tempranas para enfrentar el cambio climático, en el futuro las soluciones podrán ser económicamente mucho más costosas y técnicamente más complicadas, con lo cual varias generaciones de huilenses invertirán su tiempo y sus recursos económicos en temas de reconstrucción, reasentamiento y restauración, en lugar de invertirlos en desarrollo, competitividad y sostenibilidad para el departamento (IDEAM, 2013).

Según Castro (2014), una de las herramientas que ha causado gran impacto en la gestión integral del recurso hídrico es la modelación hidrológica, dado que permite estudiar los fenómenos al interior de una cuenca hidrográfica, bien sea describiéndolos, explicándolos y/o prediciéndolos, a través una representación esquemática o conceptual y numérica, lo que permite realizar un análisis detallado de los resultados relacionándolos con el territorio.

WEAP es una iniciativa del Stockholm Environment Institute, la cual hace un enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos, realiza procesos participativos de los actores involucrados en un proceso abierto. El modelo representa procesos como el cálculo de la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento de agua, y generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas. Para los escenarios se evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos. Para todo esto se necesita una interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de “arrastrar y

soltar” con resultados flexibles como mapas, gráficos y tablas (SEI, Guia metodologica, 2009).

Con WEAP se han realizado proyectos en diferentes partes de mundo, uno de ellos se realizó en cuencas nivales de la IV región Elqui en Algaborral y Hurtado en San Agustín (Chile), simulando los caudales futuros en los periodos 2036 - 2065 y 2071 - 2100, donde se proyectaron disminuciones en las precipitaciones las temperaturas medias anuales. Los resultados muestran una disminución de los caudales futuros en ambos periodos analizados (aproximadamente 30% menos en el periodo 2071-2100) (Mardones, 2009).

En el 2009, en la cuenca Andina del río Teno (Chile) se intentó proveer la información necesaria para comprender los alcances del cambio climático, en términos de vulnerabilidad del sector de los recursos hídricos, con el fin de contribuir al proceso de toma de decisiones sobre medidas de adaptación frente al cambio climático. Los resultados mostraron una baja de los caudales medios mensuales futuros del río Teno de un 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente y un aumento en el número y prolongación de periodos secos en la cuenca, causados principalmente por la disminución de la precipitación anual y del aumento de la temperatura anual (Mena,2009).

Por otro lado, en Ecuador, en la cuenca del río Pastaza, se utilizó el modelo WEAP para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca, en donde se realizaron los procesos de calibración y verificación, en subcuencas altas, Cutuchi y Ambato, con sus periodos de registro (1982-1995) y (1982-1986), respectivamente, los cuales alcanzaron un coeficiente de correlación en un intervalo de (0.6 a 0.8), indicando una buena correspondencia de lo observado y lo simulado (Lema & Plaza, 2009).

Debido a la gran acogida que ha tenido WEAP en otros países se buscara evaluar las condiciones actuales de las fuentes hídricas a través de un análisis de series climatológicas e información cartográfica de los últimos años, así como considerar posibles escenarios futuros con la ayuda del sistema de modelación Water Evaluation and Planning System (WEAP), que a través del balance de oferta y demanda de agua permite la distribución y la planificación del recurso hídrico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de planificación integral del recurso hídrico para la cuenca hidrográfica del río Aipe.

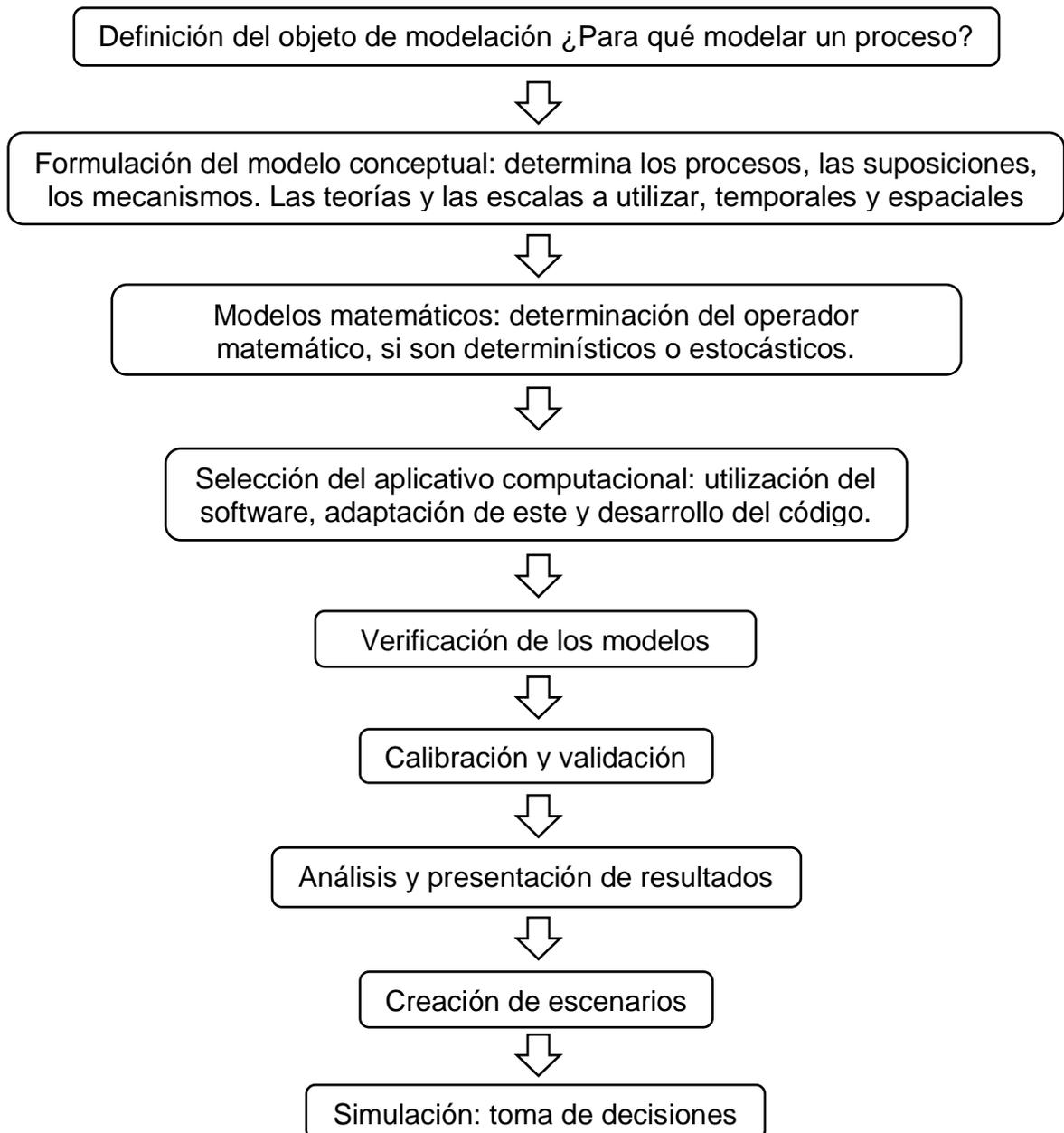
2.2. Objetivos específicos

- Calibrar y validar el modelo hidrológico seleccionado.
- Simular la oferta hídrica de la cuenca teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático.
- Proponer medidas de adaptación para el manejo a futuro del recurso hídrico.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. PROTOCOLO DE MODELACIÓN

La modelación matemática debe enmarcarse en un número finito de pasos ordenados, que conviertan el proceso de modelación en una secuencia lógica, y discreta, de acciones orientadas a la obtención de un resultado con la calidad esperada, estos pasos son:



3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo, por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos ya sea de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, y predicción o pronóstico de flujo en tiempo real.

Los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías: material y formal. Un modelo material es una representación física del prototipo, simple en estructura pero con propiedades que reúnen las del prototipo. Un modelo formal es una abstracción matemática de una situación idealizada que preserva las propiedades estructurales importantes del prototipo; estos están rápidamente disponibles, son altamente flexibles para usar (Salinas & Villafañe, 2011).

3.3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Un escenario de cambio climático no es ni un pronóstico ni una predicción climática, es una representación del clima afectada por una condición de gases de efecto invernadero. De acuerdo con Pabón (2005), en este sentido hay que distinguir las siguientes definiciones:

- Predicción: decir con anticipación lo que ocurrirá en un momento o periodo futuro en un medio determinado (predicción del tiempo, predicción climática).
- Proyección: Estimación de una situación futura mediante el estudio de la condición actual o a través de una extrapolación (estadística, numérica o dinámica) del curso de los procesos (por ejemplo: extrapolación de tendencias)
- Escenario Climático: condición climática asumida para efecto de evaluación de impactos de la variabilidad climática (escenario El Niño/La Niña), de cambio climático (escenario del holoceno medio, del ultimo pleniglacial) de impactos en sectores socio-económicos o ecosistemas.
- Escenario de cambio climático: representación del clima que se observa bajo una concentración determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmosfera.

Según Jones et al (2004), un escenario de emisión es un resultado plausible y consistente que ha sido construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima. Las principales etapas requeridas para proveer escenarios de cambio climático con el fin de calcular los impactos del mismo son:

- Establecer los escenarios de emisiones (escenarios de crecimiento de la población, energía y modelos socio-económicos).
- estimar las concentraciones de CO₂, metano, sulfatos, simular ciclo del carbón con modelo químicos etc.

- modelar el cambio climático global: temperatura, lluvia, nivel del mar (modelos acoplados).
- determinar detalles regionales que involucra efectos de montañas, islas, tiempo extremo, etc.
- obtener los impactos (modelos de impacto: inundaciones, suministro de alimentos) (Diaz Ruiz, 2009).

Nunca sabremos exactamente como las emisiones antropogénicas cambiaran en el futuro. Sin embargo, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) ha desarrollado nuevos escenarios de emisión denominados "SRES" escenarios, que comprenden cuatro familias A1, A2, B1 y B2.

A1: La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción a tecnologías nuevas y más eficientes.

A2: describe un mundo muy heterogéneo, con aumento continuo de la población global; con crecimiento económico regionalmente orientado y más fragmentado y más lento que en otros escenarios.

B1: describe un mundo convergente con una misma población mundial que A1 pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios e información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias común aprovechamiento eficaz de los recursos.

B2: describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con un nivel de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en la líneas evolutivas A1 y B1 (Dominguez Calle, 2000).

La evolución del cambio climático en los sistemas hidrológicos fundamentalmente buscan establecer como, a diferentes escalas espaciales y temporales, los cambios en los atributos del clima pueden modificar la disponibilidad de agua en una cuenca. Por ejemplo buscan determinar cómo los cambios en las magnitudes esperadas o en los patrones estacionales de la temperatura del aire, precipitación y humedad relativa, modificarán los procesos de circulación de agua que ocurren a escala de la cuenca: la escorrentía, evapotranspiración, transpiración, y almacenamiento de humedad en el suelo. A su vez, buscan establecer cómo estos cambios pueden producir alteraciones en los sectores hidro-dependientes (como la hidroenergía, los

acueductos y la agricultura) o los ecosistemas que dependen de patrones específicos de disponibilidad de agua en la cuenca.

Este tipo de estudio supone tres grandes interrogantes:

1. ¿Cuáles son los atributos actuales del clima, entendidos como los atributos estadísticos del estado del tiempo?, y a su vez, cuales son los cambios en dichos atributos ante los factores de cambio asociados a factores antrópicos o naturales, por ejemplo, los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmosfera, cambios en la radiación solar, etc. Estos atributos incluyen por ejemplo, las magnitudes medias, de variables de estado del tiempo y su variabilidad, los patrones estacionales (su variación a lo largo de un año), las tele-conexiones macro-climáticas (por ejemplo la relación del fenómeno del Niño), y los ciclos seculares, o de baja frecuencia.
2. ¿Cuál es la respuesta hidrológica de una cuenca o un área de una cuenca determinada al clima?, o en otras palabras, el movimiento y almacenamiento del agua en los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca, como la escorrentía, la evapotranspiración, el almacenamiento en el suelo, la recarga/descarga de acuíferos, etc. A su vez, ¿Cuál será la respuesta hidrológica de una cuenca ante cambios en el clima y otros factores antropogénicos sobre los sistemas naturales y humanos? Es decir, cuáles serán los patrones del cambio espacial y temporal en la disponibilidad de recursos hídricos.
3. Finalmente, ¿Cuáles son las implicaciones de estos impactos a escala de cuencas sobre el sistema socioeconómico y ambiental? En conjunto, estos interrogantes suponen una gran dificultad y constituye un reto al desarrollo científico actual, pues requieren predecir el comportamiento de sistemas altamente complejos: el sistema climático, los sistemas hidrológicos y sus factores de alteración antrópicos y naturales, cada uno compuesto de muchos elementos mutuamente interdependientes y con ciclos de retroalimentación no muy bien comprendidos. Ante este reto, existen avances que permiten, si bien con niveles significativos de incertidumbre, vislumbrar a nivel exploratorio cuales son los “futuros posibles” del sistema climático y sus efectos sobre los sistemas hidrológicos, de forma que contribuyan como guía en el proceso de planificación.

Con respecto al primer interrogante, un número importante de instituciones científicas de diferentes países, han desarrollado desde la década de 1960 investigaciones orientadas a simular el sistema climático terrestre y predecir los cambios esperados por factores naturales y antrópicos. Los factores de cambios analizados incluyen por ejemplo, el incremento en la concentración atmosférico de gases de efecto invernadero y aerosoles, los cambios en la cobertura y uso del suelo y los cambios en el albedo por el derretimiento al

hielo. Dichos esfuerzos han sido coordinados desde la década de 1990 por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas de las Naciones Unidas (WCRP), que desarrolla cada 5 a 7 años las proyecciones climáticas globales a través de su proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP, Coupled Modeling InterComparison Project) (Angarita, 2014).

En septiembre de 2013 el WCRP publicó su quinto informe de evaluación (CMIP5) sobre el estado del arte del entendimiento científico de cambio climático. Este informe presenta los resultados compilados de la modelación de clima realizados por 35 instituciones de diferentes países, bajo un consenso sobre los periodos de simulación (1850-2100), y los escenarios de los factores de alteración del sistema climático, denominados rutas representativas de concentración, o RCP (por sus siglas en inglés: Representative Concentration Paths), que se ilustra en la Figura 1. Cada RCP es definido como un conjunto posible de cambios antrópicos y/o naturales en propiedades del sistema terrestre asociadas principalmente con el balance radiativo del sistema climático, tales como: concentración de aerosoles atmosféricos (volcánicos, sulfatos, etc.), concentración de gases de efecto invernadero, polvo, cambio de cobertura terrestre, ozono (troposféricos y estratosféricos), carbono orgánico, sal marina y radiación solar. Por lo tanto, las trayectorias de forzamiento radiativo no están asociadas con los escenarios socioeconómicos o de emisión únicos, sino son la combinación de diferentes futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales (Angarita, 2014).

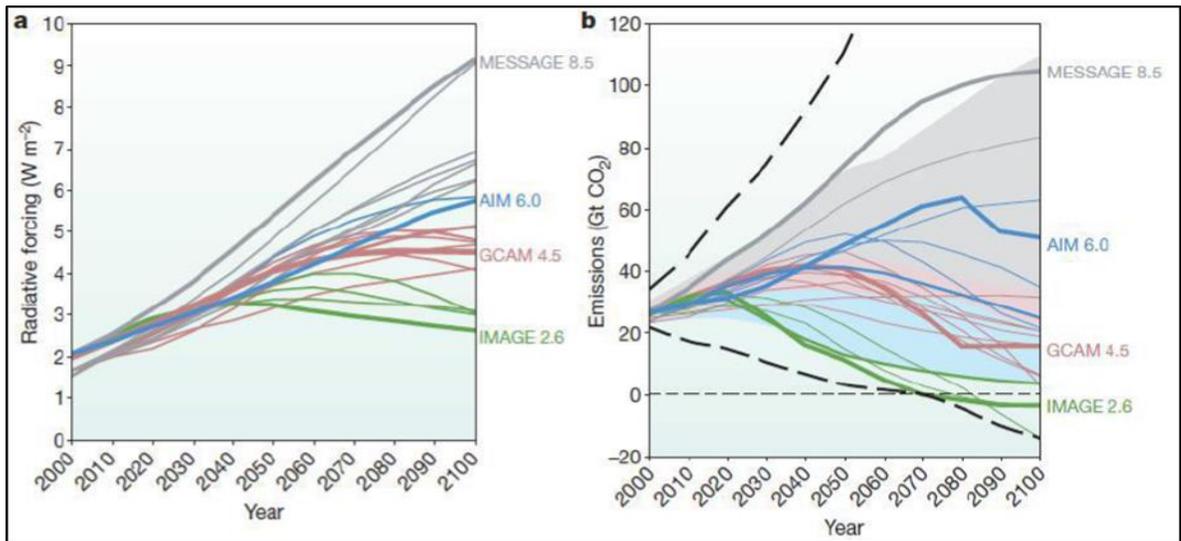


Figura 1. Trayectorias representativas de concentración RCP en términos de a. forzamiento radiativo y b. emisiones de CO₂ de la industria y del consumo energético.

Fuente: Moss et al. 2010

El proyecto CMIP5 pretende promover una herramienta basada en múltiples modelos y escenarios, para ilustrar el rango de los cambios posibles en el clima durante el siglo 21. Los modelos utilizados en el CMIP5 varían desde aquellos que representan solamente la interacción entre el océano y la atmósfera, hasta modelos del sistema climático terrestre que representan además las interacciones de los ciclos biogeoquímicos, la vegetación, capas de hielo, etc. Sin embargo, mediante los escenarios RCP, la investigación del sistema climático global se realiza en la actualidad sobre una base homogénea que permite su posterior comparación y síntesis.

Los modelos CMIP5 son la principal fuente de información disponible actualmente para predecir el clima en horizontes de largo plazo y pueden informar sobre el rango de “futuros posibles” del clima terrestre frente a diferentes cambios naturales o antrópicos, y a su vez, informar los modelos hidrológicos utilizados para representar las condiciones locales en las que las cuencas y los efectos esperados por los cambios en el clima. Sin embargo, la aplicación de los resultados del CMIP5 en la estimación del efecto del cambio climático global sobre los sistemas hidrológicos, presentan varias limitaciones. En primer lugar el nivel de detalle espacial alcanzado por los modelos globales no es suficiente para representar los atributos del clima local. Si bien un modelo de escala global simula los patrones de circulación utilizando una grilla entre 1 a 2 millones de puntos, en la práctica la resolución espacial alcanzada varía entre 1 a 3 grados (aproximadamente 40 a 120 kilómetros en el Ecuador, que equivalen áreas de entre 1600 a 14400 Km²). Esto significa que los modelos solamente proporcionan información “promedio” del clima de la atmósfera libre en grandes áreas de la superficie y no alcanza a representar atributos locales que dependen de las condiciones físicas o bióticas, por ejemplo, características orográficas, patrones de circulación local asociados a la precipitación convectiva, almacenamientos locales, etc.

3.3.1. MODELO WEAP

WEAP ("Water Evaluation And Planning" según la sigla en inglés) fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute, es una herramienta computacional amigable que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos, incorporando valores para la planificación de recursos hídricos y el análisis de políticas del uso del agua.

WEAP posiciona las condiciones del lado de la demanda de agua, tales como patrones de uso del agua, eficiencias de equipos, estrategias de la reutilización, costos, y esquemas de asignación del agua en una misma línea con los temas del lado de la oferta de agua tales como caudal, recursos de agua subterránea, embalses, y transferencia de agua. WEAP también se distingue por su enfoque

integral al simular tanto los componentes naturales (ej. las demandas por evapotranspiración, escorrentía, flujo base, etc.) como los componentes humanos (ej. embalses, bombeo de agua subterránea, plantas hidroeléctricas y otros) de los sistemas de agua, permitiendo el acceso del planificador a una vista más comprensiva de la amplia gama de factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos hídricos para el uso presente y futuro. El resultado es una herramienta eficaz para examinar opciones alternativas del desarrollo y manejo del agua (SEI, 2009).

3.3.1.1. EL PROCESO DE APLICACIÓN DE UN MODELO WEAP

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

- **Definición del estudio:** En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- **Búsqueda de información:** En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
- **Desarrollo del modelo:** En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
- **Calibración:** Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
- **Uso del modelo, y generación de escenarios:** Una vez que el modelo está calibrado se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

La metodología de implementación de un modelo WEAP contempla las etapas mencionadas en la sección anterior. A continuación se describirán brevemente las características esenciales de este trabajo con respecto a cada uno de estos componentes (SEI, 2009).

3.4. CAUDAL ECOLÓGICO

Es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, flora y la fauna de una corriente de agua (resolución 865 de 2004), también puede definirse como aquel caudal que se debe dejar correr en una fuente hídrica después de un aprovechamiento hidráulico (modificación del régimen natural) para mantener las

funciones y dinámicas ecológicas de las diferentes comunidades bióticas presentes en un ecosistema fluvial (Toro, Durango, & Reinoso, 2007).

La evaluación de los caudales ecológicos no sólo es útil en los ríos en los que se han desarrollado o se están desarrollando programas de gestión de recursos hídricos; es muy útil para conocer las necesidades del medio ambiente antes de hacer cualquier plan de desarrollo, de modo que estos flujos puedan ser tomados en cuenta en las primeras etapas del proceso de planificación (O'keeffe & Le Quesne, 2010).

Según la Resolución 865 de 2004, existen diversas metodologías para conocer los caudales ecológicos de una fuente hídrica.

Hidrológicas. Se basan en el comportamiento de los caudales en los sitios de interés. Es necesario el conocimiento de series históricas de caudales.

Hidráulicas. Consideran la conservación del funcionamiento o dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río, es decir que el caudal de reserva que se deje en los distintos tramos permita que el río siga comportándose como tal.

Simulación de los hábitats. Estiman el caudal necesario para la supervivencia de una especie en cierto estado de desarrollo.

Mínimo histórico: El Estudio Nacional del Agua (2.000) a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.

Porcentaje de Descuento: El Ideam ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

Finalmente la suma de la reducción por calidad del agua (25%) más la reducción por caudal ecológico (25%), equivale a la reducción total de la oferta hídrica calculada en el punto 3, para regiones Andina y Caribe (RESOLUCION 865 DE 2004)

Este componente está ligado a las características físico-químicas y bacteriológicas de la corriente hídrica, las cuales indican la mayor o menor afectación de esta por causa de descargas contaminantes (domésticas e industriales), erosión en la cuenca, actividades productivas ejercidas en el río o cerca de él (extracción de material de arrastre, cultivos en las orillas) y todos los factores que contribuyen a la variación de las condiciones de calidad de agua.

Es un parámetro definitivo para la vida acuática, ya que no solo se afecta con la reducción de su volumen (caudales bajos), sino también, cuando sus características físicas, biológicas y químicas están fuera de los valores estándar que definen la calidad para diferentes usos (Toro, Durango, & Reinoso, 2007).

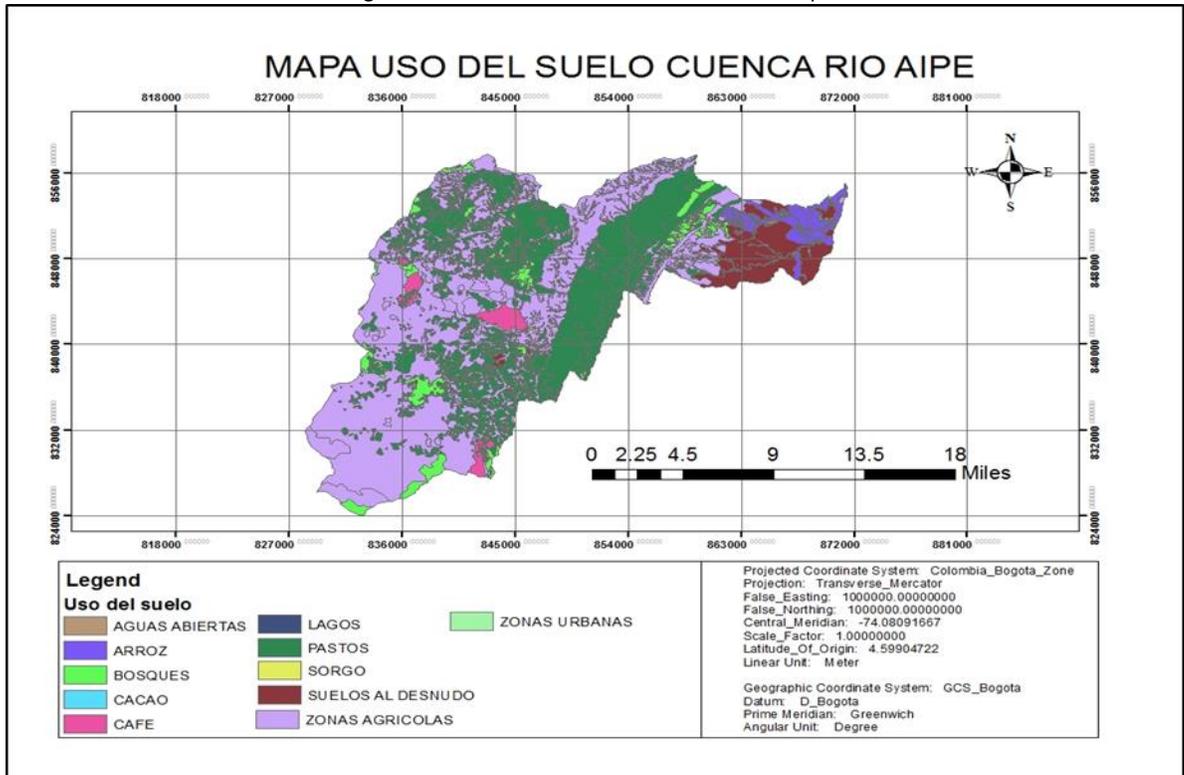
3.4.1. CAUDAL DE ESTIAJE

“Se denomina así a la disminución de los caudales de los cursos fluviales durante las épocas secas debido a la escasez de precipitaciones. También se denomina así al nivel medio más bajo o caudal mínimo de un río u otra corriente al que se da el valor cero y constituye el punto de partida para medir la altura de las aguas. Casi todos los ríos mediterráneos sufren un fuerte estiaje en verano por ello algunos de estos ríos son auténticas ramblas que tienen totalmente secos los cauces durante gran parte del año, a veces durante varios años hasta que una fuerte precipitación aporta algo de caudal” (Romero, 2009).

4.2. Usos del suelo

Para una aproximación más exacta del área de interés se utilizó la información suministrada por la CAM (Corporación Autónoma y Regional del Alto Magdalena), correspondiente a los usos del suelo actualizado al año 2011 y de ésta se obtuvieron las siguientes coberturas del suelo en la cuenca del río Aipe.

Figura 3. Usos del suelo cuenca río Aipe



Fuente: CAM, 2014

5. METODOLOGÍA

Para el logro de los objetivos planteados en el presente proyecto, se desarrollaron tres fases, en las cuales se utilizaron diferentes herramientas. La fase inicial del proyecto fue la fase descriptiva, en la cual se estudiaron las características de la zona de estudio mediante la información cartográfica, climatológica, usos del suelo, población, entre otras que permitieran el análisis de oferta y demanda, para así caracterizar la situación de interés e identificar sus necesidades (Hurtado de Barrera, 2000). Posterior a la descripción de los datos, éstos debieron ser analizados para su interpretación, lo que se logró con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual permite capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georeferenciados, a través de hardware y software (Vila Ortega & Varga, 2008), en este caso se utilizó ArcGis 10.1, completando así la fase analítica, permitiendo juzgar y validar la información para su utilización en la siguiente fase. Finalmente, en la fase proyectiva, se crearon futuros escenarios con los datos ya descritos y analizados, con el fin de proponer alternativas de cambio (Hurtado de Barrera, 2000), como la generación de políticas de Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Entre las herramientas que se usaron se encuentran los modelos de simulación, los cuales permiten una representación simplificada del sistema real cuyo objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo. Abarcan una gran diversidad de problemas y funcionalidades tales como modelado de ríos y cuencas, calidad de aguas, predicción de crecidas, riesgos hidrológicos, etc. (Urciuolo , y otros, 2007). Para tal propósito, el Instituto Ambiental de Estocolmo desarrolló el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés) con el fin de apoyar la gestión de los profesionales encargados de la planificación del recurso hídrico. WEAP también incluye técnicas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica, teniendo en cuenta las variables climáticas, por lo que es ideal para realizar estudios de cambio climático.

5.1. Oferta y demanda hídrica

Teniendo en cuenta la información que se ha mencionado de las corrientes hídricas de las que se surte la población de la cuenca del río Aipe tanto para su consumo como para el riego, se realizó un análisis detallado de cada una de ellas, así como la descripción de los usuarios que captan el recurso de las mismas.

5.1.1. Análisis de la demanda hídrica

La demanda del recurso hídrico en la cuenca se centra principalmente en el abastecimiento del servicio de acueducto, el distrito de riego para los cultivos de la zona y uso pecuario. Para lo cual han sido otorgadas las respectivas concesiones por la CAM, así como se les ha exigido cumplir con requisitos como el caudal ecológico (Tabla 1.). Cabe aclarar que para el desarrollo del proyecto se asumió que la demanda hídrica es igual a la concesión.

Tabla 1. Concesiones otorgadas por la CAM

Uso	Concesión otorgada	Caudal ecológico	Resolución CAM
Acueducto	3,100 lts/seg	465 lts/seg	3408 de 2009
Pastos	1,50 lts/seg	No especificado	3408 de 2009
Sorgo	1,50 lts/seg	No especificado	3408 de 2009
Vacunos	50 lts/seg	No especificado	3408 de 2009
Ovinos y porcinos	10 lts/cab-día	No especificado	3408 de 2009
Aves	0.20 lts/ave-día	No especificado	3408 de 2009

Fuente: Resolución 3408 20 DIC 2009

5.1.2. Análisis de la oferta hídrica

El río Aipe nace en las montañas de San Luis, en su recorrido recoge las aguas de importantes ríos y quebradas, desemboca en la margen izquierda del Río Magdalena, a 5 kilómetros por la vía Aipe – Bogotá. Su cuenca está en el flanco Oriental de la Cordillera Central al noroccidente del departamento del Huila. Abarca un área de 688.9 Km². En él se empezaron a construir los primeros ranchos en la boca de Río Aipe. Sus aguas abastecen el acueducto del pueblo, cuya bocatoma se construyó a 450 mts sobre el nivel del mar para que por gravedad lleguen 1.2 Metros cúbicos de agua por segundo (Consejo Municipal de Aipe, 2012).

El río Cachichí es uno de los principales afluentes del río Aipe y aporta aproximadamente el 50% del caudal total del río Aipe. Este río nace en la parte alta de la cordillera central en jurisdicción del municipio de Neiva y forma parte del límite natural municipal entre Neiva y Aipe y le entrega sus aguas al río Aipe sobre los 650 m.s.n.m. En su recorrido recibe las quebradas Guayabero y San Francisco en jurisdicción de Aipe y las Mangas y Lechalosa en Neiva.

Siendo esta microcuenca parte fundamental del aporte hídrico al río Aipe, debe considerarse como una de la principales microcuencas del municipio, debido especialmente a que está más ligada a la supervisión administrativa de Aipe, lo cual implica que se pueda influir directamente sobre su manejo, recuperación y sostenimiento, con la limitante de que mitad de la cuenca está en jurisdicción del

municipio de Neiva, y se tendrá que depender de lo que este municipio pueda hacer para su recuperación. De otro lado para su planeación se podría pensar en un convenio entre los dos municipios.

Este río ocupa un área de 10451,7 hectáreas que corresponde al 12,79% del total del territorio. En su recorrido recibe alguna carga de contaminación por aguas servidas de Praga y por el beneficio del café desde la vereda Castel hacia la parte alta, desde los 1300 m.s.n.m. En su cuenca se presentan cultivos de café, yuca, plátano y pastos naturales para la actividad ganadera.

Por las características topográficas abruptas de la cuenca, el posible uso del agua es para el consumo humano en las partes alta y media desde la vereda, Castel hacia arriba, con acueductos individuales y veredales. Hay dificultad para utilizar el agua para riego por la topografía circundante (FUNDISPRO & CAM , 2009).

La cuenca del río Aipe cuenca con otros afluentes como la quebrada Tambilla, El Chocho, El Conjeo, El Junquito, Guayabero, Jeronimo, La Sardina, Muchubi, Aguache, San Francisco, Pipilicua, Mangas, Aipecito, Carbonera, El Jugal, Los Organos, Tinail y Ventanas.

5.2. Modelo WEAP

La interfaz gráfica usada por WEAP permite basarse en SIG para generar el esquema del territorio a estudiar, teniendo en cuenta diferentes elementos como los ríos, elementos construidos y otros componentes de interés a lo largo del río, entre ellos, los “*Demand Sites*” que representan los sitios de demanda a los que se les ha otorgado concesiones de agua como centros poblados o sistemas de riego, por ejemplo; así mismo, se encuentran los “*Catchment*” que representan las áreas de captación a lo largo de las corrientes, a los que se les suministra la información climatológica y de usos de suelo correspondiente para la simulación (Castro Giraldo, 2014).

En los “*Catchments*” tienen lugar procesos como evapotranspiración, escorrentía, infiltración y la demanda de riego. Los cuales WEAP permite modelar mediante cuatro métodos a elegir: (1) método de lluvia escorrentía (método de coeficiente simplificado), (2) método de demanda de irrigación (método de coeficiente simplificado), (3) método de lluvia escorrentía (método de la humedad del suelo) y (4) método MABIA. De los anteriores, el método de lluvia escorrentía con la humedad del suelo es el más complejo dado que representa los “*Catchments*” en dos capas de suelo (Figura 3), simulando en la superior la evapotranspiración, teniendo en cuenta los parámetros climatológicos y de usos del suelo y en la inferior, el flujo base del río y los cambios en la humedad del suelo (Castro Giraldo, 2014).

A continuación se describen las variables de uso de suelo que considera este modelo:

- Coeficiente del cultivo (K_c): es relativo a cada cultivo y tipo de suelo.
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w): capacidad de almacenar agua efectiva en la capa superior del suelo (representada en mm).
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w): capacidad de almacenar agua efectiva en la zona más profunda del suelo (balde 2), representada en mm. Este parámetro es un valor único para el "Catchment" y no varía según el tipo de suelo.
- Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): es usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Está relacionado con factores como el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (entre 0,1 y 10). Este parámetro puede variar entre los diferentes tipos de suelo.
- Conductividad de zona de raíces (K_s): tasa de conductividad en la zona superior (balde 1) con total saturación, que se dividirá según la dirección de flujo preferida, entre el flujo subsuperficial y el flujo de la capa inferior del suelo. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Conductividad de zona profunda (K_d): tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la zona profunda (balde 2) con saturación total, que controla la transmisión del caudal base. Esta variable es un valor único para el "Catchment" y no varía según el tipo de suelo.
- Dirección preferencial de flujo (f): es usado para la división del flujo de la zona de raíces entre el flujo subsuperficial y el flujo hacia la parte más baja del suelo (balde 2) o las aguas subterráneas. Si el valor es 1.0 = 100% horizontal y si es 0 = 100% flujo vertical. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Nivel de humedad en la zona de raíces (Z_1): el valor de la inicial 1 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona de conductividad de las raíces.
- Nivel de humedad en la zona profunda (Z_2): el valor de la inicial 2 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona del suelo más profunda. Este parámetro no varía según el tipo de suelo.

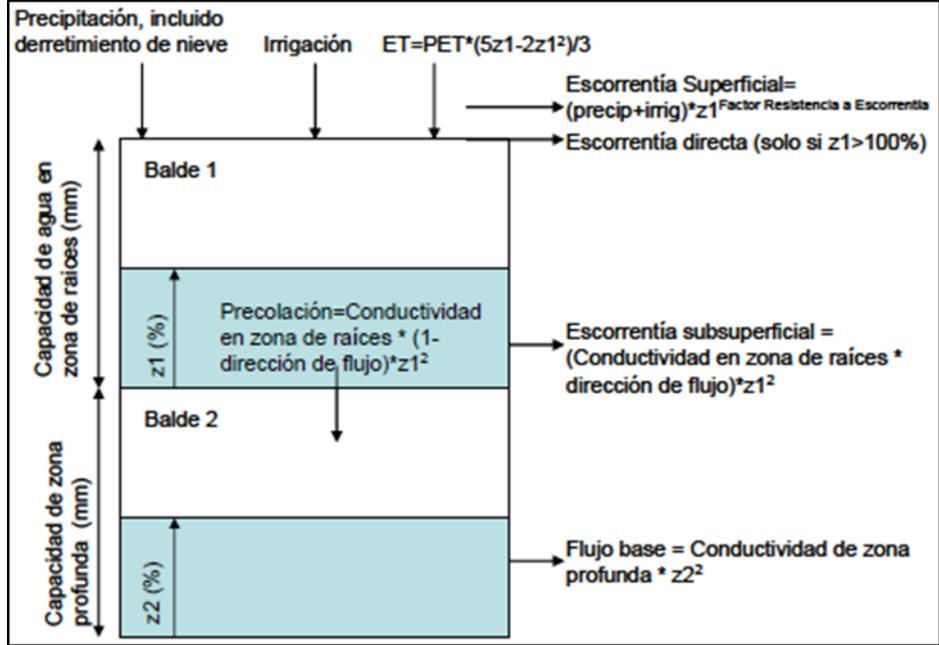


Figura 4. Diagrama conceptual de elementos hidrológicos modelados en WEAP
Fuente: Stockholm Environment Institute, 2009

En la figura 4, se observa un esquema de los componentes de modelo hidrológico WEAP, donde el balance se realiza entre los estanques que representan la zona de raíces y zona profunda. Las ecuaciones de balance de masa para cada estanque se presentan, en las ecuaciones 1 y 2.

- Estanque superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2 \quad \text{Ecu.1}$$

- Estanque inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_f)k_s z_{2,j}^2 \quad \text{Ecu. 2}$$

En el estanque superior, los términos de izquierda a derecha, representan: cambio en la humedad del suelo, precipitación efectiva, evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo intermedio y percolación.

Los términos de la ecuación de balance representan:

Swj: Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.

Z1j: Nivel de humedad en la zona de raíces.

Pe: Precipitación efectiva, incluye derretimiento de nieve y riego.

PET: Evaporación potencial cultivo referencia, aproximación de Penman-Montieth.
Kc,j: Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.
RRFj: Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo.
Ks: Conductividad de zonas de raíces.
Ff: Dirección preferencial de flujo.
Dwj: Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.
Z2,j: Nivel de humedad en la zona profunda.
kd: Conductividad de zona profunda.

5.2.1. Delimitación de catchments en SIG

Las subcuencas se delimitaron en ciertos puntos de interés hidrológico donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros.

Estos puntos son:

- Confluencia de ríos.
- Puntos de aforo de caudales.
- Reservorios existentes (y proyectados).
- Puntos de inicio y de terminación de canales de derivación de agua. Usando el software Arcgis 10.1 se logró realizar la delimitación de las subcuencas donde el punto de interés fue la confluencia de ríos. La Figura 4 muestra la delimitación inicial a nivel de subcuencas. Esta decisión se tomaba en función de la existencia de puntos de interés. Adicionalmente se subdividieron las subcuencas de acuerdo con sus capas de elevación. Para este proyecto, bandas de elevación, para obtener áreas de captación que son espacialmente uniformes respecto a sus características topográficas y climatológicas. Estos catchments constituyen las unidades hidrológicas sobre los cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. Los catchments además se pueden subdividir dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos.

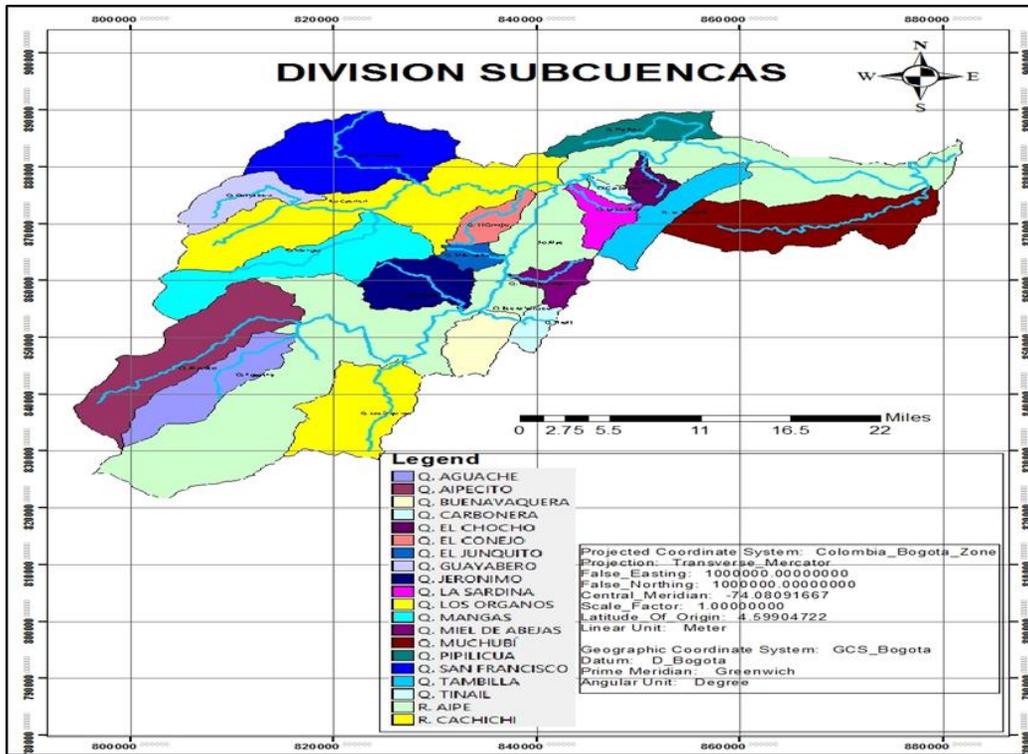


Figura 5. División subcuencas cuenca río Aipe

Fuente: CAM, 2014

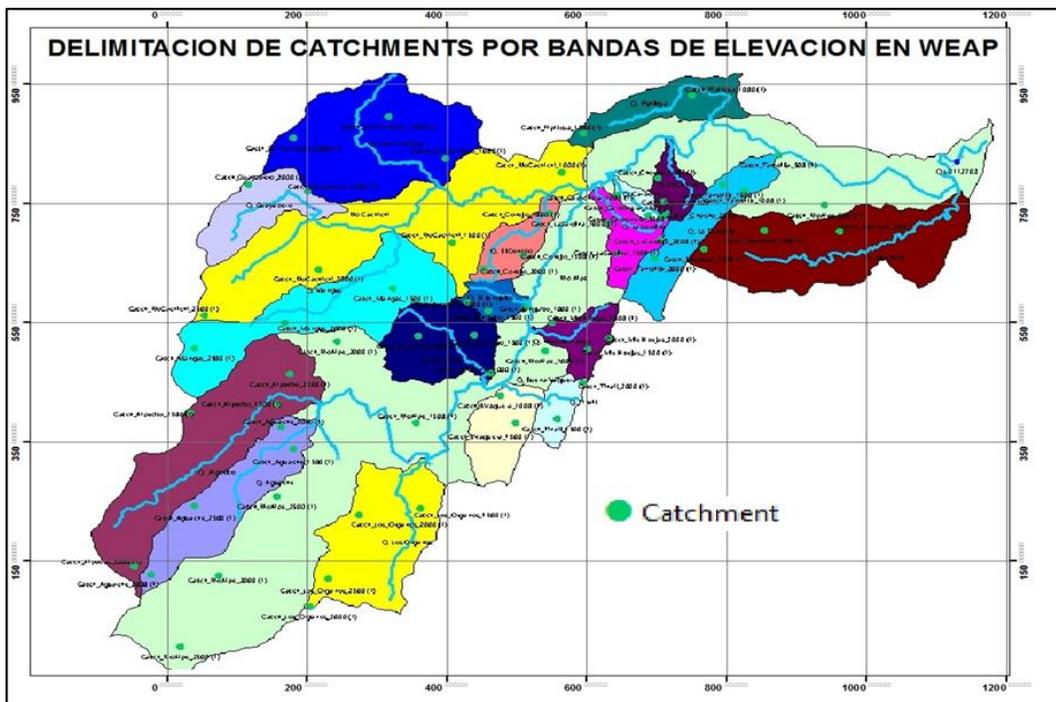


Figura 6. Delimitación de catchments por bandas de elevación en WEAP

Fuente: CAM, 2014

5.2.2. Caracterización de cobertura vegetal

De acuerdo con la información obtenida de las coberturas de suelo en SIG (Figura 2), también se realizó un análisis de uso de suelo para cada una de las bandas de elevación por subcuenca. Es importante analizar el número de categorías de la cobertura original y reducirlo si es necesario, para disminuir el esfuerzo en el desarrollo y la calibración del modelo. Por ejemplo, la equivalencia entre las categorías originales y finales usadas en el modelo del Río Aipe se muestra en la Tabla 2. La cobertura de vegetación se intersectó con la cobertura SIG de las bandas de elevación por subcuenca para finalmente obtener la distribución espacial de coberturas en la cuenca.

Tabla 2. Uso de suelo original y agrupación utilizada en el modelo del río Aipe

Uso del suelo original	Uso del suelo utilizado en el modelo
Ríos	Aguas abiertas
Arroz	Arroz
Arbustal denso	Bosques
Bosque fragmentado de pastos y cultivos	
Cacao	Cacao
Café	Café
Embalses	Lagos
Estanque para acuicultura continental	
Pastos arbolados	
Pastos limpios	
Pastos enmalezados	Pastos
Herbazal abierto	
Mosaico de pastos con espacios naturales	
Sorgo	Sorgo
Zonas quemadas	Suelos al desnudo
Degradados	
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Zonas agrícolas
Zonas Industriales	Zonas urbanas

Fuente: Elaboración propia a partir de la información suministrada por la CAM

A continuación los catchments con su respectiva área en Km² y la repartición de los usos del suelo dentro de la misma.

Tabla 3. Catchments con su respectivo uso del suelo

Suma de Area_Kn Etiquetas de co	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	Total gen
Q. AGUACHE			0.60685	14.2262	9.23414	2.92257		26.9897
BOSQUES			0.1189966	2.9566081	0.094114			3.1697187
PASTOS			0.0728974	1.1669526	1.0223809	0.0030828		2.2653137
SUELOS DESNUDOS				0.1399489				0.1399489
ZONAS AGRICOLAS			0.4149544	9.962649	8.1176471	2.9194854		21.414736
Q. AIPECITO			1.18002	23.246	23.6926	0.52607		48.6447
BOSQUES			0.1029222	0.8896356	1.3509005			2.3434583
PASTOS			0.6527684	7.0557872	1.6358609			9.3444166
ZONAS AGRICOLAS			0.4243332	15.300623	20.705798	0.5260653		36.95682
Q. BUENAYAQUERA	1.46042	12.562						14.0224
BOSQUES	0.0726026	2.2238781						2.2964807
PASTOS	0.0022564	2.314188						2.3164444
ZONAS AGRICOLAS	1.3855611	8.0239566						9.4095177
Q. CARBONERA	2.33029	0.54162	0.00364					2.87555
BOSQUES	1.4774962	0.4173614	0.0036441					1.8985018
PASTOS	0.2512836	0.1213271						0.3726108
ZONAS AGRICOLAS	0.6015061	0.0029319						0.6044379
Q. EL CHOCHO	3.3884	2.61106	0.32155					6.32101
BOSQUES	3.3535003	2.6110649	0.3215455					6.2861107
ZONAS AGRICOLAS	0.034896							0.034896
Q. EL CONEJO	1.68833	6.82763	0.90164					9.4176
BOSQUES	0.1584818	1.1828991	0.2228283					1.5642092
ZONAS AGRICOLAS	1.5298522	5.6447266	0.6788071					7.8533859
Q. EL JUNQUITO	0.21447	3.72593	1.336					5.27639
BOSQUES	0.0559851	1.17598	1.0421997					2.2741647
ZONAS AGRICOLAS	0.1584842	2.5499456	0.2937989					3.0022288
Q. GUAYABERO		6.0289	10.0149					16.0438
BOSQUES		2.9023418	2.3926668					5.2950087
CAFE		0.0121094	0.0468172					0.0589266
PASTOS		2.3082467	2.4657453					4.773992
ZONAS AGRICOLAS		0.8062023	5.1096578					5.9158601
Q. JERONIMO	0.08379	11.1652	9.92319					21.1721
BOSQUES	0.0069725	2.4810919	1.7966625					4.2847268
CAFE		2.5185004	3.4485194					5.9670198
PASTOS	0.0317913	0.5383685	1.5984407					2.1686005
ZONAS AGRICOLAS	0.0450232	5.6272057	3.0795656					8.7517946
Q. LA SARDINA	3.1032	6.07863	0.63406					9.8159
BOSQUES	0.2276175	1.6274435	0.3155819					2.1706428
PASTOS	0.3520869	0.2776493	0.0389068					0.668643
ZONAS AGRICOLAS	2.523495	4.1735417	0.2795731					6.9766099

Q. LOS ORGANOS	15.3652	15.2098	4.63436	0.05875	35.2681
BOSQUES	4.6968668	2.4357525	0.9646118	0.0587536	8.1559847
CAFE	0.4366726	2.709227			3.1458996
PASTOS	9.2657673	4.1328907	0.2190389		13.617697
SUELOS DESNUDOS	0.1237784	0.0732102			0.1969887
ZONAS AGRICOLAS	0.784404	5.8587051	3.4507119		10.093821
ZONAS URBANAS	0.0577391				0.0577391
Q. MANGAS	11.7123	22.9052	5.54309		40.1606
BOSQUES	1.4260558	1.8855216	0.1587977		3.4703751
CAFE		0.658783	0.0496729		0.7084559
PASTOS	1.4634145	2.6463072	0.5692405		4.6789622
SUELOS DESNUDOS		0.0168536			0.0168536
ZONAS AGRICOLAS	8.8228413	17.697709	4.7653775		31.285928
Q. MIEL DE ABEJAS	0.8015	6.89067	0.83346		8.52563
BOSQUES	0.0436392		0.0297138		0.073353
PASTOS		0.2102378	0.264123		0.4743608
ZONAS AGRICOLAS	0.7578577	6.6804294	0.5396259		7.977913
Q. MUCHUB-	44.83933408	15.3033	1.84468		61.9873
ARROZ	5.133403071				5.1334031
BOSQUES	1.284088369	2.0113714	0.7299766		4.0254364
PASTOS	0.007506171	0.963904	0.1712651		1.1426753
SUELOS DESNUI	38.40462992	4.7037873			43.108417
ZONAS AGRICOLAS		7.6242455	0.94344		8.5676855
ZONAS URBAN/	0.009706543				0.0097065
Q. PIPILICUA	9.29926	6.08729			15.3865
BOSQUES	4.5456206	1.3262661			5.8718867
SUELOS DESNUDOS	0.0197349				0.0197349
ZONAS AGRICOLAS	4.7339022	4.7610253			9.4949275
Q. SAN FRANCISCO	1.94672	33.0995	13.4884		48.5346
BOSQUES	0.6185261	9.0128832	5.1507288		14.782138
PASTOS	0.1019469	9.8884729	3.0304885		13.020908
ZONAS AGRICOLAS	1.2262491	14.104136	5.3071894		20.637574
ZONAS URBANAS		0.0940182			0.0940182
Q. TAMBILLA	0.01450376	4.12673	10.6041	3.54855	18.2939
AGUAS ABIERT.	0.002525835				0.0025258
BOSQUES		2.3185914	7.4137427	2.5147335	12.247068
PASTOS			0.8020807	0.8659531	1.6680338
SUELOS DESNUDOS		0.0084807	0.0430745		0.0515552
ZONAS AGRICO	0.011977925	1.7996533	2.3451991	0.1678633	4.3246936
Q. TINAIL			6.00874	0.13293	6.14167
BOSQUES			0.7346693	0.0006497	0.735319
PASTOS			0.1198708	0.0088489	0.1287197
ZONAS AGRICOLAS			5.154199	0.1234335	5.2776325
R. AIPE	33.9636042	51.3272	55.4898	33.8608	32.253
AGUAS ABIERT.	0.64570613	0.0757908			0.721497
ARROZ	17.29184357	2.5178861			19.80973
BOSQUES	0.841989095	19.627315	14.224719	5.4542351	44.863286
CACAO	0.258903595				0.2589036
CAFE				0.0379587	0.0379587
LAGOS	0.802582595	0.367095	0.0188865		1.188564
PASTOS	0.150139199	0.4303751	17.223018	9.0324942	28.662188
SORGO	0.042829159			1.8261616	0.0428292
SUELOS DESNUI	13.2538832	3.2069295	0.9486665	0.2183811	17.639237
ZONAS AGRICO	0.675727664	25.101805	23.074492	19.117735	107.02034
R. CACHICHI	11.3126	40.2981	19.9177	0.20883	71.7372
BOSQUES		2.2399867	6.749327	1.9249738	10.914287
CAFE				0.803861	0.803861
PASTOS		0.2568682	5.3636497	2.4600584	8.0805762
SUELOS DESNUDOS				0.0289959	0.0289959
ZONAS AGRICOLAS		8.8157398	28.18509	14.699843	51.909502
Total general	78.81744204	106.386	238.728	170.504	75.566
					16.7874
					0.07018
					686.859

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel 2013

En WEAP, desde cada uno de los Catchments (puntos verdes en el esquema de WEAP) se desprende una línea punteada de color azul claro (líneas de escorrentía/infiltración) hacia la corriente que se indique como receptora de la escorrentía del mismo. De igual forma, el esquema se completa con los puntos rojos que se observan, los cuales corresponden a los sitios de demanda; las líneas de color verde que se dirigen desde las corrientes a los sitios de demanda, que son las líneas de transmisión que corresponden a las captaciones, y finalmente, las figuras de color púrpura ubicadas justo antes de las líneas de transmisión, que corresponden a los caudales ecológicos.

5.2.3. Nodos de demanda Urbana

Para establecer la demanda urbana se consideró la información proveniente de censos disponibles. Utilizando la ecuación (Ecu 1) del Método Geométrico del capítulo B del RAS 2000, se determinó la población efectiva para cada año usando como datos de entrada la tasa de crecimiento, los años de proyección y el número de usuarios. Se encontraron tres centros urbanos ubicados en las cuencas San Francisco, los Órganos y la del acueducto de Aipe.

Se encuentran 3 centros poblados o nodos de demandas urbanas los cuales están en las sub-cuenca San Francisco, Los Órganos y el Alcantarillado municipal de Aipe (Figura 7).

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{Tf - Tuc} \quad \text{Ecu.3}$$

Donde:

Pf = Población futura

Puc = Numero de usuario*4

r = Tasa de crecimiento anual en forma decimal

Tf = Año inicial

Tuc = Año final

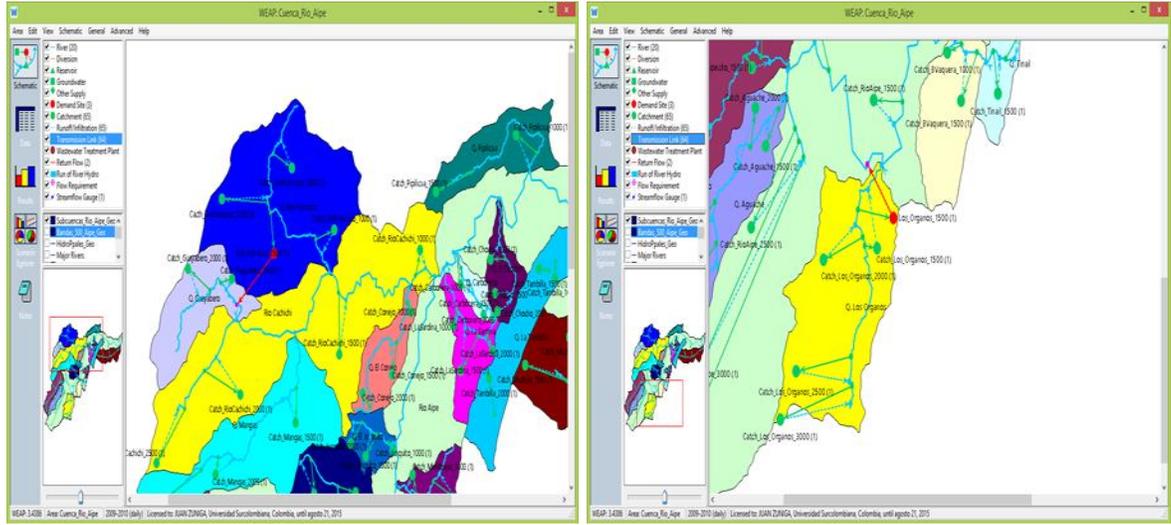


Figura 7. Modelo conceptual, Sitios de demanda "Demand Site"

La tabla 4 muestra los componentes que se trabajan en el modelo WEAP con su respectiva función.

Tabla 4. Componentes del modelo

Componente WEAP	Cantidad	Función
Ríos (River)	20	Representación gráfica de las fuentes hídricas utilizadas en el modelo.
Sitios de demanda (Demand Site)	2	Representan los usuarios que se abastecen de los servicios de acueducto y riego en la zona.
Catchment	65	Áreas de captación definidas teniendo en cuenta los nacimientos de las corrientes hídricas, las confluencias de las corrientes.
Línea de Escorrentía/Infiltración	65	Indican hacia que corriente hídrica se dirige las aguas por los procesos de infiltración y/o escorrentía.
Línea de Transmisión (Transmission Link)	64	Representan los flujos de caudal que son dirigidos de las bocatomas a los Sitios de demanda.
Medidor de caudal (Streamflow Gauge)	1	Se utilizó para introducir al modelo los valores de caudal en campo para compararlos con los modelados.

5.2.4. Climatología

Para la elaboración del modelo se procesaron los datos climáticos conseguidos en la etapa de búsqueda de información y asociarlos con los catchments.

5.2.4.1. Precipitación

La base de datos que ha sido otorgada para la realización del presente proyecto está a nivel diario y va desde el año 1970, siendo las 12 estaciones de la siguiente tabla las que tienen más área de influencia. Esto se realizó mediante Polígonos de Thiessen. Cinco (5) de las estaciones que se han tomado en cuenta esta dentro de los límites de la cuenca.

La distribución de las estaciones que miden precipitación en la cuenca está dada de la siguiente manera.

Tabla 5. Estaciones con área de influencia según Polígonos de Thiessen

Nombre Estación	Clase	Localización	Altura (m.s.n.m)
El Carmen	MET	3° 0' 25.7" N 75° 33' 33.1" W	2250
Casa de Zinc	MET	3° 17' 19.4" N 75° 35' 26.9" W	1700
Gaitana	MET	3° 5' 41.1" N 75° 40' 38.6" W	1500
La Julia	MET	3° 5' 55.6" N 75° 31' 48.1" W	1691
Órganos	MET	3° 7' 15" N 75° 31' 48.1" W	800
Hacienda Pérez	MET	3° 14' 36.8" N 75° 15' 21.4" W	450
Potrerito	MET	3° 8' 27.9" N 75° 22' 46.1" W	850
Praga	MET	3° 16' 6.9" N 75° 29' 26.4" W	1085
Rioclaro	MET	3° 8' 8" N 75° 39' 3.8" W	2230
San Luis	MET	3° 4' 50.3" N 75° 29' 4.8" W	1140
San Pedro	MET	3° 15' 0" N 75° 27' 0" W	850
La Yeguera	MET	3° 18' 19.2" N 75° 12' 2.8" W	400

Fuente: elaboración propia

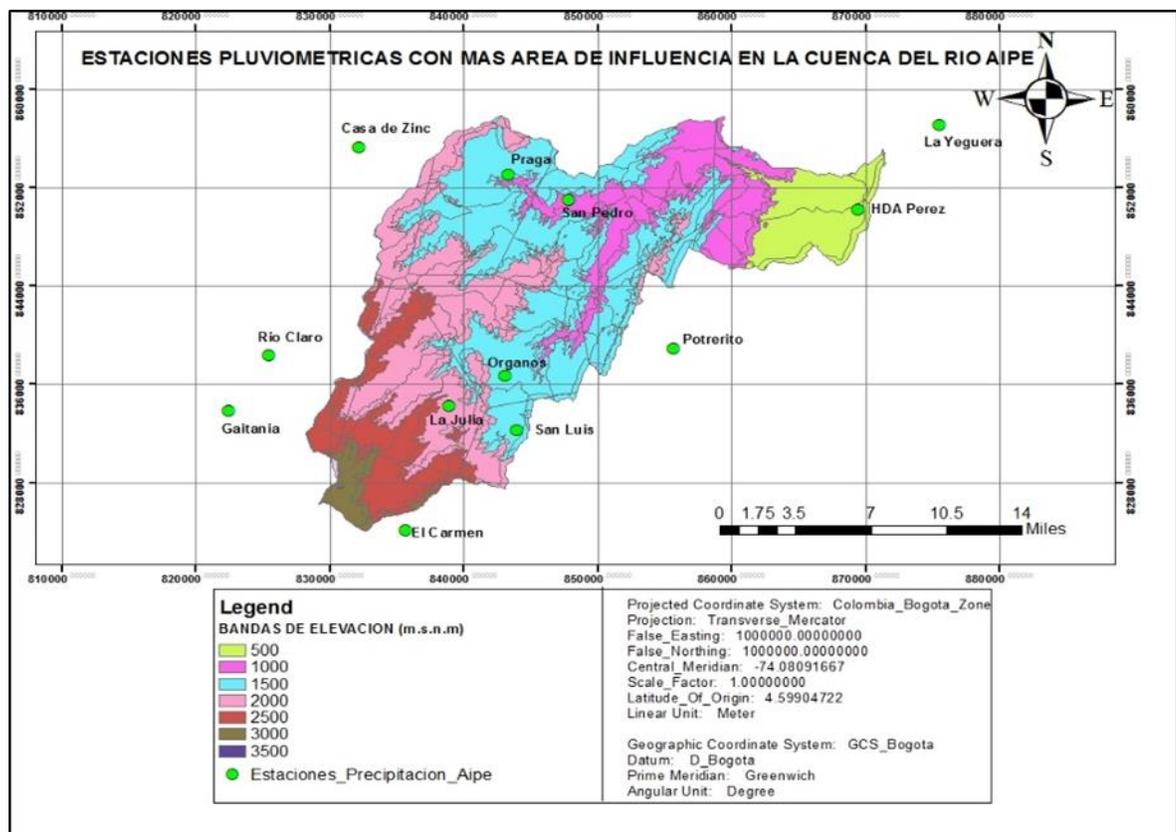


Figura 8. Estaciones pluviométricas con más área de influencia
Fuente: SIG, 2014

Los datos históricos de precipitación se afectaron por un factor con el fin de conocer el comportamiento de este parámetro a diferentes bandas de elevación. A diferencia del parámetro temperatura que su comportamiento es lineal, o sea, a mayor altura menor temperatura.

Para realizar este factor, primero se realizó por medio de Microsoft Excel un porcentaje de influencia de cada cuenca para cada catchment y saber su precipitación anual (Tabla 6).

Por medio del comando Zonal Statistics del software Arcgis 10.1 se sacó la precipitación media de los catchments.

5.2.4.2. Temperatura

Los datos de temperatura están disponibles a nivel diario. En la cuenca existen solamente 2 estaciones de este parámetro con mayor área de influencia. Estas estaciones son la Estación San Alfonso, localizada en el municipio de Villavieja y la Estación Santa María, localizada en el municipio de Santa María. La información corresponde a 34 años de registro (1976-2010).

Debido a la distribución espacial y temporal de la temperatura, se consideró que es suficiente una extrapolación por altura de la información de temperatura proveniente de un grupo de estaciones representativas dentro de la cuenca. El gradiente de temperatura con la altura se estimó considerando los valores de temperatura promedio para estaciones ubicadas a diferentes elevaciones. La Figura 8 presenta dicha relación para estaciones localizadas en la cuenca del río Aipe. Considerando dos estaciones índices para la cuenca (ubicadas a diferentes alturas) y la altura de cada una de las bandas de elevación de cada subcuenca se pueden derivar series de tiempo de temperatura que toman como base la serie de tiempo histórica de las estaciones índices y la diferencia de altura entre las bandas y la ubicación de las estaciones (ver Figura 9).

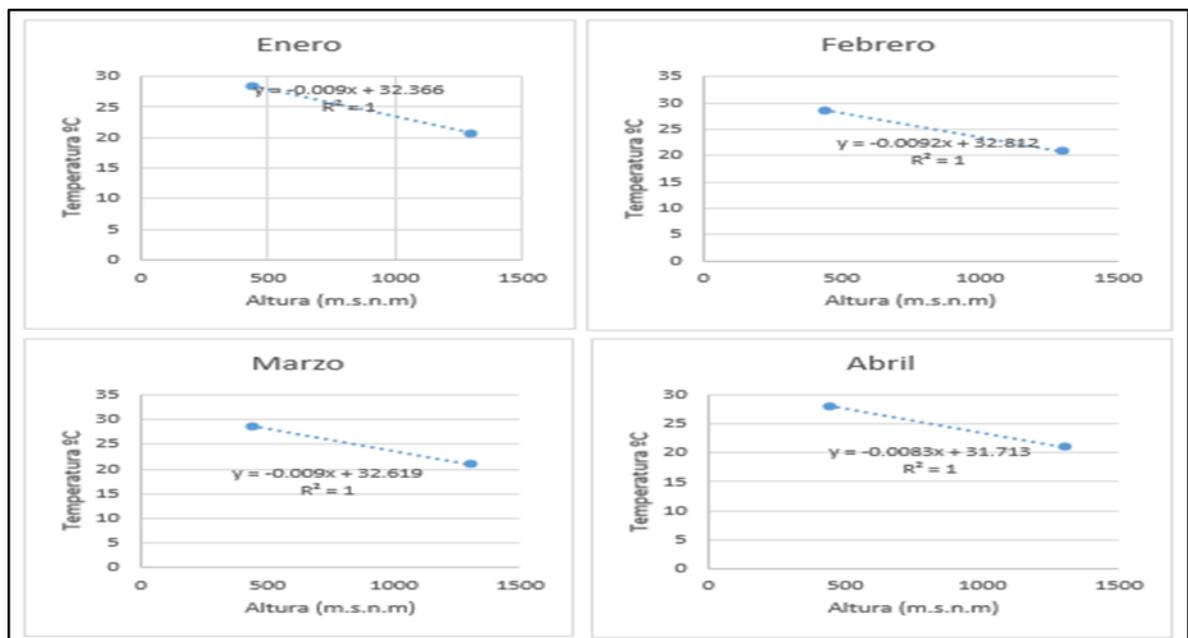


Figura 9. Relación Temperatura-Altura (para cada mes)

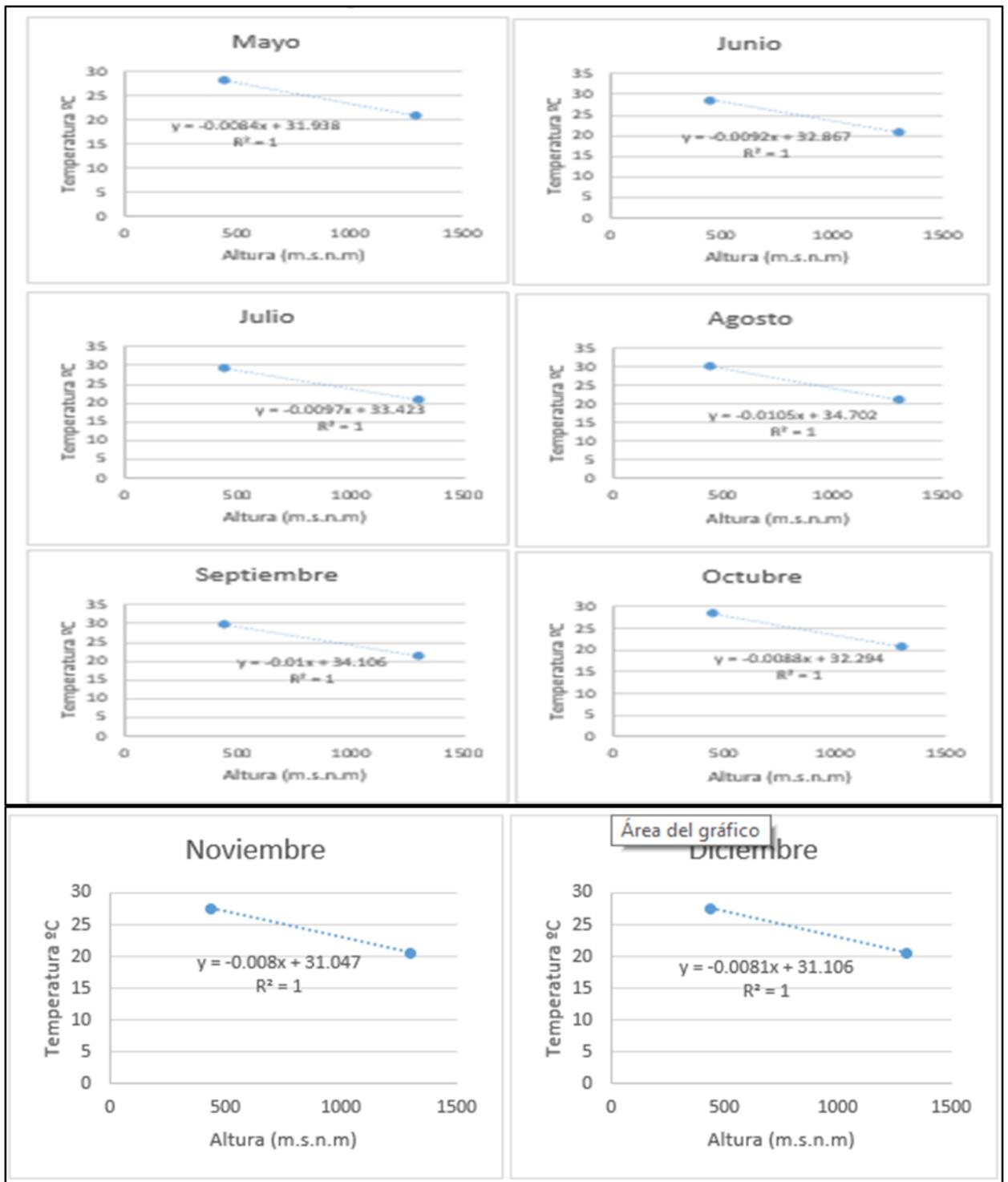


Figura 9. Continuación

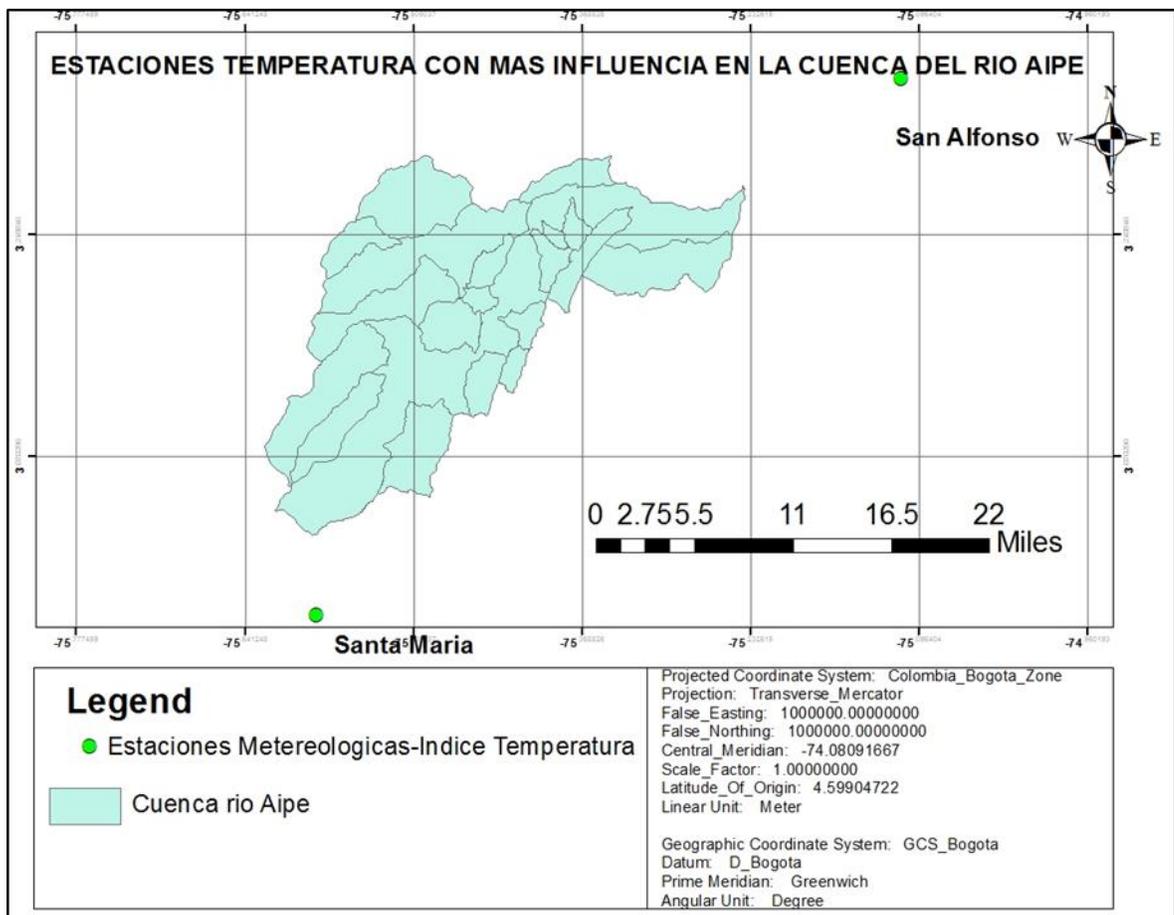


Figura 10. Estaciones Meteorológicas Índice-Temperatura cuenca río Aipe
 Fuente: SIG, 2014

A continuación se presenta una forma de usar los datos de temperatura cuando estos han sido afectados por el gradiente para incorporarlos al modelo WEAP. Se muestra la manera en que se ha distribuido esta variable en el modelo WEAP de la Cuenca del Río Aipe. La temperatura de cada catchment de este modelo está dada por la ecuación:

`ReadFromFile(SERIES\SERIES_TS_DIARIO.csv, 34, , Average)` (**Ecu 3**)

Donde,

`Read From File` es la función en WEAP para leer los datos de archivo (Figura 10)

`SERIES\SERIES_TS_DIARIO.csv, 34` corresponde al archivo donde se encuentran los datos de temperatura de la estación base y el 34 se refiere a la columna donde se encuentran los datos dentro del archivo.

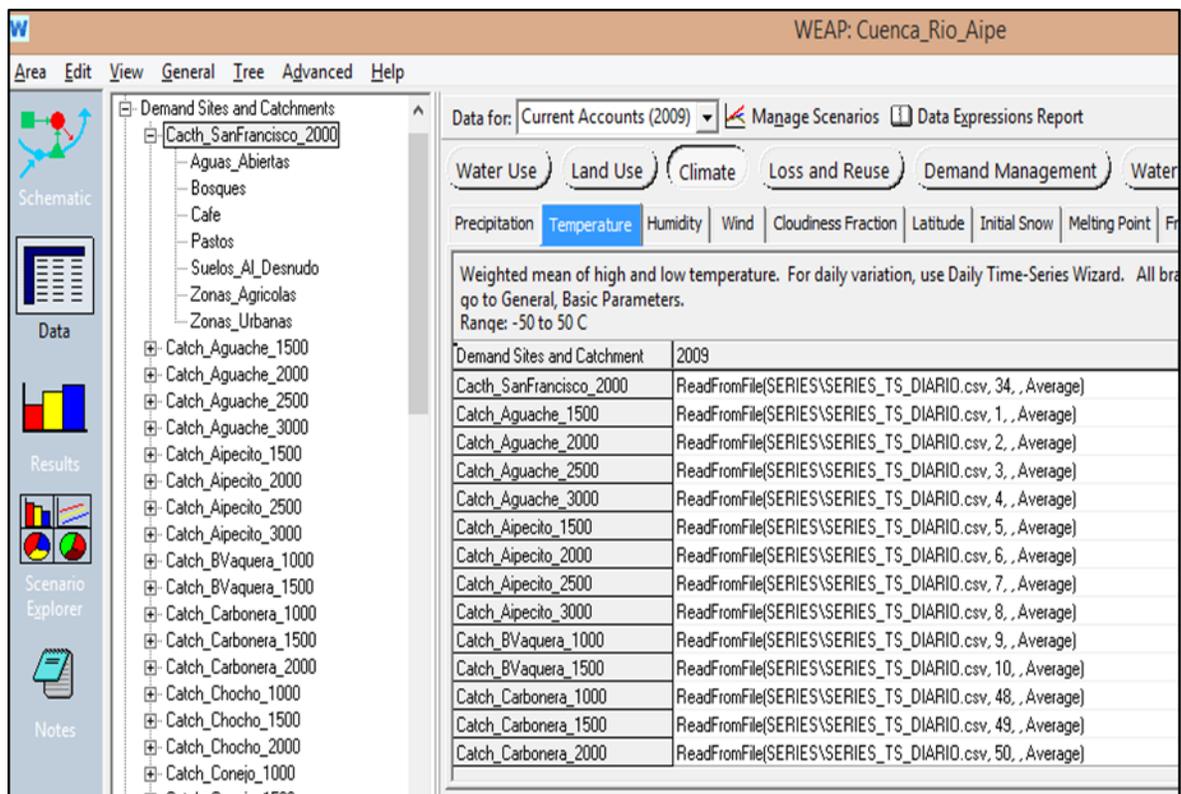


Figura 11. Vista en WEAP con ecuaciones Read From File para temperatura

5.2.4.3. Humedad relativa, velocidad del viento y latitud

La asignación de las variables humedad relativa y velocidad del viento se tomaron de la estación San Alfonso ya que la cuenca no cuenta con estaciones que contengan estas variables. También se tomaron los datos de dicha estación porque tiene semejanza con los parámetros climatológicos.

6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1. Calibración y validación

Para la calibración de este modelo se empleó el método de prueba y error, el cual es el más utilizado y usualmente recomendando. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador, conociendo la dinámica del modelo.

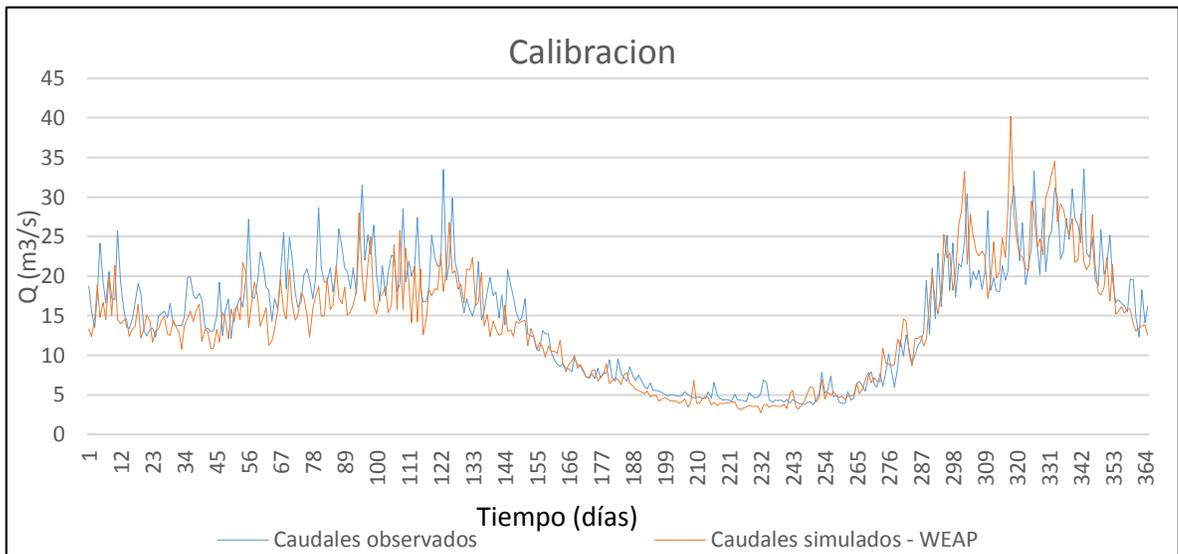


Figura 12. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la cuenca del río Aipe mediante WEAP

La calibración se realizó haciendo uso del componente de WEAP denominado “Streamflow Gauge”, el cual permite, entre otras cosas, observar en la gráfica de los resultados el caudal modelado y el medido en campo en la estación 2113703 Puente Carretera (1980-2001) (Figura 12). En la que se observa el caudal correspondiente a los años 1980 a 2011 por ser este, en el que se registra la mayor cantidad de datos confiables.

Una vez calibrado el modelo se procede a la validación del mismo con el 30% de los datos (periodo de 2002-2011). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 13, donde se comprueba un buen ajuste entre datos simulados y observados.

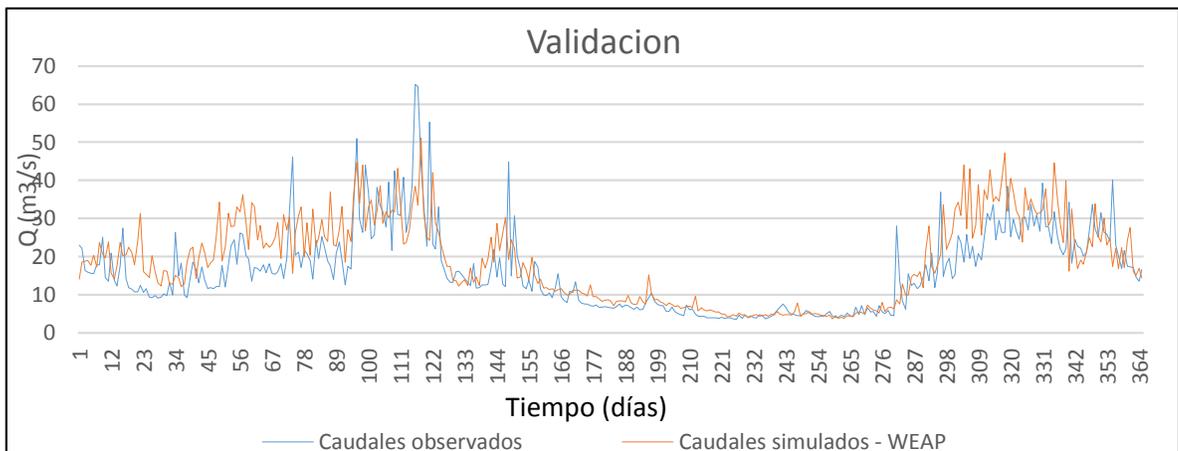


Figura 13. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la cuenca del río Aipe mediante WEAP

La calibración y la validación fueron evaluadas con la métrica del coeficiente de determinación, denominado R^2 cuyo principal objetivo es establecer una correlación confiable entre los valores simulados y observados. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados, que pueden explicarse por el modelo.

La métrica de desempeño aplicada al modelo hidrológico del río Aipe para la calibración y validación muestra una buena correlación entre los caudales simulados y observados en la estación analizada. El coeficiente de determinación para la calibración $R^2 = 0.75$, muestra que el 75% de los datos son predichos por el modelo, mientras el 25% restante son incertidumbres mientras que para la validación $R^2 = 0.57$ (Figura 14 y 15), lo que indica una relación positiva fuerte entre los caudales observados y simulados de los modelo. Comparado con el proyecto “Evaluación del efecto de los escenarios de cambio climático sobre el recurso hídrico en la cuenca del río Aipe mediante modelos hidrológicos” (Romero, *et al.*, 2015) donde se obtiene un $R^2 = 0.76$ para la calibración y $R^2 = 0.89$ para la validación con los modelos Thornthwaite y Thomas en la cuenca del río Aipe, se observa un mayor ajuste en estos dos modelos que en el modelo WEAP, debido a que son modelos mensuales a diferencia del modelo WEAP que se realizó a escala diaria.

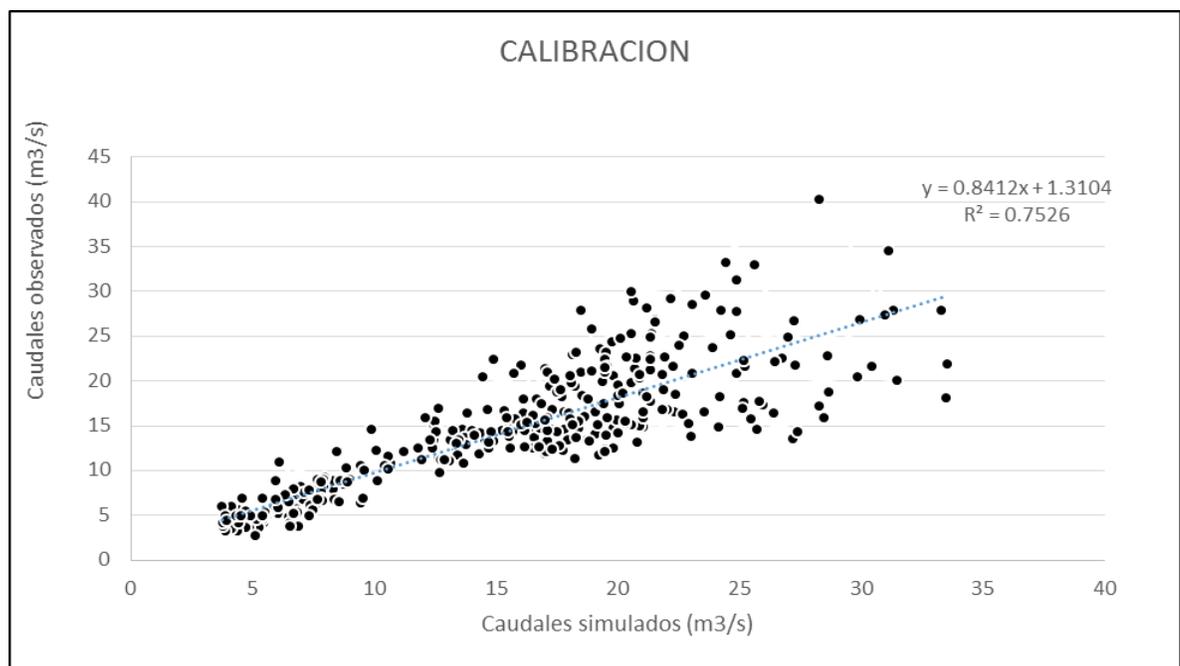


Figura 14. Coeficiente de determinación (R^2) de los caudales simulados y observados para el periodo de calibración

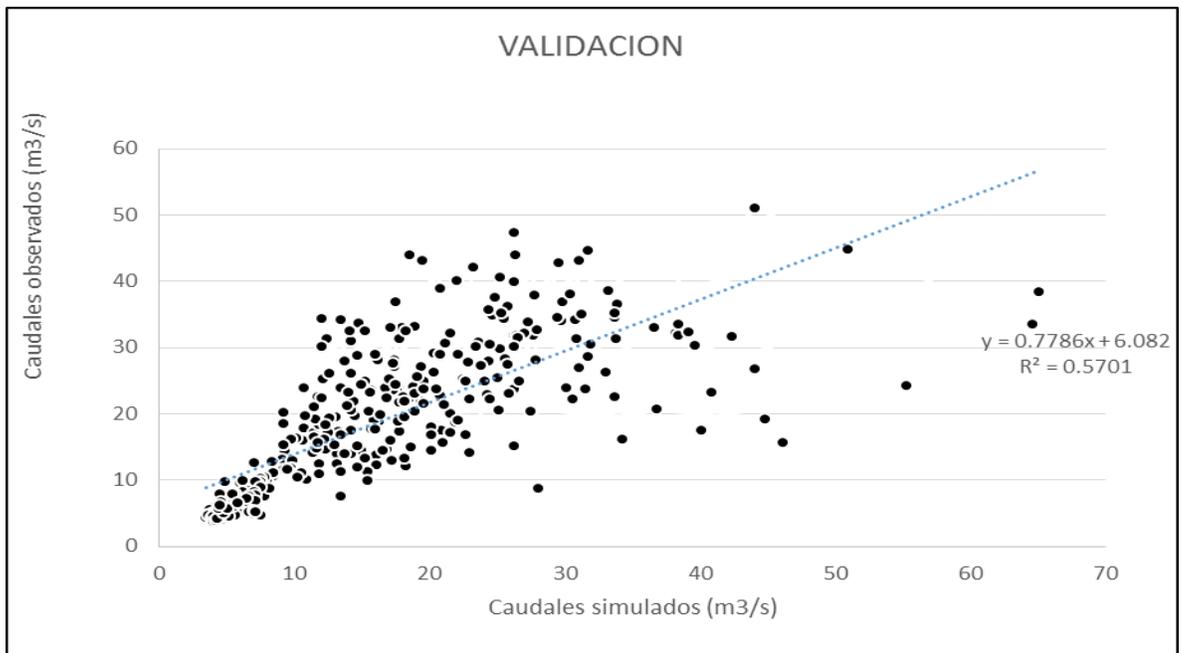


Figura 15. Coeficiente de determinación (R^2) de los caudales simulados y observados para el periodo de validación

6.1.1. Ajuste de los parámetros del modelo

Los modelos son una representación de la realidad, y en hidrología simulan específicamente el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica a partir de la representación de caudales y operaciones de obras de infraestructura hídrica, que sean similares a series históricas. El éxito del proceso depende del ajuste de los parámetros hidrológicos de calibración y también de la calibración de operaciones de infraestructuras hidroeléctricas (CAM, CENIGAA, USCO, TNC, & IDEAM, 2015).

El proceso de calibración ayuda a formular la mejor respuesta hidrológica a la cuenca. Así, los principales parámetros que permiten el aumento de la respuesta de caudales pico son el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la conductividad hidráulica en la zona de raíces (K_s). Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se deben ajustar la dirección de flujo (f) y la conductividad hidráulica en la zona profunda (K_d). Al aumentar este factor aumenta la conductividad en la zona profunda, y, por lo tanto, la descarga de perfiles profundos, y como consecuencia aumenta los caudales bases. De igual manera, si se aumenta la capacidad hidráulica del perfil superior (S_w), se logra un mayor flujo subsuperficial, y por lo tanto el aumento de caudales máximos. Igualmente si se regula la transmisión de flujo del caudal base se podrá ajustar la capacidad de retención de humedad en el perfil profunda (D_w) (Tabla 7).

Los parámetros ajustados en el modelo hidrológico son el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad hidráulica en la zona de raíces (RZC), la conductividad hidráulica en la zona profunda (DC), dirección preferencial de flujo (PFD), y la capacidad de retención de humedad en la capa superior (SWC) y en la capa profunda (DWC).

La calibración del río Aipe busca principalmente el ajuste de caudales picos y bases, por lo que los parámetros más relevantes son el RRF y el SWC. En este estudio específico la tabla 7 muestra que el RRF varía en un rango de 2 a 9.5 que representa un RRF alto (entre 0.1 y 10). Por otro lado el SWC varía en un rango entre 230 mm a 330 mm, lo que indica un alto contenido de retención de humedad en el suelo.

Tabla 7. Parámetros de calibración del modelo de la cuenca río Aipe en WEAP. DC= 5 mm/día, DWC= 500 mm y Z2= 30%

COBERTURAS	SWC (mm)	RRF		RZC (mm/día)		Ks	PFD	Z1 (%)
		MAX	MIN	MAX	MIN			
Aguas abiertas	290	2	7.2	200	150	2	0.5	20
Bosques	330	2	9.5	230	160	6	0.4	20
Café	260	2	9.5	140	100	4	0.5	20
Pastos	255	2	7	170	100	3	0.6	20
Suelos al desnudo	230	2	7.2	200	160	3	0.6	20
Zonas agrícolas	260	2	7.2	190	100	4	0.5	20
Zonas urbanas	230	2	7.2	200	150	1	0.9	20
Arroz	260	2	9.5	190	80	4	0.6	20
Cacao	260	2	7.2	190	80	4	0.5	20
Lagos	290	2	7.2	200	150	2	0.5	20
Sorgo	260	2	7.2	180	80	4	0.6	20

6.2. Estimación del caudal ecológico

Para la estimación del caudal ecológico primero se clasificó la información de caudales diarios para un rango de 12 años (2000-2011), los datos son suministrados por la estación hidrológica Puente Carretera. Se recomienda manejar los valores de caudales diarios por año, luego se organizan los datos de mejor a mayor.

Se calcula el porcentaje de excedencia para cada caudal, este porcentaje es el tiempo que dura cierto caudal en el río. Este porcentaje se calcula por medio de una regla de tres simple.

$$x = \frac{\text{días totales}}{365} * 100 \quad \text{Ecu. 4}$$

Seguido a esto se eliminan los datos de caudales repetidos y graficar tiempo de excedencia en porcentaje VS caudales en m^3/s .

Luego se calcula y grafica el caudal de estiaje para cada año interpolando entre el porcentaje de excedencia el valor de 97.5% y después se ajusta a una función de probabilidad.

Como último paso se selección el caudal asociado a la mayor frecuencia, la cual corresponderá al caudal ecológico final de la Cuenca del río Aipe.

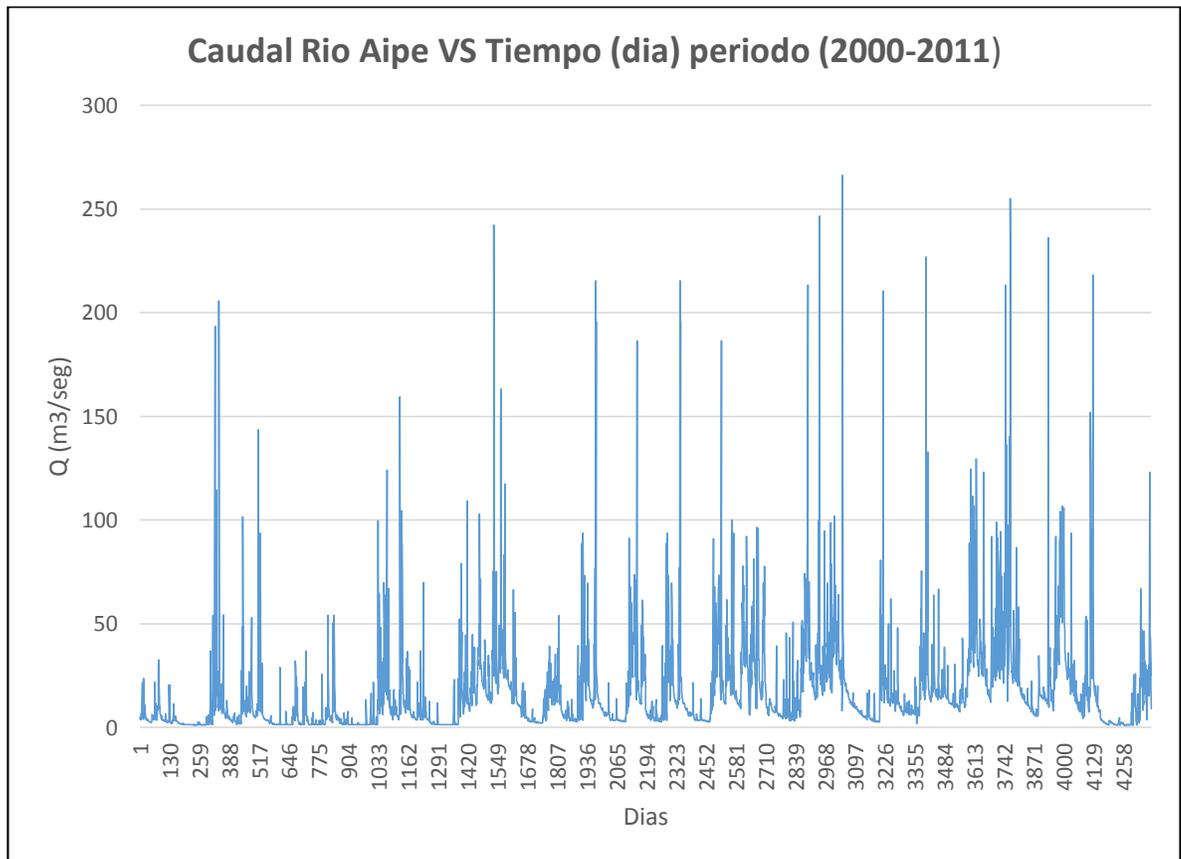


Figura 16. Caudal río Aipe VS Tiempo (dia) periodo (2000-2011)

De acuerdo a la información de caudales diarios de la cuenca del río Aipe durante el periodo (2000-2011), y luego de ser procesados en Excel 2013 y Matlab, los resultados son los siguientes:

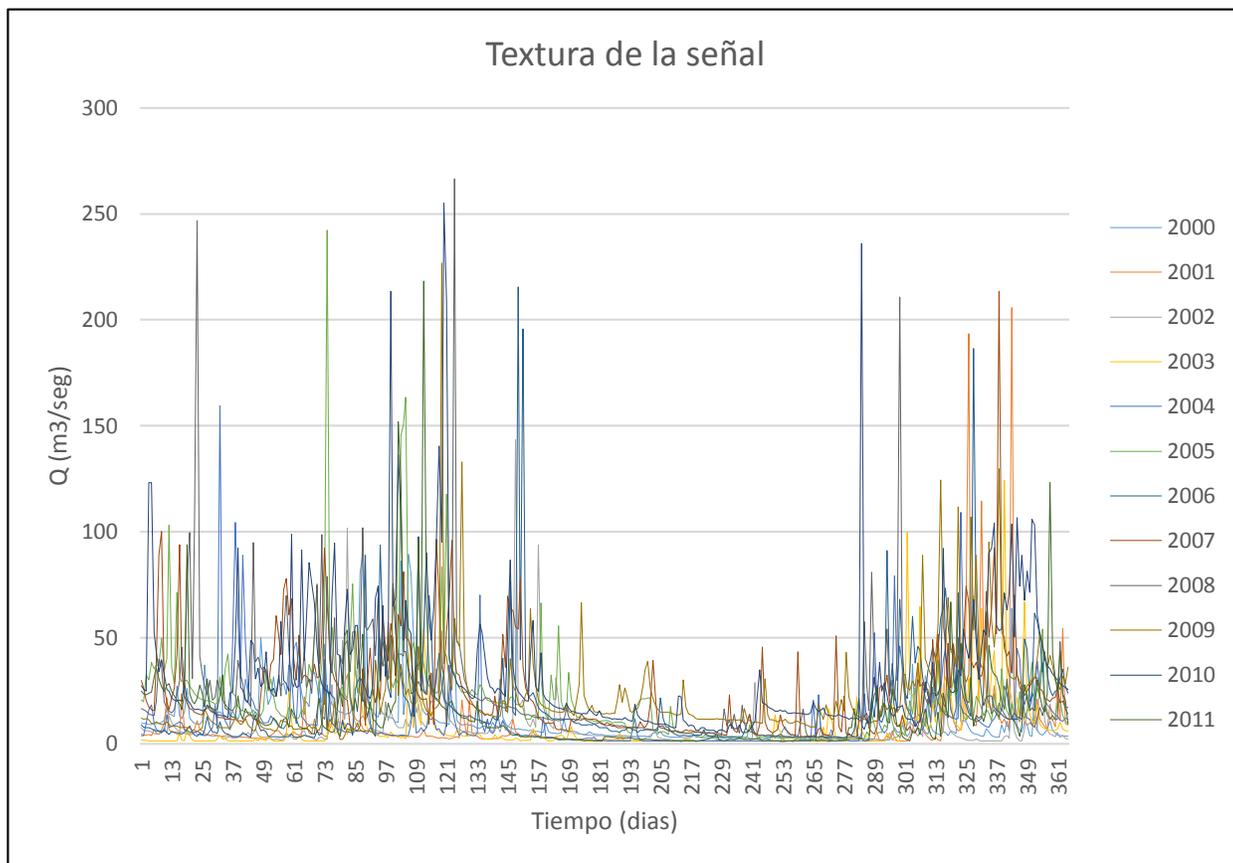


Figura 17. Textura de la señal

De la figura 16 se puede observar que durante aproximadamente los primeros 5 años el río Aipe sufrió de escasez de agua. Debido a los bajos niveles de caudal diarios se podría suponer que en el periodo 2000-2005 en el departamento del Huila presentó el fenómeno del Niño, motivo que causaría disminución en producciones agrícolas y pecuarias. Los resultados obtenidos se podrían utilizar para preparar posibles soluciones en cuanto a disponibilidad de agua.

De acuerdo a la Figura 17 se observa que los caudales mínimos que se presentaron durante el periodo de 12 años se encuentran en su mayoría concentradas en la misma fecha (finales del mes de mayo y finales de septiembre), periodo de meses que coinciden con la época de verano en Colombia.

Teniendo en cuenta que en Colombia se presentan dos épocas de verano y dos de invierno, los caudales mínimos se presentan en su mayoría en una ellas, en el segundo periodo de verano presentados durante los meses de mayo y septiembre. El caudal de río Aipe es en su mayoría constante para los siguientes meses (septiembre-mayo), presentado en algunos días fuertes precipitaciones que generan crecientes del río Aipe que pasa de conducir caudales de 15 m³/s a 100 m³/s llegando a superar 200 m³/s.

Tabla 7. Caudales de estiaje

AÑO	CAUDAL DE ESTIAJE (M³/SEG)
2000	1.98
2001	1.26
2002	1.36
2003	1.20
2004	1.26
2005	2.25
2006	2.89
2007	3.58
2008	2.89
2009	5.97
2010	6.18
2011	1.13

Según la Tabla 8, el caudal mínimo que la cuenca del río Aipe se presentó en el último año de estudio (2011), con un caudal de 1.127 m³/s, un caudal extremadamente bajo para la cuenca. Los años 2009-2010 ostentaron caudales mínimos de 5.973 m³/s y 6.179 m³/s respectivamente, valores que presentan hasta un 300% más de caudal mínimos con respecto a los otros años.

Se muestra también la influencia del fenómeno del Niño en los años 2000, 2003 y 2011 ya que presentan caudales bajos, así como el fenómeno de la Niña en los años 2009 y 2010 con los caudales más altos.

Finalmente, para estimar el caudal ecológico de la cuenca del río Aipe, se realizó el ajuste de probabilidad Log-Logistic (Figura 18), error de desviación estándar de 0.2; la cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Para este método de probabilidad, el caudal ecológico del río Aipe debe ser de 2.4 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 0.29873.

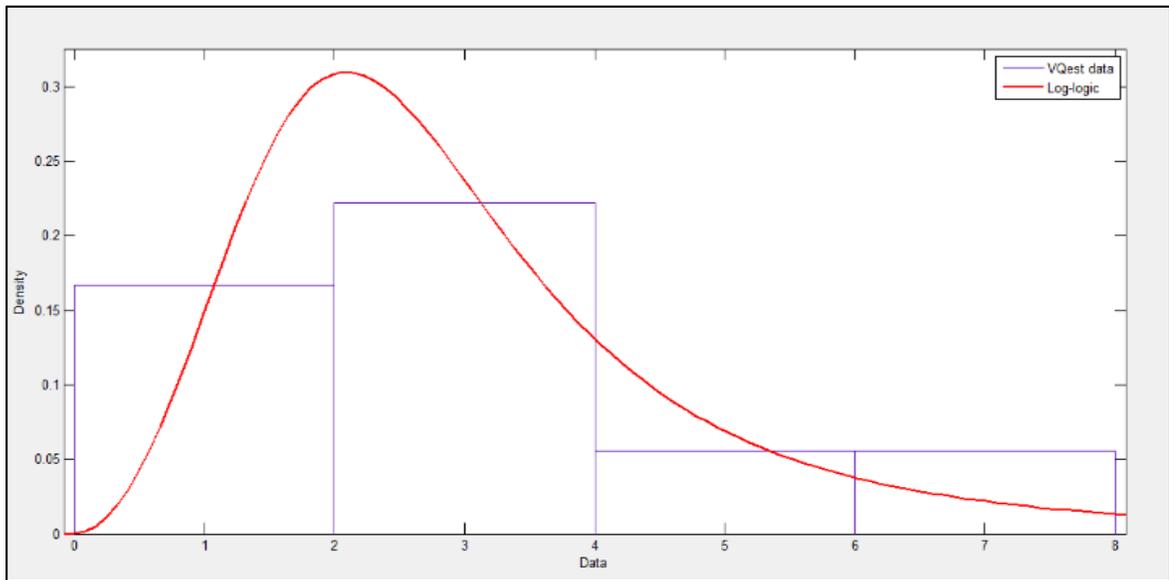


Figura 18. Curva de probabilidad Log-Logistic

Se comparó esta metodología del caudal de estiaje con la realizada en la resolución 3408 del 28 de diciembre de 2009 llamada OHIDRICAMI (Oferta hídrica disponible con caudales mínimos) dando una diferencia de caudal ecológico de 2 m³/s, siendo el caudal de la resolución de 0.4 m³/s, ya que esta analiza los caudales medios y mínimos y se compara con los caudales diarios de los últimos años.

7. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

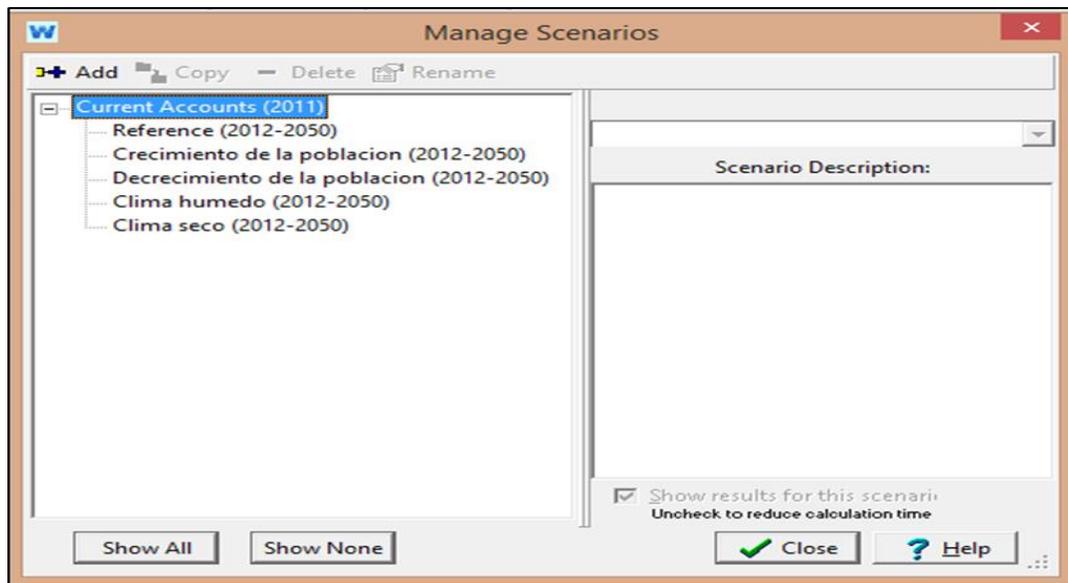


Figura 19. Escenarios modelo WEAP

De acuerdo a la investigación realizada en el marco de este proyecto se generaron 2 escenarios en el modelo para analizar sus resultados, desde luego, considerando también las observaciones realizadas en campo. Así las cosas, los escenarios definidos fueron: 1) Población (Alto y bajo), 2) Clima (Húmedo y seco). Figura 17.

7.1. Escenarios de simulación.

Para comprender los posibles efectos de los cambios en el clima en la disponibilidad de agua en las cuencas, es necesario utilizar modelos hidrológicos, que permitan representar adecuadamente los diversos procesos que ocurren en la cuenca. Por ejemplo, cambios en las rachas de días secos o húmedos, o cambios en los patrones estacionales de lluvias, etc., pueden conducir a cambios en los volúmenes totales de evapotranspiración, escorrentía o almacenamientos en el suelo. A su vez, para comprender los cambios en los patrones de circulación de aguas en las cuencas, no solo es necesario incluir aspectos relacionados con el cambio en el clima y sus efectos directos en los procesos hidrológicos, sino también indirectos en términos de los cambios en las condiciones de operación de la infraestructura como almacenamientos, trasvases y desviaciones de agua y la irrigación. Los análisis de cambio climático, por lo tanto, también busca estimar las complejas interacciones entre el clima, las actividades humanas hidrodependientes, y la hidrología de las cuencas. Existen diversos modelos hidrológicos que pueden capturar a la escala de las cuencas hidrográficas los procesos antes mencionados (Angarita, 2014).

El propósito de la metodología propuesta es generar series de proyecciones climáticas de la variable de precipitación para la cuenca del río Aipe, a nivel de las unidades de análisis del modelo WEAP, informadas por las predicciones del proyecto CMIP5, que sumadas al clima actual, permitan establecer un rango de comportamiento hidrológico posible en la cuenca del río Aipe para los años 2010 a 2050. También, generar dos (2) escenarios de simulación de escala reducida para la cuenca del río Aipe a escala temporal diaria, que corresponde a condiciones extremas en términos de precipitación y población, en el horizonte 2010-2050, que reflejen los cambios en los patrones de estado del tiempo representados en la simulaciones del clima global (Angarita, 2014).

En la Figura 20 se resume la metodología implementada en el presente estudio.

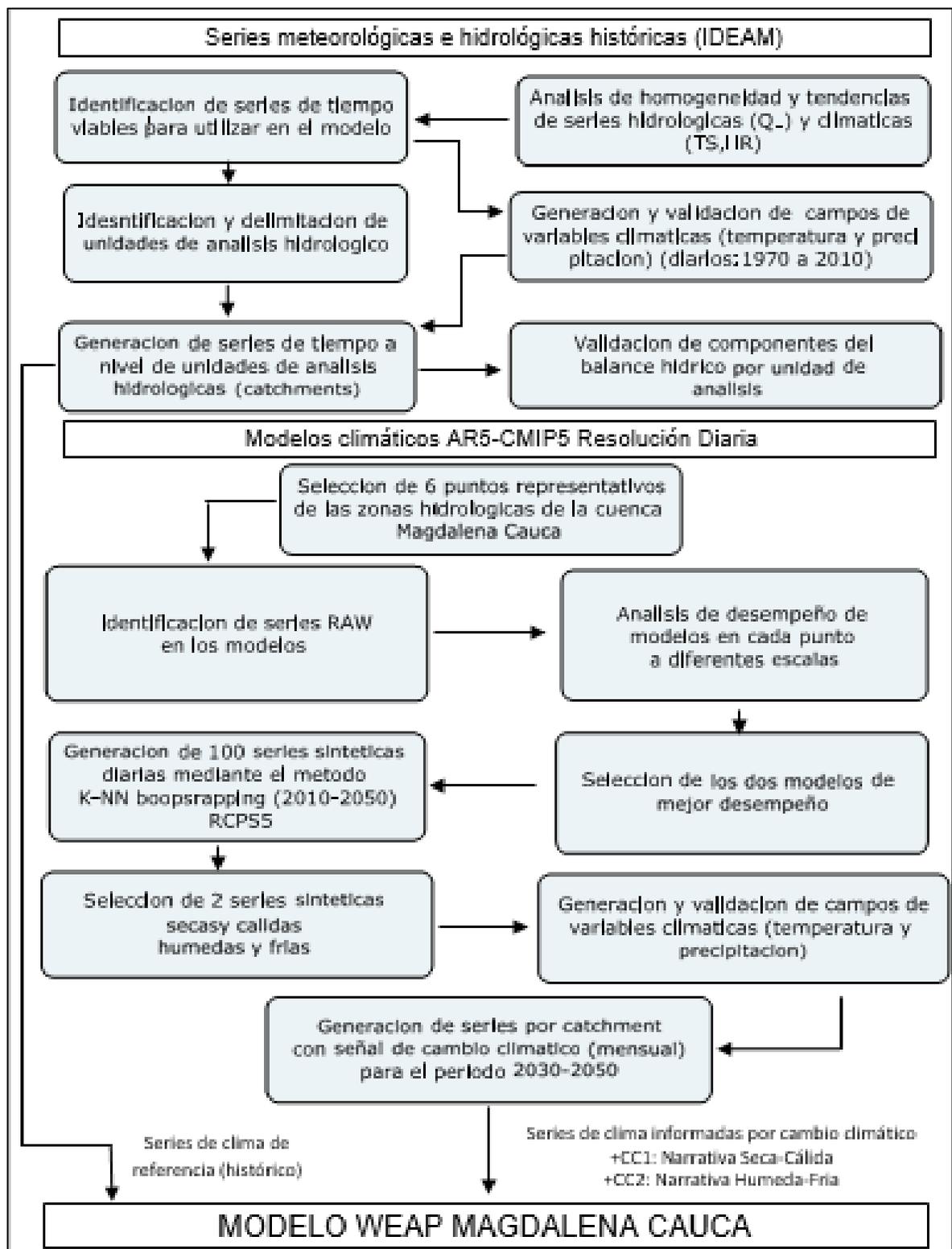


Figura 20. Metodología para generar las series climáticas implementadas en este estudio
Fuente: Angarita, 2014

7.1.1. Escenario Población

La primera suposición plantea la creación de un escenario de referencia para el cálculo de oferta dentro del proyecto, a nivel de los patrones de crecimiento poblacional.

Según la Figura 21 el caudal para la población en el escenario de simulación, muestra una disminución de $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mismo, lo que representa un descenso del 2.81% cuando la población tiene un aumento del 2%, lo que significa que pasan de ser 23513 habitantes (Acuerdo municipal. No. 001 DE 2012) a 23983, esto respecto a los datos históricos medidos en la estación Puente Carretera.

Cuando la población presenta un aumento del 10% (25864 habitantes) el caudal en la cuenca del río Aipe pierde $4.44 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa una disminución del 29% con respecto al promedio histórico para un periodo de 39 años (2011-2050).

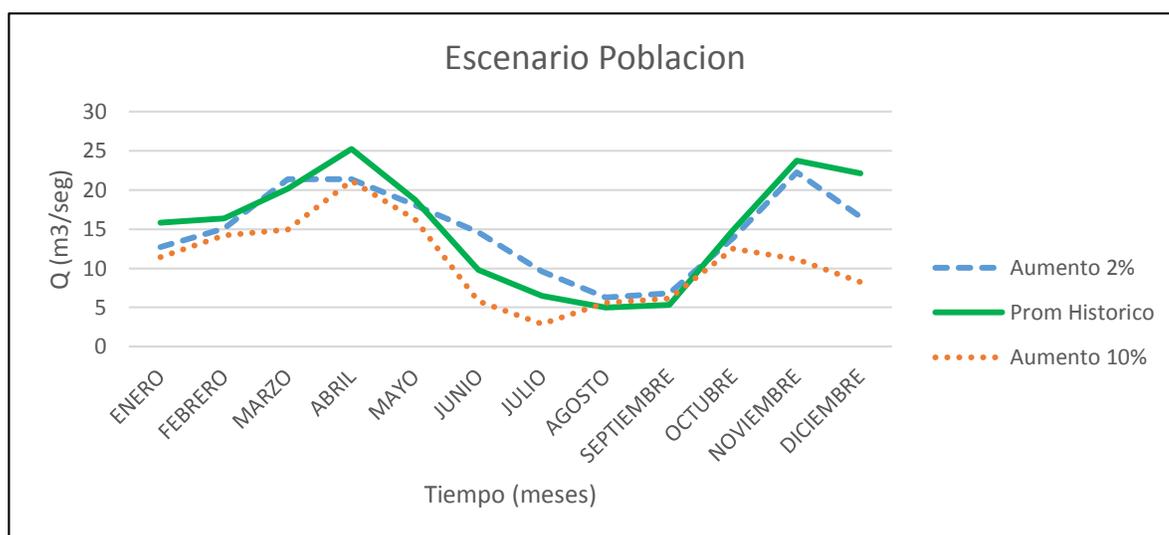


Figura 21. Promedio mensual multianual Escenario Población

7.1.2. Escenario Clima

La segunda suposición es generar series de proyecciones climáticas de la variable precipitación, a nivel de las variables de análisis del modelo WEAP, informadas por las predicciones del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), que sumadas al clima actual, permitan establecer un rango de comportamiento hidrológico posible en la cuenca para los años 2011-2050 (Angarita, 2014).

Para este escenario, muestra dos series de clima MPI-ESM-MR, que hacen referencia a un clima húmedo y seco, los cuales se muestran en la Figura 22.

Con respecto a los datos históricos de la estación Puente Carretera cuando el clima es húmedo hay un aumento en m^3/s de 3.67, lo que indica que el caudal en la cuenca del río Aipe incrementa un 23.97% para el periodo (2011-2050).

Cuando el clima es seco y se compara con los datos históricos de la cuenca, se nota que hay una reducción muy marcada del 65.77% en los caudales. El caudal disminuye $10.07 m^3/s$.

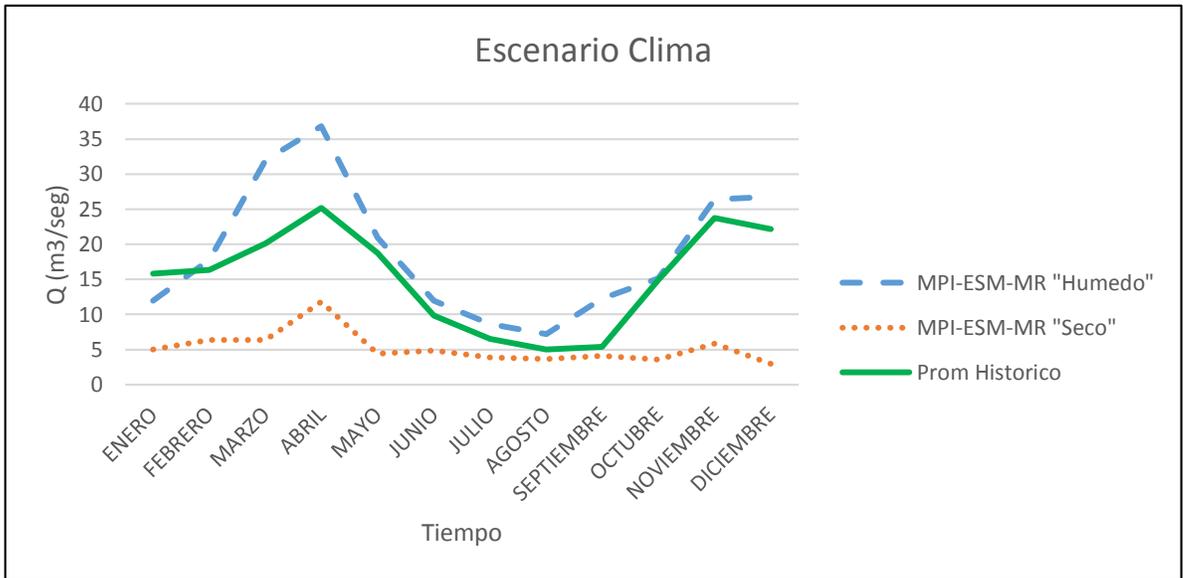


Figura 22. Promedio mensual multianual Escenario Clima

En los dos escenarios de simulación se observan dos periodos marcados húmedos a finales de los meses de abril y noviembre, lo que es característico de los climas tropicales como los de Colombia. Esto se debe a la influencia de los dos océanos que rodean el país, como lo son el océano Pacífico, el Atlántico y la presencia de la Amazonía. Estos periodos de lluvias también son generados por la cercanía de Colombia con la línea del Ecuador y la zona de convergencia intertropical, donde convergen los vientos alisios del hemisferio Norte con los del hemisferio Sur. Se caracteriza por ser un ancho cinturón de baja presión constituido por corrientes de aires ascendentes donde convergen grandes masas de aire cálido y húmedo proveniente del norte y del sur de la zona intertropical (León, Zea & Eslava, 2000).

7.1.3. Escenario caudal ecológico

Para las cuatro series de los escenarios futuros (aumento de población al 2% y 10% y prediciendo un clima seco y un clima húmedo) se calculó el caudal ecológico por el método del caudal de estiaje dando los siguientes resultados:

- Cuando la población aumenta un 2%:

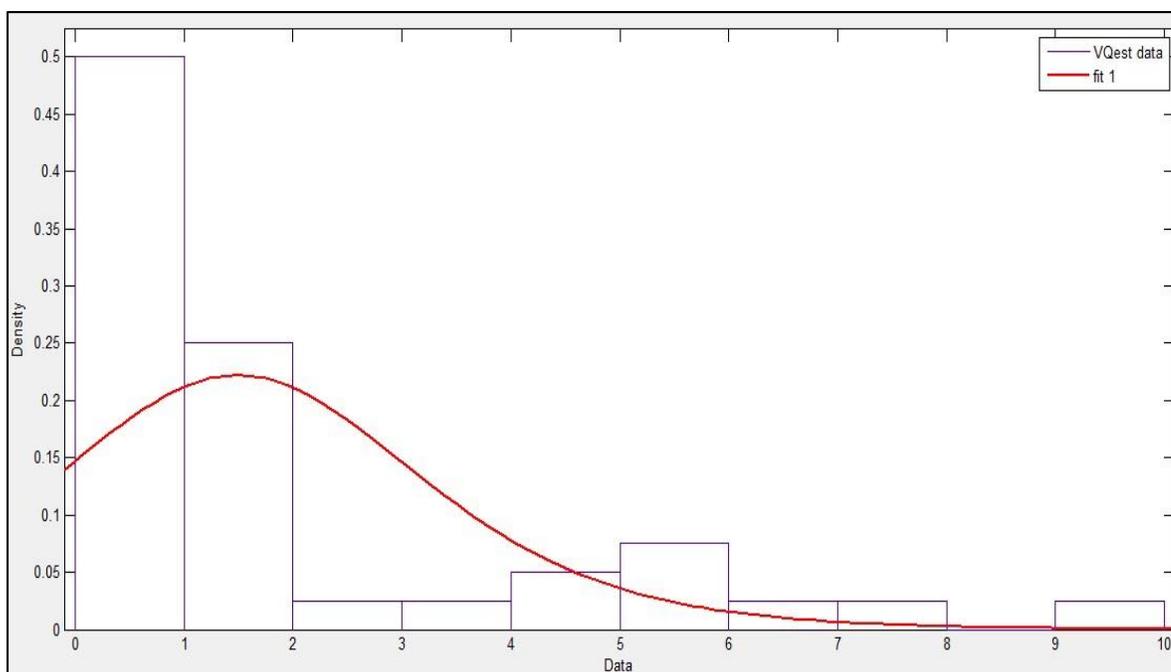


Figura 23. Curva de probabilidad Logistic

Fuente: Matlab, 2013

Para Estimar el caudal ecológico de la cuenca del río Aipe cuando existe un incremento de la población en un 2%, se realizó el ajuste de probabilidad Logistic (Figura 23), error de desviación Estándar de 0,3; la cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Para este método de Probabilidad, el caudal ecológico debe ser de 1,6 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 0,22159.

- Cuando la población aumenta 10%:

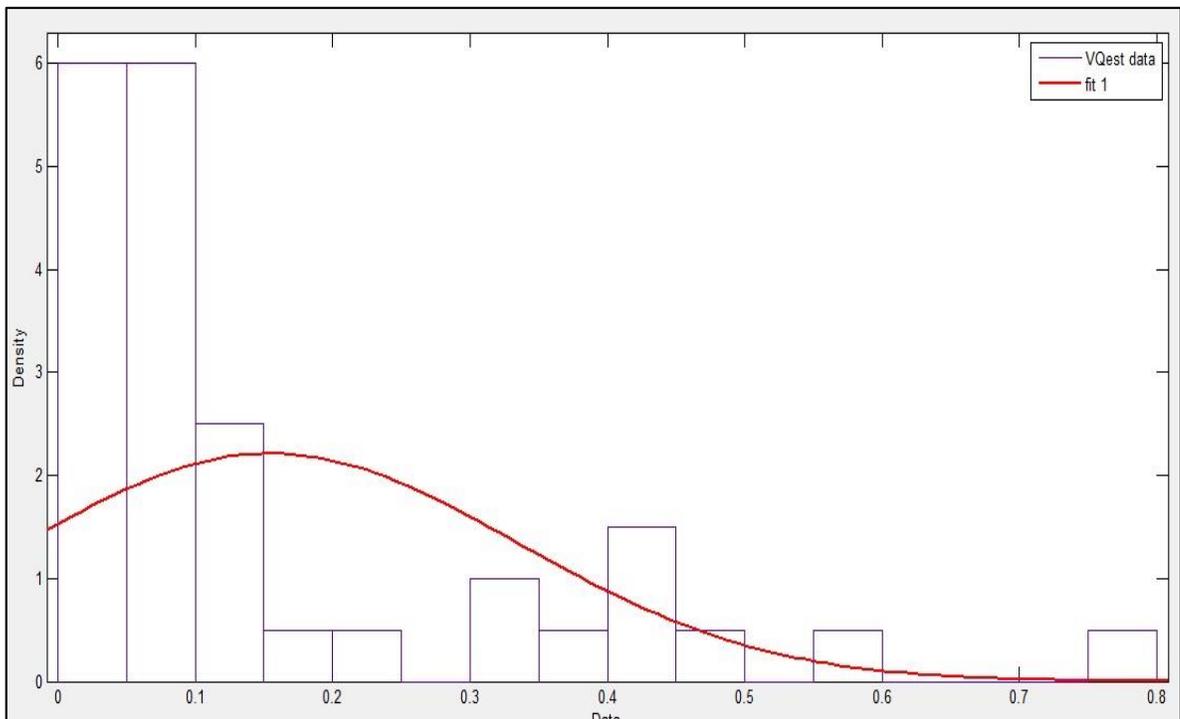


Figura 24. Curva de probabilidad Normal
Fuente: Matlab, 2013

Para Estimar el caudal ecológico de la cuenca del río Aipe cuando existe un incremento de la población en un 10%, se realizó el ajuste de probabilidad Normal (Figura 24), error de desviación Estándar de 0,03; la cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Para este método de Probabilidad, el caudal ecológico debe ser de 0,18 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 2,19084.

- MPI-ESM-MR clima húmedo:

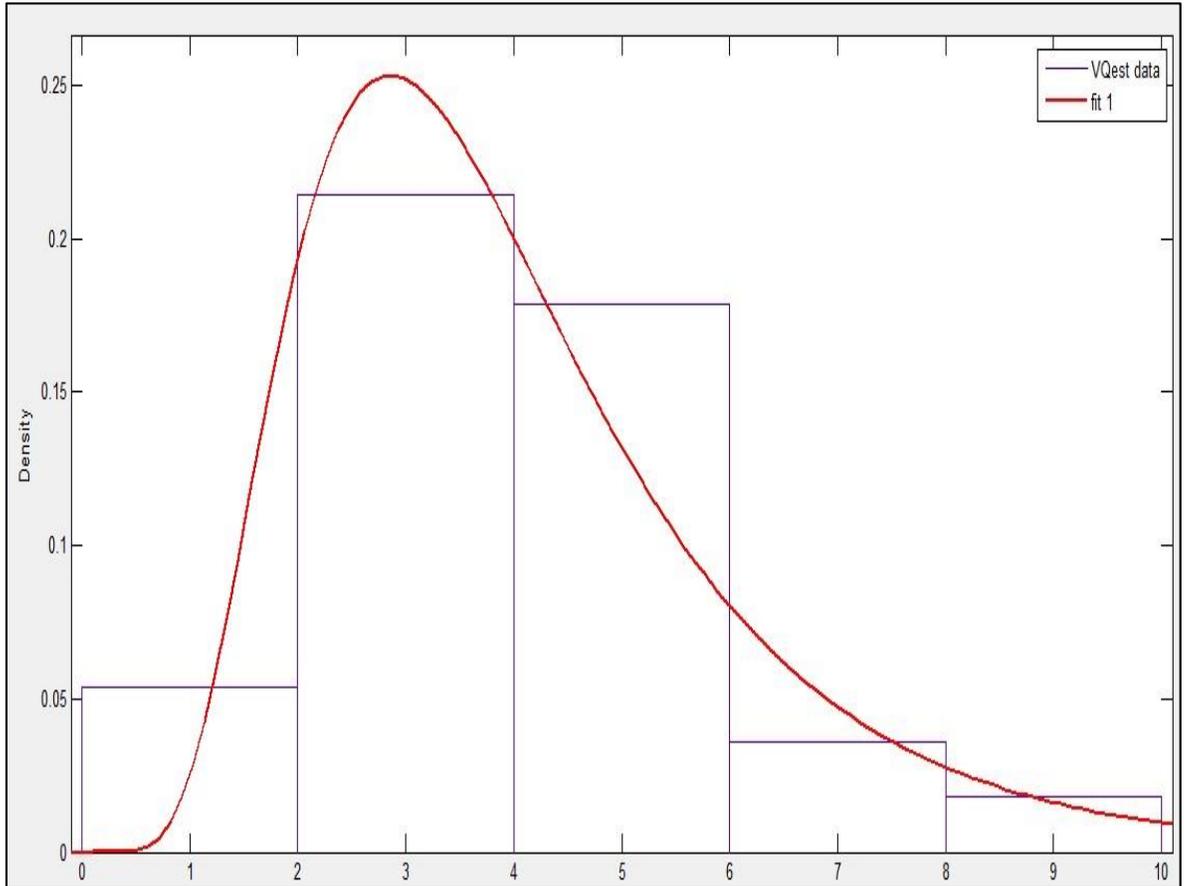


Figura 25. Curva de probabilidad Lognormal

Fuente: Matlab, 2013

Para Estimar el caudal ecológico de la cuenca del río Aipe cuando existe la serie MPI-ESM-MR de clima húmedo se realizó el ajuste de probabilidad Lognormal (Figura 25), error de desviación Estándar de 0,1; el cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Para este método de Probabilidad, el caudal ecológico debe ser de 3,2 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 0,24663.

- MPI-ESM-MR clima seco:

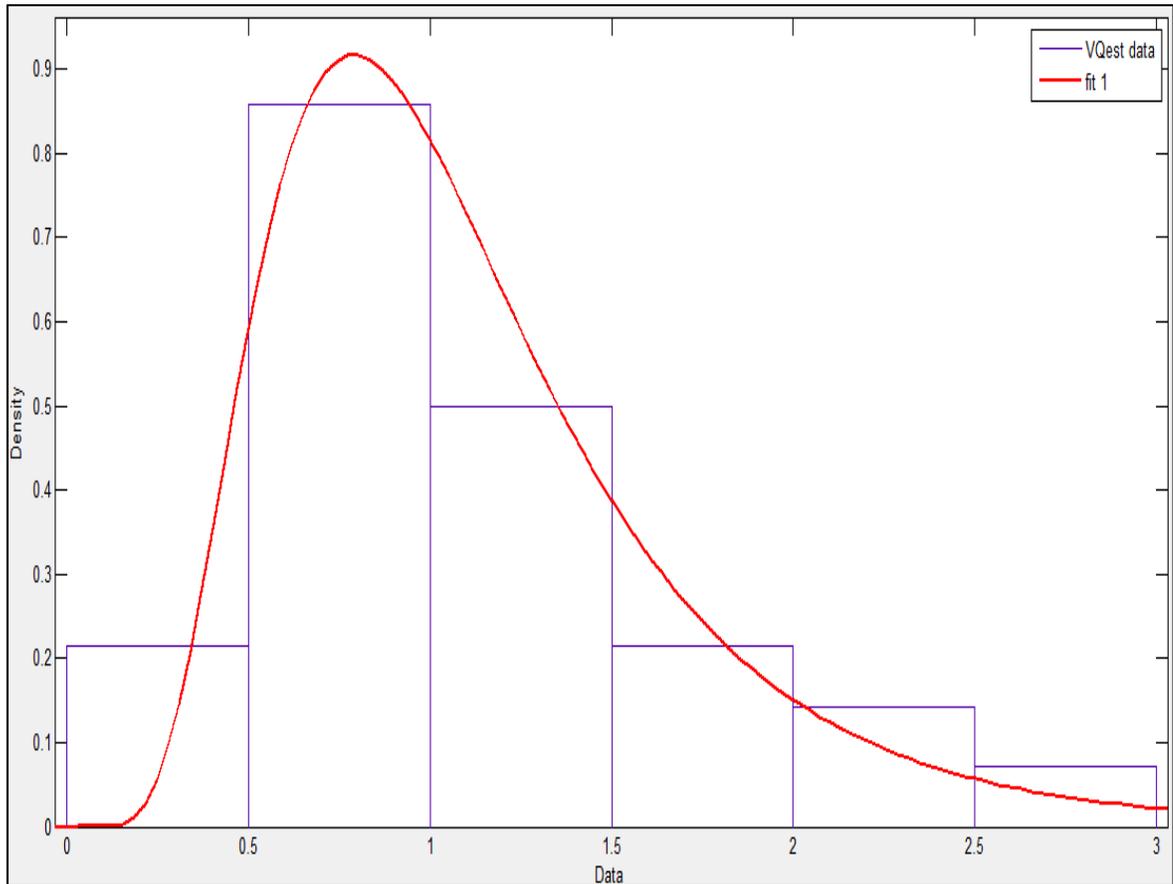


Figura 26. Curva de probabilidad Lognormal

Fuente: Matlab, 2013

Para Estimar el caudal ecológico de la cuenca del río Aipe cuando existe la serie MPI-ESM-MR de clima seco se realizó el ajuste de probabilidad Lognormal (Figura 26), error de desviación Estándar de 0,9; la cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Para este método de Probabilidad, el caudal ecológico debe ser de 3,2 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 0,88493.

8. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

La mayor demanda hídrica en el área de estudio la constituye el consumo en la agricultura seguido el consumo de la piscicultura.

La estimación de la demanda actual de agua para consumo humano y agropecuario se tomó teniendo en cuenta la información suministrada por las encuestas realizadas en el censo de usuarios y censo agropecuario (uso actual).

En la cuenca las actividades agropecuarias desarrolladas y de mayor incidencia son la piscicultura, el cultivo de arroz y la caficultura, que también generan una demanda de agua. Cifras de la CAM consideran el consumo de agua para el caso de la piscicultura que posee un área de 200 ha con lagos de profundidad promedio de un (1) metro se obtiene un consumo de agua de $0,0035 \text{ m}^3/\text{s}$ por hectárea, para lo cual se requiere $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para abastecer las necesidades del sector piscícola en el área de estudio, lo que representa el 0,11% de la oferta hídrica actual.

El área actual para el cultivo de arroz es de 2492,2 ha el requerimiento hídrico necesario para este cultivo con un módulo de riego de $2,12 \text{ l/s/ha}$, lo cual se requieren $5287,7 \text{ l/s/ha} = 5,2877 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa el 34,54% de la oferta hídrica actual.

El sector cafetero ocupa un área de 1071,9 ha con un módulo de riego $1,50 \text{ l/s/ha}$, para lo cual se requieren $1607,85 \text{ l/s/ha} = 1,61 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa el 10,52% de la oferta hídrica de la cuenca.

Para el cultivo del sorgo, el cual ocupa un área de 4,3 ha con un módulo de riego $1,50 \text{ l/s/ha}$, para lo cual se requieren $5,45 \text{ l/s/ha} = 0,0065 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa el 0,04% de la oferta hídrica de la cuenca. El cultivo de cacao que ocupa un área de 25,9 ha se requieren $38,85 \text{ l/s/ha} = 0,039 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual representa el 0,25%

En el plan de ordenamiento y manejo ambiental de la cuenca del río Aipe señala que la cuenca suministra el agua a un total de 23513 habitantes. Siguiendo los parámetros de la normal RAS 2000, la dotación promedio de agua al día por habitante debe ser de 125 litros, esto indica que estaría generando un consumo de $2'939.125 \text{ lt/día} = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}$. Este consumo comparado frente a la oferta hídrica promedio actual de la cuenca estaría representando un gasto del 0,22%.

Teniendo en cuenta los siguientes indicadores en actividades de piscicultura, cultivo de arroz, caficultura, cultivo de sorgo, cultivo de cacao y consumo se está empleando en la actualidad el 45,64% de la oferta hídrica actual.

Basado en lo anterior, las actividades que mayor demanda de agua tienen son el cultivo de arroz, la caficultura y la piscicultura, por eso se plantean medidas de

adaptación que contribuyan a la preservación del recurso y el desarrollo de regiones de manera sustentable.

- Incorporar la variable cambio climático en proyectos específicos de obras hidráulicas, por ejemplo modificando los estándares de diseño e incrementando los márgenes de seguridad en nuevas obras de infraestructura, en los estudios de planificación de uso de los recursos hídricos y en la definición de políticas para el sector.
- Elaborar programas de educación ambiental tendientes a informar acerca de los potenciales impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.
- Formular y proponer para su aprobación una política nacional de aguas que permite integral las variables cambio climático.
- Implementar programas de mantenimiento, conservación y expansión de los bosques naturales existentes en la cuenca, con el fin de convertir estas áreas protegidas en zonas que incidan de manera directa en la producción y conservación del recurso hídrico y a su vez contribuir a la protección de la vida silvestre propia de la zona a la mitigación de desastres naturales y al fortalecimiento de la capa vegetal que se ha visto afectada por la ganadería extensiva presente en la zona de estudio.
- Debido a que la oferta hídrica disminuye como se muestra en los escenarios futuros presentado una reducción del 65.77% en su caudal, en el sector agrícola se recomienda establecer cultivos con menor requerimiento hídrico. Por ejemplo, remplazar las hectáreas sembradas en arroz por maíz ya que el requerimiento de agua en su periodo vegetativo es mucho menor en comparación con el arroz.
- La CAM debería garantizar los volúmenes de agua concesionados para el casco urbano de Aipe y los centros poblados de San Francisco y Los Órganos, debido a que el caudal tiende a disminuir a medida que la población aumenta.
- Facilitar la coordinación interinstitucional para el desarrollo de acciones y toma de decisiones para los entes gubernamentales en relación a un manejo integrado de los recursos naturales a nivel de cuencas hidrográficas.
- Promover el manejo sostenible de suelos, incluyendo la siembra directa y otras medidas de conservación de suelos, realizar riegos a cultivos empleando curvas de nivel con el fin de disminuir el desperdicio de agua y mantener mayor humedad en el suelo.

- Implementar políticas de medición y control en las derivaciones y tomas prediales de los usuarios que se abastecen del río Aipe para garantizar el caudal concesionado y evitar conflictos entre usuarios.
- Desarrollar planes de ordenamiento y manejo de cuencas que incluya escenarios de cambio climático, utilizando modelos hidrológicos, de forma participativa para priorizar medidas de mitigación y adaptación que contribuyan al buen manejo de la cuenca.
- Impulsar esquemas financieros y de pago por servicios ambientales para cada cuenca, de manera concertada con los que conservan la cuenca y los usuarios del agua, garantizando su manejo a largo plazo.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

La modelación de la cuenca del río Aipe mostró que los parámetros más relevantes son el RRF y el SWC. En este estudio específico, se muestra que el RRF varía en un rango de 2 a 9,5 que representa un RRF alto (entre 0,1 y 10). Por otro lado, el SWC varía en un rango entre 230 mm a 330 mm, lo que indica un alto contenido de retención de humedad en el suelo.

En la calibración, la métrica de desempeño aplicada al modelo hidrológico del río Aipe muestra una buena correlación entre los caudales simulados y observados en la estación analizada. El coeficiente de determinación $R^2 = 0,79$ que indica que el 79% de los datos el modelo los predice y el 21% restante son incertidumbres.

Para los escenarios futuros el caudal para la población muestra una disminución de 0,43 m³/s en la cuenca, lo que representa una descenso del 2,81% cuando la población tiene un aumento del 2%, esto respecto a los datos históricos medidos en la estación Puente Carretera. De igual forma, cuando la población presenta un aumento del 10% el caudal en la cuenca del río Aipe pierde 4,44 m³/s, lo que representa una disminución del 29% con respecto al promedio histórico para un periodo de 39 años (2011-2050).

En la cuenca del río Aipe se observa una disminución en los caudales de 10,07 m³/s cuando se hace referencia al clima seco y un aumento de 3,67 m³/s cuando existe un clima húmedo para el periodo (2011-2050).

Mediante el ajuste de probabilidad estadística Log-Logistic, el caudal ecológico del río Aipe calculado es de 2,4 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad 0,29873. Debido a esto el caudal de estiaje mínimo presentado en la cuenca del río Aipe durante los 12 años fue de 1,127 m³/s.

Cuando la población aumenta un 2% se realizó el ajuste de probabilidad Logistic con un error de desviación estándar de 0,3, la cual se ajusta de una manera más exacta a los caudales estudiados. Según esto el caudal ecológico debe ser de 1,6 m³/s, de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad de 0,22159. Cuando incrementa la población un 10% el caudal ecológico debe ser de 0,18 m³/s de acuerdo a la mayor frecuencia de probabilidad de 2,19084, con el ajuste de probabilidad Normal con un error de desviación estándar de 0,02.

Para las series MPI-ESM-MR de clima húmedo y seco se obtienen caudales ecológicos de 3,2 m³/s y 0,9 m³/s, respectivamente.

9.2. RECOMENDACIONES

- La modelación de los sistemas de recurso hídrico de la cuenca del río Aipe, desarrollado en WEAP, es una herramienta de gestión y planificación que ayuda a comprender mejor el funcionamiento del sistema hídrico y los efectos del cambio climático en general, y que apoya a los entes gubernamentales en el análisis de oferta y demanda hídrica a escala temporal y espacial.
- El modelo WEAP demuestra que es una plataforma útil y robusta para la modelación de procesos hidrológicos, pero una de las debilidades del modelo es el costo de la licencia, ya que para un estudiante que está registrado en una universidad o institución educativa acreditada cuesta 250\$, lo que significa alrededor de \$631.000 colombianos.
- Debido a que la oferta hídrica disminuye como se muestra en los escenarios futuros presentado una reducción del 65.77% en su caudal, en el sector agrícola se recomienda establecer cultivos con menor requerimiento hídrico. Por ejemplo, reemplazar las hectáreas sembradas en arroz por maíz ya que el requerimiento de agua en su periodo vegetativo es mucho menor en comparación con el arroz.
- La CAM debería garantizar los volúmenes de agua concesionados para el casco urbano de Aipe y los centros poblados de San Francisco y Los Órganos, debido a que el caudal tiende a disminuir a medida que la población aumenta.
- Desarrollar planes de ordenamiento y manejo de cuencas que incluya escenarios de cambio climático, utilizando modelos hidrológicos, de forma participativa para priorizar medidas de mitigación y adaptación que contribuyan al buen manejo de la cuenca.
- Impulsar esquemas financieros y de pago por servicios ambientales para cada cuenca, de manera concertada con los que conservan la cuenca y los usuarios del agua, garantizando su manejo a largo plazo.

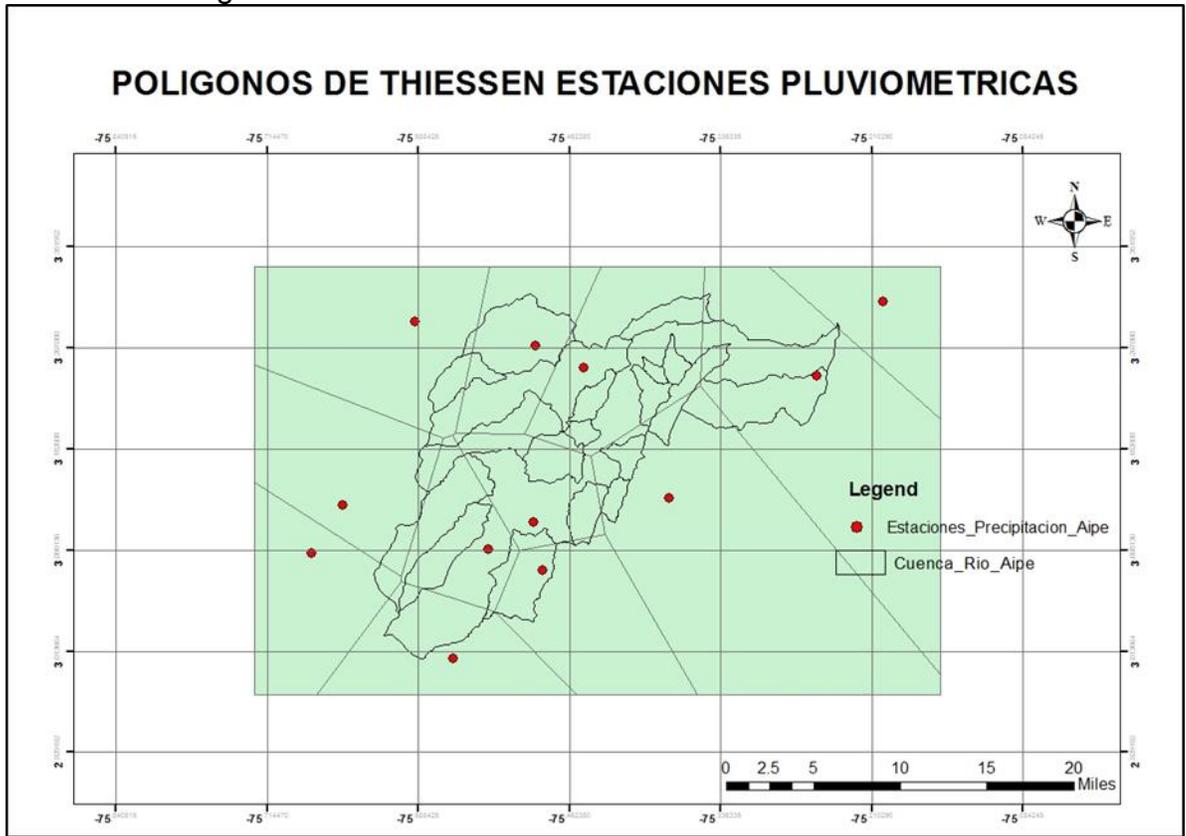
10. BIBLIOGRAFÍA

1. Angarita, Héctor (2014). Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo WEAP de la macro cuenca del Magdalena y resultados de las simulaciones. The Nature Conservancy. Bogotá. 47 pp.
2. Bustamante, C., Monsalve, E., García, P. (2007). Los Caudales Ecológicos: Herramienta Fundamental en la Gestión Integral de las Fuentes Hídricas del Quindío. Revista de Investigaciones, (17) 205 – 221.
3. Castro Giraldo, N. L. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda La Bella. [Trabajo de grado]. Universidad Tecnológica de Pereira: Pereira, Colombia.
4. Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Consultado 25 de marzo de 2015. www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
5. Chavarro, M., García, A., García, J., Pabón, J., Prieto, A., Ulloa, A. (2008). Amenazas, Riesgos, Vulnerabilidades y Adaptación Frente al Cambio Climático. Consultado el 25 de mayo de 2015. https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Reed_/cartilla_adaptacion.pdf
6. Consejo municipal de Aipe (2012). *Acuerdo municipal No. 001 de 2012 “por el cual se adopta el plan de desarrollo económico, social y de obras públicas para el municipio de Aipe 2012-2015 “porque todos queremos”*. Consultado 20 de octubre de 2014. <http://aipe-huila.gov.co/apc-aa-files/63653464653537613037626266636162/acuerdo-municipal-no-001-de-2012-3.pdf>.
7. Consorcio de Ingeniería FUNDISPRO. (2009). Revisión y Actualización de la Reglamentación para la Corriente río Aipe, Municipio de Aipe- Departamento del Huila. Consultado 25 de marzo de 2015. Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. Aipe, Huila. 381 pp.
8. Domínguez, E. (2000). Protocolo Para la Modelación Matemática de Procesos Hidrológicos, Meteorología Colombiana. (2) 33-38.
9. García, M.C., Piñeros, A., Bernal, F., Ardila, E. (2012). Variabilidad Climática, Cambio Climático y el Recurso Hídrico en Colombia, Revista de Ingeniería. (36), 60-64.
10. Lema Changoluisa, M. A., Plaza Quezada, V. C. (2009). Modelación hidrológica de la cuenca (alta y media) del río Pastaza aplicando el modelo de simulación WEAP (Water Evaluation and Plannig System). [Trabajo de grado]. Universidad de Chile: Santiago de Chile, Chile.
11. León G, J. Zea, J. Eslava. (2000). Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. Meteorología Colombiana. (1), 31-38.

12. Londoño, L., Marín, J. (2002). Metodología de la investigación Holística. Una propuesta integradora desde las sociedades fragmentadas. 3, Uni-pluriversidad. (2) 22-23.
13. Mardones Morales, G. A. (2009). Implementación y Uso del Modelo Weap en Cuencas Nivales de la IV Región para el Análisis del Cambio Climático. [Trabajo de grado]. Universidad de Chile: Santiago de Chile, Chile.
14. Mena, D. (2009). Análisis del Cambio Climático en la Cuenca Andina del Río Teno, Usando el Modelo WEAP. [Trabajo de grado]. Universidad de Chile: Santiago de Chile, Chile.
15. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004), Resolución 865 de 2004. Consultado en 20 de octubre de 2014. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_23_julio_2004.pdf.
16. O'Keeffe, J., Quesne, T. (2010). Cómo Conservar Ríos Vivos, Guía Sobre Caudales Ecológicos. Consultado el 25 de mayo de 2015. http://www.agua.unam.mx/humedales/assets/materialdifusion/WWF_ComoConservarLosRiosVivos.pdf
17. Romero, J., Buitrago, A., Quintero, T. (2009). Evaluación del Efecto de los Escenarios del Cambio Climático Sobre el Recurso Hídrico en las Cuencas del Río Yaguara Y Aipe. [Trabajo de Grado]. Universidad Surcolombiana (USCO): Neiva, Huila.
18. Salinas Villafañe, A. A., & Paz Rada, O. (2011). Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. 6. Revista Tecnología, Investigación y Docencia. (6), 27-38.
19. Suárez, J., Puertas, J., Anta, J., Jácome, A., Álvarez-Campana, J.M., 2014. Gestión integrada de los recursos hídricos en el sistema del agua urbana: Desarrollo Urbano Sensible al Agua como enfoque estratégico Ingeniería de Agua. (18), 111-123.
20. Urciuolo, A., Iturraspe, R., Rosanigo, B., Parson, A., Moyano, E., Villareal, M. (2007) Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes. Consultado el 25 de mayo de 2015. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/20405/Documento_completo.pdf?sequence=1.

ANEXOS

ANEXO 1. Polígonos de Thiessen



ANEXO 2. Código Matlab caudal ecológico

```
1. %ESTIMACION CAUDAL ECOLOGICO
2. %DATOS
3. clc, clear all
4. Qini=importdata('climaseco.xlsx')
5. [d a]=size(Qini)
6. Q=Qini
7. % iniciar grafica
8. subplot(1,2,1);
9. plot(Q)
10. title('TEXTURA DE LA SEÑAL');xlabel('TIEMPO
(Dias)');ylabel('Caudal Q(m3/s)');grid on
11. %ORDENAR DATOS
12. for j=1:a
13.     Q(:,j)=sort(Q(:,j),'ascend');
14. end
15. % de excedencia
16. for k=1:a
17.     hold on%superponercurva
18.     clear curva
19.     q=Q(:,k);
20.     L=length(q);
21.     curva(1,:)= [q(1,1) (length(find(q>q(1,1)))/L)*100]% regla
de 3
22.     cont=1
23.     for t=2:L
24.         if q(t)~=q(t-1)
25.             cont=cont+1
26.             curva(cont,1)=q(t)
27.             curva(cont,2)=(length(find(q>q(t)))/L)*100;
28.         end
29.     end
30.     subplot(1,2,2);
31.     plot(curva(:,2),curva(:,1),'-g','MarkerFaceColor','g')
32.     title('CURVA DE EXCEDENCIA');xlabel('TIEMPO DE EXCEDENCIA
%');ylabel('Caudal Q(M3/S)');grid on
33.     Qest=interp1(curva(:,2),curva(:,1),97.5)
34.     VQest(k,1)=Qest;
35. end
36.
37. fprintf('Caudales de estiaje en m^3/s años 2000 a 2011 \n' );
38. fprintf(' %.2f\t\n', VQest );
39. dfittool(VQest);
```

ANEXO 3. Resultados Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico

X	Log - Logistic
	f(X)
0	0
0.8	0.10147
1.6	0.27437
2.4	0.29873
3.2	0.21344
4	0.13097
4.8	0.07827
5.6	0.04777
6.4	0.0302
7.2	0.01981
8	0.01345

ANEXO 4. Resultados Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico aumento población 2%

X	fit 1
	f(X)
0	0.14723
0.8	0.20229
1.6	0.22159
2.4	0.18964
3.2	0.13114
4	0.07808
4.8	0.04246
5.6	0.02197
6.4	0.01108
7.2	0.00551
8	0.00273

ANEXO 5. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico aumento población 10%

X	fit 1
	f(X)
0	1.53022
0.06	1.92657
0.12	2.17138
0.18	2.19084
0.24	1.97883
0.3	1.60002
0.36	1.15815
0.42	0.75046
0.48	0.43533
0.54	0.22606
0.6	0.10509
0.66	0.04373
0.72	0.01629
0.78	0.00543

ANEXO 6. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico serie MPI-ESM-MR clima seco

X	fit 1
	f(X)
0	0
0.3	0.12854
0.6	0.78211
0.9	0.88493
1.2	0.63625
1.5	0.38799
1.8	0.22187
2.1	0.12408
2.4	0.0692
2.7	0.03886
3	0.02208

ANEXO 7. Resultado Frecuencia de Probabilidad caudal ecológico serie MPI-ESM-MR clima húmedo

X	fit 1
	f(X)
0	0
0.8	0.00843
1.6	0.12467
2.4	0.23723
3.2	0.24663
4	0.20021
4.8	0.14463
5.6	0.09856
6.4	0.06523
7.2	0.0426
8	0.02771
8.8	0.01804
9.6	0.01179