

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN OFERTA-DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO
GUALÍ BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**MELISSA PIMIENTO CASTAÑEDA
LINA MARÍA RESTREPO CAICEDO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2018**

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN OFERTA-DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO
GUALÍ BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**MELISSA PIMIENTO CASTAÑEDA
LINA MARÍA RESTREPO CAICEDO**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera ambiental

**Director
DARWIN MENA RENTERÍA
Ingeniero Ambiental y Sanitario
MSc en Evaluación de Recursos Hídricos**

**Codirector
MIGUEL ANGEL CAÑÓN RAMOS
Ingeniero Ambiental
MSc (c) Hidrosistemas**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2018**

Nota de aceptación

Firma director trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 23/abril/2018

DEDICATORIA

Principalmente a Dios y a nuestras madres Mery Castañeda y Elizabeth Caicedo quienes nos apoyaron en todas las etapas de este proyecto y nos dieron ánimo para culminar este trabajo. A nuestras familias y a todas las personas que de una u otra forma nos apoyaron en el desarrollo de esta investigación y que aportaron a nuestro crecimiento personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director y maestro Darwin Mena por ser nuestro apoyo en la realización de este trabajo, por la confianza que depositó en nosotras y su asesoramiento.

A todos los docentes que aportaron su conocimiento y experiencia a nuestra formación profesional, especialmente a Miguel Cañón, cuyo papel fue de vital importancia en el desarrollo de este trabajo.

A Mauro Nalesso y Juliana Corrales del Banco Interamericano de Desarrollo y el RTI por su asesoramiento técnico en etapas fundamentales de este trabajo.

A Freddy Santiago Duarte y Jhon Chavarro Díaz por compartirnos parte de su conocimiento y por su contribución a este trabajo.

CONTENIDO

	Pág
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	15
2. MARCO CONTEXTUAL	16
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA.....	16
2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA	18
2.3 CLIMATOLOGÍA.....	19
3. MARCO TEÓRICO	23
3.1 GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	23
3.2 CAMBIO CLIMÁTICO	23
3.2.1 Modelos de circulación global (GCM)	25
3.2.2 Reducción de escala	27
3.2.3 Reducción de escala estadística basada en la teoría del caos	28
3.3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	30
3.3.1 Análisis estadístico de modelos	30
3.3.2 Hydro-BID.....	32
3.3.3 WEAP.....	39
4. METODOLOGÍA.....	44
4.1 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA.....	44
4.1.1 Definición y procesamiento de la cuenca.....	44
4.1.2 Obtención y tratamiento de los datos de entrada.....	45
4.1.3 Calibración y validación del modelo Hydro-BID	47
4.1.4 Análisis de cambio climático	48
4.1.5 Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático	49
4.2 OBTENCIÓN DE LA DEMANDA	49
4.2.1 Obtención de la demanda actual y futura.....	49
4.2.2 Estimación de la demanda insatisfecha por escenario de cambio climático.....	52

4.3	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA INSATISFECHA.....	52
5.	RESULTADOS	53
5.1	OBTENCIÓN DE LA OFERTA.....	53
5.1.1	Tratamiento de los datos de entrada	53
5.1.2	Calibración y validación del modelo Hydro-BID	54
5.1.3	Modelación hidrológica bajo los escenarios de cambio climático en Hydro-BID...	66
5.2	OBTENCIÓN DE LA DEMANDA	68
5.2.1	Integración WEAP con Hydro-BID	68
5.2.2	Obtención de la demanda insatisfecha por escenario.....	69
5.3	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA REDUCIR LA DEMANDA INSATISFECHA	71
6.	IMPACTO DE SOCIAL	73
7.	CONCLUSIONES	74
8.	RECOMENDACIONES.....	76
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Área incluida en la cuenca por municipios	17
Tabla 2. Área de las subcuencas de la cuenca del río Gualí.....	17
Tabla 3. Características morfométricas y parámetros de forma de la cuenca	18
Tabla 4. Escenarios de cambio climático planteados por el IPCC.....	24
Tabla 5. Fortalezas y debilidades de los tipos de reducción de escala	28
Tabla 6. Ecuaciones del modelo lluvia-escurrimiento GWLF	35
Tabla 7. Parámetros de calibración de Hydro-BID	37
Tabla 8. Métricas de desempeño para la calibración de Hydro-BID	38
Tabla 9. Datos de entrada del modelo	45
Tabla 10. Puntos de demanda de la cuenca del río Gualí.....	50
Tabla 11. Corriente asociada a cada subcuenca de la zona de estudio	52
Tabla 12. Medidas planteadas para reducir la demanda insatisfecha	52
Tabla 13. Parámetros de calibración finales por subcuenca	54
Tabla 14. Métricas de desempeño diarias por subcuenca	55
Tabla 15. Métricas de desempeño mensuales por subcuenca.....	55
Tabla 16. RMSE para cada modelo de circulación global	60
Tabla 17. Porcentajes de incremento o disminución de precipitación y temperatura por estación	63
Tabla 18. Oferta por corriente en los RCP 2.6 y RCP 8.5	68
Tabla 19. Demanda insatisfecha promedio, aplicando la modificación en los porcentajes de pérdidas.....	71

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de μ	29
Ecuación 2. Ecuación MAE.....	31
Ecuación 3. Ecuación RSME	31
Ecuación 4. Ecuación RAE	32
Ecuación 5. Ecuación CE	32
Ecuación 6. Expresión de cálculo para el balde superior	41
Ecuación 7. Expresión de cálculo para el balde inferior	41
Ecuación 8. Cálculo de Nash-Sutcliffe	42
Ecuación 9. Cálculo de Bias	42
Ecuación 10. Promedio aritmético.....	46

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica y división político-administrativa de la cuenca.....	16
Figura 2. Mapa de pendientes	19
Figura 3. Comportamiento de la precipitación.....	21
Figura 4. Comportamiento de la temperatura.....	20
Figura 5. Comportamiento del brillo solar.....	22
Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa.....	22
Figura 7. Metodologías de construcción de escenarios.....	24
Figura 8. Forzamiento radiativo de las vías representativas de concentración.....	25
Figura 9. Modelo conceptual de un GCM.....	26
Figura 10. Esquema conceptual de la reducción de escala.....	27
Figura 11. Comparación del espacio de fase de la serie de tiempo de precipitación.....	29
Figura 12. Relación entre los puntos de los atractores.....	30
Figura 13. Esquema general de simulación en Hydro-BID	34
Figura 14. Representación del modelo GWLF	35
Figura 15. Elementos hidrológicos modelados en WEAP	40
Figura 16. Esquema metodológico.....	44
Figura 17. a) Ubicación de la cuenca del río Gualí en la AHD. b) Cuenca del río Gualí	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Estaciones de temperatura y precipitación.....	46
Figura 19. Calibración por subcuencas.....	47
Figura 20. Esquema de demanda en la cuenca del río Gualí.....	51
Figura 21. Curva de doble masa, estación de precipitación 23020080 y 23050080	53
Figura 22. Línea del tiempo para estaciones de precipitación.....	54
Figura 23. Curvas de duración para la calibración por subcuencas	56
Figura 24. Curvas de duración-validación, subcuenca 301270200	58
Figura 25. Caudales vs precipitación para las condiciones actuales en escala diaria	59
Figura 26. Comparación de GCM vs estaciones de precipitación y temperatura.....	60
Figura 27. Comparación de los promedios de precipitación generadas por estación	61
Figura 28. Comparación de los promedios de temperatura generadas por estación.....	61
Figura 29. Comparación de la variación mensual actual y futura para precipitación y temperatura	62
Figura 30. Interpolación de temperatura futura, RCP 2.6	64
Figura 31. Interpolación de temperatura futura, RCP 8.5	65
Figura 32. Interpolación de precipitación futura, RCP 2.6	65
Figura 33. Interpolación de precipitación futura, RCP 8.5	66
Figura 34. Caudales proyectados, periodo 2013-2040.....	67
Figura 35. Caudales proyectados, periodo 2041-2070.....	67
Figura 36. Caudales proyectados, periodo 2071-2100.....	68
Figura 37. Crecimiento de la demanda de la cuenca del río Gualí	69
Figura 38. Demanda insatisfecha, escenarios sin medidas de reducción, promedio anual	70

Figura 39. Demanda insatisfecha, escenarios sin medidas de reducción, promedio mensual...	70
Figura 40. Demanda insatisfecha RCP 2.6 con medidas de reducción, promedio mensual.	72
Figura 41. Demanda insatisfecha RCP 8.5 con medidas de reducción, promedio mensual	72

LISTADO DE ANEXOS

Anexo a: Histogramas de precipitación, temperatura, brillos solares y humedad relativa.....	81
Anexo b: Histogramas de precipitación, temperatura, brillos solares y humedad relativa.....	84
Anexo c. Análisis estadístico de las estaciones	85
Anexo d: Área de cultivo por municipio	87
Anexo e. Curvas de doble masa	89
Anexo f: Comparación histórico vs futuro del GCM reducido	91
Anexo g: Métricas de desempeño de la reducción de escala.....	97

ABREVIATURAS

AHD: Base de Datos de Hidrología Analítica
ALC: América Latina y El Caribe
AR5: Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático
BID: Banco Interamericano de Desarrollo
Cortolima: Corporación Autónoma de Tolima
DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística
ENSO: Oscilación del Niño Sur
GCM: Modelo de Circulación Global
GEI: Gases de Efecto Invernadero
GWLF: Modelo de Factor de Carga Generalizado
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IIASA: Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados
IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático
m.s.n.m: Metros sobre el nivel del mar
MAE: Error Absoluto Medio
CE: Coeficiente de eficiencia
mm: Milímetros de precipitación
NIES: Instituto Nacional de Estudios Ambientales
PIB: Producto Interno Bruto
PNNN: Parque Nacional Natural Los Nevados
POMCA: Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas
RAE: Error Absoluto Relativo
RAS: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
RCM: Modelo de Circulación Regional

RCP: Representative Concentration Pathways
RSME: Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio
SIGOT: Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial
USAID: United States Agency for International Development
WEAP: Sistema para la Evaluación y Planificación del agua
ZCIT: Zona de Confluencia Intertropical

UNIDADES

km: Kilómetros
W: Watts
Ha: Hectáreas
mbar: Milibar
m²: Metro cuadrado

RESUMEN

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos a partir de una modelación hidrológica realizada en la cuenca del río Gualí, en el departamento de Tolima; con el fin de determinar los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico y la demanda de agua no satisfecha de la zona, acoplando dos herramientas de modelación del recurso hídrico. Se obtuvieron las series de caudales para las condiciones de clima actual y para las proyecciones climáticas futuras bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, el modelo de circulación global seleccionado fue el MPI-ESM-MR para el cual se realizó la reducción de escala por medio de un método estadístico basado en la teoría del caos. A partir de los resultados de la oferta hídrica futura mediante la herramienta de modelación Hydro-BID y las proyecciones de las demandas agrícolas, domésticas e industriales hasta el año 2100, se estimó la demanda insatisfecha por medio de la herramienta de modelación WEAP. Se obtuvo como resultado que para los dos escenarios se espera se presente una disminución en el caudal respecto a las condiciones actuales, de entre 5.8% y 9.56% para el RCP 2.6 y entre 2.18% y 6.86% para el RCP 8.5. Finalmente, los resultados de la simulación evidencian que solo se presenta demanda insatisfecha en los nodos de los acueductos de Fresno y Mariquita siendo en promedio 0.0413 m³/s y 0.0386 m³/s respectivamente. Además, se planteó como medida de mitigación la reducción de las pérdidas en los sistemas de abastecimiento, con lo que se puede llegar a disminuir la demanda insatisfecha en un 87.8% y 90.26% para el RCP 2.6 y el RCP 8.5 respectivamente, sin embargo, se requeriría aplicar medidas adicionales con el fin de reducir en un mayor porcentaje la demanda insatisfecha y así garantizar la seguridad hídrica en la cuenca.

Palabras clave: Cambio climático, Hydro-BID, WEAP, modelación hidrológica, cuenca del río Gualí, reducción de escala

ABSTRACT

This research presents the results obtained from a hydrological modeling carried out in the basin of the Gualí river, in the department of Tolima; in order to determine the impacts of climate change on the hydrological regime and the unmet demand for water in the area, coupling water modeling tools. Flow series were obtained for the current climate conditions and for future climate projections under the scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5, the selected global circulation model was the MPI-ESM-MR for which scale reduction was carried out using a statistical method based on the theory of chaos. Based on the results of the future water supply through the Hydro-BID modeling tool and projections of agricultural, domestic and industrial demands until the year 2100, the unmet demand was estimated using the WEAP tool. It was obtained that for the two scenarios it is expected that there will be a decrease in the flow with respect to the current conditions, between 5.8% and 9.56% for the RCP 2.6 and between 2.18% and 6.86% for the RCP 8.5. Finally, the results of the simulation show that only unsatisfied demand is present in the nodes of the Fresno and Mariquita aqueducts, with an average of 0.0413 m³ / s and 0.0386 m³ / s respectively. In addition, the reduction of losses in the supply systems was proposed as a mitigation measure, with which it is possible to decrease the unsatisfied demand by 87.8% and 90.26% for RCP 2.6 and RCP 8.5 respectively, however, it would be necessary to apply additional measures in order to reduce in a greater percentage the unmet demand and thus guarantee water security in the basin.

Keywords: Climate Change, Hydro-BID, WEAP, Hydrological modeling, Gualí river basin, Downscaling.

INTRODUCCIÓN

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) es un concepto mundial que tiene como objetivo impulsar una adecuada planificación y manejo del agua para garantizar su sostenibilidad y conservación [1] y fomentar la generación y acceso de información para dar solución a los problemas relacionados con el agua, brindar asistencia e implementar herramientas y recursos que faciliten la toma de decisiones [2]. Es por esto que uno de sus principios elementales es reducir los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad de agua, tanto actualmente como a futuro, para suplir las necesidades básicas de la población [1]. El abastecimiento de agua cumple un papel básico en el desarrollo de las actividades económicas y culturales de las comunidades alrededor del mundo, no sólo para el consumo humano sino también para el desarrollo de actividades agrícolas e industriales; por lo que suplir la demanda hídrica a partir de la oferta disponible en las cuencas es parte fundamental de la GIRH [1], [3].

El consumo mundial de agua aumentó 8 veces desde el siglo XIX y se duplica cada 15 años; por otro lado la demanda del sector agrícola, doméstico e industrial aumentó 7, 20 y 12 veces respectivamente y el consumo de agua urbana ha aumentado 20 veces en 100 años [4], lo que puede conllevar a que en el 2050, aproximadamente el 55% de la población mundial se enfrente a una crisis del agua [5], [6]. En el caso específico de Colombia, a pesar de que es considerado como uno de los países con mayor oferta hídrica natural del mundo, con un rendimiento hídrico aproximado de 56 L/s*km^2 , que supera por mucho el rendimiento promedio mundial de 10 L/s*km^2 [7], se conoce que cerca del 4% de la población sufre de un índice de escasez alto, el 7% medio alto y el 30% medio, con lo cual se estima que para el año 2025 la población afectada por escasez hídrica podría llegar al 39%, por lo que las acciones encaminadas a la conservación del recurso deben ser una prioridad [8]. Algunos de los factores que generan conflicto entre la oferta y la demanda hídrica son los altos niveles de industrialización, el acelerado crecimiento de la población, el crecimiento económico insostenible y el cambio climático [3], [9]; el conjunto de estos aspectos puede limitar el desarrollo social, económico, industrial e incluso el desarrollo mundial [10].

Esta investigación emplea herramientas de modelación hidrológica y de planificación del recurso hídrico con el fin de evaluar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica y su repercusión en la demanda insatisfecha de la cuenca del río Gualí. Se implementó la herramienta Hydro-BID para generar las series de tiempo de caudales bajo el clima actual y bajo las proyecciones climáticas futuras obtenidas del Modelo de Circulación Global MPI-ES-MR y del método estadístico de reducción de escala basado en la teoría del caos. Además, se aplicó el software WEAP para simular las demandas insatisfechas y evaluar medidas de mitigación al cambio climático.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación oferta-demanda de agua en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático, a partir de indicadores.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

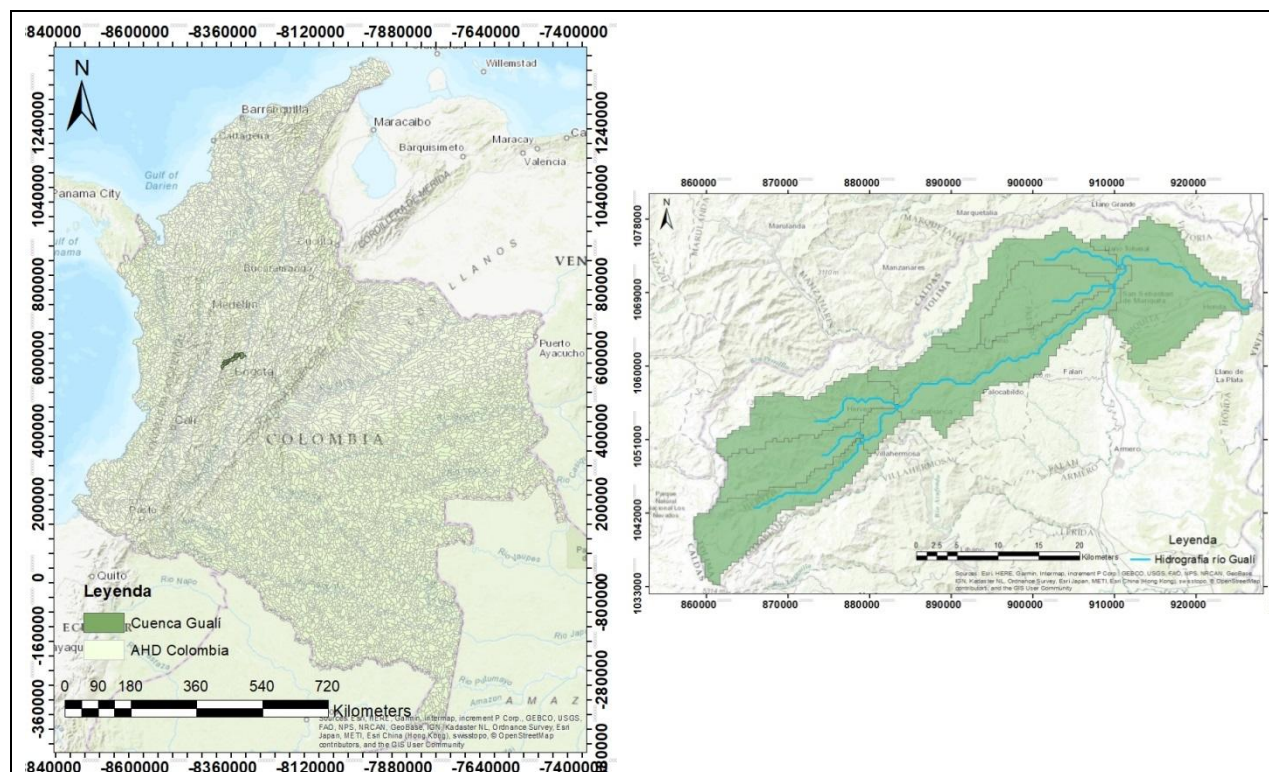
- Evaluar la disponibilidad de agua de la cuenca bajo escenarios de cambio climático implementando la herramienta Hydro-BID.
- Estimar la demanda futura de agua en la cuenca para los diferentes sectores económicos.
- Analizar la demanda de agua futura no satisfecha en la cuenca del río Gualí.
- Plantear medidas potenciales de adaptación para la reducción de la demanda futura no satisfecha.

2. MARCO CONTEXTUAL

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

La cuenca del río Gualí se encuentra ubicada en la zona norte del departamento del Tolima con coordenadas 5°12'0" N y 4°43'60" W sobre la cordillera central. Sus límites están dados por la cuenca del río Guarino al norte, las cuencas del río Lagunilla y Sabandija al sur, aporta a la cuenca del río Grande del Magdalena al oriente y al occidente colinda con la cuenca del río Chinchiná (figura 1). Esta unidad de estudio es compartida con el Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN), posee un área de 82.147,8 Ha, abarcando una población cercana a los 83.500 habitantes y nace a una altura aproximada de 4.850 m.s.n.m en la vereda de Aguas Calientes, perteneciente al municipio de Casabianca. La desembocadura de sus tributarios y de su cauce principal se da en la cuenca del río Grande del Magdalena, en el municipio de Honda aproximadamente a los 600 m.s.n.m[11].

Figura 1. Ubicación geográfica y división político-administrativa de la cuenca



Sistema de coordenadas: Magna Sirgas.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la división político-administrativa, la totalidad del área de la cuenca se encuentra en el departamento del Tolima abarcando una totalidad 7 municipios; Mariquita, Fresno, Herveo,

Honda, Palocabildo, Casabianca y Falán. El área de cada municipio dentro en la cuenca se encuentra en la tabla 1, en la cual se evidencia que Mariquita y Herveo son los de mayor área al interior de la cuenca. La cuenca se encuentra conformada por 9 subcuencas principales como se evidencia en la tabla 2.

Tabla 1. Área incluida en la cuenca por municipios

Municipio	Porcentaje de la cuenca (%)	Área de la cuenca (Ha)
Palocabildo	2.05	1684.8
Mariquita	28.09	23075.9
Fresno	17.19	14119.2
Falán	1.55	1273.2
Casabianca	13.88	11403.01
Honda	8.51	6994.04
Herveo	28.73	23597.8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Área de las subcuencas de la cuenca del río Gualí

Cuenca	Área de la cuenca (Ha)	Porcentaje de la cuenca (%)
Rio Medina	8579.3	10.44
Rio Gualí medio-bajo	702.5	0.86
Rio bajo Gualí	17093.7	20.81
Rio Sucio	8473.1	10.31
Rio medio Gualí	16565.4	20.17
Rio Aguacatal	9924.2	12.08
Rio Gualí alto-medio	1852.8	2.26
Rio Cajones	8136.1	9.90
Rio alto Gualí	10820.7	13.17
Total	82147.8	100

Fuente: elaboración propia.

Las principales actividades económicas de la zona de estudio son la industria agropecuaria, el turismo, la agricultura, la ganadería, la minería y el sector de prestación de servicios, estas actividades se localizan tanto en la zona urbana como rural. En el sector primario de la economía, la cuenca se caracteriza por cultivos semipermanentes principalmente de café, aguacate, frutales y panela. En la ganadería, para el año 2010 en la totalidad de la extensión de la cuenca se presentaron 768820 cabezas de ganado, esto sumado a la piscicultura, que para el mismo año se llegó a una producción de 517334 kg, principalmente de tilapia y trucha. Por otro lado, la producción industrial no es el común denominador de la dinámica productiva de la cuenca, pero se destaca en la parte baja (municipio de Mariquita y Honda) la existencia de industrias dedicadas a la generación de productos alimenticios como de las bebidas gaseosas y derivados agroindustriales. Finalmente, en la minería para el año 2010 se registró que los títulos mineros ocupaban una extensión total de 4972.10 Ha [12].

Finalmente, en cuanto a la cobertura vegetal de la cuenca se tiene que el 0.88% del área está constituida por territorios artificializados como tejidos urbanos y zonas industriales, el 62.63% corresponde a territorios agrícolas, el 35.81% a bosques y áreas seminaturales y el 0.68% a superficies de agua como lagos, lagunas, ciénegas y ríos. De lo anterior se concluye que la cuenca tiene una predominancia de uso en actividades agrícolas y pecuarias [13].

2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA

Para establecer el comportamiento general de la cuenca del río Gualí se calcularon los parámetros físicos y morfométricos de la misma con el fin de identificar sus principales características y cómo estas condicionan su comportamiento y su respuesta a eventos extremos. Estos parámetros se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Características morfométricas y parámetros de forma de la cuenca

Características morfométricas	
Área (Ha)	82147.8
Perímetro (km)	233.75
Longitud de cauce principal (km)	110.54
Altura media (msnm)	2600
Pendiente media	4.21%
Parámetros de la forma de la cuenca	
El factor de forma de Horton (Hf)	0,1434
Razón circula de Miller (Rc)	0.07
Razón de elongación de Schum (Re)	0,42736
Índice de alargamiento (Ia)	3.34
Densidad de drenaje	0.5

Fuente:[14].

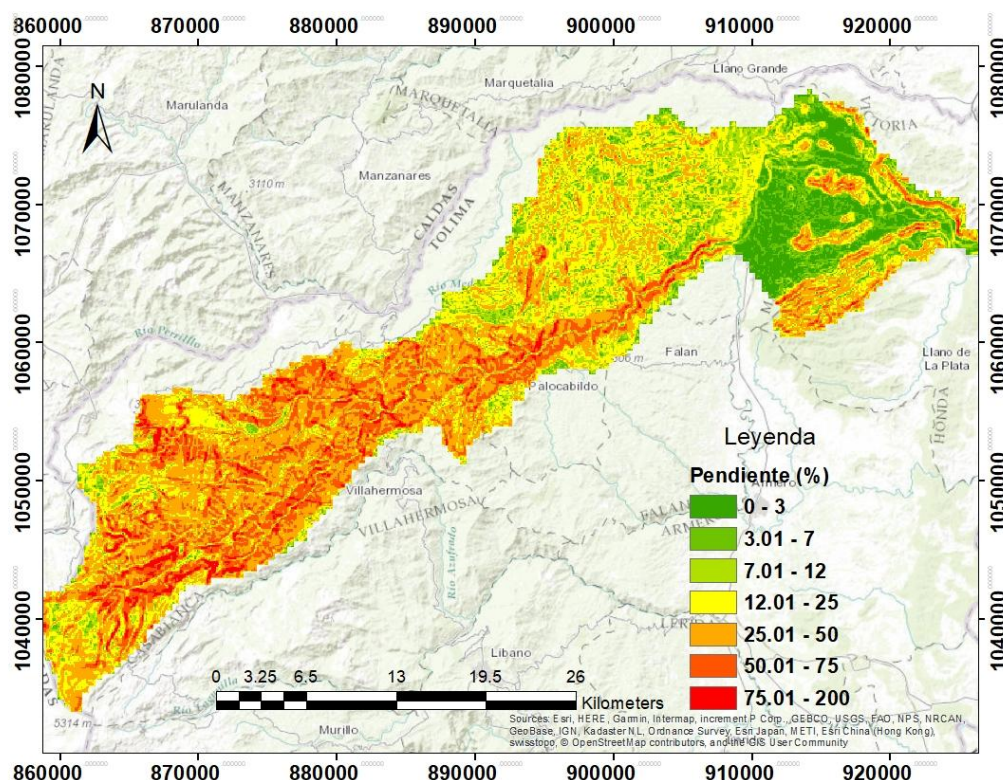
La cuenca del río Gualí tiene como característica una marcada diferencia de altitudes, pues se encuentran cotas desde los 200 m.s.n.m en la parte baja de la cuenca hasta los 5400 m.s.n.m en la parte alta lo cual puede influir en el comportamiento de las variables climáticas. Por otro lado, como se observa en la tabla 3 la longitud del cauce del río Gualí desde su nacimiento a los 4850 m.s.n.m es de 110.54 km, de los cuales a los 33.38 km recibe al primer afluente, la quebrada Cajones a una altura de 3500 m.s.n.m, posteriormente a los 44.46 km aguas abajo recibe al río Aguacatal continuando río abajo hasta los 81.63 km donde recibe al río Sucio, a los 85.40 km recoge el caudal del río Medina y por último la quebrada Padilla a los 98.71 km. A partir de allí continúa con el nombre del río Gualí hasta su desembocadura en el río Magdalena[14].

La pendiente media de la cuenca es de 4.2%, en donde la mayor parte de la misma (34.3%) presenta valores entre el 25% y 50%, lo cual corresponde a la clasificación de muy ondulada. El 20.7% del área de la cuenca se encuentra en un rango de pendientes de 12% al 25% (ondulada), el 13.73% del área total corresponde a pendientes semi onduladas a planas con valores entre 3% al 12% y el 5.48% de área restante corresponde a un rango de pendientes

entre el 0 y el 3%, es decircasi plano,siendo este el de menor presencia en la cuenca (figura 2)[14].

Los parámetros de la forma indican que la cuenca es poco susceptible a lluvias torrenciales y crecidas súbitas, esto se evidencia en el factor de forma de Horton que tiende a cero, del mismo modo la razón circular de Miller también tiende a cero, lo cual señala que la cuenca es alargada o de forma rectangular lo que conlleva a que el comportamiento de las lluvias sea poco torrencial [14]. El valor de elongación demuestra que la cuenca tiende a ser alargada y estrecha. El índice de alargamiento evidencia que la cuenca posee un sistema de drenaje semejante a una espiga, lo que denota un alto grado de evolución del sistema, con capacidad de asimilar mejor una precipitación alta [14].De acuerdo con los resultados obtenidos por los diferentes parámetros, la cuenca del río Gualí es de forma predominantemente alargada. La densidad de drenaje expresa características geológicas del territorio, para la cuenca del río Gualí este valor es de 0,5, indicando un suelo resistente a la erosión o muy permeable, con un relieve suave [14].

Figura 2. Mapa de pendientes



Sistema de coordenadas: Magna Sirgas

Fuente: elaboración propia.

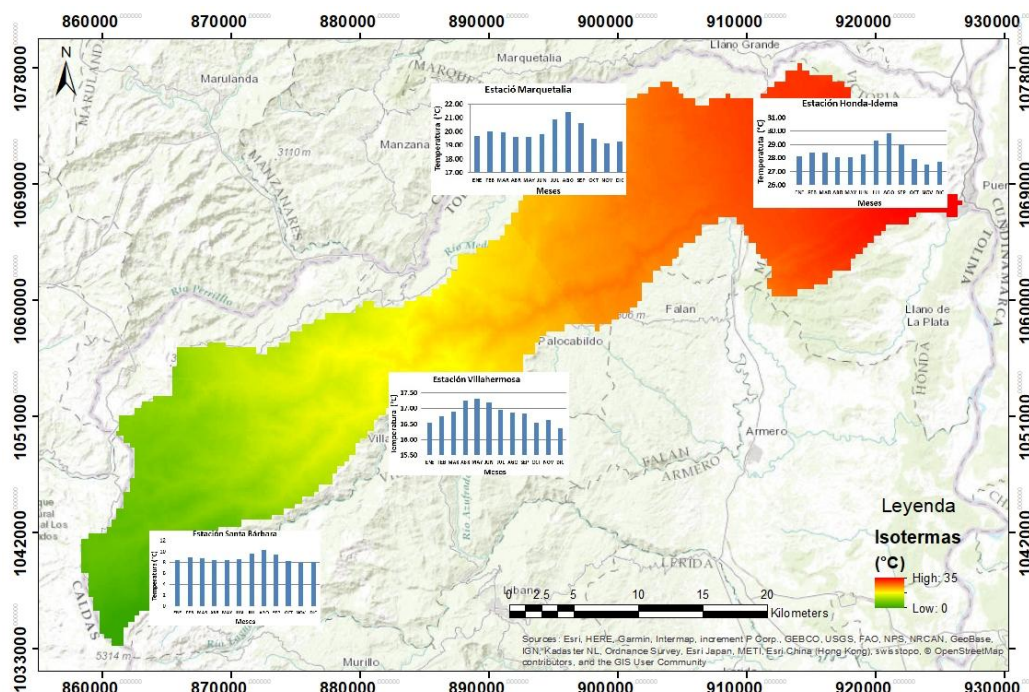
2.3 CLIMATOLOGÍA

La cuenca del río Gualí se caracteriza por tener un clima de carácter tropical que se ve enmarcado por los cambios topográficos y altimétricos presentados a lo largo de la zona, que condicionan principalmente la variación de la temperatura, teniendo un rango de

comportamiento entre 17°C a 29°C aproximadamente; así mismo en la parte alta de la zona, en cercanía del PNNN (que presenta altitudes aproximadas de 4150 m.s.n.m) la temperatura puede oscilar entre los 6°C y 8°C. Adicionalmente y a medida que se va descendiendo por el terreno, este rango varía entre 18°C y 20°C hasta que en la zona más baja, cerca de la desembocadura del cauce principal, la temperatura llega a sus puntos máximos variando entre los 28°C y 30°C, a los 220 m.s.n.m aproximadamente. Así mismo las temperaturas máximas se presentan en el mes de agosto y las mínimas en los meses de febrero y noviembre, además la variación entre los valores mínimos y máximos no supera los 3°C respecto a los valores medios a lo largo del año[11].

En las figuras 3,4,5 y 6 se muestra la interpolación de las variables climatológicas descritas, el método de interpolación implementado es el de la distancia inversa ponderada. IDW po sus siglas en inglés, se seleccionó este método debido a que ha sido ampliamente utilizado en el campo de la climatología y meteorología mostrando resultados satisfactorio, adicionalmente es un método sencillo, que se adapta fácilmente a las necesidades específicas [15]

Figura 3. Comportamiento de la temperatura



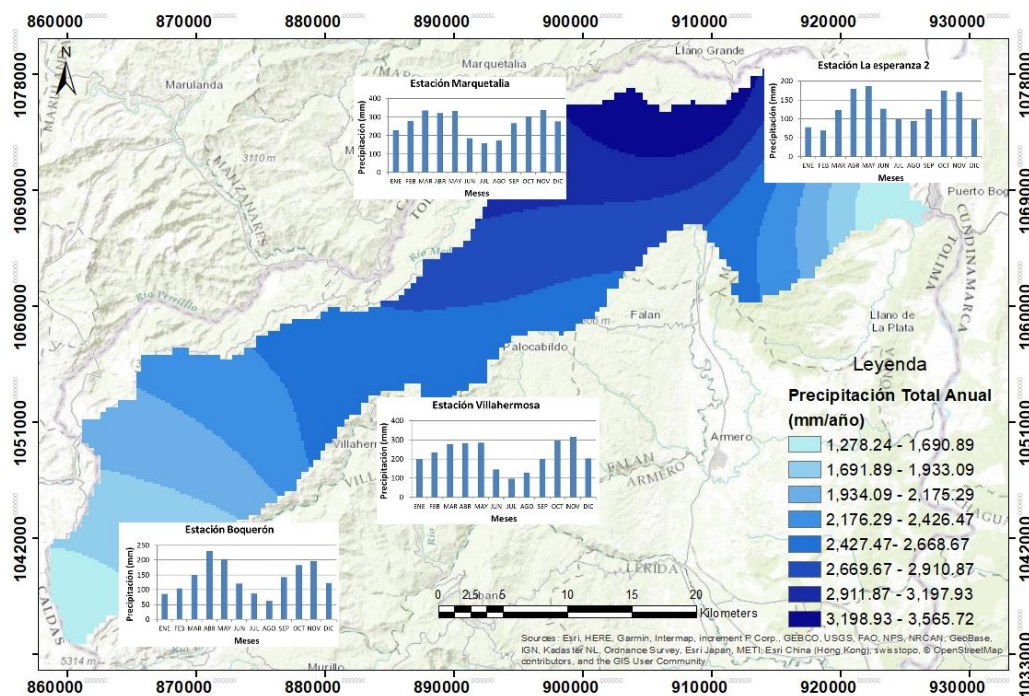
Sistema de coordenadas: Magna Sirgas

Fuente: elaboración propia.

La variable anterior describe el mismo comportamiento bimodal de la variable de precipitación, en donde setienen dos picos a lo largo del año como consecuencia del paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) en la zona andina, que presenta un movimiento de sur a norte para generar el primer periodo húmedo del año entre los meses de marzo y junio y posteriormente realiza un desplazamiento descendente, de norte a sur, para originar el segundo periodolluvioso en el año entre los meses de septiembre y noviembre, con picos máximos en el mes de octubre; así mismo los periodos secos se dan entre los meses diciembre a febrero y

entre los meses de junio a agosto. Adicionalmente, la precipitación se ve influenciada por los sistemas convectivos presentes en la zona que producen lluvia de tipo orográfica, especialmente en la parte alta de la cuenca, generando valores máximos de aproximadamente 600 mm (evidenciados en los registros históricos de la estación La Victoria) y con valores totales anuales que oscilan entre los 1270 mm y los 3600 mm, resaltando que es en el municipio de Honda donde se presentan los valores más bajos, de entre 1400 mm y 2000 mm de lluvia al año[11].

Figura 4. Comportamiento de la precipitación

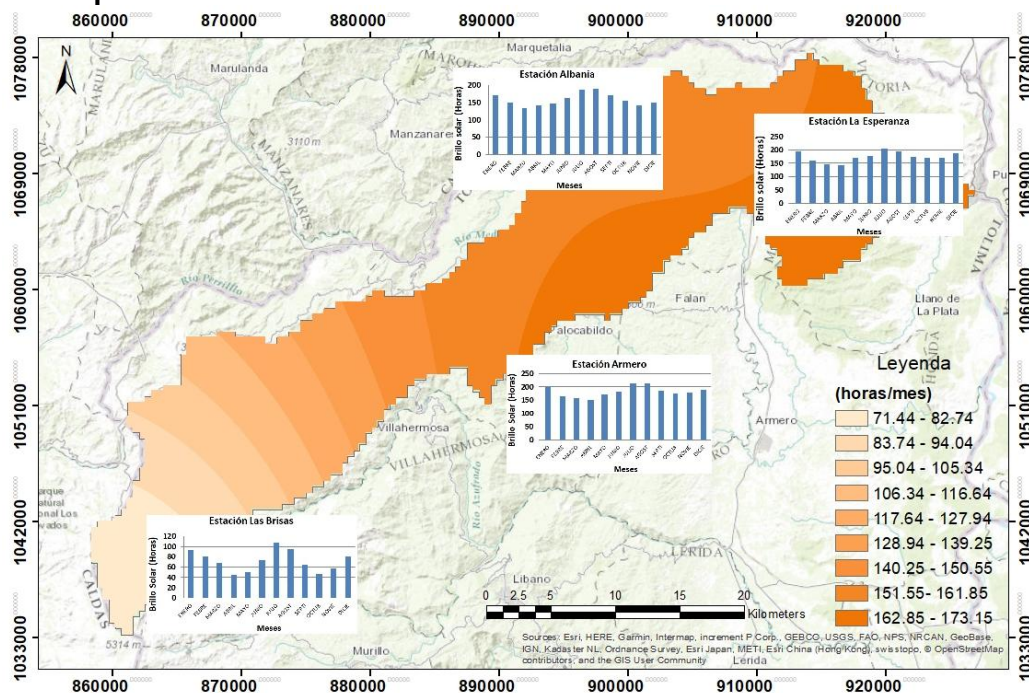


Sistema de coordenadas: Magna Sirgas

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a variable de la humedad relativa, presenta una relación inversa al comportamiento de la temperatura de la cuenca y directamente proporcional al de la precipitación, presentando aumentos en los trimestres de febrero-marzo-abril y octubre-noviembre-diciembre y ajustándose al patrón bimodal de la misma, con valores máximos de entre el 80% y el 93% aproximadamente. Finalmente, para la variable de brillo solar, se identifica que esta se ve condicionada por las condiciones de nubosidad y precipitación en la cuenca presentando un comportamiento inverso a estas variables, lo que implica que a medida que la lluvia y la formación de nubes aumenta, las horas de brillo solar disminuyen, a pesar de presentar un comportamiento bimodal y tener valores máximos de entre 100 y 200 horas de sol al mes, con valores totales anuales de 2070 horas de sol que se relacionan de forma directa con el comportamiento de la temperatura. Los histogramas de las variables anteriormente descritas se encuentran en el anexo A[11].

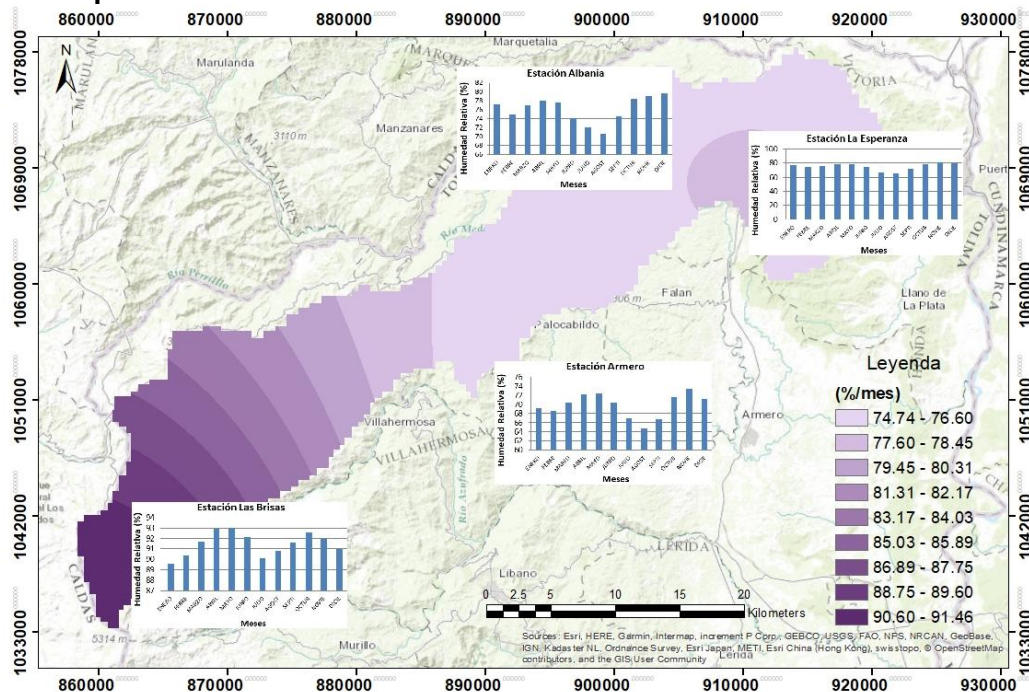
Figura 5. Comportamiento del brillo solar



Sistema de coordenadas: Magna Sirgas

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa



Sistema de coordenadas: Magna Sirgas

Fuente: elaboración propia

3. MARCO TEÓRICO

3.1 GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) es un concepto mundial que tiene como objetivo impulsar una adecuada planificación y manejo del agua para garantizar su sostenibilidad y conservación además de fomentar el acceso y la generación de información para dar solución a los problemas relacionados con el agua; así mismo busca brindar asistencia e implementar herramientas y recursos que faciliten la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas que soporten el manejo adecuado del mismo apoyándose en los elementos económicos y sociales de las regiones [1][2]. En este orden de ideas, en Colombia se establece la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, en el año 2010, que establece los objetivos, metas, estrategias y principales líneas de acción para llevar a cabo este manejo integral, sentando un precedente en la legislación ambiental del país y relacionándose de forma estrecha con el Plan Hídrico Nacional para así asegurar su implementación por medio de programas, proyectos y actividades [16].

3.2 CAMBIO CLIMÁTICO

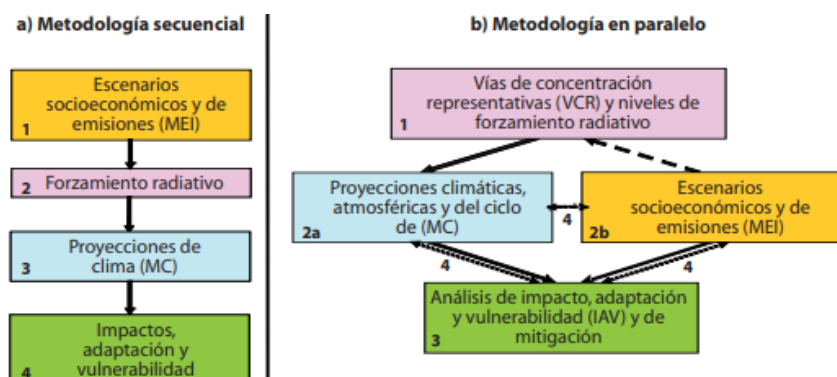
Introducirse en el concepto de cambio climático requiere en primer lugar comprender conceptos básicos como el clima, que es la medida de la media estadística de las variables que componen al sistema climático durante una serie temporal suficiente que suele ser de mínimo 30 años [17] y el tiempo, definido como “el conjunto de fenómenos atmosféricos en un momento determinado”[18], por lo que se puede decir que el clima es la estadística del tiempo [19]. En segundo lugar, cabe aclarar el concepto de variabilidad climática, dado a que es un término que suele confundirse fácilmente con el cambio climático y cuya diferencia es de vital importancia para el desarrollo de este trabajo. La variabilidad climática se refiere a fluctuaciones de los componentes del sistema climático en periodos relativamente cortos respecto a una media determinada por una serie climatológica (escalas de variabilidad) y que se evidencia con los fenómenos ENSO. Teniendo en cuenta lo anterior, el cambio climático se define como la alteración de la composición de la atmósfera que puede ser atribuida a acciones antrópicas y que sumada a la variabilidad climática puede conllevar a cambios en las condiciones predominantes del clima [20].

El cambio climático ha representado una preocupación persistente a nivel global que ha llevado a los organismos gubernamentales a realizar un gran esfuerzo por hacer frente a los efectos adversos. El Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático denominado AR5 indicó que cada una de las últimas tres décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850 y tiene un 95% de certeza de que los humanos son la principal causa del calentamiento global actual [21], adicionalmente advierte sobre las amenaza que los cambios del clima pueden generar para las personas, los ecosistemas, los sistemas económicos y el desarrollo y la necesidad urgente de que los tomadores de decisiones incluyan la adaptación y la mitigación al cambio climático dentro de sus políticas.

Dentro de las acciones del IPCC se encuentra el establecimiento de los denominados escenarios de cambio climático, que son una herramienta que permite identificar las posibles

condiciones futuras y reducir la incertidumbre acerca de cómo pueden influir las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en combinación con otras posibles fuerzas y relaciones de variables en el clima, y que se utilizan principalmente para el establecimiento de modelos que evalúan impactos y medidas de adaptación y mitigación. En el AR5 se estableció una nueva metodología para desarrollar los modelos que se basa en un sistema en paralelo, a diferencia de los anteriores escenarios que fueron planteados secuencialmente (figura 7). Los nuevos escenarios están basados en las trayectorias de concentración representativa, por sus siglas en inglés RCP.

Figura 7. Metodologías de construcción de escenarios



Fuente: [22]

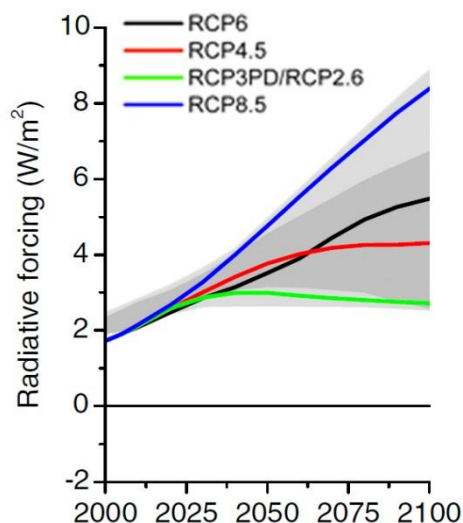
Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono [23]. Estos representan el forzamiento radiativo, es decir la medida acumulativa de las emisiones antropogénicas de GEI de todas las fuentes expresadas en vatios por metro cuadrado [24]. Fueron desarrollados en 4 líneas evolutivas diferentes, cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental que pueden ser positivos o negativos (tabla 4 y figura 8).

Tabla 4. Escenarios de cambio climático planteados por el IPCC

Escenario	Forzamiento radiativo (W/m ²)	CO _{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalia de temperatura	Trayectoria
RCP 8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento
RCP 6.0	6.0	850	3	Estabilización después del 2100
RCP 4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después del 2100
RCP 2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y luego declina

Fuente: [25].

Figura 8. Forzamiento radiativo de las vías representativas de concentración



Fuente:[24].

El RCP 2.6 fue realizado por el equipo de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos. Esta ruta de concentración representativa indica los niveles más bajos de concentración de GEI; es un escenario llamado pico, su nivel de forzamiento radiativo alcanza primero un valor de alrededor de 3.1 W/m² a mediados de siglo, volviendo a 2.6 W/m² para el 2100. Para alcanzar tales niveles las emisiones de GEI se reducen sustancialmente con el tiempo [26], [27].

El RCP 4.5 fue desarrollado por el equipo de modelado MiniCAM en el Instituto de Investigación Global de Cambio del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste (JGCRI). Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza antes de 2100 mediante el empleo de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [26], [28]–[30].

El RCP 6.0 fue elaborado por el equipo de modelado AIM en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES), Japón. Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza después de 2100 mediante el empleo de tecnologías y estrategias para reducir los GEI [31], [32].

El RCP 8.5 es desarrollado por el equipo de modelado MESSAGE y el Marco de Evaluación Integrado IIASA en el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), Austria. El RCP 8.5 se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo, indica altos niveles de concentración de GEI [33].

3.2.1 Modelos de circulación global (GCM)

Los modelos de circulación general son definidos por IPCC como “la herramienta más avanzada mundialmente disponible para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de los gases de efecto invernadero” [34]. Así pues, los GCM son modelos acoplados numéricamente que representan los procesos físicos de la atmósfera, los océanos, la criósfera y la superficie de la tierra, vinculando procesos físicos, químicos y

biológicos. Las expresiones matemáticas que configuran un GCM son la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire, el transporte de la energía y el momentum, la física del sistema climático y la transmisión de radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, la evaporación y otros factores como la interacción océano-atmósfera, la topografía y parámetros que representan la dinámica de la vegetación. Las ecuaciones matemáticas se basan en las leyes físicas de la conservación de la energía y de la masa junto con ecuaciones empíricas que relacionan variables [35].

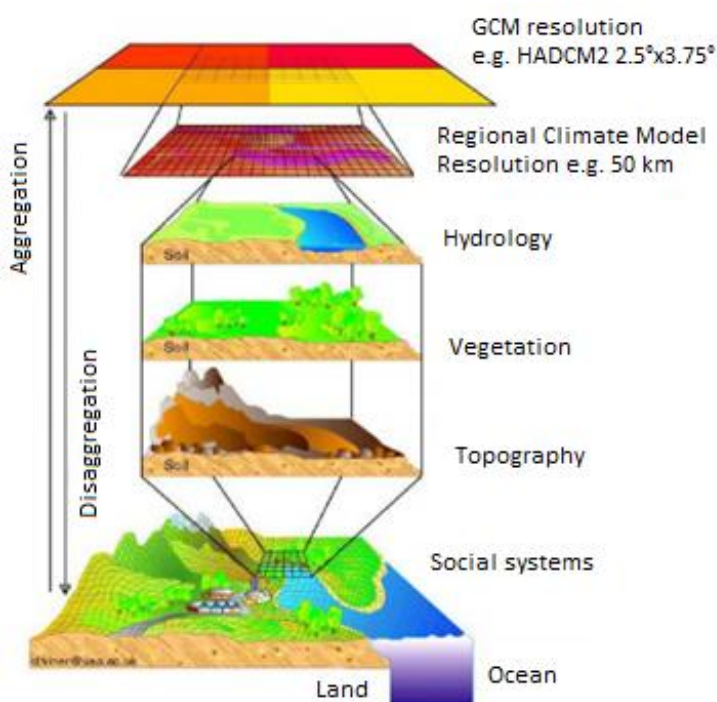
Figura 9. Modelo conceptual de un GCM

Fuente: [34]

3.2.2 Reducción de escala

La diferencia entre la escala que proporcionan los GCM y la escala necesaria para evaluar impactos locales hizo necesaria la creación de métodos de reducción de escala, estos son un mecanismo por el cual los resultados del modelo de circulación global ajustan sus resultados a escalas locales (Figura 10). Este procedimiento se basa en la suposición de que el clima a gran escala presenta una fuerte influencia en el clima local [36], [37]. El downscaling se puede realizar espacial o temporalmente, el primero se refiere a reducir la resolución de la cuadrícula del GCM a una más fina y la segunda a cambiar la escala temporal, por ejemplo, si el GCM tiene resultados mensuales y se requieren datos diarios. Por otro lado, existen dos tipos de técnicas de reducción de escala; la dinámica y la estadística.

Figura 10. Esquema conceptual de la reducción de escala



Fuente:[38]

La reducción de escala dinámica se basa en un modelo climático regional (RCM) para representar el proceso atmosférico físico, el RCM toma la información atmosférica suministrada por el GCM en los límites laterales e incorpora topografía más compleja, el contraste océano-superficie, heterogeneidades de superficie y descripciones detalladas de procesos físicos para generar información climática realista a una resolución espacial de aproximadamente 20 a 50 kilómetros[38].

La reducción de escala estadística establece relaciones empíricas entre las variables atmosféricas locales y atmosféricas a gran escala. Una vez que se ha determinado y validado una relación, se utilizan variables atmosféricas futuras que son proyectadas por el GCM y se predicen las variables climáticas locales futuras. El downscaling estadístico puede producir

proyecciones climáticas específicas al sitio de interés, mientras que RCM al estar limitadas a una resolución espacial de 20 a 50 kilómetros no pueden generar información a este nivel de detalle [38]. Otras ventajas y desventajas de cada tipo de reducción de escala se establecen en la tabla 5.

Tabla 5. Fortalezas y debilidades de los tipos de reducción de escala

	Reducción estadística	Reducción dinámica
Fortalezas	Información climática a escala de estación a partir de la salida de escala GCM	20 a 50 km de resolución de información climática a partir de la salida de escala GCM
	Barato, computacionalmente poco exigente y fácilmente transferible	Responde de manera físicamente consistente a diferentes forzamientos externos
	Conjuntos de escenarios climáticos permiten análisis de riesgo / incertidumbre	Resuelve procesos atmosféricos como la precipitación orográfica
	Flexibilidad	Coherencia con GCM
Debilidades	Depende del realismo del forzamiento de límites GCM	Depende del realismo del forzamiento de límites GCM
	La elección del tamaño y la ubicación del dominio afecta los resultados	La elección del tamaño y la ubicación del dominio afecta los resultados
	Requiere datos de alta calidad para la calibración del modelo	Requiere recursos informáticos significativos

Fuente:[37].

3.2.3 Reducción de escala estadística basada en la teoría del caos

En el entendimiento de la teoría del caos es necesario abarcar en primer lugar términos como los sistemas dinámicos, que son aquellos que cambian en el tiempo y que pueden ser descritos por medio de ecuaciones dinámicas y estructuras matemáticas o por medio de trayectorias de espacios de fases, caracterizados por su capacidad de percibir la evolución del sistema en el tiempo. Por otro lado, la no linealidad representa sistemas cuyo comportamiento no es expresable como la suma de los comportamientos de sus descriptores, esta es una característica de la evolución de los fenómenos naturales, como es la precipitación, donde largos periodos de estabilidad son intercalados con oscilaciones aparentemente aleatorias en épocas de inestabilidad [39], [40].

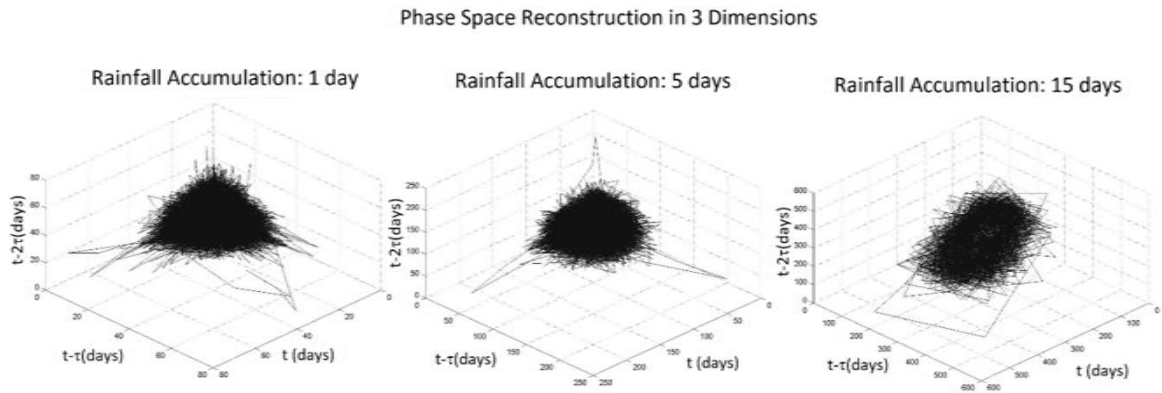
El método de reducción de escala basado en la teoría del caos evalúa la presencia de caos determinístico para diferentes periodos de acumulación. Los sistemas caóticos se entienden como aquellos que poseen una predictibilidad a corto plazo puesto que son especialmente sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales. El sistema predictivo caótico se construye con los resultados del tiempo de retardo, la dimensión de embebimiento y los exponentes de Lyapunov encontrados para los sistemas en el intervalo de acumulación de precipitación óptimo de cada sistema dinámico. El modelo predictivo se basa en la sincronización entre las estaciones climáticas y el modelo climático global, dadas por el parámetro μ del método de los vecinos falsos mutuos más próximos [36], [41].

En primer lugar se lleva a cabo evaluación de la presencia del caos determinístico para obtener el menor periodo de acumulación en el cual se presenta caos; es necesario reconstruir el

espacio de fase por medio del método del Time Delay para calcular los valores del tiempo de retardo (t) y la dimensión de embebimiento (m) necesarios para obtener los exponentes de Lyapunov[42][43][44][36], [41].

El espacio de fase es esencialmente un gráfico, cuyas coordenadas representan las variables necesarias para describir completamente el estado del sistema en cualquier momento, la trayectoria del diagrama de espacio de fase describe la evolución del sistema para un estado inicial. La "región de atracción" de estas trayectorias en el espacio de fase proporciona información cualitativa importante para determinar el grado de complejidad del sistema ", como se muestra en la figura 8 donde el espacio de fase se observa en tres dimensiones para diferentes intervalos de acumulación de precipitación. El conjunto limitante que reúne trayectorias asintóticas cercanas al equilibrio se conoce como "atractor". Los atractores de sistemas caóticos deterministas pueden exhibir un tipo inusual de auto-similitud y estructuras presentes en todas sus escalas y, por lo tanto, es necesario encontrar una dimensión apropiada del plano de fase, de modo que la estructura del atractor permanezca invariante [36], [41], [42].

Figura 11. Comparación del espacio de fase de la serie de tiempo de precipitación



Fuente:[36]

Posteriormente se realiza la sincronización de los sistemas por medio del método del vecino falso más cercano que es una técnica estadística basada en el cálculo del parámetro μ , que evalúa los vecindarios locales entre dos series de tiempo, de modo que μ toma valores del orden de 1 si existe una sincronización general completa, de lo contrario μ tiene que ser un número cuya magnitud sea comparable con el producto del tamaño del atractor dividido por el producto de la distancia entre los vecinos más cercanos en la serie de tiempo, la ecuación de μ se muestra a continuación [36], [41].

Ecuación 1. Cálculo de μ

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\|y_n - y_{n_{NND}}\| \|x_n - x_{n_{NNR}}\|}{\|x_{n_{NND}}\| \|y_n - y_{n_{NNR}}\|}$$

Fuente: [36], [41]

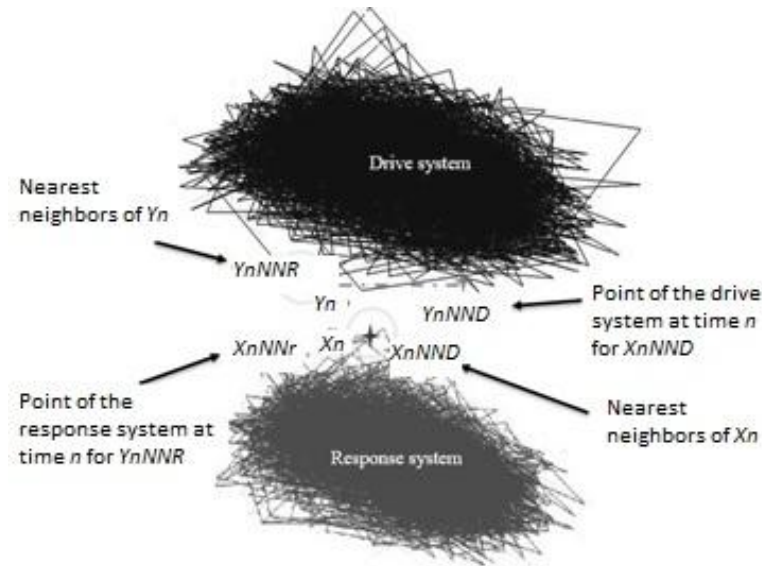
Donde

x_n y y_n , son puntos de la unidad y el sistema de respuesta en un instante n

$x_{n_{NND}}$ y $y_{n_{NNR}}$ son los vecinos más cercanos de x_n y y_n en sus respectivos sistemas

$x_{n_{NNR}}$ y $y_{n_{NND}}$ son puntos del sistema opuesto en el tiempo n para y_{nnR} y x_{nnD}

Figura 12. Relación entre los puntos de los atractores



Fuente: [41]

3.3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En primer lugar hay que destacar que un modelo es una representación de la realidad de forma simplificada que puede ser físico o matemático y que sirve para apoyar la toma de decisiones en diversos contextos [45]. Específicamente, en un modelo hidrológico se representa el sistema físico y real considerado como la cuenca de estudio, que es caracterizada por los componentes del ciclo hidrológico. Sus entradas y salidas dependen de la finalidad con la que se haga el modelo, pero en general sus resultados deben ser representativos y coherentes con las condiciones simuladas que dependen de la precipitación o de los caudales provenientes de la escorrentía superficial [46].

3.3.1 Análisis estadístico de modelos

En el desarrollo de toda modelación es necesario llevar a cabo un análisis estadístico que permita determinar el ajuste del modelo, además de su error y aplicabilidad en la zona de estudio, por lo que la aplicación de métricas o estimaciones matemáticas es indispensable. Según Krause [47] existen 3 razones principales para llevar a cabo la evaluación del desempeño de los modelos hidrológicos [48]:

- Para obtener un indicador cuantitativo de cómo el modelo reproduce el comportamiento de la cuenca.

- Para obtener un promedio de mejora del modelo o de la metodología de modelación.
- Para generar un mecanismo de comparación de resultados entre diferentes metodologías de modelación o entre varias clases de datos de entrada.

Las métricas se definen como un conjunto o sistema de parámetros que permiten cuantificar y evaluar que tanto se ajusta la simulación del modelo a las observaciones disponibles [47], [48][49]. Una de las categorizaciones principales para las métricas de evaluación se divide en parámetros estadísticos absolutos, parámetros estadísticos relativos y coeficientes adimensionales. En este orden de ideas, a continuación se muestran las métricas aplicadas en esta investigación, en donde Q_i representa los datos observados, $\hat{Q}_i$ los datos simulados, $\bar{Q}$ el promedio de los datos observados y $\bar{\hat{Q}}$ representa el promedio de los valores simulados:

3.3.1.1. Parámetros estadísticos absolutos:

- Error Absoluto Medio (MAE por sus siglas en inglés):** esta métrica representa la relación general entre el conjunto de datos observados y simulados, en unidades reales y que no puede generar resultados negativos y en donde su resultado óptimo es 0 para un modelo totalmente ajustado [48], [49].

Ecuación 2. Ecuación MAE

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i|$$

Fuente: [48]

- Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RSME por sus siglas en inglés):** representa en unidades reales el nivel general de acuerdo entre los conjuntos de datos simulados y observados, con valores no negativos, que no posee un límite superior y que en modelos de ajuste perfecto obtiene un valor de 0, usado generalmente en estudios meteorológicos, de calidad del aire y de investigaciones climáticas ya que es óptima en la evaluación de datos pico [48], [49].

Ecuación 3. Ecuación RSME

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n}}$$

Fuente: [48]

3.3.1.2. Parámetros estadísticos relativos

- Error absoluto relativo (RAE por sus siglas en inglés):** esta métrica no posee un límite superior y tiene un valor óptimo de cero, por lo que entre más bajo sea su resultado mejor será el desempeño del modelo evaluado; en general compara los datos medidos en la posición n con el promedio de los mismos [48].

Ecuación 4. Ecuación RAE

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i|}{\sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}|}$$

Fuente: [48]

3.3.1.3. Coeficientes adimensionales:

- d. **Coeficiente de eficiencia (CE por sus siglas en inglés):** describe la variación estadística total en el conjunto de datos observados respecto a los simulados, teniendo un rango entre 0 y 1, siendo este último una representación de un modelo ajustado, y aceptando valores negativos como resultado, en donde la ecuación se basa en una relación lineal, siendo un método estadístico básico [48].

Ecuación 5. Ecuación CE

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Fuente: [48]

3.3.2 Hydro-BID

Hydro-BID es un sistema de modelación desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo como parte de su compromiso para ayudar a los países miembros, en la adaptación al cambio climático. Es un sistema integrado y cuantitativo que permite simular la hidrología y apoyar gestión del recurso hídrico en la región de América Latina y El Caribe (ALC) bajo escenarios de cambio climático. Además, permite evaluar la cantidad y calidad del agua, las necesidades de infraestructura y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a estos cambios. Este programa cuenta con módulos de análisis tanto hidrológicos como climáticos que permiten estimar la disponibilidad de agua, en términos de volumen y caudal, a escalas regionales y locales con unidades de análisis de cuencas y subcuencas. Adicionalmente cuenta con una interfaz mediante la cual los usuarios pueden determinar el área de estudio y el periodo de simulación además de una interfaz especial para datos climáticos que permite incorporar los datos de las variables climatológicas y una Base de Datos de Hidrología Analítica diseñada especialmente para ALC, que lo hace ideal para la aplicación en países como Colombia. Así mismo se han desarrollado proyectos piloto e investigaciones en países como Ecuador, Perú y Argentina que comprueban la aplicabilidad de la herramienta en la zona [50][51], [52].

Tiene aplicabilidad en investigaciones que incluyan análisis de los impactos del cambio climático, simulación de aguas subterráneas, análisis del transporte de sedimentos, análisis del comportamiento de la demanda de agua al integrarse con otros software como WEAP, además del análisis de escenarios de políticas de gestión por medio de estructuras como embalses e hidroeléctricas [51]–[53].

3.3.2.1. Base de datos de hidrología analítica y datos de entrada

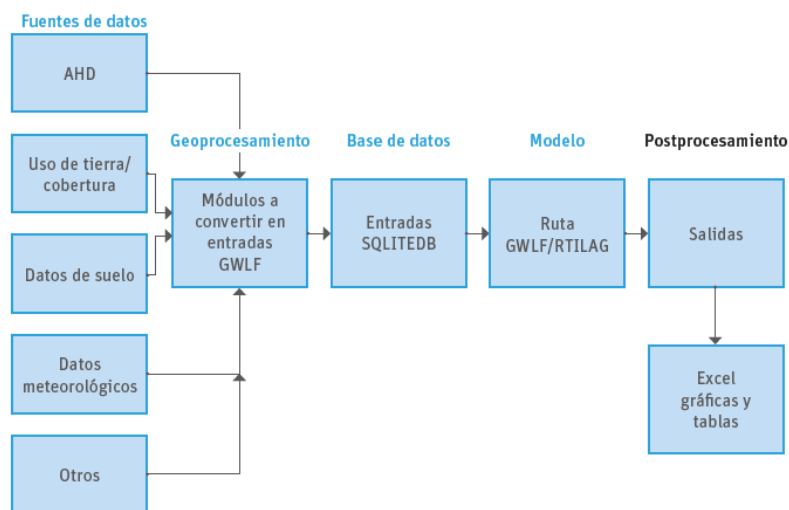
Uno de los principales componentes de este software es la Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) diseñada específicamente para la región del ALC, que está basada en una base de datos espacial apoyada en sistemas de información geográfica (GIS) de aguas superficiales y que está distribuida a lo largo de la región, en donde identifica cada una de las subcuencas con un código o ID específico. La principal función de la AHD es convertirse en una plataforma regional espacial que permita integrar y unificar los datos dispersos producto de estudios individuales en diferentes partes de ALC, de modo tal que se permita robustecer la red de modelos hidrológicos regionales [54], [55]. En la figura 10 se muestra la cobertura de esta base de datos:

Como características principales de esta base de datos se destacan las siguientes:

- Contiene una estructura compuesta por segmentos fluviales contenidos al interior de las cuencas que permite representar cauces principales y tributarios al interior de las mismas.
- Posee atributos descriptivos que permiten crear sistemas interconectados por medio de los segmentos fluviales tanto aguas arriba como aguas abajo de la cuenca y entre las mismas.
- Cuenta con una estructura de datos que permite complementar con información local y adjuntar atributos adicionales específicos para cada modelo.

Esta base de datos permite obtener la ubicación de los trazos fluviales a partir de los datos de elevación geográfica apoyándose en las elevaciones máximas y mínimas de cada zona; además de esto también incluye entre sus datos anidados la longitud de los cauces resultantes así como la inclinación promedio, el área, el perímetro y la velocidad de flujo de la corriente en cada una de las cuencas acompañado de los datos de uso de la tierra, tipo de suelo, precipitación y temperatura [50], [52]. Específicamente, para América Central y El Caribe se cuenta con aproximadamente 37.000 cuencas y segmentos fluviales caracterizados con una resolución de 83 km² y una longitud por segmento de 10 km aproximadamente. Para América del Sur se trabajaron 193.000 cuencas y segmentos, con resoluciones de 92 km² y longitudes por segmento de 11 km aproximadamente; en donde en general el 96% de las cuencas tiene una dirección de flujo conocido; cabe resaltar que para Colombia esta base de datos posee aproximadamente 1380 subcuencas delimitadas y caracterizadas [54], [55]. En la figura 13 se muestra un esquema generalizado del proceso de simulación.

Figura 13. Esquema general de simulación en Hydro-BID



Fuente: [51]

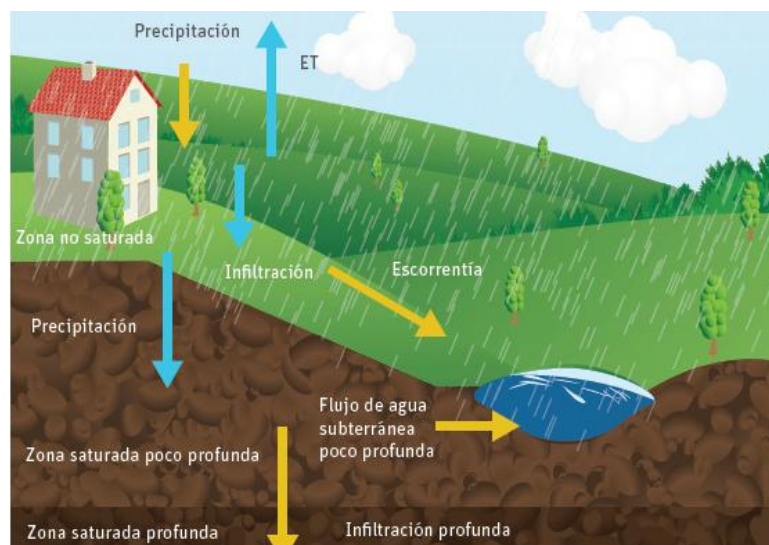
3.3.2.2. Modelo de factor de carga generalizado (GWLF)

El modelo implementado en Hydro-BID es de lluvia escorrentía de tipo distribuido y se denomina Factor de Carga de Cauces Generalizados - (GWLF, por sus siglas en inglés), este modelo suele aplicarse en cuencas pequeñas y toma en consideración los datos de uso y tipo de suelo para así generar los volúmenes de escorrentía correspondientes en cada una de las subcuencas. Este flujo resultante tiene en cuenta el aporte que hacen los flujos de agua subterránea poco profundas o flujo base [52][56]–[58].

El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por cuenca de captación: la escorrentía se genera en forma de exceso de infiltración y el flujo base es una liberación gradual de la capa saturada. Tras tomar en cuenta la escorrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo [52].

El comportamiento anteriormente descrito se evidencia en la figura 14.

Figura 14. Representación del modelo GWLF



Fuente: [52]

Como ya se mencionó anteriormente este modelo tiene en cuenta parámetros de deshielo, evaporación potencial, escorrentía, percolación, y flujo base; las ecuaciones utilizadas por este modelo se presentan en la tabla 6:

Tabla 6. Ecuaciones del modelo lluvia-escorrentía GWLF

Componente	Ecuación
Deshielo	$SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mlt}$ SNO_t: contenido de agua de la capa de nieve en un día dado R_t: cantidad de precipitación en un día SNO_{mlt}: cantidad de deshielo
ETP potencial	$PET_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273}$ H_t: número de horas de luz solar por día durante el mes E_t: presión de vapor de agua en saturación en mbar en el día t T_t: temperatura en el día t (° C).
ETP ajustada al uso de suelos y cobertura	$PET_{Adj(t)} = CV * PET$ Donde $PET_{Adj(t)}$ es la ETP de cobertura ajustada, y CV es el factor de cobertura

Tabla 6. (Continuación).

Componente	Ecuación
Escorrentía	$RO_t = \left(\frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$ $D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$ ROt: escorrentía (cm) Rt: suma de lluvia y deshielo Dt: parámetro de detención CNT: Número de curva asignado según el uso del suelo
Percolación	$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$ $S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$ Ut y St son las humedades del suelo de las zonas no saturada Qt, Et, Pt, Gt y Dt son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo, y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm)
Flujo	$F_t = RO_t + G_t$ Ft: suma de la escorrentía (ROt) y del flujo del agua subterránea (Gt)

Fuente: [52]

Inicialmente el agua procedente del deshielo se considera como lluvia que potencialmente generará infiltración y percolación en el subsuelo. En cuanto a la evapotranspiración potencial el modelo GWLF implementa un método de cálculo que incluye como variables principales la temperatura diaria y el número de horas de luz y en donde posteriormente se corregirá en base al uso del suelo y las condiciones de cobertura de la tierra que tenga la zona. Para el término de escorrentía, el modelo implementa la metodología del US Soil Conservation Service que incluye en sus parámetros de cálculo el aporte por deshielo y por precipitación. Para el caso de la percolación, es necesario llevar a cabo este cálculo tanto para la zona saturada como para la no saturada con el fin de obtener los comportamientos en las dos capas del suelo. Finalmente, para el flujo es necesario tener en cuenta la suma total de la escorrentía generada y el flujo de agua subterránea en la zona[52].

Los flujos que se generan para cada cuenca son dirigidos a lo largo de cada corriente hasta la salida de la cuenca o a alguna cuenca aguas abajo basados en un tiempo de retardo precalculado. El tiempo de retardo se define como el tiempo tomado por el flujo generado en una determinada cuenca para alcanzar la cuenca aguas abajo y se calcula como un producto de la longitud del arroyo dividida por la velocidad promedio. Mientras que la longitud del arroyo se obtiene directamente de la red de corrientes (AHD), la velocidad promedio es un parámetro que puede ser especificado en el modelo [51], [52].

6.3.1.3. Calibración del modelo

Para llevar a cabo el proceso de calibración, Hydro-BID incluye una serie de parámetros que permiten ajustar la serie de datos observados, equivalentes a los caudales obtenidos de las estaciones limnimétricas asociadas, con las series resultantes de la simulación de forma que se garantice la confiabilidad del modelo; cabe resaltar que este proceso se realiza de forma manual por método de ensayo y error. Los parámetros de calibración se muestran en la tabla 7.

Para evaluar el desempeño de la simulación es necesario aplicar una serie de estadísticas que permitan determinar la correlación entre los datos observados y modelados, Hydro-BID aplica métricas bajo los supuestos de que tanto en la serie de datos generados como los históricos no hay ningún dato faltante en el periodo de análisis además de estar en una temporalidad diaria. A continuación se muestran las ecuaciones correspondientes a las métricas calculadas por el software, en donde S_t representa los valores simulados, O_t representa los valores observados, N es el número de días de la simulación junto con σ_{obs} y σ_{sim} que corresponden a las desviaciones estándar de las series de tiempo observados y simulados respectivamente [59], [60] (tabla 8).

Tabla 7. Parámetros de calibración de Hydro-BID

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
Número de curva (NC)	Caracteriza el tipo de suelo de la cuenca y su hidrología; oscila entre 0 y 1, en donde un valor de 1 representa que toda el agua que llueve se convierte en escorrentía y 0 representa una completa infiltración.	-
Contenido de agua en el suelo (AWC)	Representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo para ser usada por las plantas, afectando la infiltración hacia el agua subterránea. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa.	10 cm
Coefficiente de Recesión (R)	Evidencia cómo el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie contribuye a los caudales de los ríos o corrientes superficiales después de un evento de lluvia. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.	0.01
Seepage o coeficiente de permeabilidad	Representa el intercambio entre las aguas subterráneas cerca de la superficie con los cuerpos de agua más profundos, en donde la cantidad de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida de la modelación. También puede ser ingresado como un multiplicador o en un valor directo.	0.005
Factor ET de la estación de cultivo	Caracteriza el factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo. Se puede ingresar como multiplicador o como un valor directo.	1

Tabla 7. (Continuación)

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
Factor ET de la estación de latencia	Corresponde al factor de evapotranspiración en la etapa de latencia o en la etapa en la que no se encuentra cultivada la zona. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.	1
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca y está disponible en algunas de las versiones del programa.	2%

Fuente: [59]–[61]

Tabla 8. Métricas de desempeño para la calibración de Hydro-BID

Métrica de desempeño	Fórmula	Valor óptimo
Volumen general de error	$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100$	Más cercano a 0
Correlación R	$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - (\sum_{t=1}^N S_t)^2][N \sum_{t=1}^N O_t^2 - (\sum_{t=1}^N O_t)^2]}}$	Más cercano a 1
Coefficiente de correlación modificado	$r_{mod} = r \frac{\min(S_{sim}, S_{obs})}{\max(S_{sim}, S_{obs})}$	Más cercano a 1
Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}$	<0.2 es insuficiente 0.2 - 0.4 es satisfactorio 0.4 – 0.6 es Bueno 0.6 – 0.8 es Muy bueno >0.8 es Excelente

Fuente: [51], [59], [60].

3.3.3 WEAP

El sistema de evaluación y planificación del agua, WEAP (por sus siglas en inglés) es una herramienta computacional robusta que permite evaluar y llevar a cabo una gestión integral del recurso hídrico. Su fin último es representar las condiciones actuales del agua en una zona de estudio para calcular la oferta y demanda hídrica generada a partir de variables climatológicas, por lo que es ideal para aplicarlo en estudios que incluyan el cambio climático [62], [63].

Este modelo fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo con apoyo del Centro Hidrológico de Ingeniería del ejército de Estados Unidos. Tiene la capacidad de ser aplicado tanto en sistemas agrícolas como en sistemas de tipo municipal e incluye módulos de análisis sectorial de demandas, conservación del agua, análisis de prioridad en el consumo y conservación del recurso hídrico, simulación de escorrentía, operación de reservorios, requerimientos ecosistémicos y análisis de costo-beneficio [64]. Las dos principales funciones de esta herramienta son:

- Simular los procesos hidrológicos naturales, como la evaporación, la infiltración y la escorrentía, para evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca de estudio.
- Simular las actividades humanas que puedan llegar a afectar los ecosistemas naturales de la zona con el fin de identificar su influencia en el comportamiento del recurso hídrico, además de los requisitos para las cosechas de esta, los flujos y el almacenamiento de agua y la generación, tratamiento y descarga de contaminantes, así como las condiciones de calidad de agua en ríos para diferentes escenarios.

Como ventaja significativa, tiene la posibilidad de integrar otras herramientas como QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST y Excel; adicional a la capacidad de generar mapas en su interfaz gráfica con el fin de mejorar la representación e interpretación de los escenarios a simular, lo que lo ha hecho un programa ideal para aplicarlo en zonas como África y América Latina [62], [63][64].

3.3.3.1. Datos de entrada

La estructura de los datos y el nivel de detalle al que se quiera llegar en la modelación depende de las herramientas y el alcance que el modelador quiera asignarle, en donde entre más información sobre la demanda y el comportamiento de la cuenca se tenga, mayor será la caracterización lograda a través de la simulación [64]. Como datos de entrada, el modelo requiere una amplia cantidad de información que va desde series de datos de variables climatológicas como precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, hasta información específica de los puntos de demanda a trabajar. En el anexo B se pueden evidenciar los datos de entrada, la prioridad y el formato.

Los datos de demanda son necesarios para analizar el comportamiento de la cuenca, los datos de clima son requeridos para alimentar el modelo a partir de las condiciones climatológicas del área de estudio, en donde la precipitación y la temperatura deben ser promedios del paso del tiempo en el que se va a trabajar (como por ejemplo promedios mensuales en cada año del periodo de simulación) mientras que para la velocidad del viento y la humedad relativa pueden ser promedios aproximados [63], [65].

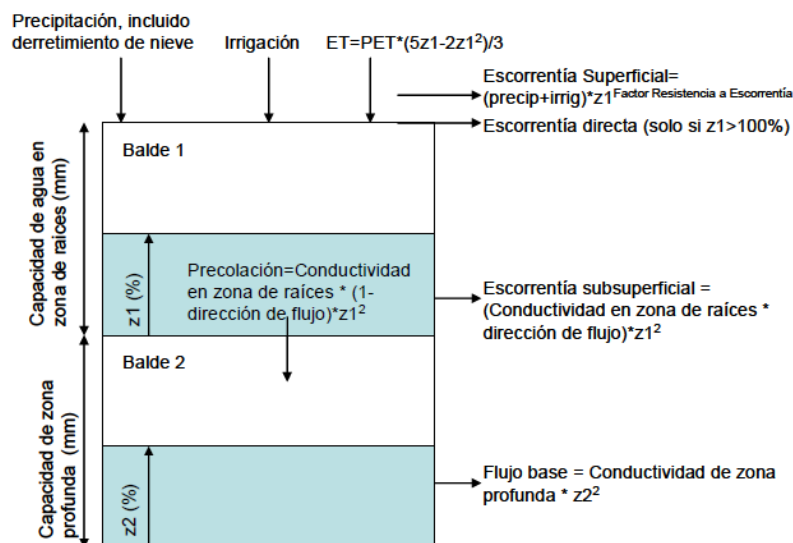
Debido a las características cuasi-físicas y semi-distribuidas del modelo hidrológico dentro de WEAP, la representación de los procesos hidrológicos tiene un nivel de agrupamiento que hace las aplicaciones del modelo sean válidas dentro del paso de tiempo semanal y mensual. Si la aplicación requiere una mayor resolución, se debe considerar el uso del paso de tiempo semanal, pero en muchas ocasiones el paso de tiempo mensual es suficiente para los propósitos de la aplicación [65].

Gracias a que WEAP cuenta con una interfaz gráfica, el planteamiento del modelo se facilita pues es posible importar directamente al programa un esquema o *shape* del área de estudio que se encuentre dividido de forma previa por subcuenca.

3.3.3.2. Modelo hidrológico utilizado en WEAP

Este programa implementa un modelo hidrológico de lluvia-escorrentía de tipo continuo, configurado a partir de un área de estudio compuesta con un set de subcuencas contiguas (*catchments*) que cubren la totalidad del área de estudio y que integran las diferentes coberturas y usos del suelo al interior de las mismas. Además, este modelo cuenta con dos receptores baldes que distribuyen el agua en escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. La distribución del agua se realiza en el tiempo de simulación, en donde las restricciones de embalses, red de distribución, las regulaciones ambientales y las prioridades asignadas a los puntos de demanda se usan como condiciones iniciales de operación y de frontera para la corrida en cuestión y que se desarrolla por medio de un algoritmo de tipo lineal que tiene como objetivo maximizar el suministro de agua en los sitios de demanda, apoyándose en la asignación de niveles de prioridad definido para cada uno de los puntos de consumo; en los casos en los que el agua se ve limitada, el algoritmo restringe de forma progresiva la asignación de agua para los sitios de demanda que tienen una prioridad de menor nivel [62], [64][65]; a continuación se muestra la figura 15 que evidencia los elementos hidrológicos modelados en WEAP:

Figura 15. Elementos hidrológicos modelados en WEAP



Fuente: [65], [66]

Así mismo incluye en sus parámetros básicos de cálculo variables como el coeficiente de cultivo (K_c), la capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular (SWC) y en la zona profunda del suelo (DWC), el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad de la zona radicular (RZC) y de la zona profunda (DC), la dirección preferencial del flujo (PFD) y el contenido de humedad del suelo en la zona radicular (Z1) y en la zona profunda (Z2); en donde por medio de estos parámetros es posible llevar a cabo la calibración del modelo desarrollado con el fin de obtener resultados que representen de forma aproximada las condiciones a simular [66], [67]. Las ecuaciones utilizadas al interior de este modelo se muestran a continuación:

Ecuación 6. Expresión de cálculo para el balde superior

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

Fuente: [66]

En donde:

$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$ representa el cambio en la humedad del suelo

$P_e(t)$ es la precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)

$PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right)$ es la evapotranspiración

$P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}}$ representa la escorrentía superficial

$f_j k_s z_{1,j}^2$ es el flujo intermedio

$(1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$ es la percolación

Ecuación 7. Expresión de cálculo para el balde inferior

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$$

Fuente: [66]

En donde:

$-k_d z_{1,j}^2$ equivale al flujo base

$(1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$ representa la percolación de la cuenca de estudio

En general WEAP realiza un balance de masa de flujo de forma secuencial a lo largo del sistema fluvial establecido en la cuenca, teniendo en cuenta los puntos de demanda o extracción y las entradas de flujo en la misma, representados por los caudales de las corrientes

hídricas. De esta forma, para simular el sistema, la corriente se encuentra dividida por tramos que tienen como límites aquellos puntos o secciones en donde se presentan cambios en el flujo como consecuencia de un afluente, una presa o una estructura física de contención [64].

3.3.3.3. Calibración

En el caso de WEAP el proceso de calibración se lleva a cabo por medio de un conjunto de parámetros hidrológicos que permiten realizar el ajuste de las condiciones simuladas a las observadas, en donde con estos resultados se aplican medidas estadísticas que permitan calcular la precisión del modelo y así ajustar los parámetros hasta que se obtengan los resultados óptimos. Esta calibración es realizada usando las ecuaciones mostradas en la sección anterior y en general lo que se busca es ajustar los caudales pico y los caudales base obtenidos en la simulación [65].

La relación que se crea entre los parámetros de calibración se describe como no-lineal, en donde la afectación de uno de los términos de la ecuación de cálculo tiene una afectación indirecta en el resto de términos de la misma [65], [68], [69]. Esta relación se evidencia de la siguiente forma:

Si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escurrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y Ks, los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y Kd. Otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, Kd, puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, Sw, se logra un mayor flujo subsuperficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente, para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (Dw), regula la transmisión de los flujos a los caudales base.

Cuando se han establecido los valores correspondientes para los parámetros de calibración se procede a identificar la correlación entre los datos observados y los datos simulados a través de un análisis estadístico llevado a cabo por medio de métricas o índices de correlación. Generalmente en WEAP se utiliza el índice de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (también llamado desviación relativa de los caudales o *Bias*) que son usados frecuentemente en hidrología y cuyas fórmulas se presentan a continuación [65]:

Ecuación 8. Cálculo de Nash-Sutcliffe

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

Fuente: [65]

Ecuación 9. Cálculo de Bias

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

Fuente: [65]

En las ecuaciones anteriores $Q_{s,i}$ corresponde a los caudales simulados y $Q_{o,i}$ representa los caudales observados, junto con s y n los cuales corresponde al número total de pasos de tiempo. En cuanto a la métrica Bias, entre menor sea el porcentaje, mejor será la correspondencia entre los datos trabajados. En el caso de esta última métrica, cuando se obtengan valores positivos, se interpreta como una sobreestimación del modelo y un valor negativo representa una subestimación de los caudales arrojados por la simulación [65].

3.3.3.4. Creación de los escenarios

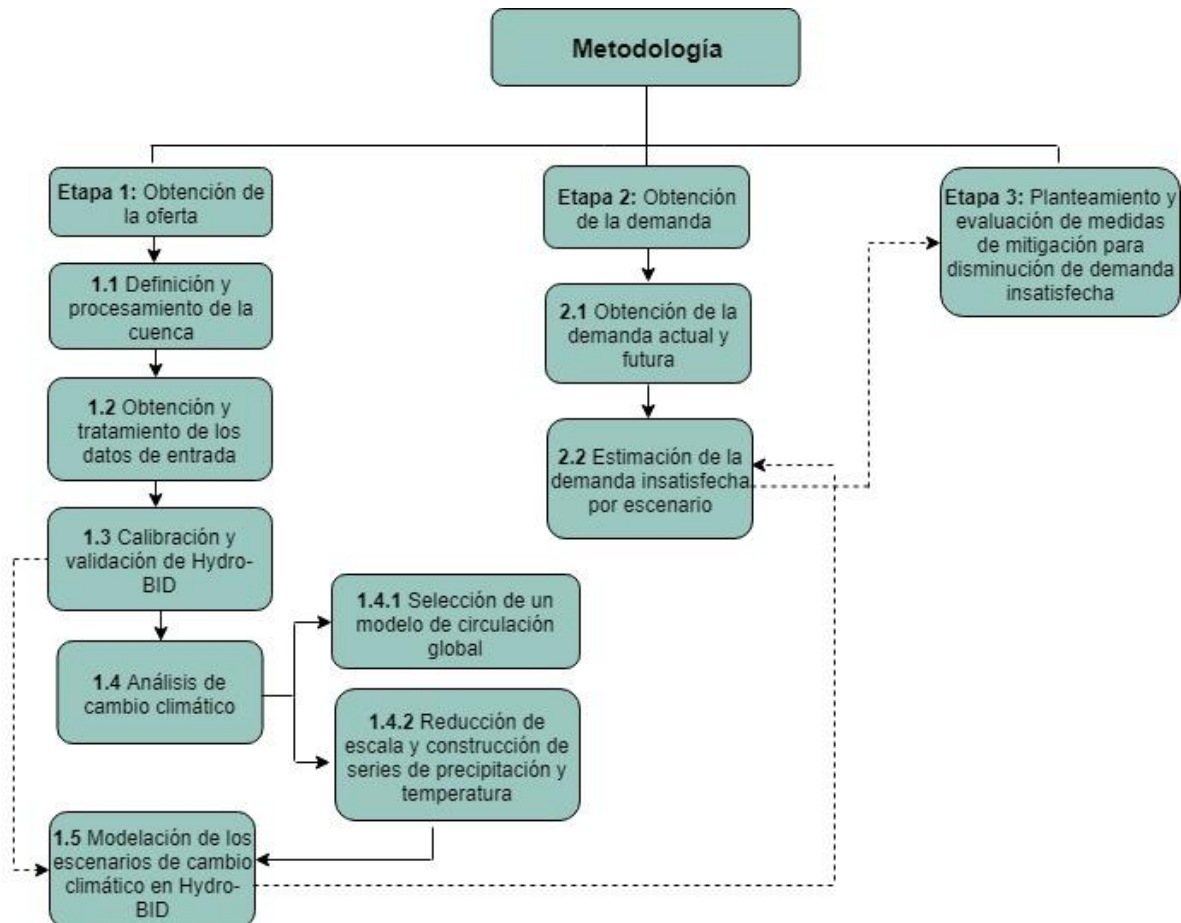
Una de las ventajas principales que tiene WEAP es la creación de escenarios de análisis basados en condiciones de frontera como las restricciones políticas y tecnológicas, las prioridades y los costos además de otros factores que condicionan la oferta y la demanda de la zona y que se integran en la modelación por medio de supuestos claves que permiten la creación de variables que pueden ser independientes de un escenario a otro y que benefician el proceso de perfeccionamiento del modelo en general [66], [69], [70]. Estos escenarios pueden ser [65]:

- Escenarios de crecimiento o cambios poblacionales, que consideren tasas de crecimiento proyectadas a futuro tanto rural como urbana.
- Escenarios de cambios en el uso del suelo como consecuencia de tendencias económicas, de conservación o de desarrollo de nuevas infraestructuras como represas.
- Escenarios de variabilidad o cambio climático. Esta opción es la más usada al interior de WEAP y permite llevarse a cabo incorporando tasas de variación de temperatura y/o precipitación, como la dada por los RCP y que se basan en proyecciones de modelos climáticos, o aplicando datos globales escalados a la zona de estudio.

4. METODOLOGÍA

Esta investigación se divide en 3 etapas metodológicas principales que van en concordancia con los objetivos planteados, primero, se estimó la oferta hídrica actual y futura, segundo se realizó la obtención de la demanda actual y futura y tercero se plantearon y evaluaron medidas potenciales para la disminución de demanda insatisfecha de los diferentes sectores hidro-dependientes, cada una de ellas consta de sus correspondientes fases que se evidencian en la figura 16 y que se describirán a continuación.

Figura 16. Esquema metodológico



Fuente: elaboración propia.

4.1 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA

4.1.1 Definición y procesamiento de la cuenca

La delimitación y procesamiento de la cuenca se realizó implementando la base de datos AHD del software Hydro-BID. Se empleó el SIG de código libre QGIS para visualizar y editar la base de datos para lo cual se cargó las capas de “catchment” y “AHD_flowline”. En primer lugar, se

realizó un acercamiento a la zona del territorio de Colombia y se demarcó la cuenca del río Gualí por medio de una herramienta denominada navegador AHD que proporciona las subcuencas con su respectivo número identificador (COMID), los ríos principales, la dirección del caudal y datos de la geometría de la cuenca como el área, la longitud del cauce principal y el perímetro. Por otro lado, usando las herramientas de geometría de QGIS se hallaron los centroides de cada una de las subcuencas, paso que es fundamental en la modelación para la interpolación climática que permite distribuir los datos de temperatura y precipitación a lo largo de la cuenca.

4.1.2 Obtención y tratamiento de los datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para la modelación se encuentran en la tabla 9 en la cual se describen la temporalidad y la escala de estos, así como la fuente de la cual fueron tomados.

Tabla 9. Datos de entrada del modelo

Datos de entrada	Fuente	Descripción	Número de estaciones	Temporalidad
Precipitación acumulada diaria en cm	Estaciones climáticas locales	Datos obtenidos del IDEAM.	16	01/01/1989 hasta 30/01/2013
Temperatura media diaria en °C	Estaciones climáticas locales	Datos obtenidos del IDEAM.	5	
Uso de la tierra	Base de datos AHD	Registros del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS).	-	
Tipo de suelo	Base de datos (AHD)	Base de Datos Armonizada Mundial de Suelos HWSD-escala 1:5.000.000 Y U.S. Department of Agriculture (USDA).	-	
Series de caudales	Estaciones limnimétricas	Datos obtenidos del IDEAM.	4	

Fuente: elaboración propia.

A cada una de las estaciones mostradas en la tabla 9 se les realizó un análisis estadístico, en el anexo C se encuentran caracterizadas las estaciones de precipitación y temperatura, esto se realizó con el fin de determinar la calidad de la información y establecer el porcentaje de datos faltantes para seleccionar el método de estimación de estos.

El método usado fue el promedio aritmético simple, ya que se contaba con 3 o más estaciones adyacentes para ambas variables. Adicionalmente, la diferencia entre las mediciones de las estaciones usadas en el promedio y la estación con los datos faltantes es menor al 10% para la variable de precipitación y 13% para la temperatura. La ecuación 10 muestra el procedimiento de cálculo de este método.

Ecuación 10. Promedio aritmético

$$D_i = \frac{A_i + B_i + C_i}{3}$$

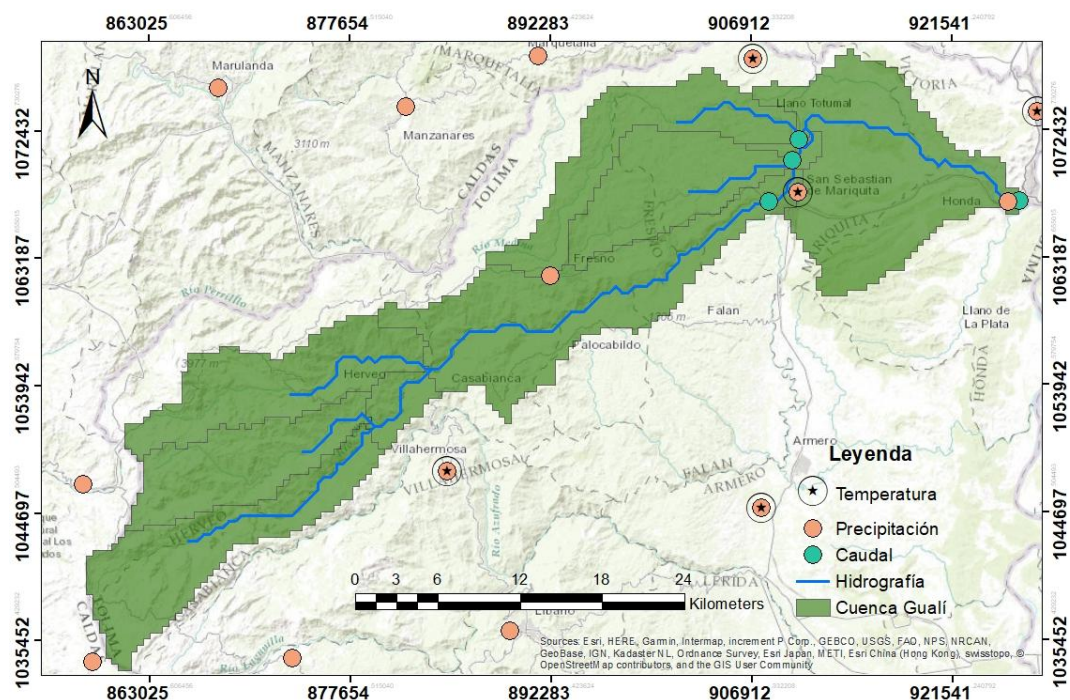
Fuente:[71].

Dónde:

D es la precipitación y/o temperatura estimada para el día i .

A, B, C es la precipitación y/o temperatura observada de las estaciones adyacentes en el día i .

Figura 17. Estaciones de temperatura y precipitación.



Fuente:elaboración propia.

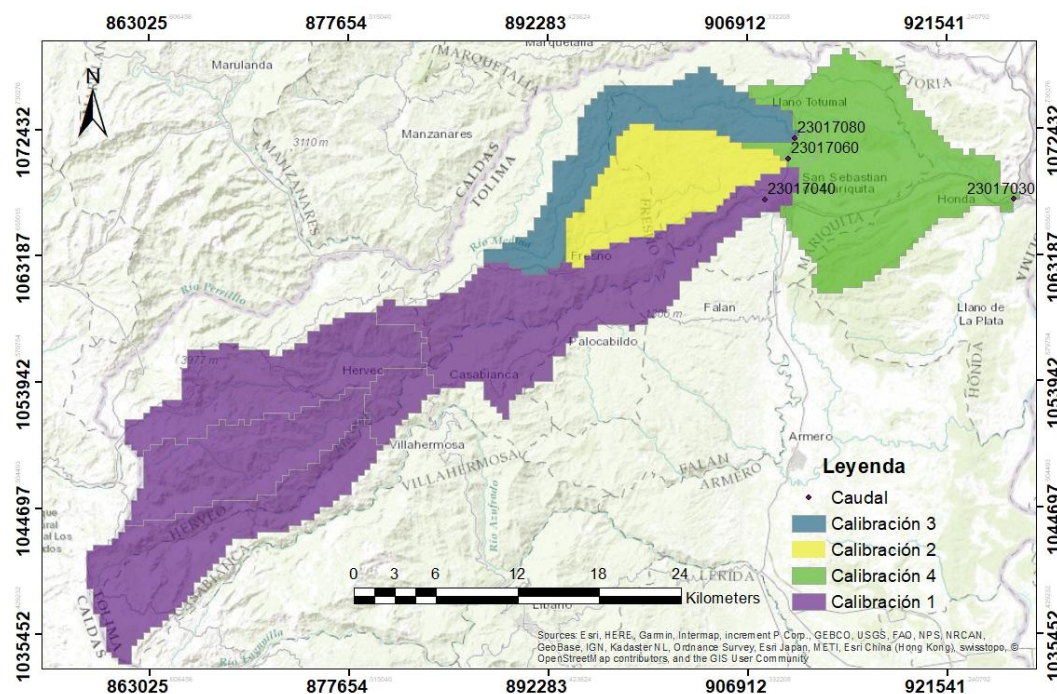
Complementando el análisis estadístico de las series, a las estaciones de precipitación se les realizó un análisis de consistencia de los datos por medio de curvas de doble masa para observar cambios en la pendiente que pudieran revelar errores sistemáticos de medición. [72], [73].

4.1.3 Calibración y validación del modelo Hydro-BID

La calibración del modelo se llevó a cabo por subcuencas puesto que se contó con 4 estaciones de caudal observado; este proceso se realizó de forma manual, por ensayo y error, desde la cuenca más aguas arriba a las más aguas abajo, relacionando entre sí los parámetros obtenidos para la cuenca inmediatamente anterior hasta llegar a la desembocadura del cauce principal. Para realizar este proceso se tuvo en cuenta el periodo comprendido entre el 01/01/1993 al 28/02/2005, puesto que en este intervalo de tiempo se encontraban las series de datos más completas para las series de caudal.

En la figura 18 se muestra la relación entre las estaciones de caudal y las subcuencas del Gualí por medio de las cuales se realizó la calibración. En este se evidencia que la calibración se realizó en 4 secciones, la primera con la subcuenca de identificador COMID 301270200 y las subcuencas inmediatamente aguas arriba de ésta que corresponde al área morada del mapa, la cual se calibró con la estación 23017040. Una segunda calibración se desarrolló en la subcuenca de COMID 301235900 correspondiente al área amarilla con la estación 23017060, la tercera con el COMID 301224300 indicada por el área azul con la estación 23017080 y finalmente el COMID 301237900 señalada por el área verde con la estación 23017030.

Figura 18. Calibración por subcuencas



Fuente: elaboración propia.

Los parámetros tenidos en cuenta en el proceso de calibración fueron el número de curva, el contenido disponible de agua el suelo (AWC), el coeficiente de recesión (R) pérdidas del sistema o el seepage, el factor de evapotranspiración de la estación de cultivo (Grow season ET factor) y el factor de evapotranspiración de la estación de latencia. Por otro lado, las métricas de desempeño del modelo usadas fueron el volumen general de error, la correlación R, el

coeficiente de correlación modificado y el índice de eficiencia de Nash Sutcliffe acompañado de la curva de duración de caudales, en donde se observa gráficamente el comportamiento de los caudales observados y simulados. Finalmente, se realizó un proceso de validación para el periodo de 28/02/2005 a 31/12/2010 para las subcuencas 301235900 y 301270200 puesto que las estaciones de caudal correspondientes eran las de mayor registro histórico.

4.1.4 Análisis de cambio climático

El análisis del cambio climático se realizó en dos fases; inicialmente se procedió a seleccionar un GCM para la obtención de las proyecciones de las variables climáticas. Se realizó una búsqueda de estudios que previamente evaluaron GCM en Colombia, y se implementaron los resultados del proyecto de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (United States Agency for International Development USAID) llamado “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”, en el cual se valoró el desempeño de 10 GCM para diferentes secciones de la cuenca del río Magdalena [74]. Debido a que la cuenca del río Gualí se encuentra dentro del área de estudio de este proyecto se preseleccionaron los 3 GCM que mejor se ajustaron teniendo en cuenta el sesgo relativo para la cuenca Magdalena-Cauca, los modelos que tienen menor sesgo para la zona mencionada fueron el MPI-ESM-MR, el CCSM4 y el NORESM1-M [74]. Posteriormente se calculó la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre el histórico del GCM y las estaciones de precipitación y temperatura para así determinar el modelo seleccionado.

La segunda etapa del análisis de cambio climático es la reducción de escala, esta es necesaria debido a que la escala requerida por los estudios hidrometeorológicos regionales es menor que las presentadas por los modelos de circulación global, que para el MPI-ESM-MR es de 22.225 km x 22.225 km. Se seleccionó el método estadístico basado en la teoría del caos que requiere como datos de entrada los registros del GMC históricos, de los RCP 2.6 y RCP 8.5 que se descargaron del Centro de Análisis de Datos Ambientales “Centre for Environmental Data Analysis” (CEDA), las series de las estaciones meteorológicas y un catálogo que contiene las coordenadas de las estaciones.

El método consta de 3 partes, la primera es la evaluación de la presencia de caos determinístico en los sistemas dinámicos para lo cual se utilizaron exponentes de Lyapunov, la segunda parte es la reconstrucción del espacio de fase, por medio del método de Time-Delay, que encuentra los valores apropiados del retardo de tiempo (τ) y dimensión (m) para capturar la dinámica del atractor. Posteriormente se realizó la sincronización de los sistemas por medio del método del vecino falso más cercano que es una técnica estadística basada en el cálculo del parámetro μ , que evalúa los vecindarios locales entre dos series de tiempo, de modo que μ toma valores del orden de 1 si existe una sincronización general completa, de lo contrario μ tiene que ser un número cuya magnitud sea comparable con el producto del tamaño del atractor dividido por el producto de la distancia entre los vecinos más cercanos en la serie de tiempo [36], [41].

Como resultados de este procedimiento se obtuvieron las series de precipitación y de temperatura reducidas; el desempeño del método se evaluó por medio de las métricas error absoluto medio, raíz cuadrada del error cuadrático medio, error absoluto relativo y el coeficiente de eficiencia entre el GCM antes de la reducción de escala y las estaciones y el GCM después de la reducción de escala y las estaciones.

4.1.5 Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático

La modelación de los escenarios de cambio climático se realizó implementando las series de precipitación y temperatura construidas a partir del procedimiento de reducción de escala. Para ello se tuvo que implementar nuevamente el interpolador climático del software Hydro-BID, cabe resaltar que el análisis se realizó en tres periodos, el primero de 2013 al 2040, el segundo de 2041 a 2070 y el tercero de 2070 a 2100. Los parámetros del modelo utilizados fueron los obtenidos en la calibración de la subcuenca más aguas abajo, es decir la correspondiente al identificador COMID 301237900 con la estación de caudal 23017030 y se seleccionó la opción “*all catchment*” que indica que los resultados serán calculados en todas las subcuencas y no solo en la subcuenca de salida. Como resultado de la modelación se obtienen series de caudal en temporalidad mensual, una hoja de cálculo con el balance hídrico de cada subcuenca además de una curva de duración que evidencia el ajuste del modelo entre los datos observados y simulados.

4.2 OBTENCIÓN DE LA DEMANDA

4.2.1 Obtención de la demanda actual y futura

La integración de WEAP e Hydro-BID se realizó en 3 partes, en primer lugar, el cálculo de la demanda actual y proyección de la demanda futura, en segundo lugar, el diseño de la topología en WEAP y finalmente el ingreso de los caudales arrojados por Hydro-BID. Para de la demanda actual de la cuenca fue necesario recurrir a los registros de la Corporación Autónoma Regional, Cortolima, con el fin de obtener los valores correspondientes a las concesiones asignadas dentro de la zona de estudio y que tienen una clasificación doméstica, agrícola o industrial. A partir de esta información, y complementándola con aquella encontrada en el POMCA de la cuenca [75], se clasificaron los puntos de demanda a lo largo de la zona de estudio, dependiendo de la corriente de la cual se estaba haciendo la captación asignando un identificador a cada una de las corrientes siendo 1 para el río Medina , 2 para el río Sucio, 3 para el río Gualí y 4 para el río Aguacatal.

Para los puntos de demanda doméstico fue necesario obtener la población que se abastece de cada uno de los acueductos, tanto municipal como veredal, para obtener la tasa de uso del agua de cada uno de los puntos de esta clasificación. Esto se obtuvo a partir de la suma de las poblaciones que se encuentran relacionadas en cada uno de los acueductos, dando como resultado el consumo de agua por año en unidades de $\text{m}^3/\text{hab.año}$. En cuanto a la obtención de la tasa de uso del agua para la clasificación agrícola fue necesario obtener las hectáreas de cultivo presentes en cada una de las subcuencas trabajadas para así determinar el consumo anual de agua en unidades de $\text{m}^3/\text{hect.año}$, realizándose por medio de los mapas de cobertura y uso del suelo de la cuenca obtenidas del Sistema de Información geográfica para la Planeación y el Ordenamiento (SIGOT), información que se evidencia en el anexo D. Finalmente, para la clasificación de demanda industrial, se trabajó con el caudal registrado en las concesiones ya mencionadas, ingresándola en el modelo en unidades de m^3/s . La totalidad de los puntos de demanda se pueden observar en la tabla 10.

Tabla 10. Puntos de demanda de la cuenca del río Gualí

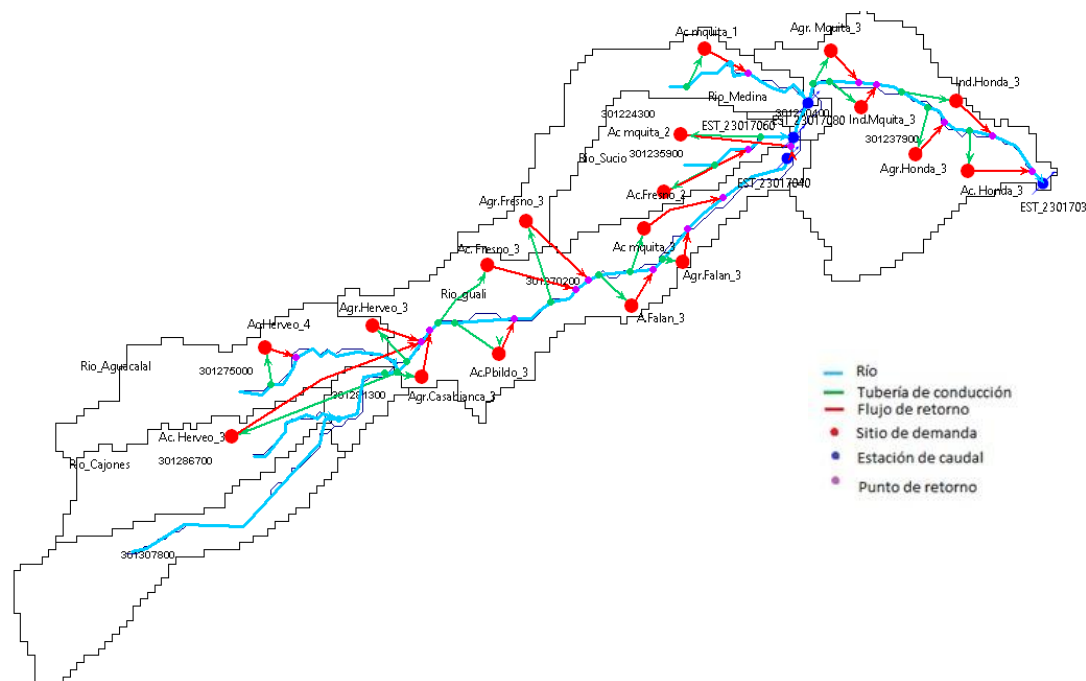
Municipio	Tipo de uso	Corriente	Concesión (l/s)
Fresno	Agrícola	Gualí	14.47
		Aguacatal	25
	Doméstico	Sucio	2.7
		Gualí	190.29
Falán	Agrícola	Gualí	0.35
	Doméstico	Gualí	0.625
Honda	Industrial	Gualí	7.95
	Doméstico	Gualí	0.846
	Agrícola	Gualí	0.115
Herveo	Agrícola	Gualí	3.96
	Doméstico	Gualí	244.57
	Doméstico	Aguacatal	40
Casabianca	Agrícola	Gualí	0.55
Mariquita	Doméstico	Gualí	67.79
		Medina	21.32
		Sucio	183.31
	Agrícola	Gualí	203.24
		Medina	50.7
		Sucio	2006
	Industrial	Gualí	8.45
Palocabildo	Doméstico	Gualí	19.92

Fuente: elaboración propia.

Para la demanda futura se realizó la proyección de los consumos ya mencionados por medio de los registros históricos del Producto Interno Bruto anual (PIB) obtenidos de datos registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Banco de la República, en un periodo entre el 2000 hasta el 2016, asociados a cada uno de los 3 sectores (agrícola, industrial y de servicios).

En cuanto a la topología planteada en el modelo en WEAP se trabajó con la interfaz gráfica de la misma en donde es posible importar el esquema de la cuenca para ubicar los puntos de demanda con los que se va a trabajar, obteniendo la figura 19.

Figura 19. Esquema de demanda en la cuenca del río Gualí



Fuente: elaboración propia.

En el esquema, las líneas de color azul representan los ríos de la zona de estudio, siendo estos la corriente principal del río Gualí y los tributarios. Los puntos rojos representan los sitios de demanda, los puntos azules corresponden a las estaciones de caudal. Finalmente, las líneas verdes mostradas en el esquema corresponden a las líneas de transmisión desde los tributarios y la corriente principal a los puntos de captación y las líneas rojas representan el caudal devuelto a las corrientes desde el punto de demanda (vertimientos) teniendo en cuenta un 15% de retorno. Así mismo, fue necesario incluir el porcentaje de pérdidas generadas a lo largo de las líneas de transmisión para cada tipo de punto de demanda; estos datos fueron obtenidos a partir de información otorgada por Cortolima para los puntos domésticos, además de revisión bibliográfica, específicamente en el título A del Reglamento de Agua y Saneamiento Básico (RAS 2000) y de otros casos de estudio similares, como el llevado a cabo en la cuenca del río Grande en Argentina [50]. A partir de esto se plantearon como pérdidas iniciales el 35% para los puntos de demanda doméstico, el 30% en los puntos de demanda industrial y el 55% de pérdidas en los puntos agrícolas.

Como último dato de entrada, se incluyeron en este modelo las series de caudales obtenidas del Hydro-BID, para los escenarios de cambio actuales y para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, en cada una de las subcuencas. De esta forma se asignaron las series de caudal a las corrientes que se encontraban ubicados al interior de la cuenca. Esta asignación se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Corriente asociada a cada subcuenca de la zona de estudio

Corriente	Subcuenca asociada
Aguacatal	301275000
Cajones	301286700
Medina	301224300
Sucio	301235900
Gualí	301307800
	301281300
	301270200
	301230400
	301237900

Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Estimación de la demanda insatisfecha por escenario de cambio climático

Posterior a la integración de las series de datos de Hydro-BID en WEAP se lleva a cabo la corrida del modelo, en donde se obtienen los valores de demanda proyectados y se comparan con la oferta generada en la cuenca, como resultado se genera el valor de la demanda insatisfecha para cada uno de los puntos de demanda.

4.3 PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA INSATISFECHA

Con el fin de reducir los niveles identificados de demanda insatisfecha se plantearon 3 escenarios de manejo que consisten en disminuir el nivel de pérdidas que se presentan a lo largo del sistema de distribución, desde los puntos de captación hasta los puntos de demanda. La combinación de las medidas planteadas se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Medidas planteadas para reducir la demanda insatisfecha

Escenario	Pérdidas en demanda Doméstica (%)	Pérdidas en demanda Agrícola (%)	Pérdidas en demanda Industrial (%)
Actual	35	55	30
Medida A	30	45	20
Medida B	20	35	10
Medida C	10	20	5

Fuente: elaboración propia.

Posterior al planteamiento de las medidas para la reducción de la demanda insatisfecha se procede a correr nuevamente el modelo de WEAP con el fin de observar el impacto de cada una de las combinaciones (A, B o C) en los resultados originales y de esta forma establecer cuál de ellas es la más favorable para maximizar la cobertura de la oferta de la cuenca sobre la demanda.

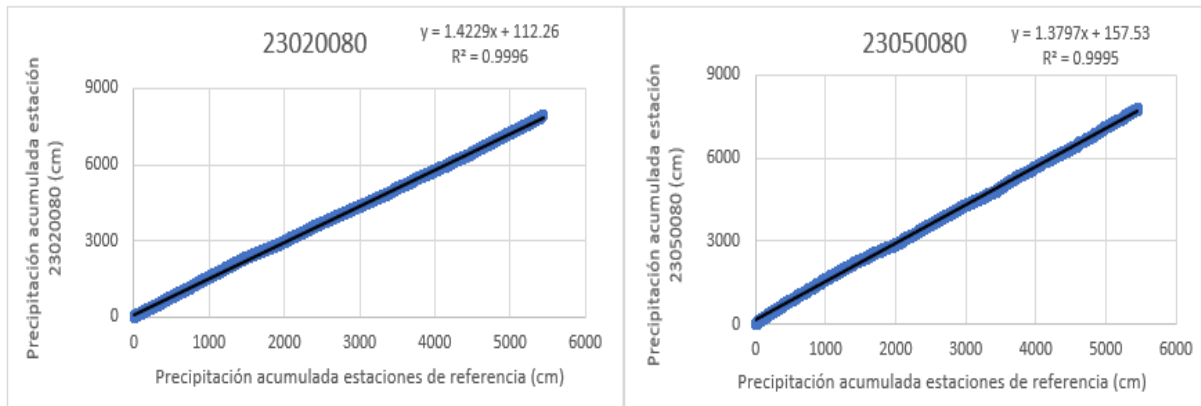
5. RESULTADOS

5.1 OBTENCIÓN DE LA OFERTA

5.1.1 Tratamiento de los datos de entrada

Como resultado del análisis de consistencia de los datos por medio de la metodología de la curva de doble masa se obtuvo que las pendientes no presentan una variación significativa en la pendiente, comportamiento que se evidencia en la figura 20, por lo que no fue necesario aplicar el coeficiente de ajuste. Este resultado se comprueba con los valores obtenidos por medio del parámetro de ajuste R^2 que varió entre 0.9931 y 0.9995, mostrando un ajuste óptimo entre las estaciones. Para observar las curvas de doble masa de las demás estaciones, remitirse al anexo E.

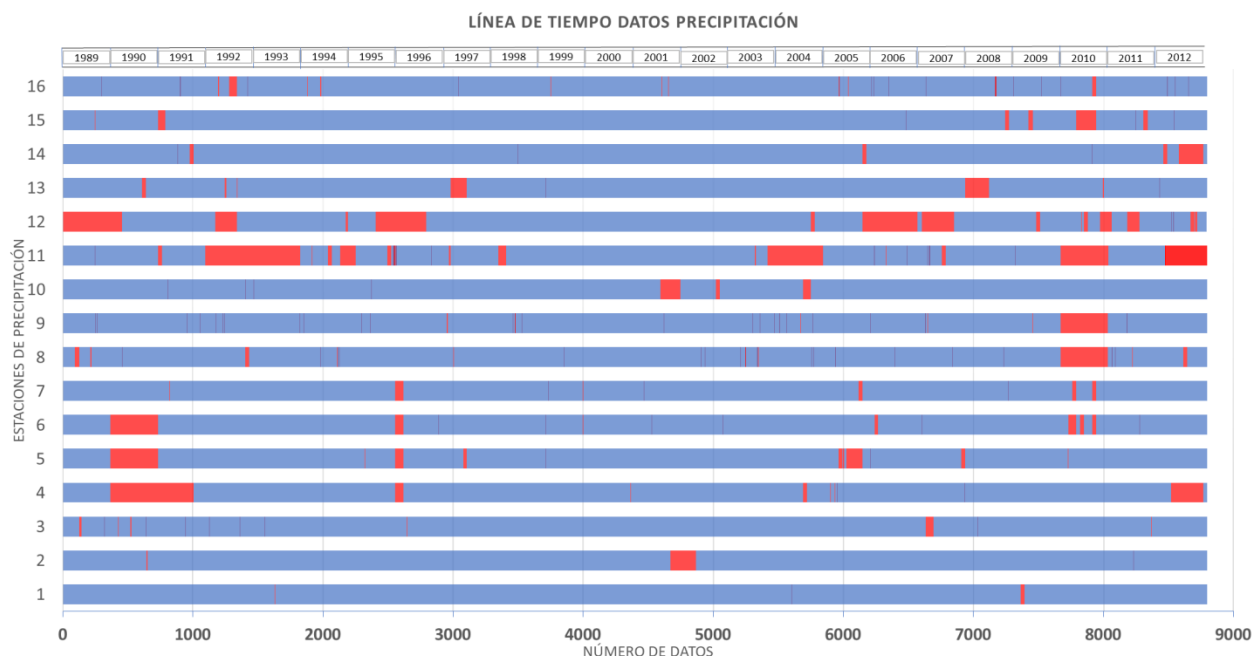
Figura 20. Curva de doble masa, estación de precipitación 23020080 y 23050080



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se realizó una línea del tiempo usando las estaciones de precipitación (eje y) en el orden en el que se muestran en el anexo C. En esta gráfica se observan los periodos sin registros de medición identificados en color rojo y los periodos de medición continuos en cada una de las estaciones, representados en color azul. Se identificaron las estaciones con periodos incompletos en común, lo que sirvió como criterio para determinar las estaciones adyacentes con las cuales se completaron los datos por el método de promedio aritmético simple además de identificar que no existe un periodo continuo de más de 2 años con datos faltantes a lo largo de los registros históricos.

Figura 21. Línea del tiempo para estaciones de precipitación



Fuente: elaboración propia.

5.1.2 Calibración y validación del modelo Hydro-BID

En el desarrollo de la calibración se identificó la influencia de los parámetros del modelo Hydro-BID sobre el caudal simulado. En primer lugar, se evidenció que la relación entre el seepage y el volumen de caudal es inversamente proporcional, por lo cual cuando se reduce el coeficiente de permeabilidad, el volumen de los caudales reflejados en la curva de duración aumenta pues se presenta menor infiltración de agua superficial a los acuíferos, también se estableció que cuando el valor asociado a el coeficiente R aumenta, la pendiente de la curva refleja este mismo comportamiento. Adicionalmente, cuando el valor del número de curva se reduce los caudales disminuyen siendo menos sensibles a los eventos de precipitación. Finalmente, cuando el valor del AWC aumenta, la pendiente de la curva de duración también lo hace. En la tabla 13 se muestran valores de los parámetros de calibración para cada una de las subcuencas:

Tabla 13. Parámetros de calibración finales por subcuenca

Parámetro	Sub cuenca	301270200	301235900	301224300	301237900
Estación		23017040	23017060	23017080	23017030
NC		2.1	2.1	1.75	1.75
AWC		0.006	0.7	0.6	0.6
R		0.006	0.018	0.02	0.02
Seepage		0.00005	0.00001	0.00005	0.00005
Grow Season ET Factor		1	1	1	1
Dormant Season ET Factor		1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

Como consecuencia de aplicar los parámetros obtenidos en la tabla anterior, se obtuvieron las métricas de desempeño, a nivel diario y mensual, de cada una de las subcuencas trabajadas, que se encuentran en el periodo del 1989 al 2013 y que se muestran en las tablas 14 y 15.

Tabla 14. Métricas de desempeño diarias por subcuenca

Métrica de desempeño diaria	Sub cuenca	301270200	301235900	301224300	301237900
Estación		23017040	23017060	23017080	23017030
Volumen de error general		-7.95	2.82	-1.57	4.45
Correlación (R)		0.31	0.13	0.28	0.25
Correlación modificada		0.27	0.11	0.25	0.21
Eficiencia de Nash-Sutcliffe		-0.64	-0.48	-0.27	-0.84

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Métricas de desempeño mensuales por subcuenca

Métrica de desempeño mensual	Sub cuenca	301270200	301235900	301224300	301237900
Estación		23017040	23017060	23017080	23017030
Volumen de error general		-7.82	2.75	-1.66	4.51
Correlación (R)		0.61	0.69	0.76	0.65
Correlación modificada		0.38	0.53	0.61	0.45
Eficiencia de Nash-Sutcliffe		0.33	0.47	0.57	0.42

Fuente: elaboración propia.

Las métricas de desempeño de la calibración que se evidencian en la tabla 14 y 15 reflejan que el proceso de calibración es aceptable para cualquier fin que involucre los valores medios mensuales o anuales, más no los valores diarios. Lo anterior se ve reflejado en el índice de eficiencia de Nash que arroja resultados negativos para la temporalidad diaria, indicando que el modelo subestima el caudal simulado y que no hay suficiente confiabilidad de los mismos; sin embargo a nivel mensual se obtuvo un índice de Nash cercano a 0.5, lo que representa que la media mensual es aceptable y se puede tener confiabilidad en la simulación.

Por otro lado, la zona de estudio se considera como una cuenca de pulsos, en donde se presentan aumentos repentinos en los volúmenes de escorrentía, causados por los deshielos provenientes del Nevado del Ruiz. Debido a que este comportamiento no fue considerado en el proceso de calibración, el ajuste de los resultados en la parte alta de la cuenca solo representa el componente atmosférico más no los aportes adicionales; teniendo en cuenta que la calibración se llevó a cabo de forma secuencial, este comportamiento generó que los resultados

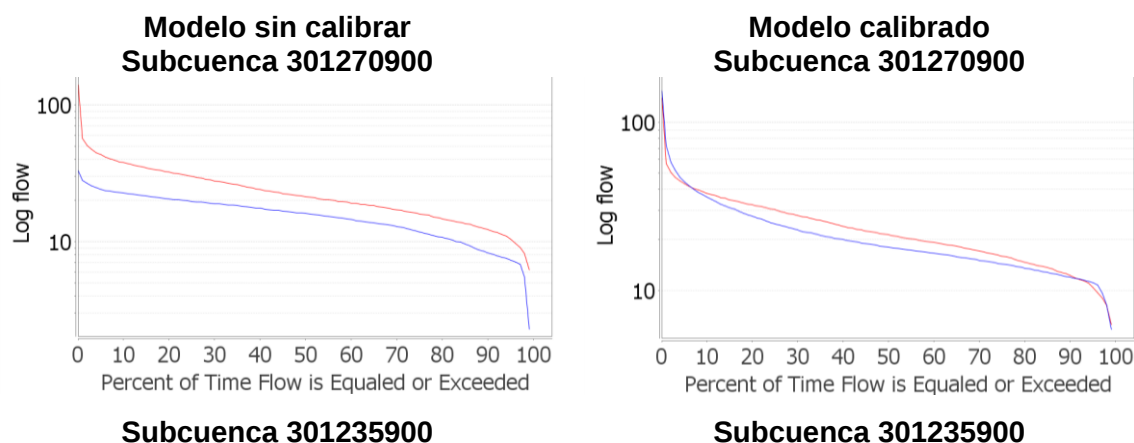
generales derivados del mismo proceso fueran aceptables a pesar de tener suficientes datos para desarrollar la modelación correctamente.

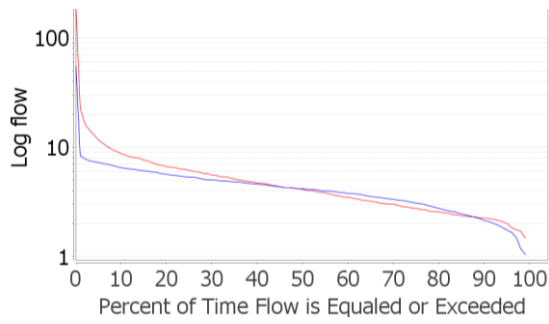
Para el caso de la correlación R se observan valores óptimos en temporalidad mensual a diferencia de los resultados generados para la temporalidad diaria. Esto se debe a que en los valores diarios se evalúa la estacionalidad por lo que se tienen en cuenta los valores máximos y mínimos; ya que esta métrica es especialmente sensible a los valores pico y como se presenta una alta variación en los caudales registrados debido a los procesos de deshielo, los resultados obtenidos en los valores diarios indican una baja correlación, sin embargo esto no implica que no haya una interdependencia de los mismos. Cabe resaltar que para fines de esta investigación, es más relevante la estacionalidad de los caudales en comparación a la relación dato-dato que se pueda generar entre las variables. En el caso la temporalidad mensual, se evalúa el promedio del conjunto de datos por lo que los valores pico no son tan relevantes, razón por la cual la correlación mejora llegando a valores de hasta 0.76.

Adicionalmente cabe resaltar que Hydro-BID es un software para la planificación que está diseñado para representar las condiciones medias, no máximas, por lo cual el modelo no representa los picos de caudal; lo anterior sumado a que la cuenca es de pulsos, implica una mayor afectación al desempeño de la calibración.

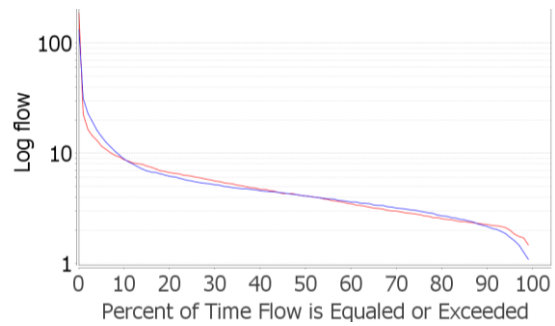
Finalmente, se obtuvieron las curvas de duración arrojadas por el programa, antes y después del proceso de calibración para cada subcuenca, evidenciadas en la figura 22 donde la línea roja corresponde al modelado y la azul al observado; se encuentra que a medida que se avanza en la calibración la curva de duración simulada se ajusta mejor a las condiciones observadas, además se evidencia que los volúmenes de caudal se conservan, validando el modelo.

Figura 22. Curvas de duración para la calibración por subcuencas

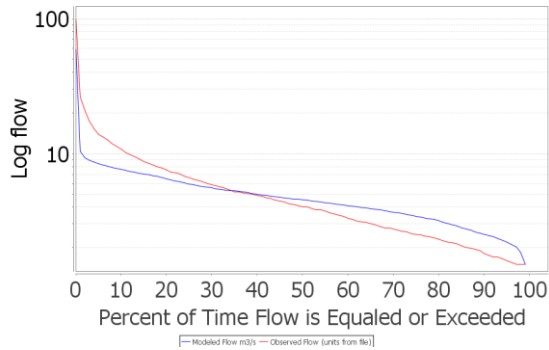




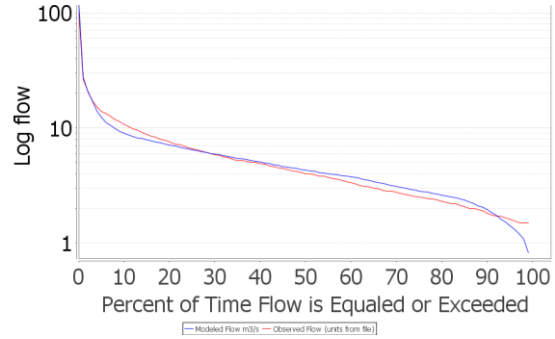
Subcuenca 301224300



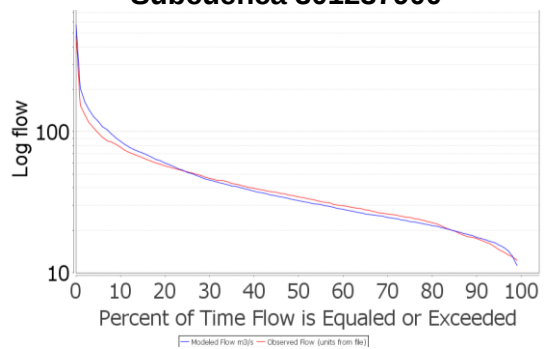
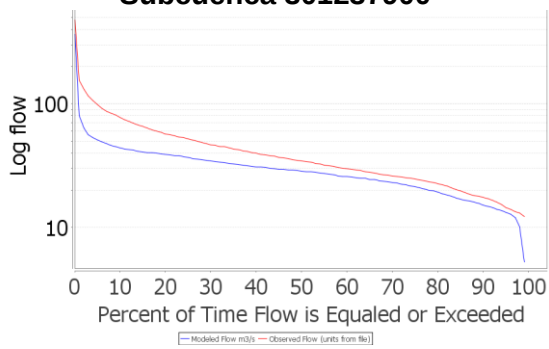
Subcuenca 301224300



Subcuenca 301237900



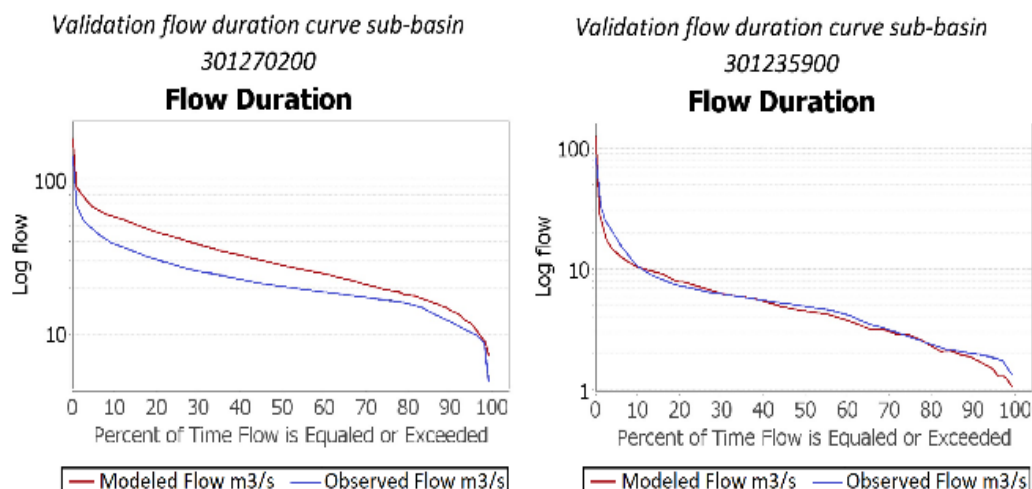
Subcuenca 301237900



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se obtuvo la curva de duración para el proceso de validación que comprueba que la calibración fue llevada a cabo correctamente.

Figura 23. Curvas de duración-validación, subcuenca 301270200

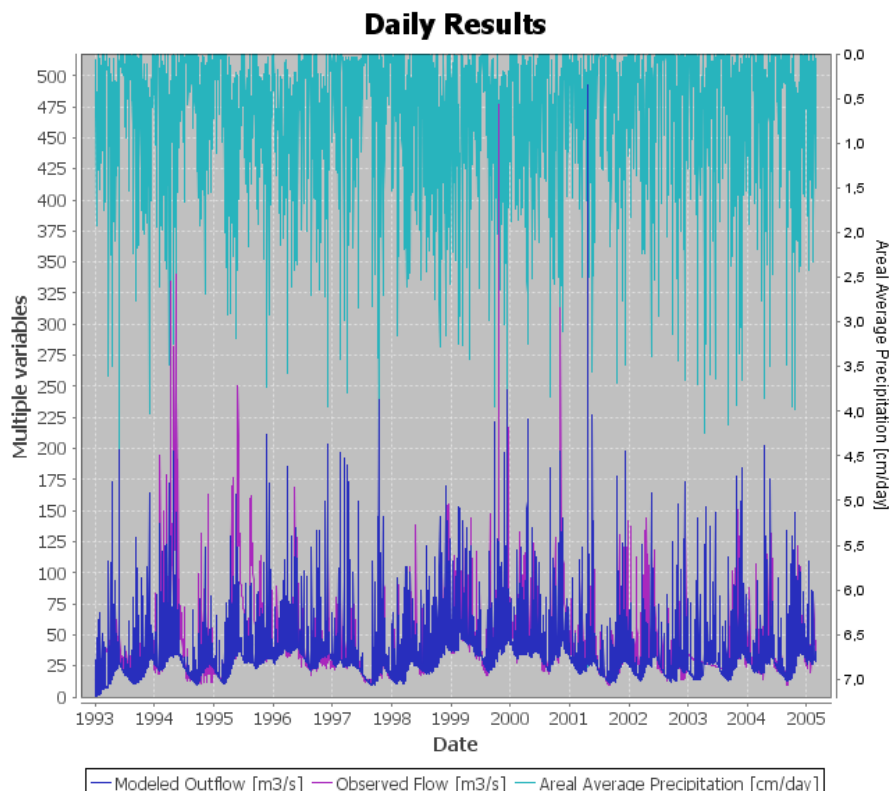


Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros de calibración de Hydro-BID se obtuvo que el parámetro más sensible es el número de curva acompañado del AWC, puesto que estos condicionan la cantidad de escorrentía que se genera a lo largo de la cuenca. Esto se debe a que en primer lugar el NC es un representante del nivel de impermeabilización que se presenta en la zona de estudio, sea por condiciones naturales o antrópicas, propiciando o no los procesos de infiltración de la precipitación recibida en el suelo. Además, el AWC al representar contenido de agua en el suelo determina el volumen de agua que el mismo es capaz de absorber antes de llegar al punto de saturación, en donde a partir de ese momento toda el agua recibida en el área se convertirá en caudal.

Por otro lado, como se evidencia en la figura 24 para la cuenca del río Gualí, el modelo representó mejor las condiciones medias y mínimas a diferencia de los valores máximos que no fueron simulados de forma óptima; a su vez la figura muestra la relación entre el comportamiento de los caudales de la cuenca (morado para el observado y azul oscuro para el simulado) con el comportamiento de la precipitación (líneas de color azul claro presentadas en la parte superior de la gráfica), donde se establece que el comportamiento de la escorrentía es directamente proporcional al de la lluvia de la zona de estudio, en donde a mayor cantidad de precipitación mayor volumen de escorrentía se va a generar a lo largo de la misma, sin embargo cabe resaltar que no todos los picos de caudales corresponden a los picos de precipitación, esto debido a que en algunos de los aumentos de la escorrentía pueden tenerse en cuenta los procesos de deshielo y aportes adicionales que no provienen de la lluvia.

Figura 24. Caudales vs precipitación para las condiciones actuales en escala diaria



Fuente: elaboración propia.

8.1.4. Análisis de cambio climático

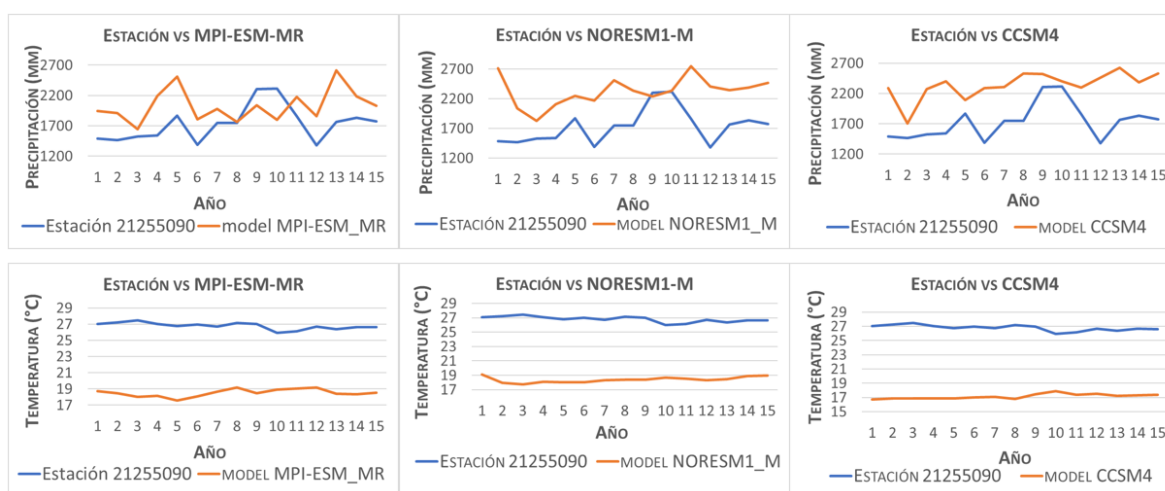
Para seleccionar el GCM de mejor desempeño para la cuenca se calculó la métrica del RSME y la desviación estándar de cada estación respecto a los datos históricos del modelo de circulación global. A partir de lo anterior se obtuvo que el MPI-ES-MR es el que mejor describe las condiciones de clima local de la zona, ya que tiene un RSME (tabla 16) entre 5.93 cm a 4.47 cm para la variable de precipitación y entre 7.22 °C y 5.19 °C para la temperatura, así mismo los valores de la desviación estándar varían entre 0.372 y 0.1 en la precipitación y entre 1.596 y 1.252 en la temperatura. Este comportamiento también se ve reflejado en la figura 25 en donde se observa la acumulación anual de precipitación y el promedio de temperatura anual tanto del modelo como de las estaciones.

Tabla 16. RMSE para cada modelo de circulación global

Variable	Estación	RSME			Desviación estándar		
		MPI-ESM-MR	CCSM4	NORESM1-M	MPI-ESM-MR	CCSM4	NORESM1-M
Precipitación	21250480	5.52	7.11	6.18	0.123	0.082	0.113
	21250500	5.34	6.98	6.02	0.174	0.115	0.159
	21255090	4.47	7.1	6.15	0.198	0.131	0.181
	23010020	5.36	6.99	6.04	0.15	0.1	0.14
	23010080	5.53	7.11	6.2	0.15	0.105	0.145
	23020080	5.38	7.02	6.08	0.24	0.159	0.22
	23020090	5.42	7.02	6.05	0.135	0.089	0.124
	23020100	5.39	7.01	6.04	0.318	0.21	0.291
	23025020	5.52	7.12	6.19	0.176	0.116	0.161
	23025040	5.53	7.11	6.19	0.312	0.206	0.286
	23040070	5.25	6.89	5.93	0.372	0.246	0.34
	23050080	5.93	7.02	6.06	0.255	0.169	0.234
	26150160	5.47	7.07	6.14	0.106	0.07	0.097
	26155150	5.53	7.13	6.19	0.1	0.066	0.091
Temperatura	21255090	7	7.99	7.11	1.596	2.201	1.83
	21255120	6.18	7.17	6.28	1.252	1.727	1.436
	23015040	6.01	6.98	6.1	1.548	2.135	1.775
	23025020	7.22	8.22	7.33	1.554	2.143	1.782
	23025040	5.19	6.16	5.28	1.348	1.859	1.546

Fuente: elaboración propia.

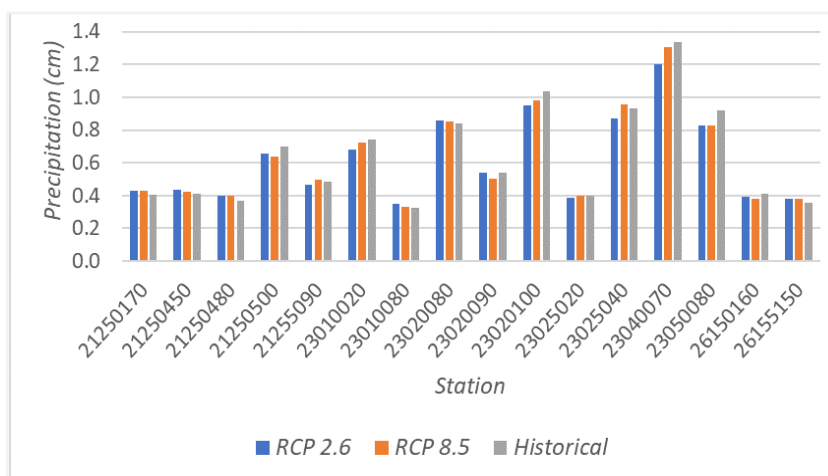
Figura 25. Comparación de GCM vs estaciones de precipitación y temperatura



Fuente: elaboración propia.

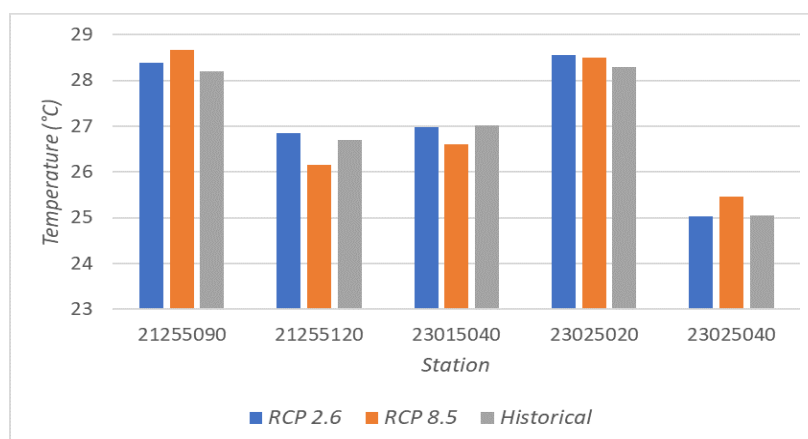
De la segunda fase del análisis de cambio climático, en el cual se aplicó el método de reducción de escala se obtuvieron las series de precipitación y temperatura reducidas a la escala local, necesarias para el análisis a nivel de cuenca. A partir de las figuras 26 y 27 se evidencia que se presentaron diferencias entre los valores promedio de precipitación y temperatura entre las estaciones en comparación con los datos históricos. Así mismo no se muestra una tendencia generalizada de aumento o disminución constante puesto que en algunas estaciones el RCP 2.6 presenta magnitudes mayores en comparación al RCP 8.5 y en otras estaciones se presenta un comportamiento contrario, esto puede atribuirse a diversos factores la marcada diferencia de altitud en la cuenca, la topografía entre otros.

Figura 26. Comparación de los promedios de precipitación generadas por estación



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Comparación de los promedios de temperatura generadas por estación

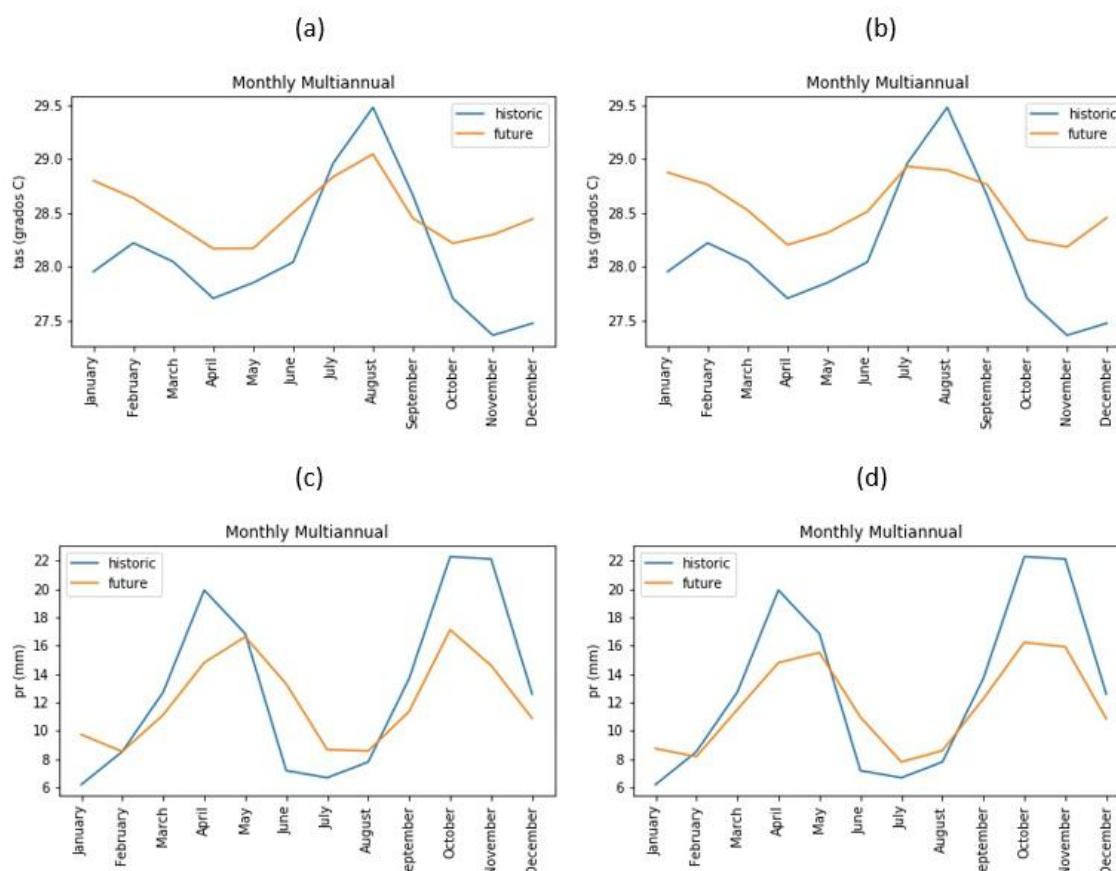


Fuente: elaboración propia.

Al realizar un análisis mensual multianual, se evidencia que el efecto potencial del cambio climático podría ser la disminución de los picos de precipitación y temperatura, cómo se evidencia en la figura 28, donde se compara la serie histórica de la estación 23025020 con la serie futura producto de la reducción de escala; el comportamiento bimodal de las variables se conserva, pero la amplitud varía aumentando y disminuyendo dependiendo de la estación que

se analice, sin embargo se encuentra que los valores máximos tienden a reducir su magnitud en especial en el escenario RCP 2.6 (figura 28.b, d), para ver las gráficas correspondientes a las demás estaciones ver el anexo F.

Figura 28. Comparación de la variación mensual actual y futura para precipitación y temperatura



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se calculó un porcentaje de incremento o reducción de la precipitación y la temperatura en cada estación en dos periodos, antes de la mitad del siglo (Half of century HOC) y al final del siglo (End of century EOC), lo cual se evidencia en la tabla 17, donde se obtuvo que en promedio para el escenario RCP 2.6 en la primera mitad del siglo se espera un aumento de 2.01% y 0.06% para las variables de precipitación y temperatura ; y para la segunda mitad del siglo se generará un posible aumento de 0.95% y 0.1% respectivamente en comparación a las condiciones actual. Así mismo el escenario RCP 8.5 se presentó una disminución promedio de 0.68% para la precipitación en la primera mitad del siglo, y en la segunda mitad se obtuvo un incremento de 1.1% para la misma variable; además para la temperatura se espera un aumento del 0.06% y una disminución del 0.08% en la primera y segunda mitad del siglo respectivamente.

Tabla 17. Porcentajes de incremento o disminución de precipitación y temperatura por estación

Variable	Estación	RCP 2.6		RCP 8.5	
		HOC(%)	EOC (%)	HOC(%)	EOC (%)
Precipitación	23010020	-5.4	-6.8	-4.3	3.1
	23010080	6.9	8.6	-2.5	5.3
	23020090	8.6	5.9	-4	-3
	23020080	0.4	2.8	-3	2.5
	23050080	0.4	1.3	-1.9	-2.5
	23040070	-0.3	-0.7	0.6	5.2
	23020100	5.1	-1.9	-2.2	1.6
	23025040	-1.5	-3.4	0.4	2.8
	23025020	7	-1.6	5.7	-0.7
	26150160	-3.7	-2.1	-3.1	-7.4
	26155150	8	4.3	5.2	1.2
	21250120	1.6	1.1	-0.5	2.4
	21250500	-1.4	3.4	1.3	-0.7
	21250480	7	6.7	0.1	1.4
	21255090	-2.5	-3.3	-2	5.3
Promedio		2.01	0.95	-0.68	1.10
Temperatura	21255090	0.2	0.1	0.1	-0.5
	23025020	-0.5	-0.7	-0.3	-1.3
	23025040	0.1	0.4	1	1.4
	23015040	0.3	0.3	0.3	0.7
	21255120	0.2	0.1	-0.8	-0.7
Promedio		0.06	0.04	0.06	-0.08

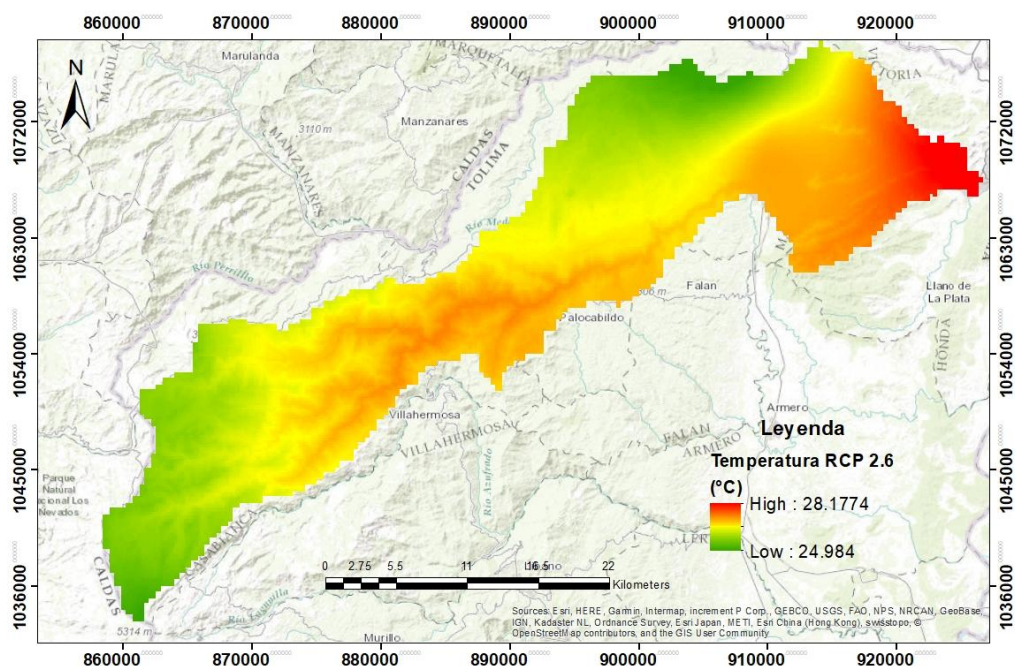
Fuente: elaboración propia.

Se evaluó el desempeño de la reducción de escala por medio de las métricas RSME, MAE, RAE y CE para estimar la correlación entre los datos del GCM antes y después del proceso de reducción de escala respecto a las series históricas de las estaciones climatológicas. Como se evidencia en el anexo G, la correlación entre los datos se acerca al valor óptimo después de realizar el proceso de la reducción de escala; comprobando que la técnica del *downscaling* permite minimizar los niveles de error que se generan aplicando los modelos de circulación global para la zona de estudio. Adicionalmente se evidencia que el método de reducción de escala construye mejor las series de precipitación que las series de temperatura, esto basado en los resultados obtenidos de las métricas.

En las figuras 29, 30, 31 y 32, en donde se realizaron interpolaciones de la precipitación y la temperatura obtenida en la reducción de escala, se evidencia que para los dos escenarios de análisis, en la zona del municipio de Honda, ubicada en la desembocadura de la cuenca, se podrían presentar los valores más altos de temperatura, llegando hasta los 28.26 °C para el RCP 2.6 y hasta 28.2°C para el RCP 8.5. A diferencia del escenario 8.5, el escenario 2.6 presenta otras zonas con temperaturas altas como en el municipio de Palocabildo y el nacimiento de la cuenca en territorio de los municipios de Herveo y Casabianca; para ambos escenarios las menores temperaturas se presentan en la región de Mariquita. En cuanto a la

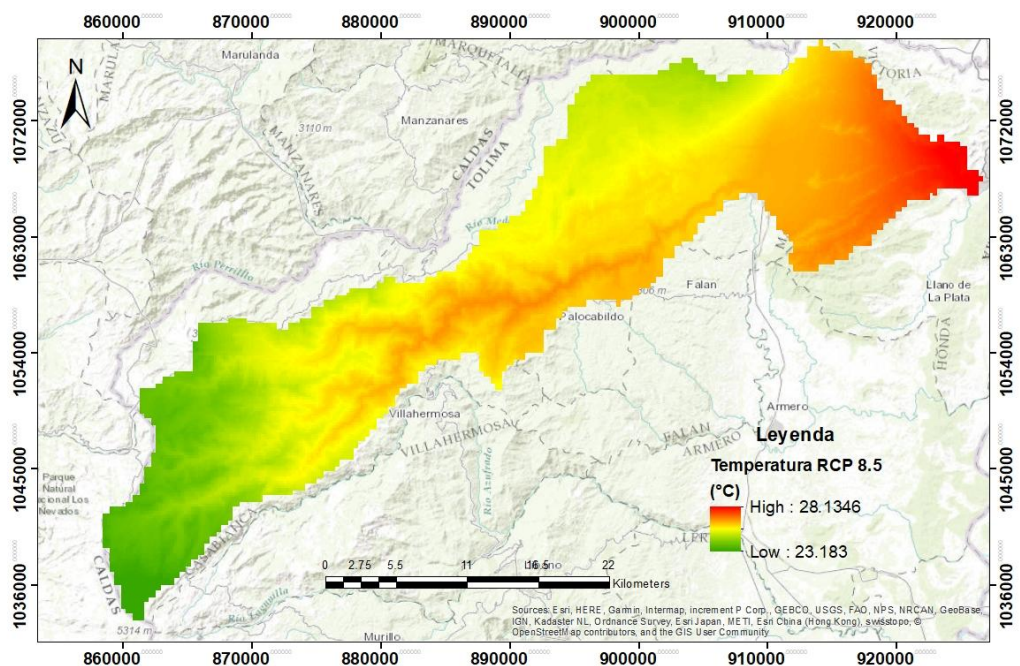
precipitación, el comportamiento entre los escenarios no presenta variaciones significativas, esto se observa en las figuras 29 y 30 en donde se muestra la interpolación de los valores acumulados mensuales multianuales de lluvia. Sin embargo, el escenario RCP 8.5 presenta valores máximos que alcanzan mayores magnitudes (929.019 mm) en comparación al RCP 2.6 (863.91 mm); para los valores mínimos de precipitación presentan valores de 308.64 mm en el RCP 2.6 y de 294.51 mm en el RCP 8.5, teniendo este último menores magnitudes. Se muestra un comportamiento inversamente proporcional en donde las zonas con mayores temperaturas corresponden a aquellas con menor precipitación y viceversa, por lo cual el área de mayor lluvia es el municipio de Mariquita.

Figura 29. Interpolación de temperatura futura, RCP 2.6



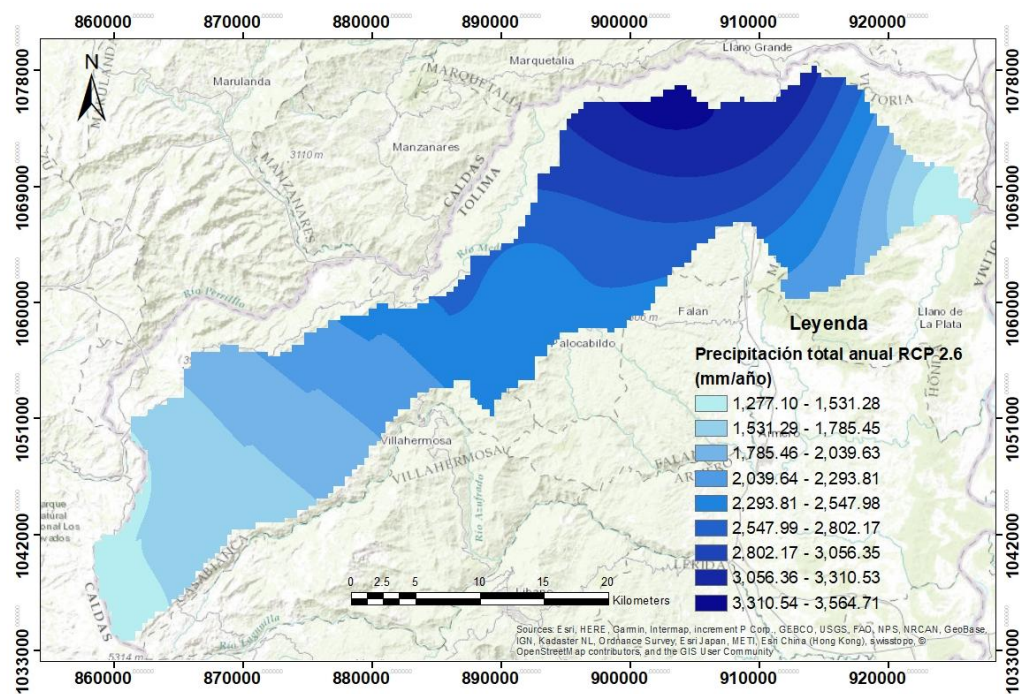
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Interpolación de temperatura futura, RCP8.5



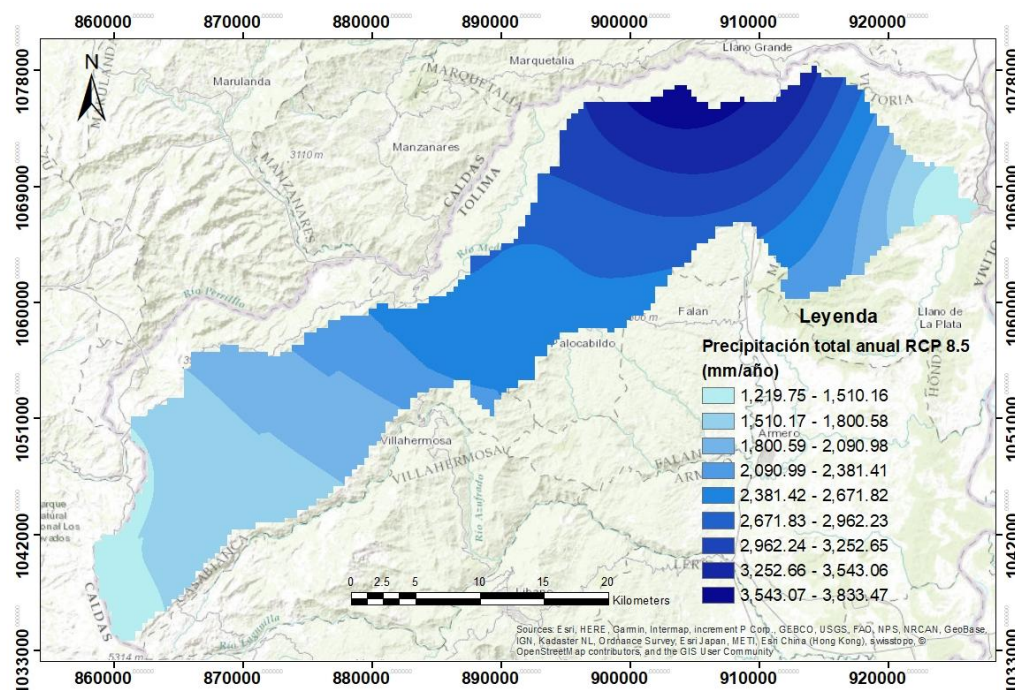
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Interpolación de precipitación futura, RCP 2.6



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Interpolación de precipitación futura, RCP 8.5



Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Modelación hidrológica bajo los escenarios de cambio climático en Hydro-BID

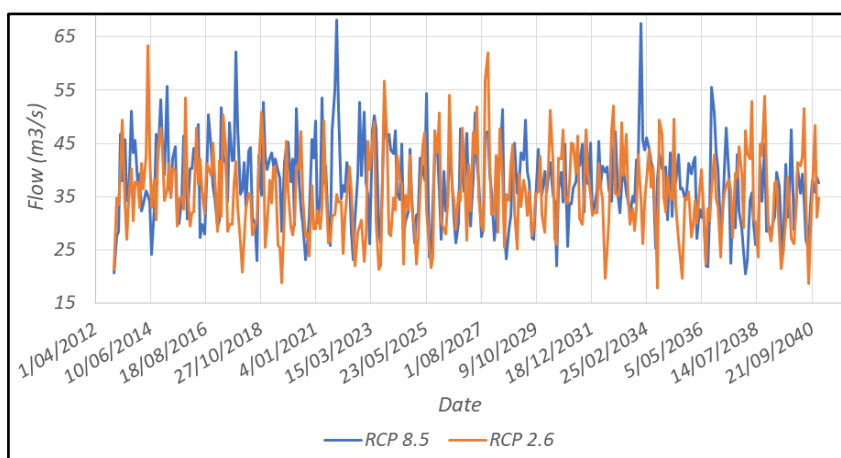
Al aplicar las series de datos de climatológicas obtenidas de la reducción de escala y luego integrarlas en el modelo de Hydro-BID, se obtuvieron las series de caudales para las condiciones actuales (periodo de 1989 a 2013) y para las condiciones futuras bajo los escenarios de cambio climático ya mencionados (periodo de 2013 a 2100), en temporalidad mensual y diaria, con el fin de obtener la oferta hídrica en la cuenca.

Las variaciones obtenidas de arrojan que para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, en la totalidad del periodo de simulación, se presenta una posible reducción de los caudales en comparación a los registros históricos. Esta disminución se obtuvo comparando la mediana de los cambios proyectados en el caudal para los dos escenarios analizados, con respecto a las condiciones actuales, para los tres periodos de análisis. En el periodo de 2013 a 2040 se obtuvo que probablemente se presentará una disminución de caudal del 9.56% para el RCP 2.6 y del 2.18% para el RCP 8.5. Por otro lado, para el periodo 2041-2070 la disminución es del 5.8% y del 4.77% respectivamente y finalmente en el periodo del 2071 al 2100 se pronostica un descenso del 6.39% y del 6.86% respectivamente.

Adicionalmente se encontró que en el escenario RCP 8.5 se presenta una menor disminución de caudal respecto al escenario RCP 2.6 para los dos primeros periodos de análisis; sin embargo este escenario tiene una tendencia a la reducción de escorrentía a lo largo del tiempo. Por el contrario, el escenario RCP 2.6 presenta una disminución de caudal de mayor magnitud al inicio del periodo de modelación, pero tiende a estabilizarse con el paso del tiempo, hasta que en el periodo 2070-2100 los dos escenarios tienen un porcentaje de reducción de caudal similar. Además, se evidencia que el periodo más crítico para las condiciones climáticas

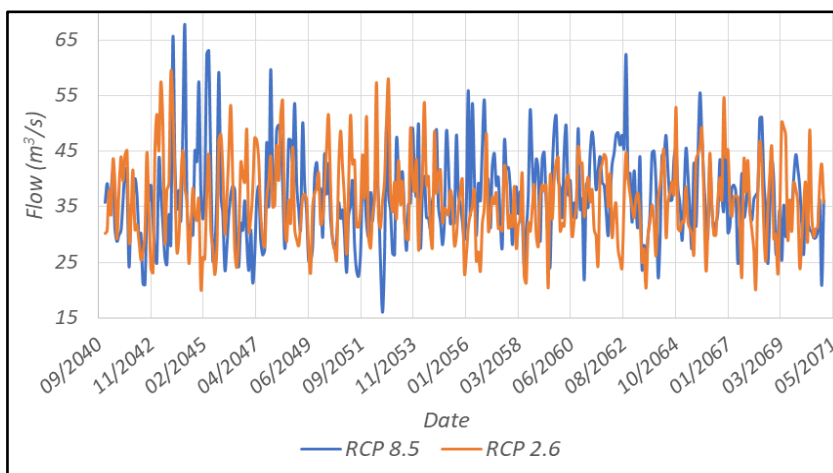
proyectadas en el escenario RCP 2.6 es de 2013 al 2040, mientras que para el escenario RCP 8.5 es el periodo comprendido entre el año 2070 y el año 2100. Las posibles reducciones en los caudales pueden tener implicaciones directas sobre los aspectos económicos y sociales de la misma, por lo que es responsabilidad de las autoridades ambientales locales y regionales plantear estrategias y alternativas de adaptación y mitigación que permitan reducir la magnitud de los impactos.

Figura 33. Caudales proyectados, periodo 2013-2040



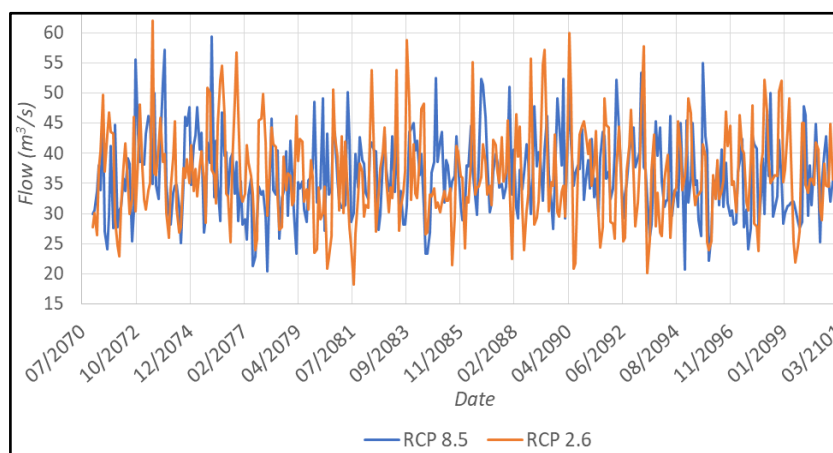
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Caudales proyectados, periodo 2041-2070



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Caudales proyectados, periodo 2071-2100



Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se evidencia a partir de las figuras 33, 34 y 35 que para los dos primeros periodos de análisis los picos de caudal tienen una mayor magnitud en el escenario RCP 8.5 en comparación a los del RCP 2.6. Cabe resaltar que, a lo largo de la simulación desarrollada, las condiciones de uso de la tierra, suelo y pendiente topográfica se mantuvieron constantes puesto que estas se obtuvieron de la base de datos AHD proporcionada por el BID. Estas condiciones se consideran ficticias en la realidad, principalmente para el uso del suelo, puesto que las actividades económicas de la cuenca condicionan estas variables, que a su vez tienen una influencia significativa en los caudales generados en el proceso [76]. Finalmente se obtuvo una oferta promedio para la corriente del río Gualí de 81.36 m³/s para el RCP 2.5 y 82.09 para el RCP 8.5. El promedio de la oferta para los ríos tributarios se encuentra en la tabla 18.

Tabla 18. Oferta por corriente en los RCP 2.6 y RCP 8.5

Corriente	Oferta, RCP 2.6 (m ³ /s)	Oferta, RCP 8.5 (m ³ /s)
Gualí	81.36	82.09
Sucio	4.72	4.79
Medina	5.23	4.99
Aguacatal	2.081	2.06
Cajones	1.72	1.704

Fuente: elaboración propia.

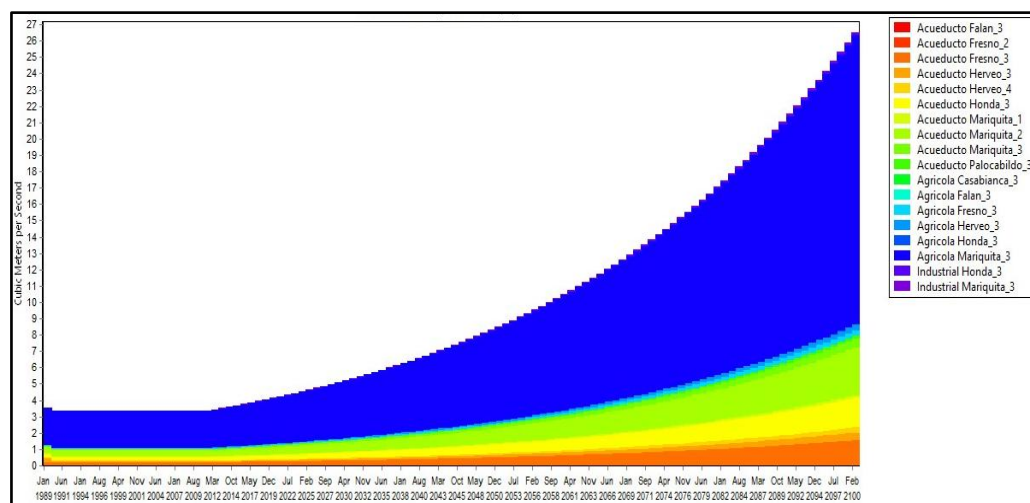
5.2 OBTENCIÓN DE LA DEMANDA

5.2.1 Integración WEAP con Hydro-BID

El proceso de proyección de la población arrojó como resultado una variación promedio de 2.34%, 2.88% y 2.37% para los puntos de demanda agrícola, industrial y doméstico respectivamente; valores que fueron aplicados de forma posterior en el periodo de modelación de los escenarios ya mencionados, en un intervalo de tiempo de entre 2012 y 2100, dando

como resultado una serie de tiempo con los consumos y poblaciones esperadas, de forma anual, con los que fue necesario recalcular la tasa de uso de agua para los puntos de demanda. Como resultado de la aplicación de estos porcentajes de variación se generó la figura 36 en donde se evidencia el crecimiento exponencial de la demanda en cada uno de los nodos, siendo los puntos de demanda agrícola los de mayor requerimiento hídrico. Así mismo se obtuvo que la demanda promedio de la cuenca es 9.13 m³/s y la demanda promedio de los puntos fue de 2.32 m³/s, 6.74 m³/s y 0.063 m³/s para los tipos doméstico, agrícola e industrial.

Figura 36. Crecimiento de la demanda de la cuenca del río Gualí



Fuente: elaboración propia.

La integración de los resultados de Hydro-BID con el software WEAP evidenciaron en primera instancia que para el periodo de referencia (1989-2012) no existe demanda insatisfecha, es decir que la cuenca es capaz de suplir el requerimiento hídrico actual, lo cual concuerda con los resultados del análisis realizado por Cortolima, en el POMCA. La demanda media en este periodo es de 3.36 m³/s, siendo el nodo agrícola de Mariquita, ubicado sobre el río Gualí, el de mayor demanda con un promedio de 2.26 m³/s.

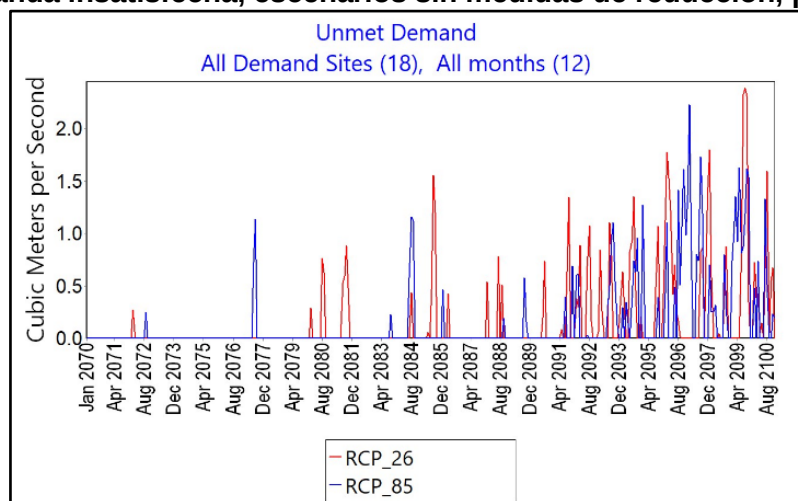
5.2.2 Obtención de la demanda insatisfecha por escenario

Se obtuvo que para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, desde el 2012 hasta el año 2100 se presenta una demanda insatisfecha promedio de 0.041 m³/s y 0.038 m³/s respectivamente. Como se observa en las figuras 37y 38, el escenario más favorable para la demanda insatisfecha es el RCP 8.5; adicionalmente en la figura 38, donde se exponen los promedios mensuales, se encuentra que agosto es el mes más crítico, pues es donde más se presenta demanda insatisfecha, mientras que meses como mayo y noviembre son los de menor demanda insatisfecha lo cual concuerda con la climatología realizada donde en los meses de menos precipitación se presenta una mayor demanda insatisfecha y viceversa. Adicional a esto, se encontró que los puntos de demanda que van a presentar una situación desfavorable en el futuro son los acueductos de Mariquita y Fresno, puesto que entre los años 2071 a 2100 presentaran demandas insatisfechas promedio de 0.00024 m³/s bajo las condiciones del RCP 2.6 y de 0.00023 m³/s bajo el RCP 8.5 para Fresno y de 0.0410 m³/s en el RCP 2.6 y de 0.0384 m³/s en el RCP 8.5 para Mariquita; por lo que es necesario que las autoridades ambientales de

la cuenca pongan estos municipios como prioridad para evitar una posible emergencia por desabastecimiento del recurso hídrico en el futuro.

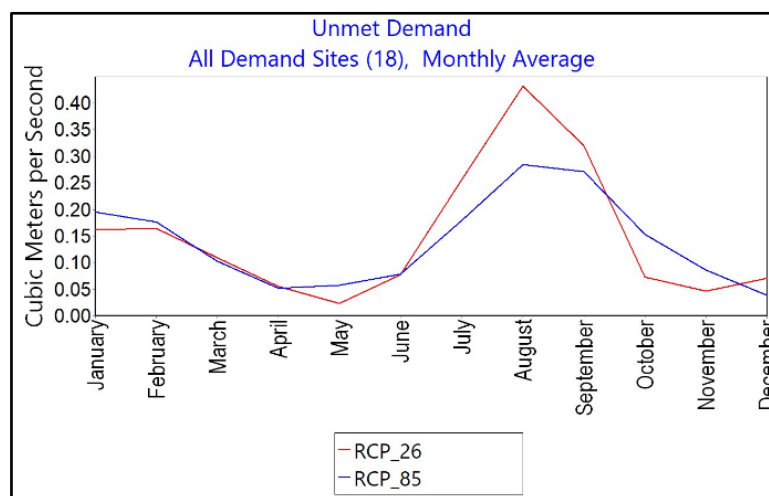
Se encontró que la demanda insatisfecha se da específicamente en la subcuenca 301235900, en donde nace el río Sucio, por lo cual esta presenta las condiciones más críticas de toda la cuenca puesto que en esta zona se encuentra el municipio de Mariquita, uno de los que tiene mayor población al interior de la cuenca además de tener uno de los menores caudales disponibles para la zona, si los puntos de captación estuviesen ubicados sobre el río principal de la cuenca, es decir sobre el río Gualí y no sobre uno de sus tributarios no se presentaría demanda insatisfecha.

Figura 37. Demanda insatisfecha, escenarios sin medidas de reducción, promedio anual



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Demanda insatisfecha, escenarios sin medidas de reducción, promedio mensual



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo el porcentaje de cobertura de agua para los puntos de demanda analizados, encontrando un 100% de cobertura en todos los nodos a excepción de los puntos

de Mariquita y Fresno en sus modalidades domésticas sobre la corriente del río Sucio, que corresponden a aquellos que tienen valores de demandas insatisfechas; en donde sus porcentajes de cobertura promedio son de 99.89% y 99.91% respectivamente, para el escenario 2.6. Así mismo, para el escenario 8.5 los promedios de cobertura en estos dos puntos son de 99.95% y 99.96% respectivamente; estos valores tienen impacto en el abastecimiento de la población, poniendo en riesgo el desarrollo de sus actividades económicas y su calidad de vida.

Finalmente comparando los resultados obtenidos de la oferta y la demanda, se encuentra que teniendo en cuenta las proyecciones para ambos escenarios la oferta tiende a disminuir y la demanda tiende a aumentar exponencialmente como producto del crecimiento poblacional y la expansión agrícola e industrial, por lo cual a pesar de que la cuenca posee un rendimiento hídrico alto se genera demanda insatisfecha, si adicionalmente se tiene en cuenta las posibles nuevas concesiones que la autoridad ambiental otorga en la cuenca, sumada a las conexiones ilegales y demás captaciones que no están registradas en Cortolima se puede llegar a condiciones aún más críticas de demanda insatisfecha poniendo en riesgo la seguridad hídrica.

5.3 PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA REDUCIR LA DEMANDA INSATISFECHA

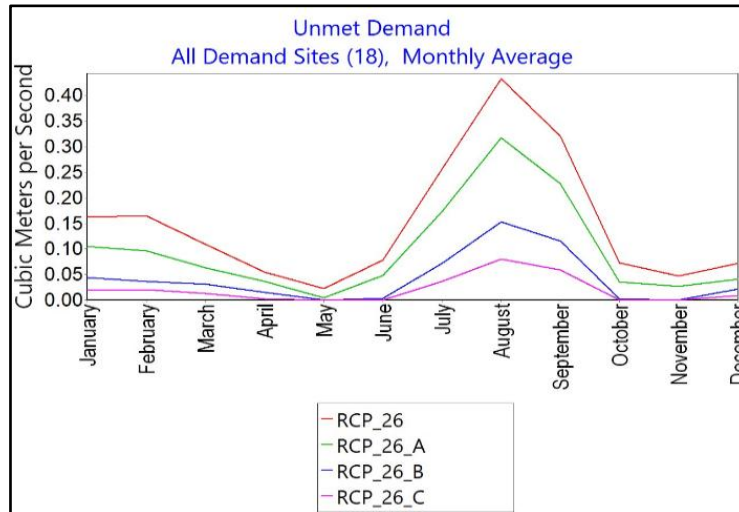
En cuanto a la modelación de las medidas planteadas para reducir la demanda insatisfecha, teniendo como eje central la reducción de pérdidas en el sistema de distribución, se obtuvo que la medida más favorable es la opción C en ambos escenarios (figuras 39 y 40) puesto que en esta es donde más se reduce la demanda insatisfecha. Cabe aclarar que después de aplicar la reducción de pérdidas, se siguen presentando demandas sin suplir promedio de 0.0055 m³/s para el escenario RCP 2.6 y de 0.0037 m³/s para el escenario RCP 8.5, resultados que se evidencian en la tabla 19. De igual forma, se evidencia que a pesar de aplicar esa medida siguen siendo los acueductos de Mariquita y Fresno los más afectados y por ende, presentan un riesgo mayor para el desarrollo de las actividades económicas y culturales de la zona. Además, se identifica un comportamiento inversamente proporcional entre el porcentaje de reducción de pérdidas y la cantidad de caudal que no se suple completamente en la cuenca, en donde entre mayor sea la reducción y la mejora en el sistema de distribución desde el punto de captación hasta los lugares de consumo, menor será el porcentaje de demanda insatisfecha.

Tabla 19. Demanda insatisfecha promedio, aplicando la modificación en los porcentajes de pérdidas

Periodo	Medida de reducción	Demanda insatisfecha promedio (m³/s)
Actual	Ninguna	0
RCP 2.6	Ninguna	0.041
	A	0.027
	B	0.011
	C	0.0055
RCP 8.5	Ninguna	0.038
	A	0.025
	B	0.0097
	C	0.0037

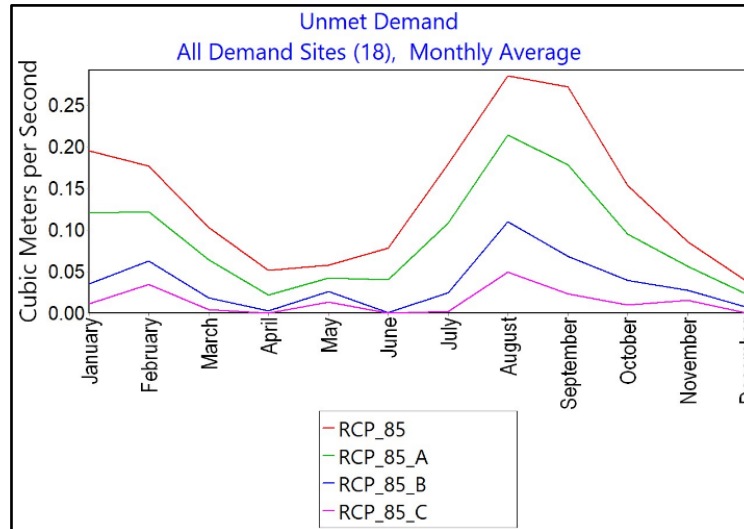
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Demanda insatisfecha RCP 2.6 con medidas de reducción, promedio mensual.



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Demanda insatisfecha RCP 8.5 con medidas de reducción, promedio mensual



Fuente: elaboración propia.

Finalmente se encontró que, teniendo únicamente como medida la reducción de pérdidas en el sistema, se puede llegar a reducir hasta un 87.8% de la demanda insatisfecha en el caso del escenario RCP 2.6 y hasta un 90,26% en el caso del RCP 8.5. Lo anterior se tiene en cuenta bajo el supuesto de que las concesiones otorgadas por la corporación se van a mantener constantes en la cuenca y que no se generaran puntos de captación adicionales. Además de esto, se considera pertinente la realización de visitas de campo que permitan verificar la información suministrada por Cortolima e identificar posibles puntos de captación no registrados ante la autoridad.

6. IMPACTO DE SOCIAL

Los resultados de esta investigación son importantes en el marco de la generación de conocimiento e información acerca de los efectos potenciales que se derivan del cambio climático en Colombia, ya que son un aporte básico para establecer las bases que permitan incorporar el riesgo climático en la planificación del desarrollo sectorial y territorial y que son elementos fundamentales en el planteamiento de las medidas de adaptación y mitigación establecidas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. De esta forma, la generación de información acerca de los posibles impactos generados sobre el recurso hídrico en el país se convierte en un insumo indispensable para las autoridades nacionales y regionales en el manejo integral del recurso hídrico, articulándose en temas como la seguridad hídrica, que es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible más importante para la región de América Latina y El Caribe.

Por otro lado, la información obtenida de esta investigación va en concordancia con la hoja de ruta del convenio 300 del 2016 en donde se establecen los lineamientos técnicos para la incorporación del componente de cambio climático en los Planes Estratégicos de Macrocuencas PEM y los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), que resalta la generación de información como una herramienta que permite analizar las evidencias actuales de cambio climático en las cuencas y proyectar escenarios futuros para contribuir a la toma de decisiones sobre las posibles medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en el país.

Así mismo, los resultados obtenidos le permiten a la comunidad que hace uso de la cuenca conocer las condiciones la disponibilidad hídrica que influyen en el desarrollo de sus actividades económicas y sociales, reduciendo así el riesgo de afectación por eventos hidrológicos extremos como las sequías y convirtiéndose en una herramienta para el establecimiento de medidas de adaptación, que no sólo benefician a las autoridades ambientales de la zona sino también a la población en general.

7. CONCLUSIONES

El proceso de reducción de escala permite representar de forma más acertada las condiciones reales de la zona de estudio, aumentando la correlación entre los datos observados y los datos históricos del GCM, esto se evidencia en los resultados de la métrica RSME que paso de ser en promedio de 7.79 cm antes de la reducción de escala a 1.523 cm después de la misma en el RCP 2.6, y de 7.97 cm a 1.252 cm en el RCP 8.5 para la variable de precipitación. De la misma forma, para la temperatura esta métrica paso de ser 8.36 °C antes de la reducción de escala a 3 °C en el RCP 2.6 y de 8.69 a 2.94 °C en el RCP 8.5.

El modelo desarrollado en HydroBID se puede implementar siempre y cuando se aplique para condiciones mensuales y anuales y no para condiciones diarias, puesto al observar las métricas de desempeño se obtiene que no hay confiabilidad del modelo para temporalidades diarias, sin embargo los resultados generados para la temporalidad mensual son aceptables, manteniendo los volúmenes de caudal evidenciados en la curva de duración.

En la cuenca del río Gualí, para el periodo comprendido entre 2011 y 2100 y bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, se espera que se presente una disminución en el caudal disponible de entre 5.8% y 9.56% para el escenario RCP 2.6 y entre el 2.18% y el 6.86% para el escenario RCP 8.5, en donde el periodo comprendido entre los años 2013 a 2040 será el periodo que presentará la mayor reducción en el caudal. Las posibles reducciones en los caudales pueden tener implicaciones directas sobre los aspectos económicos y sociales de la zona, lo que combinado con la posible generación de una demanda insatisfecha puede conllevar a que la cuenca entre en un estado de riesgo por desabastecimiento hídrico.

Para las condiciones del periodo de referencia, de 1989 al 2013, no se presenta demanda insatisfecha para ninguno de los puntos de demanda plateados, resultado que concuerda con los estudios realizados en el POMCA de la cuenca del río Gualí. Sin embargo, para los dos escenarios simulados, el periodo crítico es del 2071 al 2100 puesto que solo en estos años se presenta demanda insatisfecha a lo largo de la cuenca.

Los resultados de la simulación en WEAP evidencian que se presenta demanda insatisfecha en el periodo de 2071 a 2100 en la subcuenca del río Sucio (301235900) para los nodos de demanda correspondientes a los acueductos de Fresno y Mariquita. El nodo de demanda más crítico es el acueducto de Mariquita, puesto que se presentó una demanda insatisfecha promedio de 0.0410 m³/s para el RCP 2.6 y de 0.0384 m³/s para el RCP 8.5 mientras que en el acueducto de Fresno se obtuvo una demanda insatisfecha promedio de tan solo 0.0003 m³/s para el RCP 2.6 y de 0.00024 m³/s para el RCP 8.5.

El escenario en el que menos se presenta demanda insatisfecha es el RCP 8.5 puesto que según las proyecciones climáticas realizadas en este se presentará una menor reducción de caudal respecto al RCP 2.6, es decir una mayor oferta debido a que las condiciones del GCM proyectan una mayor precipitación en el escenario RCP 8.5, lo que se refleja en los niveles de caudal de la cuenca y por lo cual presentará menor demanda insatisfecha.

La medida de reducción de pérdidas a lo largo del sistema de abastecimiento más efectiva es la C, en donde los porcentajes de pérdidas son 10% para nodos domésticos, 20% para nodos agrícolas y 5% para los nodos industriales, aplicando estas reducciones se puede llegar a disminuir la demanda insatisfecha en un 87.8% y 90.26% para el RCP 2.6 y el RCP 8.5 respectivamente. Sin embargo, es necesario complementar esta medida con otras como el

reuso de agua en sistemas industriales acompañados de programas de ahorro y uso eficiente del agua para lograr que la cobertura sea del 100%.

Las proyecciones obtenidas indican una disminución en la oferta hídrica de la cuenca, lo que sumado al crecimiento poblacional y a la expansión agrícola e industrial de la zona, puede llegar a ocasionar un estrés hídrico debido al aumento en la presión generada en los ríos de la cuenca. En este orden de ideas, es responsabilidad de las autoridades ambientales y de los actores institucionales y gubernamentales, llevar un control sobre las actividades económicas que hacen uso del recurso y que se desarrollan en la cuenca del río Gualí con el fin de reducir el riesgo por desabastecimiento hídrico.

8. RECOMENDACIONES

Se debe incluir a la población de la cuenca en los procesos de toma de decisiones y análisis de la cuenca con el fin de aumentar sus capacidades en temas de conservación y gobernanza del territorio y así poder realizar una gestión integral del recurso hídrico de forma exitosa en conjunto con las autoridades ambientales e instituciones presentes en la cuenca del río Gualí, ya que ellos son quienes están involucrados de forma directa en los procesos que se llevan a cabo y por ende son los principales afectados por los impactos negativos que se puedan presentar al interior de la misma. Este trabajo puede servir para complementar el componente de mitigación de gestión del riesgo para el departamento y que el estudio puede apoyar los planes de ordenamiento territorial.

Para futuros proyectos se recomienda realizar unos análisis de incertidumbre de los métodos de reducción de escala aplicados en el mismo con el fin de reducir posibles los niveles de error en el proceso de la modelación hidrológica llevada a cabo con las series de datos resultantes de esta metodología.

Para la estimación de la demanda hídrica futura en otras cuencas de estudio se recomienda evaluar y aplicar otros métodos de proyección de los consumos de los diferentes sectores económicos a simular.

Se recomienda la integración de más variables en el desarrollo del modelo llevado a cabo en WEAP en el caso de que se tengan datos disponibles y de calidad, que permitan robustecer el análisis realizado por medio de la simulación. Así mismo, se debe tener en cuenta la realización de una visita de campo que permita corroborar los datos obtenidos en la investigación.

Se recomienda que para reducir las pérdidas presentadas a lo largo de los sistemas de distribución involucrados en los acueductos y en los puntos de demanda agrícolas e industriales se apliquen medidas de control de las pérdidas físicas (aquellas correspondientes a las fallas de infraestructura, calidad de los materiales implementados, deterioro de las instalaciones o pérdidas por operación inadecuada) por medio de mantenimientos tanto preventivos como correctivos en la infraestructura, llevando a cabo un control de presiones a lo largo del sistema de distribución, identificando puntos clave que permitan identificar la pérdida de volúmenes de agua, además del cambio en los elementos y accesorios del sistema que tengan un periodo de uso considerable así como capacitaciones al personal de operaciones y mantenimiento con el fin de realizar un manejo óptimo de la infraestructura y de los sistemas en cuestión.

En general, representar las condiciones climáticas futuras de forma precisa supone un alto nivel de complejidad, especialmente para la variable de precipitación, puesto que al realizar una simulación basada en series construidas a partir de Modelos de Circulación Global, se aumenta la incertidumbre en la proyección de los caudales obtenidos del proceso de modelación, por lo que los resultados deben ser tomados como una guía del posible comportamiento que se pueda generar en la cuenca desde la actualidad hasta el 2100 y no como un hecho verídico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico," *Bogotá D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, p. 124, 2010.
- [2] D. International Symposium on Integrated Water Resources Management (2000 : University of California, S. P. Simonovic, M. A. Marino, and I. I. C. on W. R. Systems, *Integrated water resources management*. Wallingford : International Association of Hydrological Sciences, 2001.
- [3] C. Bao and C. Fang, "Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China," *Ecol. Econ.*, vol. 62, no. 3, pp. 508–517, May 2007.
- [4] C. Liu, "Strategies on Water Problems in the 21st Century in China," *Sci. Press Beijing*, 1996.
- [5] Q. Song, Z. Qiting, and Y. Feng, "Water problems brought out by citifying construction and measures," *J. Water Resour. Water Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 56–58, 2004.
- [6] United Nations World Water Assessment Programme, "Global water resources under increasing pressure from rapidly growing demands and climate change, according to new UN World Water Development Report." 2012.
- [7] SIAC, "Oferta del agua." 12-Feb-2018.
- [8] E. Domínguez, H. Rivera, R. Vanegas, and P. Moreno, "Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramienta de evaluación del recurso hídrico colombiano," *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Físicas Nat.*, vol. 32, no. 123, pp. 195–212, Jun. 2008.
- [9] S. V. Larsen and D. L. Kørnø, "SEA of river basin management plans: incorporating climate change," *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 27, no. 4, pp. 291–299, Dec. 2009.
- [10] T. Kojiri, T. Hori, J. Nakatsuka, and T.-S. Chong, "World continental modeling for water resources using system dynamics," *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 33, no. 5, pp. 304–311, Jan. 2008.
- [11] Cortolima, "Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA) de la cuenca del río Gualí, Componente físico." 2013.
- [12] Cortolima, "Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Gualí, componente socioeconómico." 2014.
- [13] Cortolima, "Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Gualí, componente biótico." 2014.
- [14] Cortolima, "Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Gualí, componente físico." 2014.
- [15] R. Sluiter, "Interpolation methods for climate data." .
- [16] IDEAM, "Gestión del agua," *Sistemas de Información Ambiental de Colombia*, 2017.
[Online]. Available: <http://www.siac.gov.co/gestionagua>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [17] Organización Meteorológica Mundial, "What is climate?," NOAA, 28-Sep-2016. [Online]. Available: <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [18] National Aeronautics and Space Administration, "What's the Difference Between Weather and Climate?," NASA, 09-Mar-2015. [Online]. Available: http://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/climate/climate_weather.html. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [19] National Aeronautics and Space Administration, "What's the Difference Between Weather and Climate?," NASA, 09-Mar-2015. [Online]. Available:

- http://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/climate/climate_weather.html. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [20] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “CAMBIO CLIMÁTICO,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [21] Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, “Informe especial del IPCC, escenarios de emisiones, resumen para responsables de políticas.” 2000.
- [22] D. P. van Vuuren *et al.*, “The representative concentration pathways: an overview,” *Clim. Change*, vol. 109, no. 1–2, p. 5, Nov. 2011.
- [23] “Trayectorias de concentración representativas (RCP),” *BID*, 19-Jan-2016. [Online]. Available: <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/trayectorias-de-concentraci%C3%B3n-representativas-rcp>. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [24] Data Distribution Centre, “Scenario Process for AR5, Representative Concentration Pathways (RCPs),” Aug-2017. [Online]. Available: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [25] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, and Cancillería, “Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.” Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015.
- [26] International Institute for Applied Systems Analysis, “RCP Database.” 2009.
- [27] D. P. van Vuuren *et al.*, “Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs,” *Clim. Change*, vol. 81, no. 2, pp. 119–159, Mar. 2007.
- [28] L. Clarke, H. Edmonds, H. Jacoby, J. Pitcher, Reily, and R. Richels, “Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations,” *GlobalChange.gov*, 2007. [Online]. Available: <https://www.globalchange.gov/browse/reports/sap-21a-scenarios-greenhouse-gas-emissions-and-atmospheric-concentrations>. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [29] Smith, S.J, and Wigley, *Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. Energy Journal (Special Issue #3)*. 2006.
- [30] M. Wise *et al.*, “Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy,” *Science*, vol. 324, no. 5931, pp. 1183–1186, May 2009.
- [31] J. Fujino, R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, and Y. Matsuoka, “Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model,” *Energy J.*, vol. 27, pp. 343–353, 2006.
- [32] Y. Hijioka, Y. Matsuoka, H. Nishimoto, T. Masui, and M. Kainuma, “Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets,” *J. Glob. Environ. Eng.*, vol. 13, pp. 97–108, Mar. 2008.
- [33] K. Riahi, A. Grübler, and N. Nakicenovic, “Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 74, pp. 887–935, Sep. 2007.
- [34] IPCC, “What is a GCM?,” *Data Distribution Centre*, 18-Jun-2013. [Online]. Available: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.ipcc-data.org/ddc_gcm_guide.html. [Accessed: 19-Feb-2018].
- [35] IPCC, “Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.” 2007.
- [36] F. S. Duarte Prieto, G. A. Corzo Perez, R. Santos Granados, and O. E. Hernández Mucia, “Chaotic Statistical Downscaling (CSD): Application and Comparison in the Bogotá River Basin,” 2018.

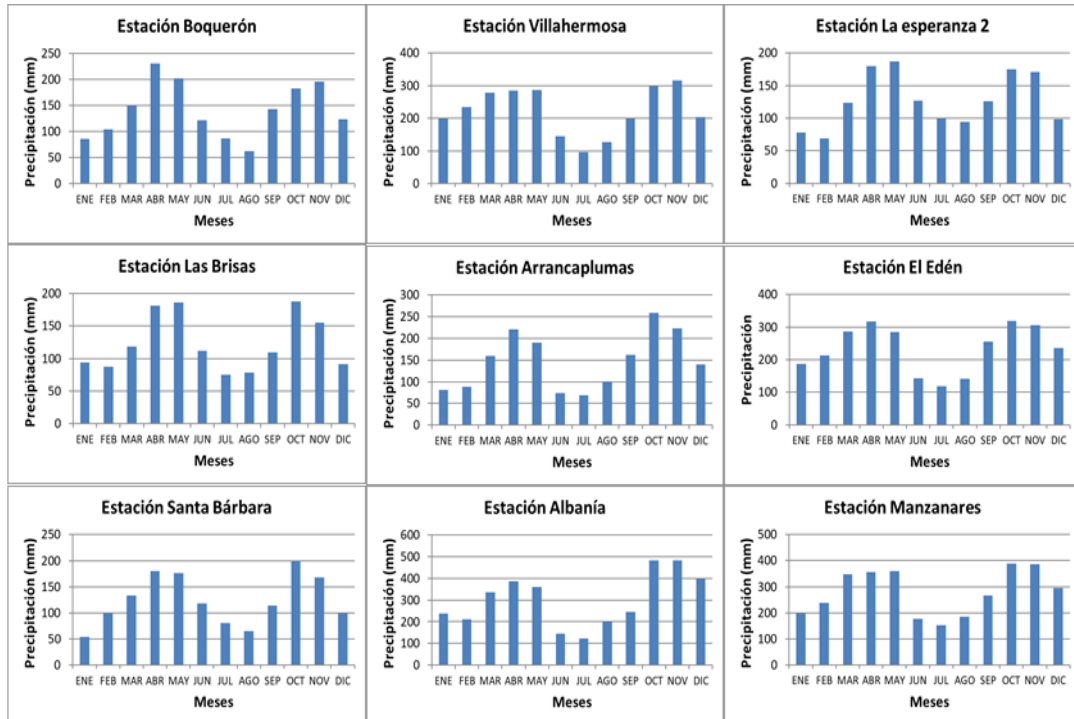
- [37] R. L. Wilby, C. W. Dawson, and E. M. Barrow, "Sdsm — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts," *Environ. Model. Softw.*, vol. 17, no. 2, pp. 145–157, Jan. 2002.
- [38] United States Agency for International Development USAID, "A review of Downscaling Methods for Climate Change Projections," 2014. [Online]. Available: http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf. [Accessed: 06-Apr-2018].
- [39] C. Oestreicher, "A history of chaos theory," *Dialogues Clin. Neurosci.*, vol. 9, no. 3, pp. 279–289, Sep. 2007.
- [40] "chaos theory | Definition & Facts," *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/chaos-theory>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [41] F. S. Duarte, "Técnica de reducción de escala estadística basada en la teoría del caos: aplicación y desempeño en la Cuenca del Río Bogotá," 2017.
- [42] B. Sivakumar and R. Berndtsson, *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*. 2010.
- [43] Sharma Ashish and Mehrotra Raj, "An information theoretic alternative to model a natural system using observational information alone," *Water Resour. Res.*, vol. 50, no. 1, pp. 650–660, Feb. 2014.
- [44] null Sano and null Sawada, "Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, no. 10, pp. 1082–1085, Sep. 1985.
- [45] E. Domínguez Calle, "Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos." IDEAM, 2000.
- [46] IDEAM, "Modelación Hidrológica," Apr-2014. [Online]. Available: www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica.
- [47] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment," *Adv. Geosci.*, vol. 5, pp. 89–97, Dec. 2005.
- [48] C. W. Dawson, R. J. Abrahart, and L. M. See, "HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts," *Environ. Model. Softw.*, vol. 22, no. 7, pp. 1034–1052, 2007.
- [49] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in literature," *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, pp. 1247–1250, 2014.
- [50] A. Wyatt, F. Moreda, G. Brantly, and R. Castillo, "Caso de estudio de Hydro-BID: Un modelo del recurso hídrico de la cuenca del Río Grande en Argentina." 03-Mar-2016.
- [51] Fekadu Moreda, Fernando Millares, and Raúl Muñoz Castillo, "Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2." Banco Interamericano de Desarrollo, Dec-2014.
- [52] M. Fekadu, M.-W. Fernando, and M. C. Raúl, "Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos." Banco Interamericano de Desarrollo, 2014.
- [53] Banco Interamericano de Desarrollo, "HydroBID," *Hydro BID*, 2017. [Online]. Available: <http://sp.hydrobidlac.org/>. [Accessed: 26-Jul-2017].
- [54] R. James, B. Mark, RTI International, M.-W. Fernando, and M. C. Raúl, "Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe (ADH)." 2014.
- [55] J. Rineer, M. Bruhn, F. Millares, and R. Muñoz, "Nota técnica: Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y El Caribe." Banco Interamericano de Desarrollo, Dec-2014.
- [56] D. A. Haith, R. Mandel, and Shyan Wu, Ray, "GENERALIZED WATERSHED LOADING FUNCTIONS.VERSION 2.0 USER'S MANUAL." 15-Dec-1992.

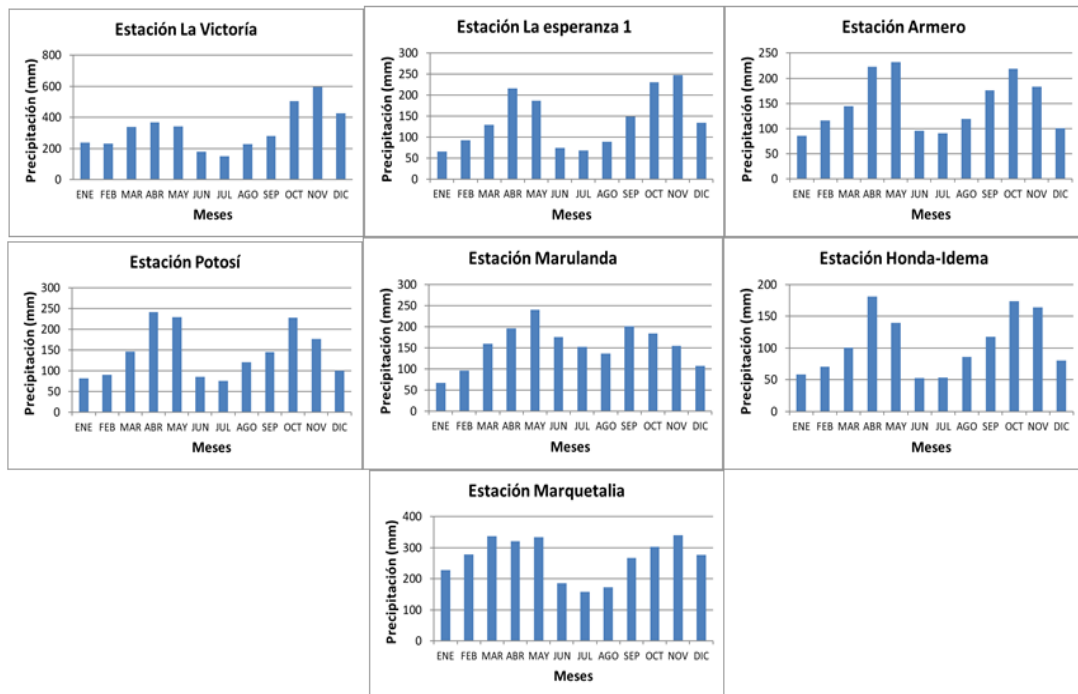
- [57] B. Hong and D. Swaney, *GWLFXL 2.1.1 Users' Manual (Generalized Watershed Loading Functions for Excel, v. 2,1,1)*. 2013.
- [58] E. M. Schneiderman *et al.*, "Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model," *Hydrol. Process.*, vol. 21, no. 25, pp. 3420–3430, Dec. 2007.
- [59] RTI international, "Hydro-BID calibración." 15-Feb-2017.
- [60] C. W. Dawson, R. J. Abrahart, and L. M. See, "HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts," *Environ. Model. Softw.*, vol. 22, no. 7, pp. 1034–1052, Jul. 2007.
- [61] Juan Cabrera, "Calibración de Modelos Hidrológicos." Universidad Nacional de Colombia, 09-Jul-2012.
- [62] Stockholm Environment Institute, "WEAP-Brochure." 2013.
- [63] Stockholm Environment Institute, "WEAP: Water Evaluation and Planning system," *SEI*, Nov-2017. [Online]. Available: <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [64] M. McCartney and R. Arranz, "Application of the Water Evaluation And Planning (WEAP) Model to Assess Future Water Demands and Resources in the Olifants Catchment, South Africa." 2007.
- [65] Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile, and Stockholm Environment Institute, "Guía metodológica: Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP," 2009. [Online]. Available: http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf. [Accessed: 13-Feb-2018].
- [66] USAID, "Modelo Hidrológico WEAP: Proyecto para la adaptación y resiliencia," Piura, 22-Sep-2016.
- [67] C. Soruco and C. Gonzalo, "Evaluación de un Modelo Hidrológico Semi Distribuido para la Estimación de la Escorrentía de Deshielo en el Río Juncal," *Repos. Académico - Univ. Chile*, 2010.
- [68] P. Raskin, J. Sieber, and A. Huber-Lee, "WEAP (Water Evaluation And Planning System): User Guide for WEAP 21." Stockholm Environment Institute, Jul-2001.
- [69] Z. M. Mounir, C. Ming Ma, and I. Amadou, "Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic)," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 5, Feb. 2011.
- [70] J. Sieber and D. Purkey, "Water Evaluation and Planning System (WEAP): User Guide Stockholm Environment Institute." Aug-2015.
- [71] M. Fekadu, C. Juliana, and Jake Serago, "Introducción a los Métodos de Rellenado de Datos," 14-Feb-2017.
- [72] C. Quispe Torres, R. Samanamud Acero, J. Cosi Guzmán, J. López Alay, C. Basurco Manrique, and S. Chamorro Acero, "Método de doble masa." Universidad de TACNA, 2015.
- [73] Universidad de Cajamarca, "Análisis de consistencia." 2015.
- [74] H. Angarita, "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." Jul-2014.
- [75] CORTOLIMA, "Programa de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA) del río Gualí." 11-Oct-2014.
- [76] Y. Zhang, Q. You, C. Chen, and J. Ge, "Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China," *Atmospheric Res.*, vol. 178–179, pp. 521–534, Sep. 2016.

ANEXOS

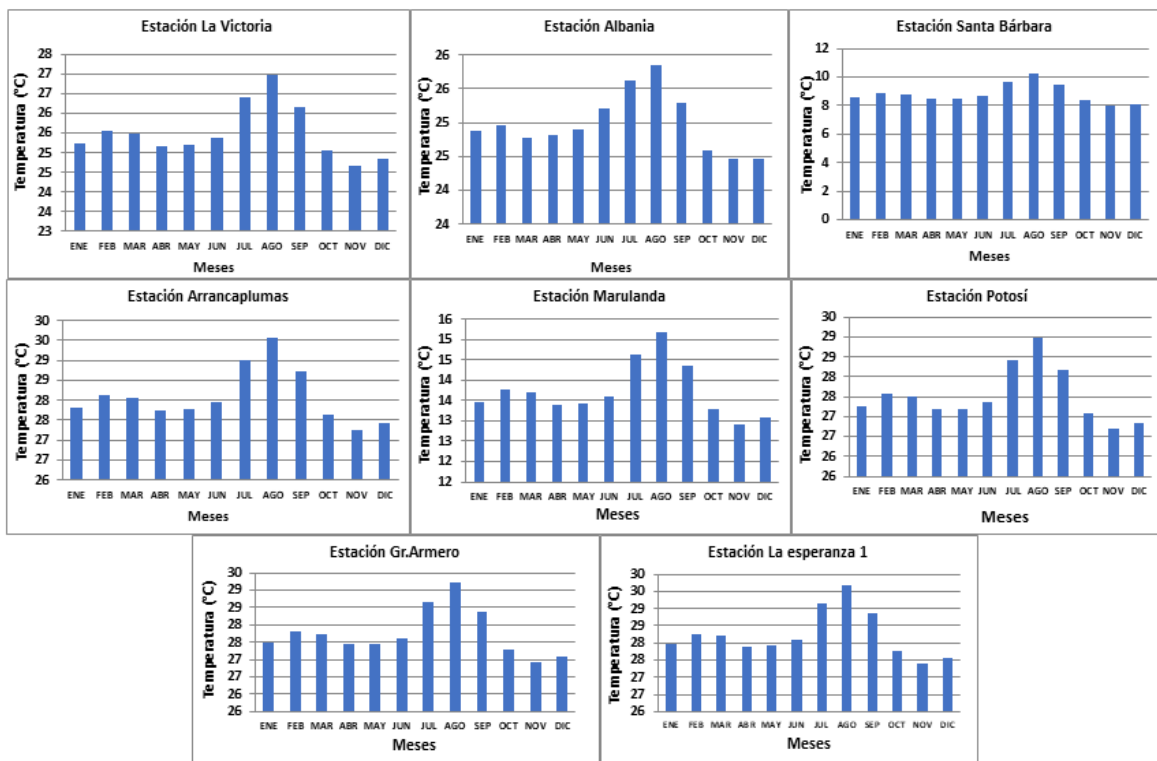
Anexo A: Histogramas de precipitación, temperatura, brillos solares y humedad relativa

- Precipitación

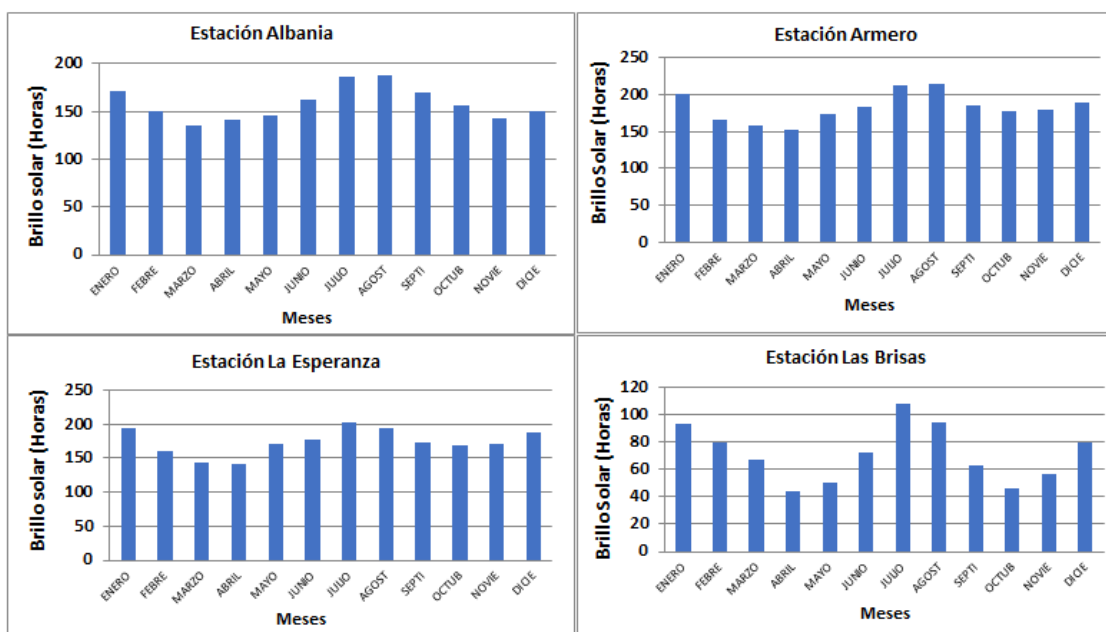




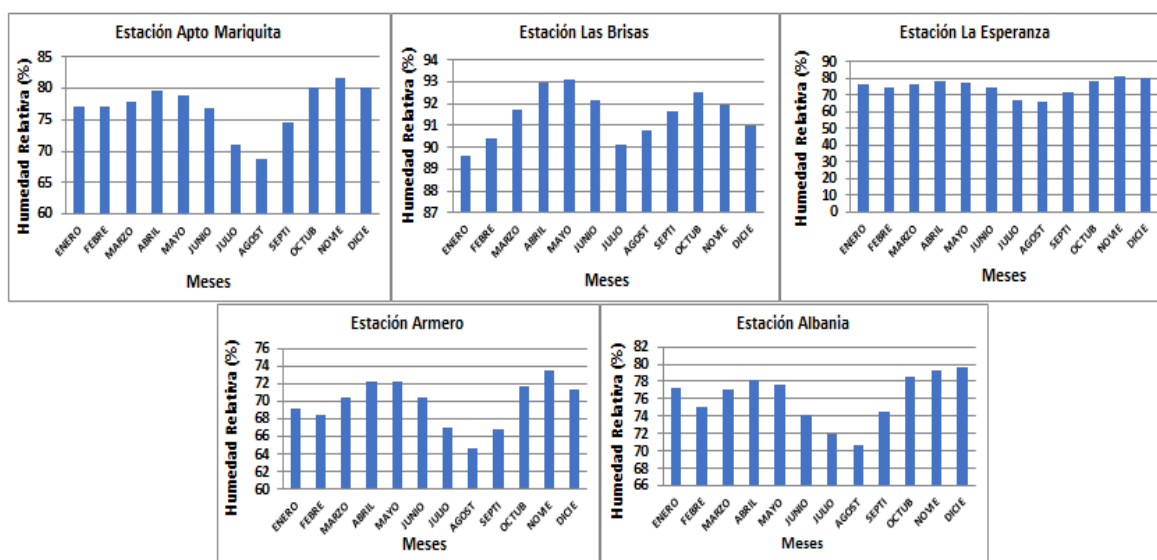
- Temperatura



- Brillo solar



- Humedad relativa



Anexo B: Histogramas de precipitación, temperatura, brillos solares y humedad relativa

Datos de entrada		Prioridad	Formato
Para el cálculo de la demanda			
Uso del suelo	Modelo de elevación digital (DEM)	1	GIS
	Cobertura/uso del suelo	1	GIS
	Tipo de suelo	2	GIS
	Geología	2	GIS
	Tecnologías de irrigación	2	GIS, Excel, CSV
Clima	Series históricas de precipitación	1	Excel, Texto, CSV
	Series históricas de temperatura	1	Excel, Texto, CSV
	Series históricas de humedad relativa	1	Excel, Texto, CSV
	Series históricas de velocidad del viento	1	Excel, Texto, CSV
	Nubosidad	2	Excel, Texto, CSV
	Latitud, longitud	1	Excel, Texto, CSV, capas GIS para extraer la información
Para los puntos de demanda	Número de usuarios	1	
	Consumo per cápita	1	
	Variación mensual o crecimiento proyectado	1	

Anexo C. Análisis estadístico de las estaciones

- Análisis estadístico estaciones de precipitación

Número de estación	Estación	Latitud	Longitud	Número de datos	% datos faltantes	Medio (cm)	Máx (cm)	Desviación estándar (cm)
1	23010020	5.155	-75.048	8763	0.37	0.74	10.00	0.96
2	23010080	5.203	-74.748	8589	2.35	0.33	11.06	0.93
3	23020090	5.278	-75.267	8692	1.18	0.53	11.70	0.82
4	23020080	5.265	-75.144	7927	9.87	0.92	25.36	1.49
5	23050080	5.298	-75.057	8147	7.37	0.89	15.53	1.60
6	23040070	5.323	-74.938	8215	6.60	1.30	21.20	2.34
7	23020100	5.320	-74.914	8640	1.77	1.02	21.75	2.06
8	23025040	5.297	-74.915	8301	5.62	0.97	33.50	2.00
9	23025020	5.262	-74.729	8398	4.52	0.42	19.93	1.12
10	26150160	5.018	-75.356	8547	2.83	0.42	7.70	0.66
11	26155150	4.901	-75.353	7915	10.01	0.41	9.90	0.64
12	21250120	5.125	-74.904	8796	0.00	0.41	25.00	1.10
13	21250480	4.903	-75.218	8436	4.09	0.38	11.40	0.71
14	21250500	4.921	-75.075	8518	3.16	0.69	13.50	1.18
15	21250480	4.903	-75.218	8482	3.56	0.45	14.50	1.15
16	21255090	5.002	-74.910	8652	1.63	0.49	15.16	1.19

Fuente: elaboración propia.

- **Análisis estadístico estaciones de temperatura**

Estación	Latitud	Longitud	Número de datos	% datos faltantes	Medio (°C)	Máx (°C)	Desviación estándar (°C)
21255090	5.003	-74.911	8242	6.30	28.21	34.70	1.70
23025020	5.263	-74.729	7585	13.77	28.29	35.60	1.71
23025040	5.298	-74.916	8125	7.63	25.03	29.60	1.34
23015040	5.210	-74.886	7689	12.59	26.47	33.2	1.46
21255120	5.027	-75.117	7957	9.54	26.77	33.55	1.46

Fuente: elaboración propia.

- **Análisis estadístico estaciones de caudal**

Estación	Latitud	Longitud	Número de datos	% datos faltantes	Medio (m³/s)	Máx (m³/s)	Desviación estándar (m³/s)
23017060	5.230	-74.890	8014	8.89	5.5	188.33	6.09
23017080	5.244	-74.885	6911	21.43	6.47	98.14	6.14
23017030	5.203	-74.741	8796	0	41.71	529.3	30.55
23017040	5.203	-74.905	8593	2.3	25.9	206.7	15.67

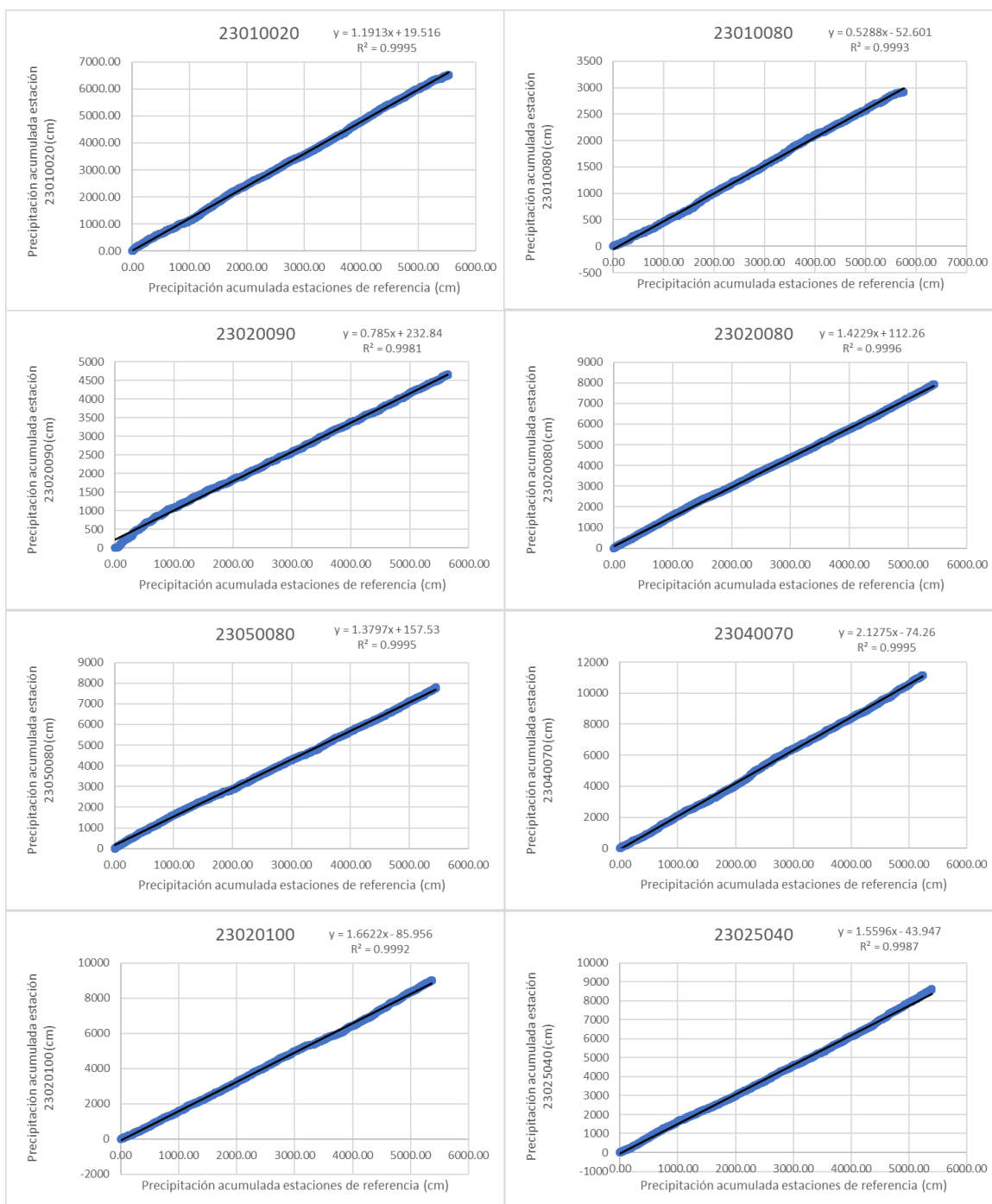
Fuente: elaboración propia.

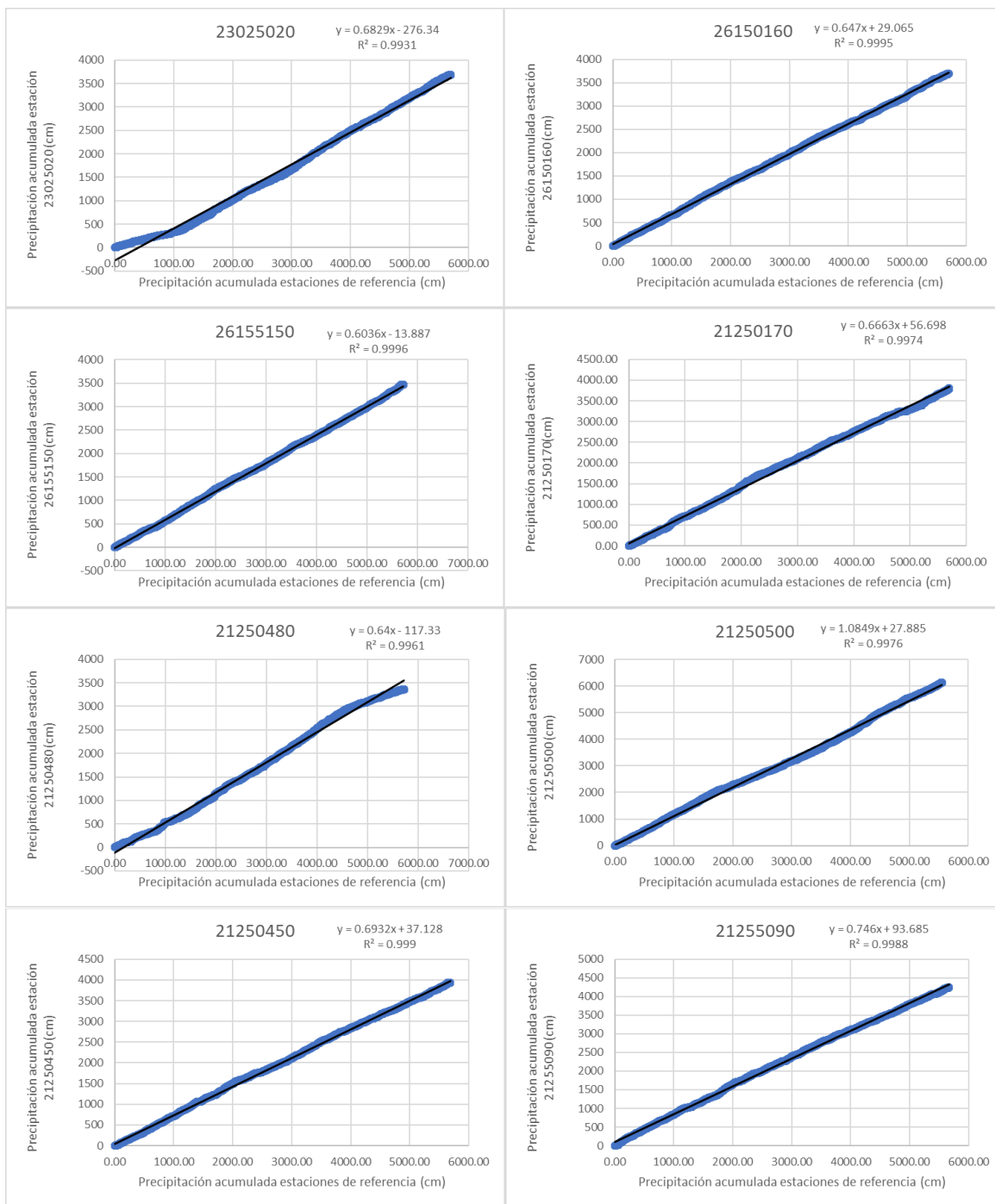
Anexo D: Área de cultivo por municipio

Municipio	Cobertura	Área	Total Agrícola (Km²)	TOTAL
Casabianca	Cultivos anuales o transitorios	165.609	292.291	1089.596
		18.521		
		108.161		
	Cultivos semipermanentes	165.609	472.822	
		99.203		
		18.521		
		81.328		
		108.161		
	Áreas agrícolas	108.161	324.483	
		108.161		
108.161				
Falán	Cultivos anuales o transitorios	165.609	165.609	496.827
	Cultivos semipermanentes	165.609	165.609	
	Áreas agrícolas	165.609	165.609	
Fresno	Cultivos anuales o transitorios	85.772	435.294	1287.578
		84.71		
		99.203		
		165.609		
	Cultivos semipermanentes	85.772	350.584	
		165.609		
		99.203		
	Áreas agrícolas	85.772	501.7	
		84.71		
		165.609		
		165.609		
Herveo	Cultivos anuales o transitorios	165.609	472.822	1796.798
		99.203		
		108.161		
		81.328		
		18.521		
	Áreas agrícolas	165.609	851.154	
		99.203		
		81.328		
		108.161		
		108.161		
		81.328		
		108.161		
	99.203			
Cultivos	165.609	472.822		

	semipermanentes	99.203			
		18.521			
		81.328			
		108.161			
Honda	Cultivos anuales o transitorios	170.908	170.908	854.54	
	Áreas agrícolas	170.908	683.632		
		170.908			
		170.908			
		170.908			
Mariquita	Cultivos anuales o transitorios	85.772	514.022	1618.691	
		7.023			
		170.908			
		84.71			
		165.609			
		Áreas agrícolas	85.772		854.35
			7.023		
	170.908				
	170.908				
	84.71				
	165.609				
	84.71				
	84.71				
Cultivos semipermanentes	165.609	250.319			
	84.71				
Palocabildo	Cultivos anuales o transitorios	165.609	165.609	496.827	
	Cultivos semipermanentes	165.609	165.609		
	Áreas agrícolas	165.609	165.609		

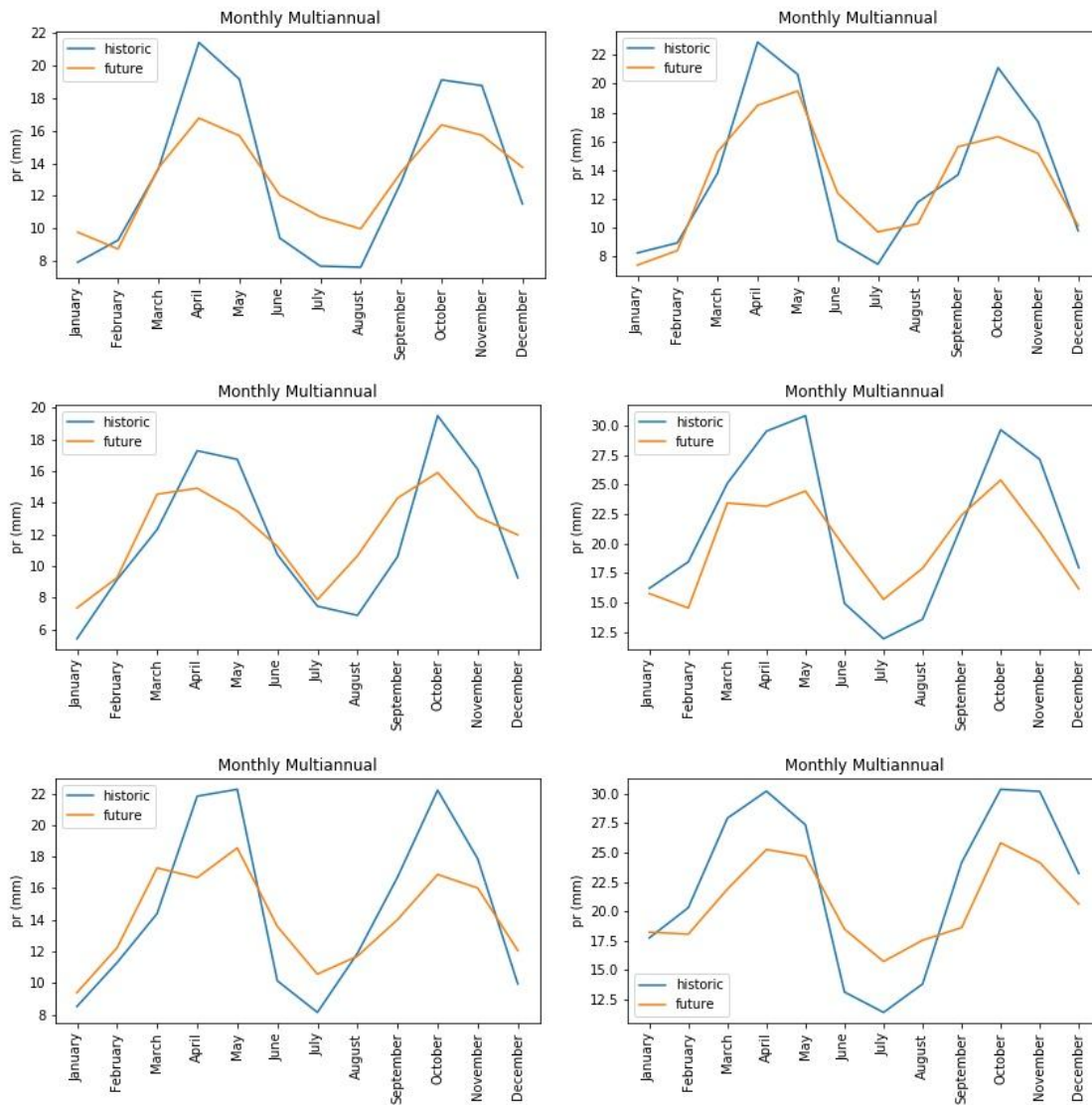
Anexo E. Curvas de doble masa

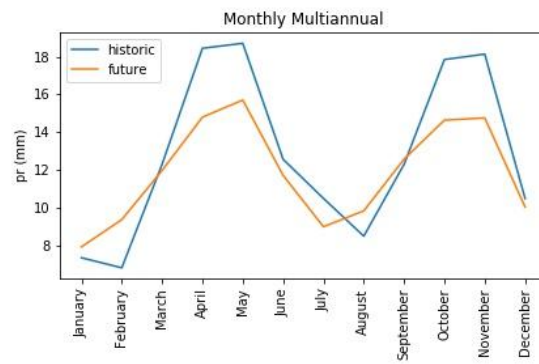
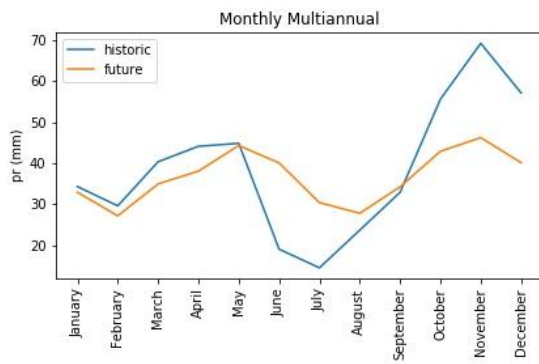
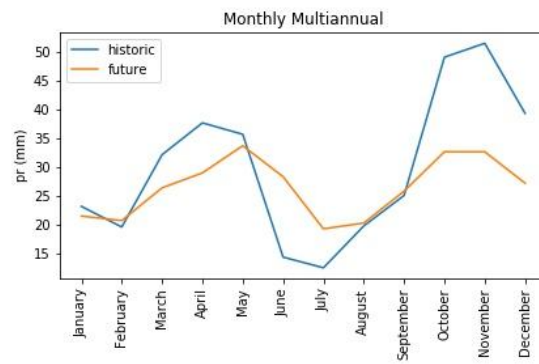
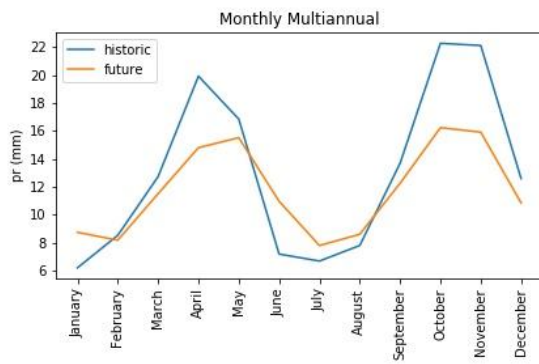
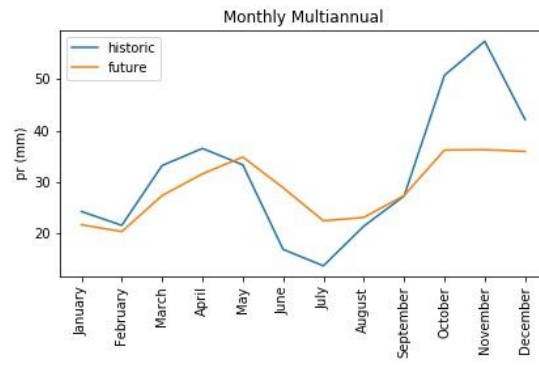
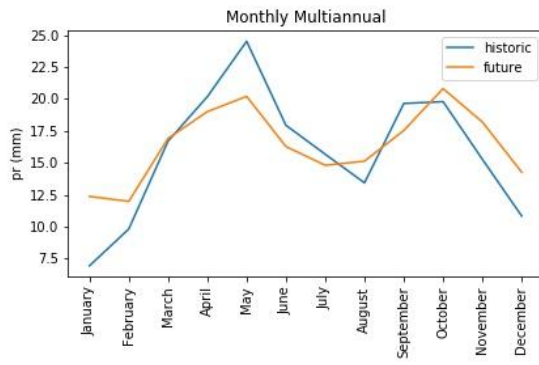
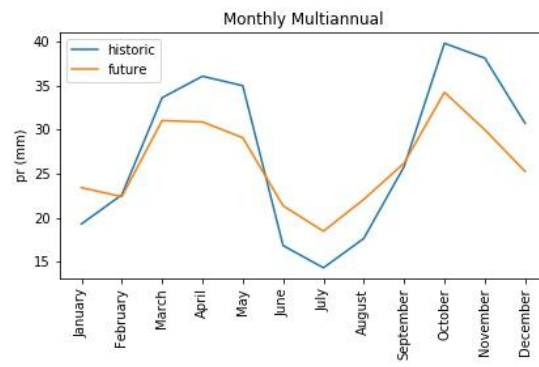
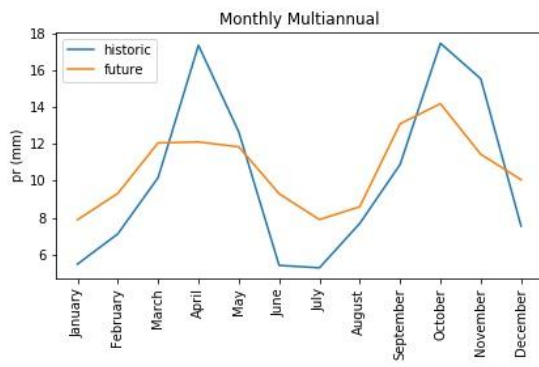


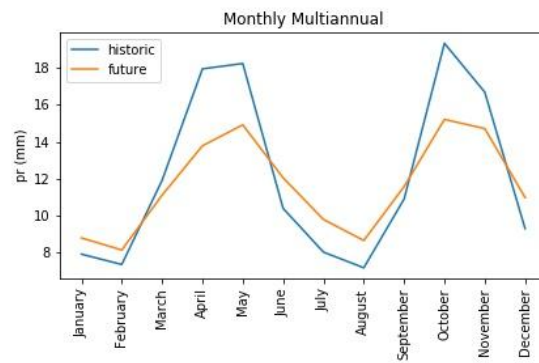
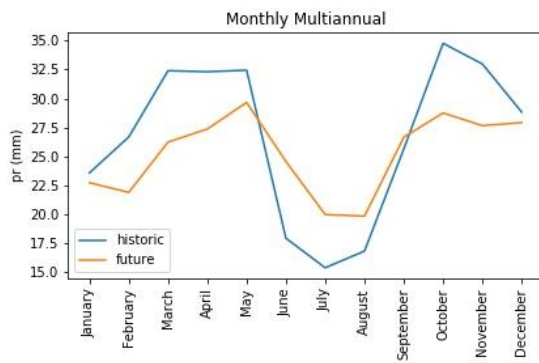


Anexo F: Comparación histórico vs futuro del GCM reducido

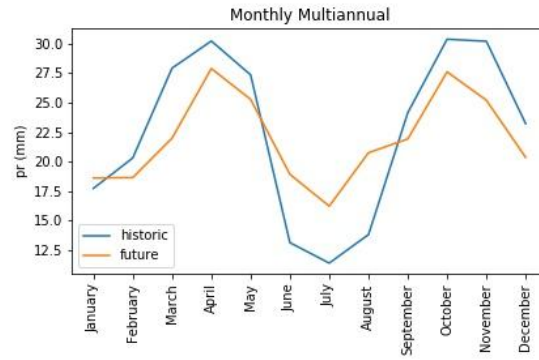
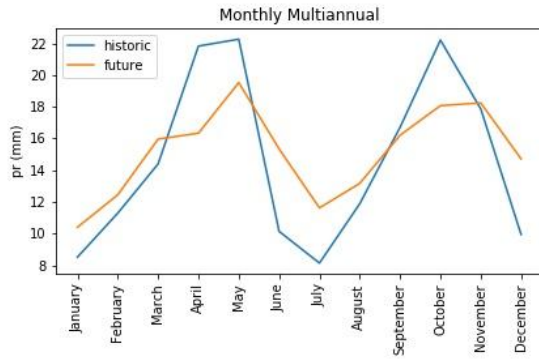
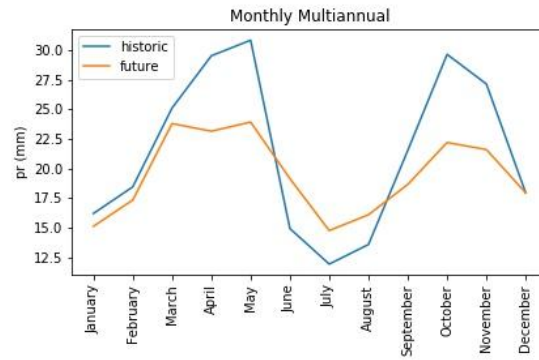
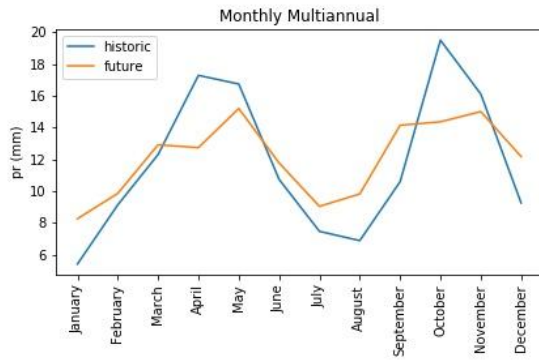
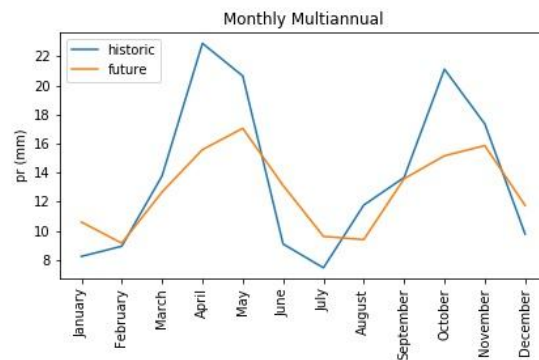
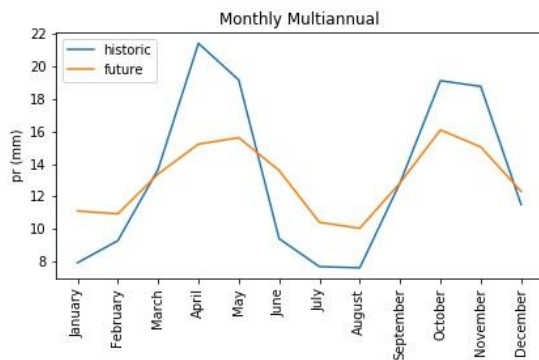
- Precipitación RCP 2.6

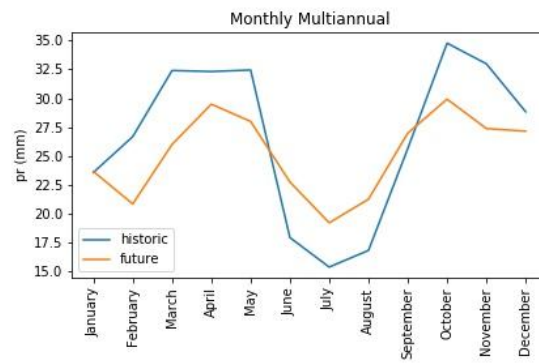
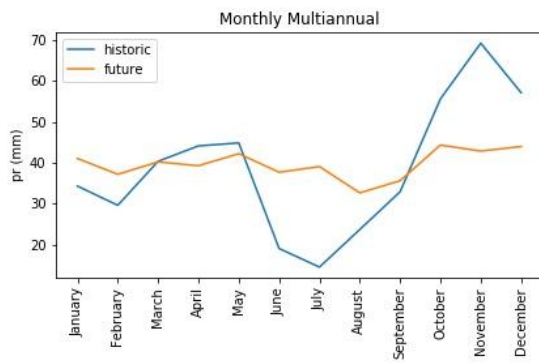
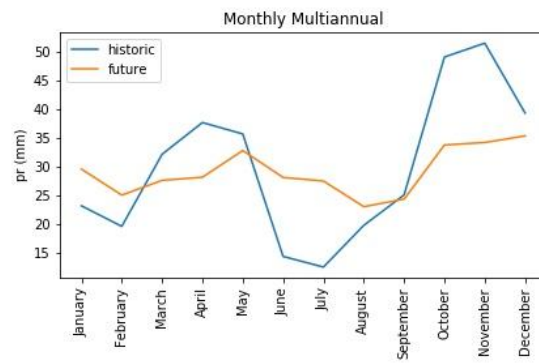
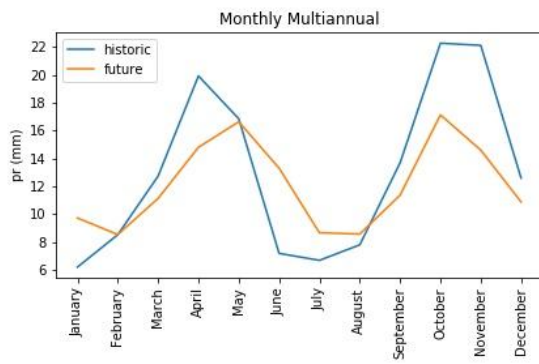
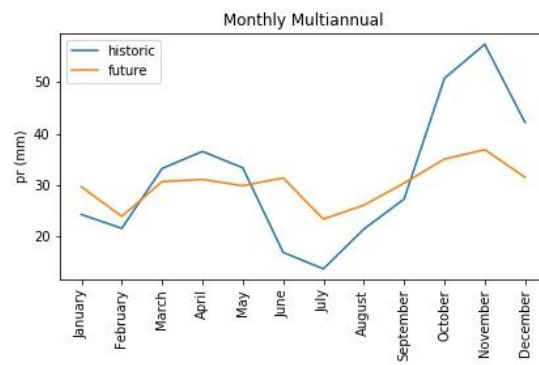
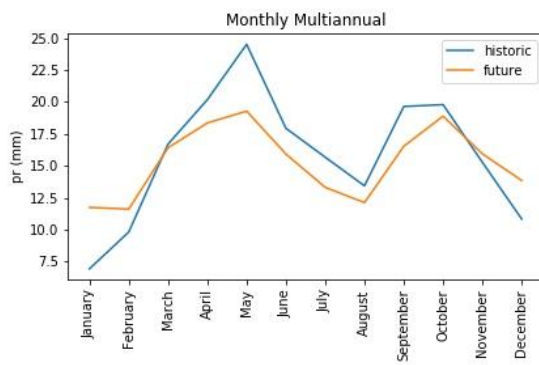
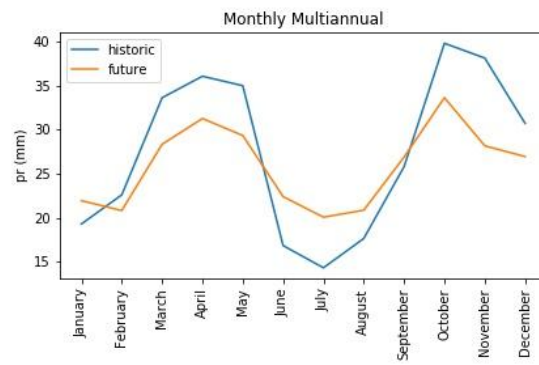
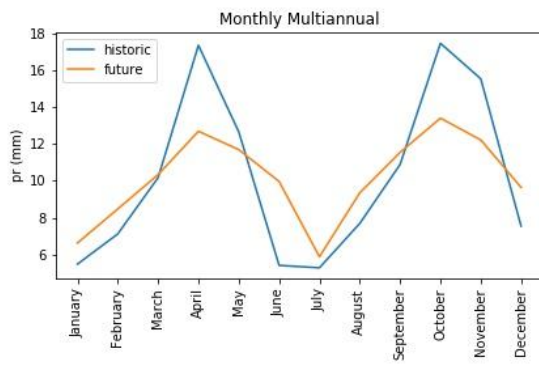


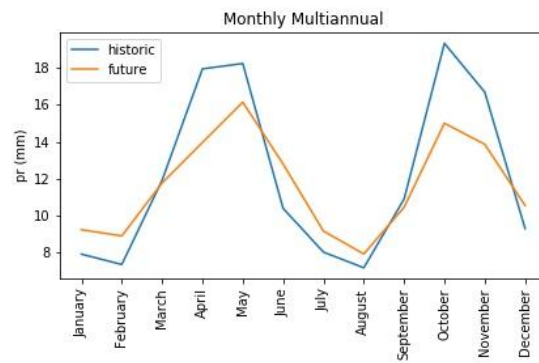
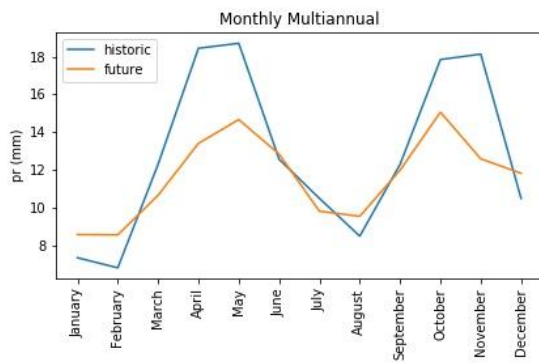




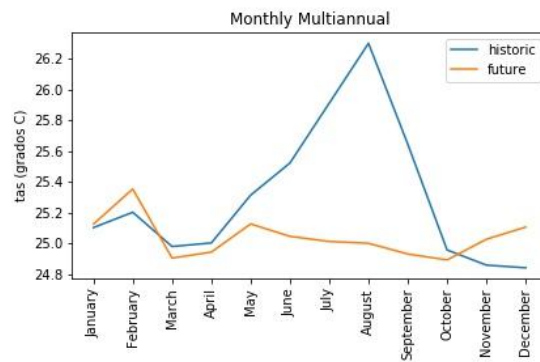
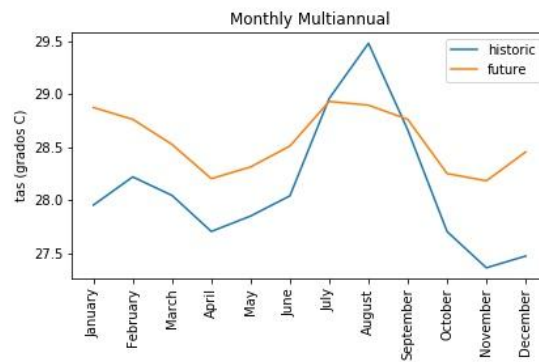
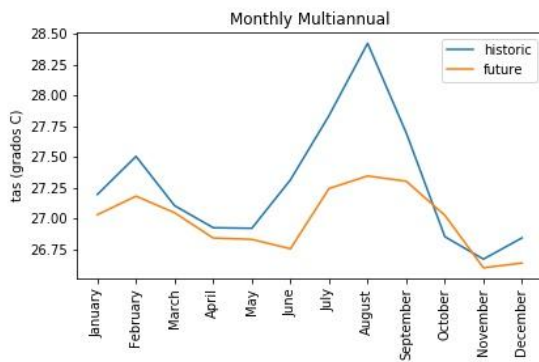
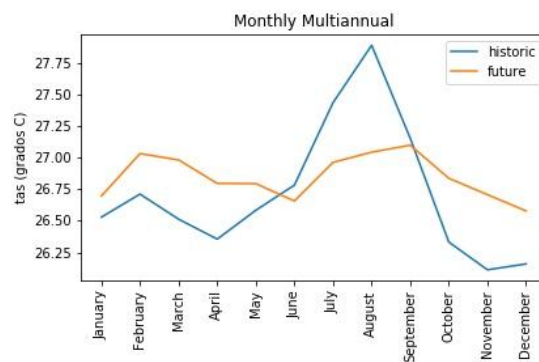
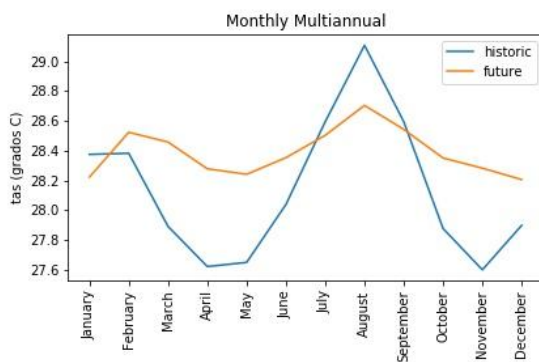
• **Precipitación RCP 8.5**



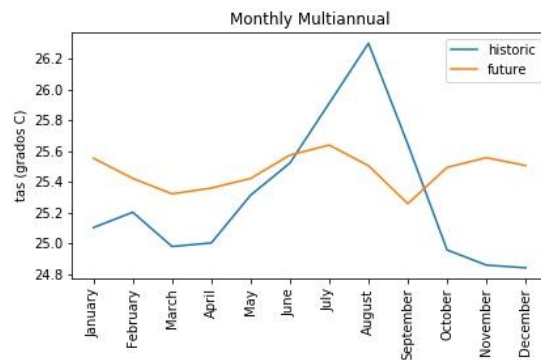
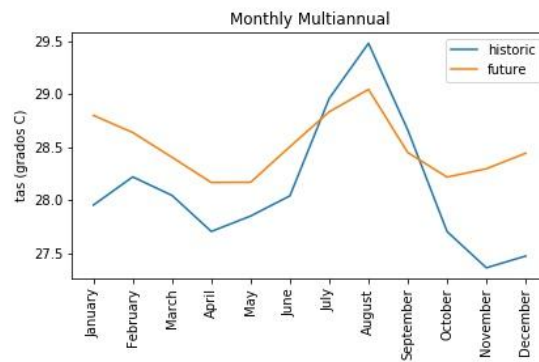
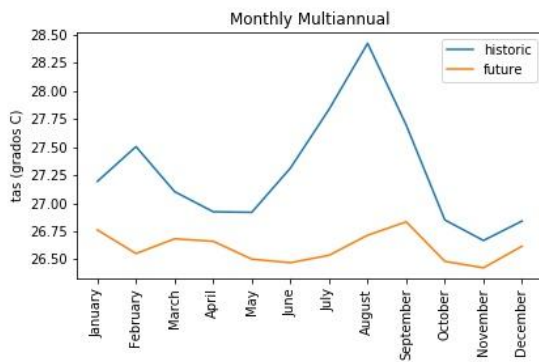
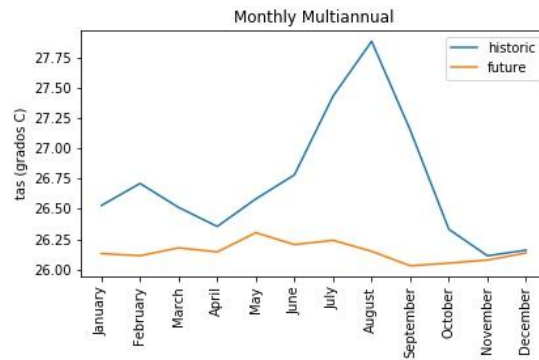
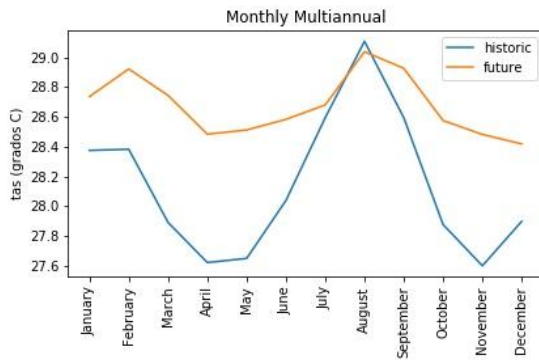




- **Temperatura RCP 2.6**



- **Temperatura RCP 8.5**



Anexo G: Métricas de desempeño de la reducción de escala

Variable	Estación	Métricas															
		MAE				RAE				CE				RSME			
		RCP 2.6 antes	RCP 2.6 después	RCP 8.5 antes	RCP 8.5 después	RCP 2.6 antes	RCP 2.6 después	RCP 8.5 antes	RCP 8.5 después	RCP 2.6 antes	RCP 2.6 después	RCP 8.5 antes	RCP 8.5 después	RCP 2.6 antes	RCP 2.6 después	RCP 8.5 antes	RCP 8.5 después
Precipitación (cm)	21250480	5.069738	0.12862	5.1695	0.1087	13.40098	1.3382646	13.608841	1.289265	-210.3	-1.04986	-218.27	-1.06855	7.9421	0.781	8.09	0.785
	21250500	4.555045	0.09446	4.6548	0.12098	4.899975	1.0170445	5.0070165	1.024358	-29.313	-0.2473	-29.313	-0.25211	7.677	1.599	7.8878	1.602
	21255090	4.903429	0.08112	5.0032	0.05868	7.474197	1.1313655	7.6777973	1.106023	-49.826	-0.37671	-52.602	-0.36461	7.8548	1.292	8.0665	1.2865
	23010020	4.597575	0.00706	4.6973	0.01344	5.903151	1.1289667	6.0394502	1.084105	-52.536	-0.55202	-55.196	-0.45704	7.6401	1.30033	7.8276	1.25992
	23010080	5.065279	0.04173	5.165	0.04425	10.34233	1.0879348	10.581505	1.087111	-86.188	-0.2589	-90.187	-0.33929	7.963	1.75006	8.1435	0.98676
	23020080	1.952853	0.01103	1.9965	0.00655	4.779025	1.0909313	4.8626566	1.124258	-26.163	-0.41394	-27.33	-0.44971	7.6735	1.75006	7.8366	1.77205
	23020090	4.856054	0.05373	4.9558	0.03867	9.081858	1.2227272	9.2362876	1.149772	-106.97	-0.65857	-111.13	-0.54494	7.8228	0.96917	7.9719	0.93538
	23020100	4.139396	0.20571	4.2391	0.21224	3.333756	1.009431	3.3954567	1.015823	-9.7594	-0.2286	-10.293	-0.22542	7.6993	2.60071	7.8879	2.59734
	23025020	4.968969	0.01112	5.0687	0.03101	8.220568	1.0703926	8.3766021	1.10786	-44.172	-0.27538	-46.171	-0.31629	7.9384	1.33336	8.1121	1.35458
	23025040	4.403393	0.03535	4.5031	0.05597	3.905461	1.0916392	4.0426246	1.108615	-12.645	-0.29941	-13.448	-0.35314	7.7752	2.39845	8.0007	2.44754
	23040070	3.96703	0.02815	4.0668	0.0422	3.084302	1.1009843	3.135976	1.090214	-8.8513	-0.37456	-9.3374	-0.36247	7.6677	2.86307	7.8546	2.85045
	23050080	4.432237	0.05403	4.532	0.01542	4.602717	1.1436381	4.6778223	1.111242	-21.105	-0.40142	-22.226	-0.33659	7.6879	1.93498	7.8803	1.88969
	26150160	4.951392	0.00279	5.0511	0.02535	10.40703	1.1266244	10.583571	1.158993	-126.69	-0.43975	-132.34	-0.50626	7.8605	0.83434	8.0325	0.85339
	26155150	5.016463	0.02419	5.1162	0.0592	11.80079	1.1302913	11.997001	1.14988	-147.6	-0.42026	-153.69	-0.42703	7.9104	0.77304	8.071	0.77488
Temperatura (°C)	21255090	9.126793	-0.27213	9.4552	-0.24	8.219018	2.132289	8.5147884	2.195893	-40.279	-3.13965	-43.193	-3.33727	9.291	2.94223	9.6133	3.01164
	21255120	7.591026	-0.21133	7.9195	-0.32392	6.139639	1.8205945	6.4052805	1.779697	-23.797	-2.20299	-25.952	-2.05869	7.7962	2.80195	8.128	2.73811
	23015040	9.039054	1.06812	9.3675	0.9169	5.947152	1.7798432	6.1632442	1.690792	-29.065	-2.81215	-31.078	-2.47326	9.2792	3.3042	9.5848	3.15392
	23025020	8.999027	-0.39457	9.3275	-0.18203	8.520371	2.3215163	8.8313395	2.167897	-42.219	-3.82415	-45.38	-3.15803	9.1434	3.05478	9.4718	2.83604
	23025040	6.115393	0.14344	6.4438	0.00619	5.695317	2.2022238	6.0011933	2.266248	-20.94	-3.67767	-23.242	-3.78129	6.335	2.9251	6.659	2.98163