



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de la variación en la amenaza de inundación por efecto del cambio climático

Angie Tatiana Forero Hernández

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia
2024

Análisis de la variación en la amenaza de inundación por efecto del cambio climático

Caso de estudio: quebrada Olivares

Angie Tatiana Forero Hernández

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director

Ph.D., Jorge Julián Vélez Upegui

Codirectora

M.Sc., Angélica María Moncada Aguirre

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia

2024

A mis padres, porque gracias a ellos la vida me florece todos los días. Honro su vida, su historia y todo su amor.

A mi hermana por su templanza, por ser más grande que la vida misma. A mi hermano, por permitirnos la felicidad de la niñez una vez más. A ustedes, mi admiración y todo mi agradecimiento.

A mis amigas y amigos por creer.

A Theodore Frobenius y a Quirón, compañeros de esta y todas mis vidas.

A la niña que fui, gracias por seguir intentando.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, por mi formación como profesional y por darme las herramientas para construir todos los días la vida que algún día me permití soñar. Al profesor Jorge Julián Vélez Upegui por su paciencia y guía durante el desarrollo de este trabajo. A Angélica Moncada Aguirre por su disposición, generosidad, mentoría y conocimiento.

Al Instituto del Ambiente de Estocolmo por las herramientas y el patrocinio para el progreso de esta investigación.

A la profesora Joan Nathalie Suárez Hincapié y al profesor Fernando Mejía Fernández por permitirme ser parte del grupo de trabajo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, por sus consejos y su apoyo.

A Luisa Fernanda Parra Gómez por su amable asesoría y los insumos necesarios para llevar a cabo la modelación hidráulica.

A mi familia, mis amigos y a David por su apoyo incondicional, su cuidado, su confianza y su amor, indispensable para la finalización de este trabajo.

Resumen

La presente investigación aborda la problemática de inundaciones en la quebrada Olivares de Manizales mediante un análisis prospectivo de la variación de la amenaza, considerando los efectos del cambio climático. Para lograr este objetivo, se evaluó el desempeño de Modelos de Circulación General contenidos en el CMIP5 en la emulación de patrones climáticos históricos de la cuenca. A través de la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura, junto con la aplicación de la técnica de reducción de escala k-NN Bootstrapping, se proyectaron futuros plausibles en la cuenca. Estas proyecciones son esenciales para la evaluación de alternativas de planificación adaptativa en respuesta a narrativas de incremento de lluvias en la región. Además, la investigación incluyó la evaluación de modelos hidrológicos y la generación de series de caudales, lo que permitió determinar la variación del área propensa a inundaciones. Esta determinación se llevó a cabo mediante la modelación hidráulica previamente desarrollada en el software IBER en puntos críticos de la ciudad. A pesar de que la variación en la amenaza de inundación en el periodo 2024-2053 no arrojó conclusiones definitivas, se analizaron las manchas de inundación en ambos casos, lo que permitió comparar el área inundada por eventos de mayor y menor magnitud con respecto a los eventos simulados a partir de la serie histórica. Como resultado, se sugiere que las variaciones de mayor magnitud porcentual se presentarían particularmente para los caudales con menor periodo de retorno. En última instancia, estos hallazgos contribuyen a la planificación territorial y la gestión del riesgo en un contexto de cambio climático. Se espera que estos hallazgos impulsen el desarrollo de estrategias adaptativas y medidas de protección que promuevan la resiliencia de las comunidades urbanas frente a eventos extremos, garantizando su desarrollo sostenible en un entorno cambiante.

Palabras clave: (Cambio climático, Reducción de escala no paramétrica, Inundaciones urbanas, Modelación hidrológica e hidráulica).

Abstract

Analysis of the variation in flood hazard due to climate change

The present research addresses the issue of flooding in the quebrada Olivares of Manizales through a prospective analysis of threat variation, considering the effects of climate change. To achieve this goal, the performance of General Circulation Models within the CMIP5 was evaluated in emulating historical climate patterns of the basin. Through the generation of synthetic series of precipitation and temperature, coupled with the application of the k-NN Bootstrapping scale reduction technique, plausible futures in the basin were projected. These projections are essential for assessing adaptive planning alternatives in response to narratives of increased rainfall in the region. Additionally, the research involved the evaluation of hydrological models and the generation of flow series, allowing for the determination of variations in flood-prone areas. This determination was carried out through hydraulic modeling previously developed in the IBER software at critical points in the city. Although the variation in flood threat during the period 2024-2053 did not yield definitive conclusions, flood patterns were analyzed in both cases, allowing for comparison of the areas inundated by events of greater and lesser magnitude with respect to events simulated from the historical series. As a result, it is suggested that variations of greater percentage magnitude would occur particularly for flows with shorter return periods. Ultimately, these findings contribute to territorial planning and risk management in a context of climate change. It is expected that these findings will drive the development of adaptive strategies and protective measures that promote the resilience of urban communities against extreme events, ensuring their sustainable development in a changing environment.

Keywords: (Climate change, Non-parametric scale reduction, Urban flooding, Hydrological and hydraulic modeling).

Contenido

	Pág.
1. Introducción.....	17
1.1 Antecedentes	19
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo general	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
2. Marco Teórico.....	25
2.1 El cambio climático	25
2.2 Causas de los cambios climáticos.....	26
2.3 Radiación solar y radiación terrestre	28
2.4 Efecto invernadero	28
2.5 Gases de efecto invernadero	29
2.5.1 Vapor de agua	30
2.5.2 Dióxido de carbono	30
2.5.3 Metano.....	31
2.5.4 Óxido nitroso	31
2.5.5 Gases fluorados.....	31
2.6 Protocolos internacionales relacionados con el cambio climático	32
2.7 Emisiones de gases de efecto invernadero	33
2.8 Indicadores de cambio climático	34
2.8.1 Indicadores de cambio climático en Colombia.....	37
2.9 Escenarios de cambio climático.....	38
2.9.1 Forzamiento radiativo	38
2.9.2 Trayectorias de concentración representativas	39
2.9.3 Trayectorias socioeconómicas compartidas	41
2.10 Modelos Climáticos Globales.....	42
2.11 Técnicas de reducción de escala.....	45
2.12 Modelos hidrológicos agregados.....	47
2.12.1 Modelo TPHM.....	48
2.12.2 Modelo de tres tanques	48
2.12.3 Modelo SIMHYD	49
2.12.4 Modelo AWBM.....	50
2.12.5 Modelo SHIA.....	50
2.12.6 Modelo HBV.....	51
2.13 Modelación hidráulica.....	52
3. Área de estudio.....	55
3.1.1 Clima.....	57

3.1.2	Parámetros morfométricos y fisiográficos	58
3.1.3	Usos y cobertura del suelo	60
4.	Metodología	63
4.1	Preparación de la información	64
4.2	Serie de evapotranspiración de referencia (ETO)	71
4.3	Generación de series con afectación de cambio climático	71
4.3.1	Modelos de Circulación General - Proyecto CMIP5.....	72
4.3.2	Evaluación de desempeño y priorización de modelos.....	73
4.3.3	Reducción de escala.....	75
4.4	Modelación hidrológica	78
4.4.1	Recopilación de información	80
4.4.2	Evaluación de parámetros de calibración de modelos hidrológicos	85
4.4.3	Modelos hidrológicos agregados.....	85
4.5	Análisis de frecuencia de extremos hidrológicos	94
4.6	Modelación hidráulica	95
5.	Resultados.....	99
5.1	Priorización de Modelos Climáticos Globales -MCG-.....	99
5.2	Generación de series sintéticas de precipitación y temperatura	105
5.3	Representación estacional del clima futuro.....	112
5.4	Análisis de eventos de precipitación.....	113
5.5	Generación de caudales de diseño.....	115
5.6	Modelación hidráulica	119
6.	Conclusiones y recomendaciones	125
7.	Bibliografía	129
8.	Anexos.....	145
8.1	Producto 1	145
8.2	Producto 2	146
8.3	Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a la información base.....	155
8.4	Resultados de simulación climática obtenidos a partir de MCG	158
8.5	Detalle de calibración y validación de modelos hidrológicos	174
8.5.1	Calibración.....	174
8.5.2	Validación.....	180

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Árbol de problemas planteado para la investigación	22
Figura 2-1. Línea de tiempo de realización de cumbres y creación de protocolos relacionados con el cambio climático.	32
Figura 2-2. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sectores económicos.....	33
Figura 2-3. Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero por sectores económicos.....	34
Figura 2-4. Esquema del modelo agregado TPHM.....	48
Figura 2-5. Esquema del modelo agregado de tres tanques.....	49
Figura 2-6. Esquema del modelo agregado SIMHYD.....	50
Figura 2-7. Esquema del modelo agregado AWBM.....	50
Figura 2-8. Esquema del modelo agregado SHIA.....	51
Figura 2-9. Esquema del modelo agregado HVB.....	52
Figura 3-1. Ubicación de la cuenca urbana Olivares.....	56
Figura 3-2. Puntos críticos de inundación en la cuenca media de la quebrada Olivares.....	56
Figura 3-3. Unidades climáticas según clasificación Caldas – Lang presentes en la cuenca quebrada Olivares.....	57
Figura 3-4. Distribución de la temperatura en la cuenca quebrada Olivares.....	58
Figura 3-5. Curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada Olivares.....	59
Figura 3-6. Cobertura del suelo en la cuenca de la quebrada Olivares.....	61
Figura 3-7. Distribución de las coberturas del suelo en la cuenca de la quebrada Olivares.....	61
Figura 4-1. Flujo metodológico de la investigación.....	63
Figura 4-2. Ubicación de la estación meteorológica Agronomía.....	65
Figura 4-3. Diagrama de cajas y bigotes de la precipitación mensual multianual promedio en la estación Agronomía.....	66
Figura 4-4. Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura mensual multianual promedio en la estación Agronomía.....	68
Figura 4-5. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la interpolación.....	69
Figura 4-6. Curva de masa residual. Temperatura mínima.....	69
Figura 4-7. Curva de masa residual. Temperatura máxima.....	70
Figura 4-8. Fases ENSO 1956 – 2017.....	70
Figura 4-9. Metodología general para la generación de series climáticas.....	72
Figura 4-10. Caracterización de atributos del clima a diferentes escalas.....	74
Figura 4-11. Ejemplo de matriz de probabilidad conjunta.....	76
Figura 4-12. Ejemplo del algoritmo del método k-NN bootstrapping.....	77

Figura 4-13. Ubicación de las estaciones de aforo consideradas en el modelo hidrológico.	79
Figura 4-14. Diagrama de cajas y bigotes del caudal promedio en las estaciones sobre la quebrada Olivares.	81
Figura 4-15. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto El Popal.....	83
Figura 4-16. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico Escuela de Carabineros.....	83
Figura 4-17. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico Aguas de Manizales.....	84
Figura 4-18. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico La Asunción.....	84
Figura 4-19. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.....	87
Figura 4-20. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.....	87
Figura 4-21. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo TPHM.....	89
Figura 4-22. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo HBV.....	89
Figura 4-23. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.....	90
Figura 4-24. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.....	91
Figura 4-25. Comportamiento mensual del caudal observado y simulado (1989-2018). Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.	92
Figura 4-26. Comportamiento mensual del caudal simulado (1989-2018). Cuenca de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales.	94
Figura 4-27. Mapas considerados en el modelo hidráulico.	95
Figura 4-28. Zonas priorizadas para análisis hidráulico.	97
Figura 5-1. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (BNU-ESM).	100
Figura 5-2. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (CMCC-CESM).	100
Figura 5-3. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (CMCC-CMS).	101
Figura 5-4. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (MIROC-ESM-CHEM).	101
Figura 5-5. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (MPI-ESM-MR).	102
Figura 5-6. Comparación de atributos climáticos históricos de los MCG con el clima observado para el periodo 1956 – 1985).	104
Figura 5-7. Comparación de atributos climáticos históricos de los MCG con el clima observado para el periodo 1986 – 2018).	104
Figura 5-8. Visualización de los atributos climáticos para 5 series generadas con el modelo MPI-ESM-MR.....	107
Figura 5-9. Visualización de los atributos climáticos para 5 series generadas con el modelo CMCC-CESM.....	108
Figura 5-10. Cambios porcentuales en los atributos climáticos para la cuenca de estudio considerando las series sintéticas generadas para el periodo 2020 – 2100.	109
Figura 5-11. Series sintéticas de temperatura generadas con el modelo MPI-ESM-MR para el periodo 2020 - 2100.....	111
Figura 5-12. Series sintéticas de precipitación generadas con los MCG para el periodo 2020-2100.	111
Figura 5-13. Comparación del patrón estacional del clima histórico con el patrón estacional de los modelos del clima futuro (2020 – 2100)	112
Figura 5-14. Probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación según serie histórica. Estación Agronomía.	114
Figura 5-15. Manchas de inundación en el sector Escuela de Carabineros en escenario histórico y de cambio climático.	119

Figura 5-16. Manchas de inundación en el sector Aguas de Manizales en escenario histórico y de cambio climático.	120
Figura 5-17. Manchas de inundación en el sector La Asunción en escenario histórico y de cambio climático.....	120
Figura 5-18. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. Escuela de Carabineros.	122
Figura 5-19. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. Aguas de Manizales.....	123
Figura 5-20. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. La Asunción.	124

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Eventos documentados en la ciudad de Manizales ocasionados por la quebrada Olivares.	21
Tabla 2-1. Características de las RCP.	40
Tabla 2-2. Modelos Climáticos Globales incluidos en el CMIP5.	43
Tabla 2-3. Algunas técnicas estadísticas de reducción de escala.	46
Tabla 3-1. Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Olivares.	59
Tabla 4-1. Estadísticos principales de la serie de precipitación diaria, en agregación mensual y anual.	65
Tabla 4-2. Estadísticos principales de la serie de temperatura media, en agregación mensual y anual.	67
Tabla 4-3. Modelos climáticos globales (CMIP5) utilizados.	72
Tabla 4-4. Indicadores utilizados para caracterizar atributos del MCG y del clima observado.	74
Tabla 4-5. Estaciones hidrometeorológicas dispuestas en la quebrada Olivares.	78
Tabla 4-6. Información de estaciones de caudal sobre la quebrada Olivares.	80
Tabla 4-7. Estadísticos principales de la serie de precipitación diaria, en agregación mensual y anual.	80
Tabla 4-8. Características de las subcuencas delimitadas hasta los puntos de interés.	82
Tabla 4-9. Evaluación del índice NSE.	85
Tabla 4-10. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de calibración. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.	86
Tabla 4-11. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de validación. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.	88
Tabla 4-12. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de simulación. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.	90
Tabla 4-13. Resumen del balance hídrico de la quebrada Olivares en estación El Popal.	91
Tabla 4-14. Resumen del balance hídrico de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales.	93
Tabla 5-1. Atributos climatológicos observados y simulados en los MCG en el periodo 1956 – 1985.	102
Tabla 5-2. Atributos climatológicos observados y simulados en los MCG en el periodo 1986 – 2018.	103
Tabla 5-3. Atributos climatológicos observados históricos y simulados en las series sintéticas seleccionadas (2020 - 2100).	109
Tabla 5-4. Estadísticas mensuales de las series sintéticas de precipitación y variación con respecto a los valores históricos. ...	110
Tabla 5-5. Estadísticas mensuales de las series sintéticas de temperatura y variación con respecto a los valores históricos. ...	110

Tabla 5-6. Eventos de precipitación con diferentes periodos de retorno. Serie histórica y proyectadas con efecto de cambio climático.....	114
Tabla 5-7. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación El Popal (2024-2053). Modelo CMCC-CESM.	115
Tabla 5-8. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación El Popal (2024-2053). Modelo MPI-ESM-MR.	115
Tabla 5-9. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales (2024-2053). Modelo CMCC-CESM.	116
Tabla 5-10. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales (2024-2053). Modelo MPI-ESM-MR.	116
Tabla 5-11. Caudales de diseño y variación porcentual respecto al caudal histórico.	117
Tabla 5-12. Áreas afectadas por eventos de inundación en los escenarios propuestos.	121

1. Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático ha generado un impacto significativo en diversos aspectos del medio ambiente y la sociedad. Entre los fenómenos más evidentes se encuentran los eventos climáticos extremos, como inundaciones, sequías y tormentas intensas, los cuales representan una amenaza cada vez mayor para las zonas urbanas; en este contexto, la variación de la amenaza de inundación en cuencas urbanas se ha convertido en un desafío crucial para la gestión del riesgo y la adaptación.

El cambio climático ha provocado modificaciones significativas en los patrones climáticos, manifestándose, según el Sexto Informe de Evaluación del Cambio Climático del IPCC, en un aumento tanto en la frecuencia como en la intensidad de las precipitaciones en la región occidental del país. Los eventos extremos de lluvia tienen el potencial de sobrepasar la capacidad de los cauces y generar inundaciones repentinas, poniendo en riesgo vidas, infraestructura y provocando pérdidas económicas significativas.

Con respecto a lo señalado anteriormente, la comprensión de las posibles amenazas en cuencas urbanas es esencial para el desarrollo de estrategias efectivas de planificación y gestión del riesgo que puedan mitigar los impactos negativos. Sin embargo, debido a la complejidad de los sistemas hidrológicos y la influencia de múltiples factores, como la topografía, el uso del suelo y la infraestructura es necesario realizar investigaciones para evaluar de manera prospectiva estos cambios.

En la ciudad de Manizales, en el marco de operación del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas -SIMAC-, se han producido estudios que infieren que los procesos de urbanización y cambio climático producen modificaciones en la dinámica de las ciudades y también de las amenazas, por lo cual, dados los recientes eventos de considerable magnitud presentados en la ciudad, surge la necesidad de modelar la amenaza en la zona, considerando la afectación de variables por posibles efectos del cambio climático.

A pesar de lo anterior, la mayor parte de los estudios realizados sobre la incidencia del cambio climático se han desarrollado para una escala regional (cuenca del río Chinchiná), sin considerar la variación de los resultados en el caso del uso de una escala local. Considerando su relevancia en la estructura y funcionamiento de la ciudad, se seleccionó la quebrada Olivares como objeto de estudio, la cual exhibe una serie de desafíos actuales a lo largo de su trayecto a través del entorno urbano. Entre estos desafíos

se encuentran la alteración del curso natural del agua, la extracción indiscriminada de materiales de construcción y la contaminación por vertimientos. En consecuencia, el presente trabajo de investigación propone abordar el desafío de las inundaciones en la quebrada Olivares a través de un enfoque centrado en el análisis de la evolución de esta amenaza, considerando los impactos del cambio climático, partiendo del supuesto que las modificaciones en el ciclo hidrológico podrían influir en los patrones de eventos húmedos extremos y en la frecuencia de las inundaciones.

Para el desarrollo de este análisis se evaluó el desempeño de Modelos de Circulación General -MCG- en la emulación de los patrones climáticos históricos de la cuenca, con el fin de definir aquellos con mejor rendimiento en la zona. Una vez definidos, se generaron series sintéticas de precipitación y temperatura en la cuenca, informadas por dichos modelos, a las cuales se aplicó la técnica de reducción de escala k-NN Bootstrapping para acercarlas al ámbito local.

La serie de precipitación histórica y las generadas con afectación de cambio climático fueron el insumo principal para la evaluación de distintos modelos hidrológicos agregados que, a su vez, permitieron la generación de series de caudales con diferentes periodos de retorno, los cuales fueron ingresados en el modelo hidráulico desarrollado previamente para la quebrada Olivares, para determinar la variación del área propensa a inundaciones en puntos críticos de la ciudad.

Si bien se destaca que las series sintéticas de precipitación y temperatura producidas en esta investigación no corresponden a una predicción del clima futuro en la ciudad, constituyen una proyección de futuros plausibles en la cuenca, útiles para la evaluación de alternativas de planificación y gestión del riesgo.

La finalidad de esta investigación obedece a la necesidad actual de establecer medidas de protección y prevención de los efectos negativos del cambio climático en la ciudad de Manizales acorde con las estrategias de gestión del riesgo establecidas y pretende consolidarse como una herramienta importante para la planeación territorial ante posibles eventos extremos de precipitación. Esto permitirá a los responsables de la planificación urbana y la gestión de riesgos desarrollar estrategias adaptativas más efectivas, como la mejora de la infraestructura de drenaje, la promoción de prácticas de gestión sostenible del agua y la implementación de políticas de ordenamiento territorial adecuadas, que puedan reducir la vulnerabilidad de las comunidades urbanas frente a las inundaciones, garantizando su desarrollo sostenible en un entorno cambiante.

1.1 Antecedentes

El Sexto Informe de Evaluación del IPCC -AR6- (2021b) resalta la afectación actual de todas las regiones habitadas del planeta, y la contribución de las actividades humanas a muchos de los cambios observados en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos.

La síntesis de la evaluación del cambio observado desde la década de 1950 en los fenómenos de calor extremo, basada en la información producida por el Grupo de Trabajo I del IPCC, permite asegurar que Colombia pertenece a las 41 regiones habitadas en las cuales se ha presentado un incremento progresivo de fenómenos de esta naturaleza, adicionalmente con alto nivel de confianza se concluye que dicho cambio está estrechamente asociado a la contribución humana. Por otra parte, la región se cataloga con datos insuficientes o publicaciones limitadas en la evaluación del cambio observado en el mismo periodo para las precipitaciones intensas, por lo cual no hay un consenso científico sobre los cambios presentados desde la fecha o su relación con la contribución humana debido a evidencias limitadas.

A pesar de estimarse con un alto nivel de confianza que la precipitación promedio aumentaría en la región, hasta el momento y debido a las pruebas escasas, no es posible establecer la dirección ni la magnitud del cambio en la frecuencia y magnitud de eventos de inundaciones fluviales y precipitaciones intensas con posteriores inundaciones (IPCC, 2023).

Pese a la falta de consenso en el AR6 sobre la incidencia del cambio climático en la dinámica de inundaciones en la región, publicaciones con casos de estudio en diferentes territorios, incluyendo Brasil (Debortoli et al., 2017) concluyen que, estadísticamente tanto los cambios en el clima, el uso del suelo y la población contribuyen significativamente en la ocurrencia de inundaciones y al número de lugares potencialmente inundados (Death et al., 2015; Fowler et al., 2021; Rahman et al., 2021; Sofia et al., 2017). Dichos cambios sumados al aumento de la precipitación promedio se traducen en la necesidad de realizar investigaciones en escenarios de cambio del régimen de eventos extremos en la región que puedan producir inundaciones, con el fin de considerar medidas de adaptación para el manejo de riesgos tanto en entornos urbanos como rurales.

Colombia, ante su compromiso con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, presentó en el año 2015 su Tercera Comunicación de Cambio Climático, estudio que requirió la formulación de escenarios de cambio climático para el país. La elaboración de estos escenarios

prospectivos (2011 – 2100) siguió las metodologías generadas por el IPCC en el Quinto Informe de Evaluación -AR5-.

El reporte producido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- tomó en cuenta los 16 modelos de circulación general con mejor desempeño en la representación del clima de referencia de Colombia para posteriormente regionalizar las variables modeladas mediante el método Ensamble Promedio de la Probabilidad Conjunta (Reliability Ensemble Averaging - REA). Se realizaron ensambles multimodelo y multiescenario que permitieron promediar las respuestas de los diferentes escenarios para las estaciones analizadas. Se emplearon métodos de interpolación basados en modelos digitales de elevación y coberturas del suelo para lograr una representación espacial que facilitara la presentación de resultados de escenarios regionales y departamentales (1:100000) (IDEAM et al., 2015). Estos escenarios fueron usados en la producción de proyecciones de disponibilidad y uso del recurso hídrico para el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2023).

Según los resultados presentados (IDEAM et al., 2015), el departamento de Caldas podría presentar un incremento promedio en la precipitación equivalente al 20% de la serie de referencia para el horizonte 2011 – 2040, mientras que, para la ciudad de Manizales, donde se ubica la cuenca de estudio, se proyecta bajo esta metodología un aumento de la precipitación superior al 40%.

En la región, Ocampo López (2017) generó series de cambio climático para el departamento de Caldas con el fin de realizar el análisis de los efectos del cambio climático y la variabilidad climática en la productividad cafetera, destacando el desempeño de los modelos de circulación global MPI-ESM-MR, NorESM1-M y CCSM4 en la representación del ciclo anual de la precipitación en la zona de estudio.

En el contexto de la gestión del riesgo en la ciudad de Manizales se han realizado esfuerzos constantes por implementar herramientas que propendan por la recopilación de información indispensable para el entendimiento del comportamiento de los fenómenos climatológicos en el territorio urbano; y la prevención de pérdidas materiales y humanas relacionadas a eventos de inundaciones. Es así como con la ayuda de diversas instituciones públicas y privadas del departamento y el municipio que a partir del año 1997 el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, instala una red de estaciones hidrometeorológicas con información de tiempo real sobre la ciudad de Manizales con el fin de monitorear eventos de precipitación (La Patria, 2012). Por su parte, la quebrada Olivares en la ciudad de Manizales cuenta con diversos estudios hidrológicos e hidráulicos realizados previamente con el fin de definir sectores susceptibles a inundaciones dentro de los que se resaltan los realizados por Gómez Tobón (2009), Montoya & Ospina (2004), la Universidad Nacional de Colombia (IDEA, 2019) y Parra Gómez (2023) cuyo modelo hidráulico se utilizó como base para la obtención de los resultados finales de esta investigación. Sin embargo, tanto las modelaciones anteriores como las

realizadas en el marco de la instalación de los sistemas de monitoreo no cuentan con el componente de variación que supondría el cambio climático en el ciclo hidrológico de la ciudad.

La modelación hidráulica en el recorrido urbano de la quebrada Olivares se ha promovido debido a los eventos de precipitación extremos en la ciudad de Manizales cuyas consecuentes inundaciones han afectado infraestructura en diferentes zonas de la ciudad. Algunos eventos documentados por medios periodísticos y entidades oficiales se presentan en la Tabla 1-1.

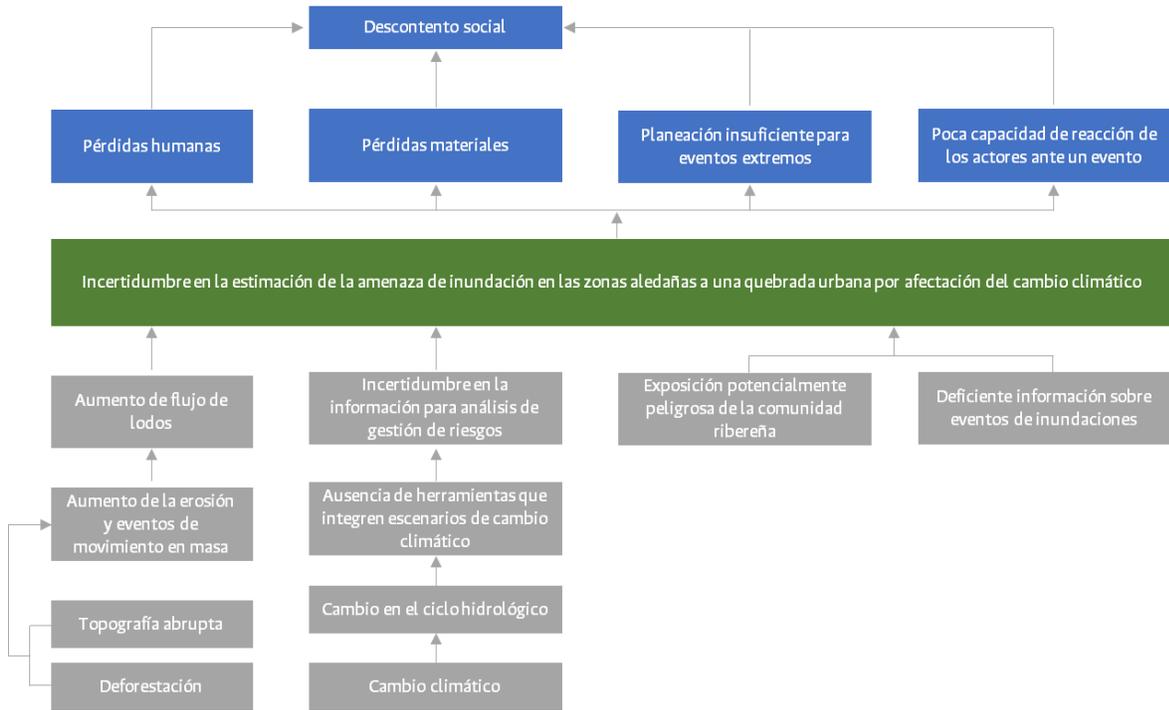
Tabla 1-1. Eventos documentados en la ciudad de Manizales ocasionados por la quebrada Olivares.

Fecha	Evento	Fuente
mar-03	Situación de calamidad pública (res 02 del 31 de marzo de 2003) y declaratoria de desastre. Afectados doce sectores, 42 barrios. Barrios 20 de julio, el Carmen y Colombia. Afectadas vía a Galán, vía Villamaría, vía a Arauca, vía a Neira, vía Batallón, carretera Panamericana, entrada al barrio La Sultana. Evacuadas 319 familias de manera preventiva.	Alcaldía de Manizales (2019b)
oct-10	Desbordamiento de los ríos, inundaciones en los sectores de La Sultana, Alta Suiza, Expoferias. Reporte de la Defensa Civil.	Alcaldía de Manizales (2019b)
nov-17	Inundación quebrada Olivares en la Calle 64 del barrio La Asunción, sector Escuela de Carabineros de la Policía Nacional de Colombia.	Alcaldía de Manizales (2019a)
abr-21	Vías inundadas en Manizales, específicamente en el sector puente-Neira.	BC Noticias (2021)
jun-21	Inundaciones por desbordamiento de la quebrada en los sectores Avenida Kevin- Villa Hermosa.	BC Noticias (2021)
oct-22	Deslizamientos, cortos circuitos, inundaciones en vías y viviendas, aumento de nivel en las quebradas se presentaron en la noche de ayer en la capital de Caldas.	Caracol Noticias (2022)
sep-22	Lluvias torrenciales provocan inundaciones en los sectores Cedros, El Guamo y puente salida Neira.	BC Noticias (2022)

Fuente: Parra Gómez (2023).

A partir de la construcción del árbol de problemas presentado en la Figura 1-1 (segunda rama) y considerando la necesidad de evaluar la incidencia del cambio climático en pequeñas cuencas urbanas, esta investigación propone la incorporación de técnicas de reducción de escala en los modelos adecuados para la estimación de fenómenos hidrometeorológicos potencialmente dañinos para sectores expuestos, lo cual constituiría una herramienta de planificación eficiente para la ciudad de Manizales y un referente importante para estudios posteriores en cuencas de la ciudad y la región.

Figura 1-1. Árbol de problemas planteado para la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático en la recurrencia y magnitud de inundaciones en la cuenca de la quebrada Olivares.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar precipitaciones y temperaturas considerando modelos de cambio climático.
- Comparar varios modelos de circulación general con el fin de determinar el más adecuado para una zona de las correspondientes características.
- Utilizar una técnica de reducción de escala que produzca resultados apropiados para estimaciones locales en la región.
- Realizar la modelación hidrológica en la cuenca de la quebrada Olivares con el fin de simular eventos con diferentes periodos de retorno.
- Adaptar la modelación hidráulica en secciones de la quebrada Olivares propensas a inundaciones.

2. Marco Teórico

En este capítulo, se explorarán en profundidad conceptos clave para entender el cambio climático. Además, se analizarán los principales indicadores de este para comprender la magnitud y la velocidad del cambio que experimenta el planeta actualmente. Siguiendo la línea metodológica propuesta por la investigación, en esta sección se exponen las herramientas utilizadas en la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura, la modelación hidrológica e hidráulica.

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes a los que se enfrenta la humanidad. Para entender este fenómeno, es necesario abordar algunos conceptos clave relacionados con la radiación solar y terrestre, el efecto invernadero, los gases que lo producen y las dinámicas de sus emisiones.

El efecto invernadero es un proceso natural que mantiene la temperatura del planeta dentro de un rango habitable para la vida, sin embargo, las emisiones provocadas por la actividad humana están alterando este proceso, atrapando cada vez más calor en la atmósfera y provocando un aumento en la temperatura global.

Los indicadores de cambio climático corresponden a pruebas físicas y biológicas que muestran los efectos de este en el planeta. Estos indicadores incluyen el aumento de la temperatura global, el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar y los cambios en los patrones climáticos (IPCC, 2022).

2.1 El cambio climático

Según el último reporte del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, el cambio climático se define como la alteración en el estado del clima, determinado mediante pruebas estadísticas que muestran cambios en la media y/o la variabilidad de las propiedades climáticas. Este cambio es persistente y se extiende durante un periodo prolongado (IPCC, 2021).

Como respuesta a las evidencias registradas de cambios en la dinámica del sistema climático global hasta la década de los 90, se convocó una amplia cooperación de carácter internacional, con el fin de establecer estrategias y acciones efectivas, apropiadas y diferenciadas según las capacidades territoriales de cada región; para hacer frente a los retos impuestos por el calentamiento acelerado de la superficie y la

atmósfera del planeta. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) llevada a cabo en el año 1992, se constituyó como uno de los referentes fundamentales para la posterior investigación y desarrollo de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático; el cual, se definió como la variación del clima atribuible de manera directa o indirecta a la actividad antropogénica, que produce una alteración en la composición de la atmósfera mundial y representa un fenómeno adicional a la variabilidad climática natural registrada durante periodos confrontables (Naciones Unidas, 1992).

En la actualidad, la CMNUCC consta de una composición casi mundial y se reconoce como uno de los primeros esfuerzos llevados a cabo con el objetivo de afrontar los desafíos que suponen el cambio climático y a su vez, se representó un punto de partida para el posterior desarrollo de investigaciones e iniciativas para afrontar el problema.

A continuación, se exploran las causas de los cambios climáticos y se profundizará en el papel del efecto invernadero en el cambio climático, con el objetivo de abordar temas posteriores de manera efectiva.

2.2 Causas de los cambios climáticos

A lo largo de la historia planetaria se han presentado cambios relevantes en el clima y sus componentes que fueron y son producidos por diferentes procesos de carácter natural. Contrario al calentamiento atmosférico que se presume como un dilema propio de la edad moderna, cuya dinámica compleja se encuentra estrechamente ligada al contexto evolutivo de la humanidad; el cambio climático abarca un contexto más amplio que puede incluir fluctuaciones debidas a cambios en la actividad solar, cambios en la orientación de la Tierra con respecto al sol, cambios en la circulación oceánica, actividad volcánica o geológica y cambios en la composición atmosférica (Caballero et al., 2007).

Sin embargo, la inusual tendencia al calentamiento del planeta durante los últimos 150 años se atribuye al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son producto de diversas actividades humanas. El calentamiento global supone un cambio en el sistema climático que no solo supone variaciones en la variable temperatura, sino en los regímenes de precipitación, vientos y humedad (Barros et al., 2005).

Para establecer una conclusión acerca de la contribución humana al calentamiento global actual y al consecuente cambio climático, es necesario descartar o mitigar la influencia de los procesos naturales. En este sentido, se procede a realizar una revisión de los antecedentes y efectos de estos fenómenos sobre el sistema climático.

Leves forzamientos astronómicos como la variación en la excentricidad orbital y la oblicuidad son suficientes para inducir al planeta a glaciaciones en intervalos de tiempo regulares, como fue expuesto

por Milankovitch (1941) en su teoría astronómica de las edades glaciales. La teoría mencionada, postula la conexión causal entre los ciclos astronómicos correspondientes a la precesión (periodo de 23 mil años), la oblicuidad (periodo 41 mil años) y la excentricidad (periodo 100 mil años); y el inicio de fases de glaciación o deglaciación (Spiegel et al., 2010).

Si bien las variaciones en la órbita terrestre han provocado cambios climáticos en el pasado, estos cambios se caracterizan por ser lentos, manifestándose únicamente en la escala de miles de años. Considerando lo anterior, no es posible atribuir a estas condiciones astronómicas los eventos relacionados con el calentamiento global propio de los últimos dos siglos. Por la misma razón se descartan los procesos geológicos que modifican la geografía del planeta, los cuales son importantes solo en la escala de millones de años (Barros et al., 2005).

Estudios empíricos y modelos teóricos, sugieren que históricamente, hay una relación entre eventos de vulcanismo explosivo y cambios climáticos a corto plazo (Rampino et al., 1988). Es decir, el sistema climático responde por varios años a erupciones volcánicas de gran magnitud, la nube de aerosol producida en una explosión genera un enfriamiento de la superficie terrestre, efecto contrario al calentamiento que se presenta en la estratósfera (Robock, 2000). No obstante, aunque se reconoce la influencia de eventos volcánicos de extrema magnitud sobre el clima como respuesta al impacto radiativo inmediato que producen, se establece que el rol del vulcanismo a partir del siglo XIX ha sido limitado, pues las erupciones recientes no han afectado significativamente la tendencia de calentamiento asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero (Cole-Dai, 2010).

La irradiación solar total corresponde a la energía total recibida por el sol medida en la parte superior de la atmósfera, aunque varía en un amplio rango de escalas de tiempo, se considera que las fluctuaciones en los últimos 140 años han sido relativamente pequeñas. Pese a que los cambios en la actividad solar pueden haber contribuido de manera perceptible a las fluctuaciones en la temperatura de la superficie a principios del siglo XX, no pueden explicar el incremento observado desde que la irradiación solar total se empezó a medir directamente por satélites a finales de la década de 1970 (IPCC, 2013a).

Investigaciones sugieren que el calentamiento presentado a principios del siglo XX pudo ser el resultado de la combinación del aumento en la temperatura causado por el incremento de gases de efecto invernadero (GEI) y la acción de forzamientos naturales, sumados al enfriamiento causado por forzantes de origen antropogénico; y una contribución sustancial pero inverosímil de la variabilidad climática (Mann et al., 2009). Se estima que el calentamiento presentado en la segunda mitad del siglo fue mayormente causado por cambios en la proporción de GEI, aunque se considera que el aerosol volcánico pudo contrastar aproximadamente un tercio de este calentamiento. Contrario al periodo anterior, el calentamiento de la tropósfera a partir del año 1960 responde principalmente a forzamientos

antropogénicos, considerando una despreciable influencia de forzamientos naturales (Hansen et al., 2011; IPCC, 2013a).

2.3 Radiación solar y radiación terrestre

La radiación solar corresponde a la energía emitida por la superficie del sol, generada por los procesos de fusión nuclear de las partículas de hidrógeno en el núcleo solar y la cual, se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esta energía impulsa la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima global (IDEAM, 2014b).

De acuerdo con la Ley de Planck, para cada temperatura, las emisiones de radiación varían dentro de un rango de longitudes de onda. Teniendo en cuenta que la máxima radiación emitida varía según la temperatura, se establece que los cuerpos con mayor temperatura emiten ondas de longitud más corta que los cuerpos más fríos (Barros et al., 2005).

La energía en forma de radiación de onda corta proveniente del sol traspasa la atmósfera sufriendo diversos procesos de debilitamiento por difusión, reflexión en las nubes y absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión; la radiación alcanza la superficie terrestre que puede absorberla o reflejarla (albedo planetario). La radiación absorbida por la superficie terrestre se envía al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, transmitiendo calor a la atmósfera (IDEAM, 2015a).

Para alcanzar el balance energético, el flujo de calor proveniente del sol debe ser compensado por una pérdida equivalente, en el caso de que este proceso no se llevara a cabo, la temperatura planetaria sufriría rápidas variaciones. Considerando la Ley de Wien, este equilibrio se logra irradiando energía en la zona infrarroja del espectro electromagnético. Asumiendo el planeta como un cuerpo negro, la Ley de Stefan-Boltzman establece que la radiación térmica emitida con una potencia emisiva hemisférica total es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Goosse et al., 2010).

2.4 Efecto invernadero

Respectivamente, la radiación solar y la radiación terrestre representan la mayor fuente y sumidero de energía en el planeta. Debe destacarse que toda la energía que ingresa a la atmósfera terrestre proviene del sol, ya que, la conducción de calor desde el interior terrestre se considera despreciable. La radiación solar entrante se divide en porciones que son absorbidas, dispersadas y reflejadas por los diferentes gases presentes en la atmósfera, aerosoles y nubes. El remanente que alcanza la superficie es ampliamente absorbido por las capas de la Tierra y una pequeña parte se refleja. Como se establece en la primera ley de la termodinámica, la energía absorbida puede transformarse en calor o puede presentarse en la naturaleza como energía potencial y cinética (Peixoto & Oort, 1992).

Cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia molecular de un gas, este absorbe energía transformándola en movimiento molecular interno que produce a su vez, un aumento de temperatura. Al estar compuesta por diversos gases, cuyo comportamiento varía según sus características; la absorción de energía en la atmósfera se efectúa de manera selectiva para diferentes longitudes de onda, siendo transparente para algunos rangos del espectro. La atmósfera tiene poca capacidad de absorción o es transparente en la parte visible del espectro; sin embargo, presenta una capacidad significativa de absorción de radiación ultravioleta -radiación de onda corta proveniente del sol- y radiación infrarroja - radiación de onda larga proveniente de la superficie terrestre- (Benavides & León, 2007).

Para conservar el equilibrio, la radiación solar entrante debe ser compensada por la radiación solar reflejada saliente más la radiación infrarroja térmica saliente. Cualquier alteración de este balance en la radiación, sea de origen natural o antropogénico, genera un forzamiento radiativo que supone cambios en el sistema climático (CIIFEN, 2016).

La transparencia a la radiación solar y la opacidad a la radiación terrestre, características de la atmósfera, permiten mantener el planeta bajo un régimen climático cómodo; el cual se denomina efecto invernadero (NASA, 2022). Sin la acción de este fenómeno las temperaturas en la superficie serían aproximadamente 33 °C menores a las habituales, afectando el desarrollo de numerosas formas de vida (IPCC, 2007, 2013a, 2021b; Michigan State University, 2015).

2.5 Gases de efecto invernadero

La temperatura se define como una medida de la energía promedio del movimiento molecular en una muestra de materia; la suma de la energía producida por aquellos movimientos puede describirse como la energía térmica de la muestra. La energía térmica y, por lo tanto, la temperatura, pueden variar debido a la interacción con diferentes tipos de energía como lo es la energía electromagnética (American Chemical Society, 2020a).

Las vibraciones moleculares poseen márgenes en su nivel de energía que corresponden a las energías en la región infrarroja del espectro electromagnético; de esta manera la radiación infrarroja absorbida por las moléculas produce aumento en su vibración. Las colisiones entre las moléculas energizadas y otras presentes en la muestra transfieren energía entre la totalidad de las moléculas, lo cual aumenta la temperatura. De modo que las vibraciones moleculares absorban energía infrarroja, los movimientos vibracionales deben cambiar el momento dipolar de la molécula. Todas las moléculas con tres o más átomos cumplen este criterio y son absorbentes de radiación infrarroja (American Chemical Society, 2020a).

El vapor de agua -H₂O-, el dióxido de carbono -CO₂- y el ozono -O₃-, se encuentran naturalmente en la atmósfera y absorben radiación infrarroja térmica emitida por la superficie terrestre y la atmósfera. Por la acción de este mecanismo, la temperatura de la atmósfera aumenta y emite radiación infrarroja térmica, de la cual una proporción significativa de esta energía actúa calentando la superficie y la zona inferior de la atmósfera. Este fenómeno se constituye como el *efecto invernadero* y los gases infrarrojos radiativamente activos se denominan *gases de efecto invernadero* (Ledley et al., 1999).

Los gases de efecto invernadero incluyen el vapor de agua, el ozono, aquellos gases enunciados en el Protocolo de Kyoto (metano -CH₄-, óxido nitroso -N₂O-, hidrofluorocarbonos -HFC-, perfluorocarbono -PFC-, hexafluoruro de azufre -SF₆-) y aquellos que se listaron en el Protocolo de Montreal (clorofluorocarbonos -CFC-, hidroclorofluorocarbonos -HCFC- y los halones (Ehhalt & Prather, 2001). En apartados posteriores se profundizará sobre dichos protocolos.

2.5.1 Vapor de agua

El vapor de agua provee la contribución más importante al efecto invernadero en la atmósfera, mediante la capacidad de emitir y absorber radiación infrarroja en muchas más longitudes de onda que los restantes gases; sumada a su mayor proporción en la composición de la atmósfera. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013a), este gas asume un rol preponderante en los procesos de calentamiento global, ya que, si bien el dióxido de carbono no tiene la capacidad de producir procesos significativos de esta naturaleza, el incremento en sus niveles de concentración eleva levemente la temperatura, lo que a su vez produce un aumento en la cantidad de vapor de agua.

2.5.2 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas incoloro e ininflamable a temperatura y presión normal. Aunque es mucho menos abundante en la atmósfera en comparación con la cantidad de nitrógeno y oxígeno, el dióxido de carbono es un componente importante del aire del planeta, siendo el cuarto componente más abundante del aire seco (University Corporation for Atmospheric Research & National Earth Science Teachers Association, 2006a).

El dióxido de carbono se posiciona como el principal gas de efecto invernadero emitido por medio de las actividades humanas. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC -AR6- (2021), el dióxido de carbono representa 75% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, siendo 64% producto de la quema de combustibles fósiles y ejecución de procesos industriales; y 11% producto del sector silvicultura y otros usos de la tierra (IPCC, 2021b).

-Investigaciones concluyen que el aumento en el dióxido de carbono atmosférico es responsable por aproximadamente dos tercios del desequilibrio energético total causante del aumento de la temperatura del planeta (IPCC, 2013a; Lindsey, 2020).

2.5.3 Metano

El metano $\text{-CH}_4\text{-}$ es un gas que se encuentra en pequeñas cantidades en la atmósfera terrestre, se constituye como el hidrocarburo más simple, estando constituido por un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno (University Corporation for Atmospheric Research & National Earth Science Teachers Association, 2006b). Las principales fuentes naturales de metano corresponden a emisiones propias de humedales y océanos, por otra parte, las fuentes antropogénicas están relacionadas con actividades como el cultivo de arroz, la incineración de biomasa, los procesos de fermentación entérica asociados al incremento de la actividad ganadera, la descomposición de residuos orgánicos en los rellenos sanitarios, la minería de carbón y la producción de gas natural y petróleo (Watson et al., 1990).

El IPCC en su Sexto Informe de Evaluación -AR6- (2021) establece que el metano representa el 18% de las emisiones globales de gases de efecto- (IPCC, 2021).

2.5.4 Óxido nitroso

El óxido nitroso es un gas traza química y radiativamente activo, producido en diversos procesos biológicos de los suelos y los cuerpos de agua (Watson et al., 1990). Este gas es el único óxido de nitrógeno $\text{-NO}_x\text{-}$ que actúa como gas de efecto invernadero (Oceana, 2020).

Aunque el óxido nitroso se produce naturalmente, aproximadamente el 40% de las emisiones totales de este gas son producto de actividades humanas (IPCC, 2013a). Las actividades asociadas al manejo del suelo en la agricultura representan la mayor fuente de emisión de este gas a la atmósfera, tales como la aplicación de fertilizantes sintéticos y orgánicos, el manejo de estiércol y la quema de residuos agrícolas. Otras actividades como la ignición de combustibles, la manufactura de fertilizantes, la producción de fibras y el tratamiento de aguas residuales de uso doméstico también se constituyen como fuentes de este gas de efecto invernadero (United States Environmental Protection Agency, 2020b).

De las emisiones globales de gases de efecto invernadero reportadas por el IPCC, el óxido nitroso representa el 4% (IPCC, 2021).

2.5.5 Gases fluorados

Los gases fluorados son emitidos únicamente por la acción del hombre, dichos gases se usan en aplicaciones como refrigeración, climatización, extinción de incendios, aerosoles y producción de

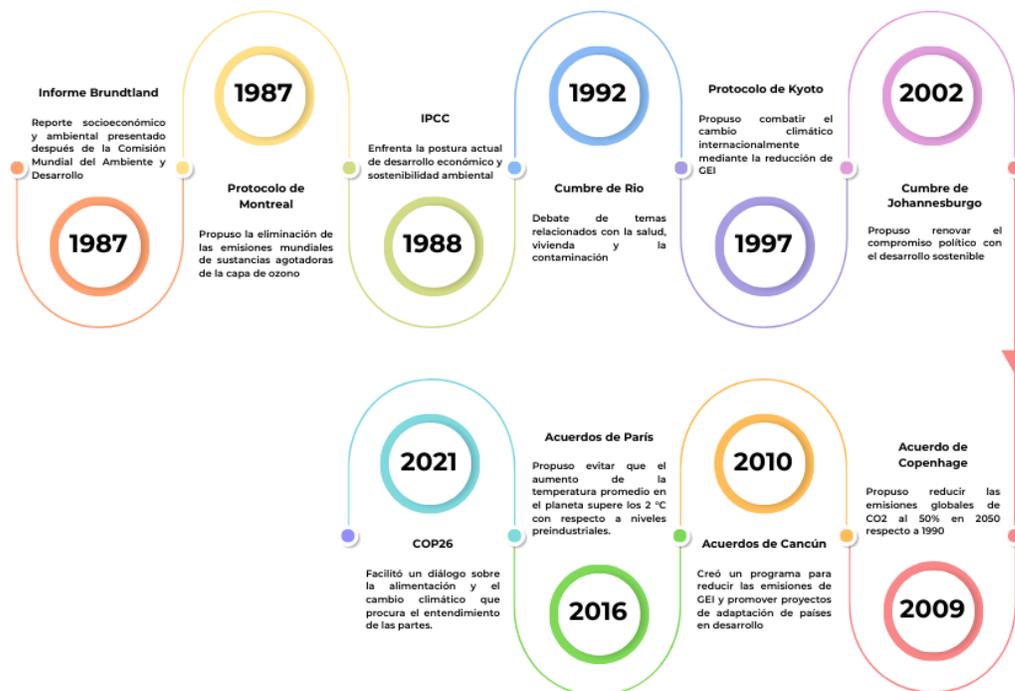
espumas de aislamiento térmico; por su capacidad de actuar como sustitutos de sustancias que agotan el ozono (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico - Gobierno de España, 2020; United States Environmental Protection Agency, 2020b).

Existen cuatro categorías principales de gases fluorados que son, hidrofluorocarbonos -HFC-, perfluorocarbonos -PFC-, hexafluoruro de azufre -SF₆- y trifluoruro de nitrógeno -NF₃-; los cuales representan el 2% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007, 2014).

2.6 Protocolos internacionales relacionados con el cambio climático

A lo largo de los años, se han establecido varios protocolos internacionales con el objetivo de abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La Figura 2-1 presenta la línea de tiempo y la descripción breve de las principales cumbres y protocolos adoptados con respecto al cambio climático.

Figura 2-1. Línea de tiempo de realización de cumbres y creación de protocolos relacionados con el cambio climático.



Fuente: Elaboración propia.

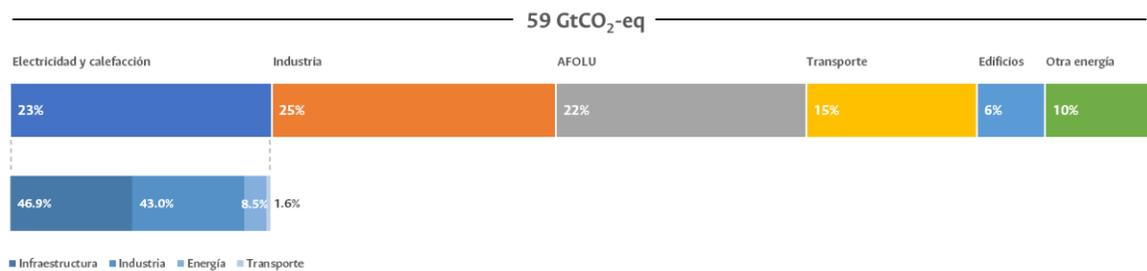
2.7 Emisiones de gases de efecto invernadero

En documentos del Sexto Informe de Evaluación -AR6- (2022) el IPCC afirmó con alta confianza (al menos 80% de probabilidad) que la influencia antropogénica represente la causa predominante del calentamiento observado en el planeta desde mediados del siglo XX (IPCC, 2022).

Como se argumentaba anteriormente, las emisiones globales pueden desglosarse según los gases emitidos, sin embargo, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero pueden estudiarse también según las actividades económicas que llevan a su producción.

En la Figura 2-2 se presentan el total de emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico por sectores económicos (Gt CO₂ eq/año). La gráfica interna muestra la participación directa de emisiones de GEI de cinco sectores económicos en el año 2019. La sección muestra la distribución de emisiones indirectas de CO₂ resultantes de la producción de electricidad y calor a sectores de uso final de la energía.

Figura 2-2. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sectores económicos.



Fuente: IPCC (2021).

A continuación, se exponen las actividades asociadas a cada sector económico considerado (United States Environmental Protection Agency, 2020a):

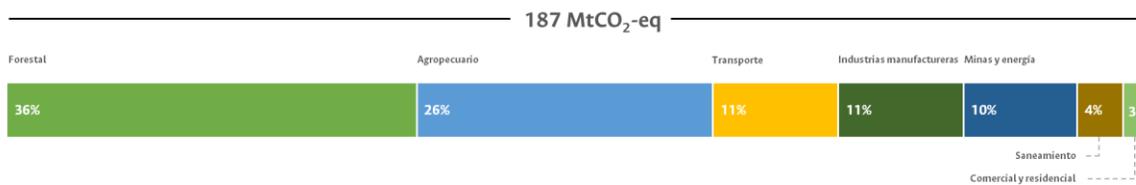
- Electricidad y producción de calor: La quema de carbón, gas natural y petróleo para este fin se constituye como la mayor fuente individual de emisiones globales de gases de efecto invernadero.
- Industria: Las emisiones asociadas a la industria involucran principalmente la quema de combustibles fósiles en el sitio en instalaciones para la producción de energía. Este sector incluye las emisiones de los procesos de transformación metalúrgica, química y mineral no asociados con el consumo de energía y las emisiones provenientes de la gestión de residuos.
- Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU): Las emisiones propias de este sector provienen principalmente de la agricultura (manejo de cultivos y ganadería) y la deforestación.

- Transporte: Involucra principalmente la quema de combustibles fósiles para el transporte por carretera, ferrocarril, aéreo y marítimo.
- Edificios: Las emisiones de este sector son producidas por la generación de energía in situ y la quema de combustibles para calentar edificios o cocinar en hogares.
- Otras clases de energía: Se refiere a todas las emisiones del sector energético que no están directamente asociadas con la producción de electricidad o calor, como la extracción, la refinación, el procesamiento y el transporte de combustible.

Según datos la Comisión Europea, en el año 2019 los principales países emisores de gases de efecto invernadero fueron China [28%], Estados Unidos de América [13%], India [7%], Rusia [4.8%] y Japón [2%]. Por su parte, Colombia en el mismo periodo alcanzó un total de emisiones de 187 MtCO₂ eq, equivalentes al 0.41% de las emisiones de gases de efecto invernadero globales (Comisión Europea, 2019).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia -IDEAM-, en su Tercera Comunicación de Cambio Climático presentó el Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero, del cual se destacan los resultados y participación por sectores económicos en las emisiones nacionales. De este documento se concluye que los sectores forestal y agropecuario, realizan los más grandes aportes a las emisiones totales del país, siendo la conversión de bosques naturales a pastizales y a otras tierras forestales como arbustales y vegetación secundaria, la fuente principal de emisiones en el territorio nacional. La Figura 2-3 expone la distribución de las emisiones según sectores productivos en el año 2012 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP & Cancillería, 2016).

Figura 2-3. Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero por sectores económicos.



Fuente: IDEAM, PNUD, MADS, DNP & Cancillería (2016).

2.8 Indicadores de cambio climático

El calentamiento del sistema climático es innegable, habiendo evidencia de que, a partir de la década de 1950, se han presentado cambios sin precedentes en escalas tanto de décadas como de milenios (IPCC, 2013b).

Según el IPCC, existen diversos indicadores de cambio climático, los cuales incluyen respuestas físicas como variaciones en la temperatura de la superficie, el vapor de agua atmosférico, precipitación, eventos extremos, glaciares, océanos, masas de hielo terrestre y nivel del mar. La estructura del Quinto Informe de Evaluación del IPCC -AR5. presenta los cambios observados en el sistema climático en cuatro grupos: atmósfera, océanos, criósfera y nivel del mar (IPCC, 2013a).

Por su parte, el Sistema Mundial de Observación del Clima -GCOS- estableció los Indicadores Climáticos Globales, los cuales comprenden los aspectos de mayor relevancia del fenómeno como la temperatura (temperatura superficial, calor oceánico), la composición atmosférica (CO₂ atmosférico), el océano y el agua (acidificación del océano, nivel del mar) y la criósfera (glaciares, extensión del hielo marino ártico y antártico) (Global Climate Observation System, 2018).

En este apartado, se resaltarán algunos cambios observados en los sistemas principales que según fuentes oficiales pueden asumirse como indicadores claros de cambio climático.

En sus últimos informes, el IPCC afirma que cada una de las tres últimas décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie del planeta que cualquiera que se haya presentado a partir de la década de 1850 (IPCC, 2013b).

Los datos continentales de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica -National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA-, demuestran que el año 2018 se encuentra entre los años más cálidos registrados para África, Europa, Oceanía y Suramérica (Organización Meteorológica Mundial, 2019b).

Según la Organización Meteorológica Mundial -OMM- el periodo 2015 - 2019 fue probablemente el periodo más cálido registrado, presentándose un aumento de 1.1 ± 0.1 °C en la temperatura media global con respecto a los valores preindustriales (1850 - 1900) y un incremento de 0.20 ± 0.08 °C con respecto al periodo anterior (2011 - 2015). En este mismo periodo (2015 - 2019), la temperatura media global del aire en la superficie terrestre fue aproximadamente 1.7 °C por encima de los niveles preindustriales y 0.3 °C más cálido que el periodo anterior (Organización Meteorológica Mundial, 2019a).

Es probable (66-100% de probabilidad) que la influencia antropogénica haya afectado el ciclo global del agua a partir del año 1960, presumiblemente esta influencia ha contribuido a los aumentos observados en el contenido de humedad atmosférica, a los cambios generalizados en los patrones de precipitación sobre la tierra, a la intensificación de fuertes precipitaciones y a los cambios en la salinidad oceánica superficial y subterránea (IPCC, 2013b).

El Informe Especial sobre la Gestión de los Riesgos de Fenómenos Meteorológicos Extremos y Desastres para mejorar la Adaptación al Cambio Climático presentado por el IPCC en el 2012 afirma que “un clima

cambiante produce cambios en la frecuencia, la intensidad, la extensión espacial, la duración y las circunstancias temporales de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y puede dar lugar a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos sin precedentes”, lo que indica que las variaciones asociadas al cambio climático podrían afectar la ocurrencia e intensidad de los eventos extremos (IPCC, 2012).

La iniciativa británica Carbon Brief que tiene como objetivo cubrir los últimos avances en ciencia climática, política climática y política energética, ha reunido más de 300 estudios asociados a la ocurrencia de eventos extremos en el planeta; dicha evidencia sugiere que las actividades humanas aumentan el riesgo de algunos tiempos climáticos extremos, principalmente aquellos relacionados con el calor. El análisis realizado revela que el 69% de los 355 eventos extremos y tendencias incluidas en el estudio se hicieron más probables o severos por causa del cambio climático de origen antropogénico (Carbon Brief, 2020).

Aunque la precipitación proyectada por el IPCC y los cambios en la temperatura esperados implicarían posibles cambios en las inundaciones, hay poca confianza en las proyecciones de alteración en las inundaciones fluviales debido a que la evidencia es limitada y a la complejidad de los cambios regionales (IPCC, 2012).

Los cambios observados en la criósfera proporcionan indicadores claves sobre el cambio climático, sin embargo, este componente del sistema planetario no ha sido ampliamente muestreado. Los principales indicadores proporcionados por la criósfera incluyen el hielo marino, los glaciares y la capa de hielo de Groenlandia (Organización Meteorológica Mundial, 2019b).

En el año 2019, el IPCC lanzó el informe especial “El océano y la criósfera en un clima cambiante”, en el cual se expone el contexto actual de estos dos componentes planetarios incluyendo los cambios e impactos observados, los cambios y riesgos proyectados, y la instrumentación para la evaluación de respuestas a los cambios de ambos componentes. En este informe se afirma con altos niveles de confianza que, en los últimos decenios se ha reducido la extensión de la criósfera, aumentándose la pérdida de masa de mantos de hielo y glaciares, se ha reducido la extensión y espesor del hielo marino ártico y se ha presentado un aumento en la temperatura del permafrost, todo como producto del calentamiento global (IPCC, 2019).

Tanto el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático -IPCC- como la Organización Meteorológica Mundial -OMM-, resaltan que debido a que la actual extensión de los glaciares está fuera de balance con las condiciones climáticas actuales, estos continuarán disminuyendo en el futuro incluso si la temperatura deja de aumentar (IPCC, 2013a; Organización Meteorológica Mundial, 2019b).

En su informe especial, el IPCC afirma con altos niveles de probabilidad que los océanos han sufrido un aumento constante de temperatura desde la década de los setenta y han absorbido una cantidad superior

al 90% del exceso de calor presente en el sistema climático, duplicándose su nivel de calentamiento desde el año 1993. Adicionalmente, al aumentar la absorción de CO₂ (20 - 30% del total de emisiones antropogénicas desde la década de los ochenta), los océanos han experimentado incrementos en la acidificación de la superficie, presentando una disminución muy probable en el pH de la superficie del mar en el rango de 0.017 a 0.027 unidades de pH por decenio desde finales de la década de 1980 (IPCC, 2019).

En la misma fuente se expone que consecuente a la pérdida de hielo de los mantos de Groenlandia y de la Antártida, la pérdida constante de glaciares y la expansión térmica del océano; el nivel medio del mar a escala mundial se encuentra en aumento. Se estima que el aumento total del nivel medio del mar a escala mundial durante el periodo 1902 - 2015 alcanzó un valor de 0.16 m (IPCC, 2019).

2.8.1 Indicadores de cambio climático en Colombia

La síntesis de resultados realizada por Pabón (2012), establece que la temperatura media del aire aumentó a una tasa de 0.1 a 0.2 °C por década y la temperatura máxima en apropiadamente en 0.6°C, en diferentes regiones del país durante la segunda mitad del siglo XX (Pabón, 2012).

Estudios realizados por el IDEAM demuestran un notable aumento en la precipitación en el país, destacándose la zona noroccidental, el departamento de Vichada, el piedemonte de Putumayo y Providencia. Se presentan de manera contraria disminuciones en los regímenes de precipitación en San Andrés, la vertiente oriental de la Cordillera Oriental y en amplias áreas del Alto Cauca (IDEAM, 2011).

En cuanto a eventos extremos, en la Tercera Comunicación de Cambio Climático presentada por el IDEAM en el año 2017, se resalta la evidencia histórica que revela un aumento considerable en la ocurrencia de sequías y en los eventos de precipitación extrema en los últimos 30 años. Los resultados de las proyecciones realizadas en el marco de esta publicación prevén un incremento de aproximadamente 0.9 °C para el periodo 2011-2040 (IDEAM et al., 2017).

Las evidencias del cambio climático se comprueban de igual manera en la dinámica de los ecosistemas de páramo. Contrario a lo presentado en diferentes pisos térmicos donde se presenta una tendencia de incremento en las precipitaciones de alta intensidad, en las zonas de páramo se evidencia una tendencia de disminución de eventos extremos de lluvia. También se registró que en regiones de páramo alto se presentaron aumentos en la temperatura diurna máxima de aproximadamente 1 °C por década (IDEAM, 2013).

El país ha perdido 84% de los glaciares que existían en el territorio (Semana, 2017), actualmente persisten sólo cuatro nevados (Huila, Ruiz, Santa Isabel y Tolima) y dos sierras nevadas (Cocuy y Santa Marta) (Pabón, 2012). Cifras reveladas por el IDEAM en su Segunda Comunicación de Cambio Climático (2010),

exponen que la tasa promedio de retroceso lineal de los glaciares colombianos se encuentra en el rango de 20 a 25 metros por año, proyectando un colapso glacial total entre los años 2030 y 2040 (IDEAM et al., 2010).

Estudios dirigidos por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe -CIOH-, determinaron que la tasa de incremento del nivel del mar se encuentra entre 4.5 y 5.9 milímetros por año en la Bahía de Cartagena (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, 2015). Por otra parte, en el Pacífico colombiano el aumento del nivel se estimó en aproximadamente 2.2 milímetros por año (IDEAM et al., 2010). En el Portal para el Conocimiento del Cambio Climático perteneciente al Banco Mundial, se presenta la variación del nivel del mar en Colombia con respecto al año 1993, el último dato disponible del año 2015 presentó una anomalía equivalente a 101.99 milímetros (Agencia Espacial Europea et al., 2015).

2.9 Escenarios de cambio climático

2.9.1 Forzamiento radiativo

Los forzamientos radiativos representan los cambios impuestos en el balance radiativo del planeta, produciendo variaciones en el calor saliente o entrante del sistema climático (IDEAM et al., 2015). Alteraciones de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, cambios en la radiación solar y variaciones en las propiedades reflectivas de la superficie, perturban la absorción, dispersión y emisión de radiación dentro de la atmósfera y en la superficie del planeta, produciendo forzamientos radiativos (Benavides & León, 2007).

El IPCC define el forzamiento radiativo como “la medida utilizada para cuantificar el cambio en el equilibrio energético de la Tierra que se produce como resultado de un cambio impuesto externamente. Se expresan en vatios por metro cuadrado ($W m^{-2}$) y representa el cambio neto en el flujo radiativo (onda corta y onda larga) en la tropopausa después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, manteniendo otras variables como temperaturas troposféricas, vapor de agua y cobertura de nubes fijas en los valores no perturbados (Stocker et al., 2013, p. 53).

Actualmente, según afirmaciones del IPCC, el forzamiento radiativo es positivo y ha llevado al sistema climático a absorber energía (IPCC, 2013b). Como se resalta previamente, las emisiones producidas por los sistemas humanos han provocado cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero bien mezclados con respecto a las concentraciones anteriores a la era industrial, según dichos cambios el forzamiento radiativo correspondiente a estos gases para el año 2011 se estimó en $2.83 W m^{-2}$, mientras que para el año 2019 este valor alcanzó $3.14 W m^{-2}$ representando un aumento del 11% (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020b; Stocker et al., 2013).

2.9.2 Trayectorias de concentración representativas

La respuesta del clima del planeta a las futuras condiciones depende de múltiples factores como la cantidad de futuras emisiones de gases de efecto invernadero, el desarrollo tecnológico, los cambios en la generación de energía y uso del suelo, los contextos económicos tanto regionales como globales y el crecimiento poblacional. De manera que los resultados obtenidos a partir de diversos sistemas de modelación cumplan con la condición de ser comparables, se buscó el uso de un conjunto de escenarios estándar con el fin de establecer un grupo homogéneo de condiciones iniciales, datos históricos y posibles futuras emisiones; a los cuales se denominó *Trayectorias de Concentración Representativas RCP*, *Representative Concentration Pathways*- (Department of the Environment - Australian Government, 2013).

Según el IPCC (2021) las narrativas y los escenarios de cambio climático se presentan como herramientas útiles para la comunicación y el análisis de la incertidumbre. Los escenarios son descripciones plausibles de cómo podría desarrollarse el futuro, basadas en un conjunto coherente e internamente consistente de supuestos sobre las principales fuerzas impulsoras y sus relaciones. Por lo tanto, se considera que los escenarios no son predicciones, sino visiones del futuro en condiciones desafiantes (IPCC, 2021).

Moss et al. (2008) define las Trayectorias de Concentración Representativas como escenarios que incluyen series de tiempo de emisiones y concentraciones de la agrupación de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como información relacionada al uso y coberturas del suelo. Cada una de las trayectorias provee sólo uno de muchos posibles escenarios que llevarían a unas características específicas de forzamiento radiativo; se resalta que en dichas trayectorias no sólo los niveles de concentración a largo plazo son de interés, sino también el camino que se tomó a lo largo del tiempo para alcanzar dicho resultado (Moss et al., 2008, 2010; van Vuuren et al., 2011).

En los informes previos al Quinto Informe de Evaluación del IPCC -AR5- (2014), se utilizaron un conjunto de escenarios divulgados en los *Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones -SRES*, *Special Reports on Emission Scenarios-*, en los cuales se partía de las circunstancias socioeconómicas para la generación de escenarios de trayectorias de emisiones e impactos climáticos mediante una metodología secuencial. Seguido a la implementación de las RCP, se fijan las trayectorias de emisiones y el forzamiento radiativo derivado, lo que permite asociar este último no sólo a un único escenario socioeconómico o de emisiones, sino como un resultado de la combinación de diversos futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales, todo esto mediante un proceso en paralelo que permite mayor eficiencia y consistencia (IDEAM et al., 2015; Moss et al., 2010; National Climate Change Adaptation Research Facility, 2017).

Las cuatro RCP (Representative Concentration Pathways) empleadas en la elaboración del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), y utilizadas en este estudio, fueron seleccionadas minuciosamente a partir

de la literatura publicada. Este proceso aseguró que abarcasen el espectro completo de niveles de forzamiento radiativo presentes en dicha literatura (van Vuuren et al., 2011).

Los escenarios se identifican por un pico en el siglo XXI o el valor de estabilización del forzamiento radiativo resultante del modelo de referencia. La RCP más baja -RCP2.6- establece un máximo de 3 W m^{-2} para luego disminuir a 2.6 W m^{-2} aproximadamente para el año 2100; la RCP media-baja -RCP4.5- y media-alta -RCP6- establecen el punto de estabilización en 4.5 y 6 W m^{-2} , respectivamente finalizando el siglo; y la trayectoria más crítica -RCP8.5-, implica un forzamiento radiativo equivalente a 8.5 W m^{-2} para el año 2100, estimando un aumento en dicho forzamiento a partir de esa fecha (IPCC, 2013a; Moss et al., 2010). En la Tabla 2-1 se exponen las principales características de las trayectorias representativas de concentración.

Tabla 2-1. Características de las RCP.

RCP	Forzamiento radiativo	Ruta	Modelo que proporciona RCP	Referencia
RCP2.6	Pico en $\sim 3 \text{ W m}^{-2}$ antes de 2100; disminución posterior	Pico y declive	IMAGE - Integrated Model to Assess the Global Environment-	(van Vuuren et al., 2006, 2007)
RCP4.5	Estabilización en $\sim 4.5 \text{ W m}^{-2}$ a partir de 2100	Estabilización sin excesos	GCAM - Global Change Assessment Model-	(Clarke et al., 2007; Smith & Wigley, 2006; Wise et al., 2009)
RCP6	Estabilización en $\sim 6 \text{ W m}^{-2}$ a partir de 2100	Estabilización sin excesos	AIM - Asia-Pacific Integrated Model-	(Fujino et al., 2016; Hijioka et al., 2008)
RCP8.5	$> 8.5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100	En aumento	MESSAGE -Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact-,	(Rao & Riahi, 2006; Riahi et al., 2007)

Fuente: Moss et al., (2010); van Vuuren et al., (2011).

Las trayectorias representativas de concentración fueron elegidas para representar una amplia variedad de resultados climáticos, sin embargo, no se constituyen como predicciones ni recomendaciones políticas (IDEAM et al., 2015). Se requiere realizar un esfuerzo científico para la definición de la dimensión socioeconómica para el complemento de las RCP, ya que, si bien las RCP son resultados de supuestos socioeconómicos internamente coherentes, como conjunto no presentan lógica interna (van Vuuren et al., 2011; van Vuuren et al., 2012).

2.9.3 Trayectorias socioeconómicas compartidas

En el último informe presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático se introdujeron escenarios que conjugan cambios en el clima y en la sociedad para estudiar sus impactos en el sistema climático (Kriegler et al., 2010, 2012; Moss et al., 2010; O'Neill et al., 2015; van Vuuren et al., 2012). Las *Trayectorias Socioeconómicas Compartidas -SSP, Shared Socioeconomic Pathways-* se constituyen como parte de un nuevo conjunto de escenarios cuya finalidad es facilitar el análisis integrado de futuros impactos climáticos, vulnerabilidad, adaptación y mitigación (Riahi et al., 2017).

El informe actual, ha incluido cinco nuevos escenarios ilustrativos de emisiones con el fin de examinar cómo el clima respondería a una gama más amplia de futuros relacionados con los gases de efecto invernadero, el uso de la tierra y los contaminantes atmosféricos, en comparación con los evaluados en el informe anterior (IPCC, 2021).

Las SSP a diferencia de las RCP, se componen por argumentos narrativos que recogen las dimensiones clave del desarrollo socioeconómico y cuantificaciones de posibles desarrollos de variables socioeconómicas como el crecimiento poblacional, el desarrollo económico e índices de cambio tecnológico, dichas variables determinan los retos para la adaptación y mitigación (Ebi et al., 2014; Kriegler et al., 2012; van Vuuren et al., 2014; van Vuuren & Carter, 2014).

Se desarrollaron cinco SSP a partir del año 2015 con el fin de cubrir los posibles cambios impulsados por la actividad humana con relación al cambio climático mencionados en la literatura científica. A continuación se describen brevemente los escenarios considerados (IPCC, 2021):

- SSP1-1.9: Representa un futuro en el que se logra limitar el calentamiento global a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales a corto plazo [2021-2040], disminuyendo a 1.4 °C a finales de siglo. Requiere una rápida transición hacia una economía baja en carbono, con un fuerte enfoque en la sostenibilidad, la equidad y la conservación del medio ambiente.
- SSP1-2.6: También apunta a limitar el calentamiento global, pero a un nivel más cercano a 2 °C. Requiere una transición significativa hacia fuentes de energía bajas en carbono, así como la implementación de políticas climáticas ambiciosas y tecnologías de mitigación avanzadas.
- SSP2-4.5: Este escenario representa un mundo en el que las emisiones continúan aumentando durante las próximas décadas, pero luego se estabilizan y disminuyen a medida que se implementan políticas más estrictas de mitigación del cambio climático. El calentamiento global se estima en alrededor de 2.7 grados Celsius para fines de siglo.

- SSP3-7.0: Es uno de los escenarios más pesimistas, en el que no se toman medidas significativas para abordar el cambio climático. Las emisiones siguen aumentando rápidamente, lo que lleva a un calentamiento global de alrededor de 3.6 °C para fines de siglo.
- SSP5-8.5: Este escenario representa un futuro en el que las emisiones continúan aumentando rápidamente a lo largo del siglo sin intervenciones significativas. Es considerado un escenario de alto calentamiento global, con un aumento estimado de temperatura de alrededor de 4.4 °C para fines de siglo.

Las emisiones difieren en los diferentes escenarios debido a los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y los controles de la contaminación atmosférica, en particular en relación con los aerosoles y los precursores del ozono diferentes al metano (IPCC, 2021).

Aunque el IPCC (2021) advierte que distintas hipótesis pueden simular niveles de emisión y respuestas climáticas semejantes, se aclara que en este informe no evalúa los supuestos socioeconómicos, ni las probabilidades de ocurrencia de cada escenario planteado.

2.10 Modelos Climáticos Globales

Los Modelos Climáticos Globales, también denominados Modelos de Circulación General -MCG- “son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y por tanto de la circulación general alrededor del planeta” (IDEAM et al., 2015, p. 19). Dichos modelos representan procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre; y simulan la respuesta del sistema climático global al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013c).

La representación del clima en los MCG se realiza mediante la aplicación de una cuadrícula tridimensional sobre el globo (IPCC, 2013c). La resolución horizontal usual de los *Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano* -AOGCM- utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014) se encontró entre 1 y 2° aproximadamente para el componente atmosférico y cerca de 1° para el componente oceánico, en cuanto a las capas verticales los valores variaron entre 30 y 40 en el primer componente; y alrededor de 30 a 60 en el segundo (Flato et al., 2013). De manera que los resultados obtenidos mediante estos modelos puedan utilizarse en estudios de impacto a nivel regional, se requiere efectuar procesos de disminución de escala.

Las limitaciones de la aplicación de Modelos Climáticos Globales son diversas. En primer lugar, se destaca la resolución espacial mencionada anteriormente, la cual no es apta para la representación de atributos de clima a escala de evaluación y planificación de recursos hídricos. Adicionalmente, los componentes del sistema climático describen ecuaciones no lineales, por lo tanto, se deduce que, aunque la dependencia de los procesos naturales en el tiempo permite un supuesto de previsibilidad, las interacciones complejas

entre los componentes de los modelos; incluso con pequeñas cantidades de incertidumbre, generan imprevisibilidad de los procesos después de algún horizonte temporal (Koutsoyiannis, 2010). En consecuencia, se aborda el rango de futuros posibles esperados del clima, en términos de propiedades a largo plazo, sin profundizar en la exactitud de las predicciones.

De modo que fuera posible evaluar la capacidad de un modelo para reproducir el clima observado, se desarrollaron los Proyectos de Intercomparación de Modelos -MIP-, los cuales mediante pruebas estándar permiten comparar su desempeño no sólo con valores observados sino también con otros modelos (Flato et al., 2013). La quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del Programa Mundial de Investigación del Clima -World Climate Research Programme, WCRP-, CMIP5, se desarrolló para proporcionar un contexto de múltiples modelos con los siguientes objetivos (Taylor et al., 2012):

- Valorar los mecanismos generadores de diferencias en respuestas poco entendidas de los modelos, asociadas con el ciclo del carbono y las nubes.
- Evaluar la capacidad de los modelos para predecir el clima en escala decadal, y de manera general.
- Identificar las razones por las cuales los modelos forzados similarmente producen diferentes respuestas.

Los cuatro escenarios ejecutables en el CMIP5 abarcan simulaciones decadales retrospectivas, simulaciones predictivas (décadas a siglos) y simulaciones enfocadas en la atmósfera para modelos exigentes en la fase de procesamiento; dichos escenarios se constituyen como una base para la exploración de los impactos del cambio climático (Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison, 2008; Taylor et al., 2012).

El CMIP5 proporciona el marco de referencia para la realización de experimentos sobre cambio climático durante los años posteriores a su publicación, incluyendo simulaciones para su evaluación en el AR5. (Flato et al., 2013; Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison, 2008).

En la Tabla 2-2 se listan los Modelos Climáticos Globales -MCG- incluidos en el CMIP5. Se incluye la resolución de la grilla (latitud y longitud), en grados.

Tabla 2-2. Modelos Climáticos Globales incluidos en el CMIP5.

Modelo	Institución	País	Resolución
ACCESS 1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Bureau of Meteorology (BOM)	Australia	1.25 x 1.88
ACCESS 1.3			1.25 x 1.88
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China	2.79 x 2.81
BCC-CSM1.1 (m)			2.81 x 2.81
BNU-ESM	Beijing Normal University	China	2.81 x 2.81

Modelo	Institución	País	Resolución
CanCM4	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	Canadá	2.79 x 2.81
CanESM2			2.79 x 2.81
CCSM4	US National Centre for Atmospheric Research	Estados Unidos	1.25 x 0.94
CESM1 (BGC)	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos	1.25 x 0.94
CESM1 (CAM5)			1.25 x 0.94
CESM1 (WACCM)			2.50 x 1.88
CESM1 (FASTCHEM)			1.25 x 0.94
CESM1 (CAM5.1.FV2)			2.00 x 1.90
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italia	0.75 x 0.75
CMCC-CM			0.75 x 0.75
CMCC-CMS			1.88 x 1.80
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	Francia	1.40 x 1.40
CSIRO-Mk 3.6.0	Queensland Climate Change Centre of Excellence, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia	1.88 x 1.87
EC-EARTH	Europe	Europa	1.12 x 1.12
FGOALS-g2	LASG (Institute of Atmospheric Physics)-CESS (Tsinghua University)	China	2.79 x 2.81
FGOALS-s2	The State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, The Institute of Atmospheric Physics	China	1.66 x 2.81
FIO-ESM v1.0	The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration	China	2.88 x 2.88
GFDL-CM2.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA	Estados Unidos	2.50 x 2.00
GFDL-CM3			2.50 x 2.00
GFDL-ESM2M			2.50 x 2.00
GFDL-HIRAM-C180			0.45 x 0.45
GFDL-HIRAM-C360			0.25 x 0.25
GFDL-ESM2G			2.50 x 2.00
GISS-E2-H	Goddard Institute for Space Studies, NASA	Estados Unidos	2.00 x 2.50
GISS-E2-H-CC			2.00 x 2.50

Modelo	Institución	País	Resolución
GISS-E2-R			2.00 x 2.50
GISS-E2-R-CC			2.00 x 2.50
HadCM3			2.50 x 3.75
HadGEM2-CC	UK Met Office Hadley Centre	Reino Unido	1.25 x 1.88
Had-GEM2-ES			1.25 x 1.88
HadGEM2-AO			1.25 x 1.88
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration	Corea	1.25 x 1.88
INM-CM4	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia	1.50 x 2.00
IPSL-CM5A-LR			3.75 x 1.89
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace	Francia	2.50 x 1.25
IPSL-CM5B-LR			3.75 x 1.89
MIROC4h			0.56 x 0.56
MIROC5	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japón	1.40 x 1.40
MIROC-ESM			2.81 x 2.79
MIROC-ESM-CHEM			2.81 x 2.81
MPI-ESM-LR			1.87 x 1.88
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology	Alemania	1.87 x 1.88
MPI-ESM-P			1.87 x 1.88
MRI-AGCM3.2H			0.56 x 0.56
MRI-AGCM3.2S	Meteorological Research Institute	Japón	0.19 x 0.19
MRI-CGCM3			1.12 x 1.13
MRI-ESM1			1.12 x 1.13
NCEP-CFSv2			National Centers for Environmental Prediction
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	Noruega	1.90 x 2.50
NorESM1-ME			1.90 x 2.50

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IPCC (2013a) y European Network for Earth System Modelling (2019).

2.11 Técnicas de reducción de escala

El nivel de detalle espacial alcanzado por los Modelos Climáticos Globales -MCG- actuales proporciona condiciones limitantes para la estimación de los impactos del cambio climático global sobre sistemas hidrológicos locales. Para abordar la necesidad de emplear proyecciones a escala reducida, se han

desarrollado técnicas de *Downscaling*. Según el tipo de modelo en que se basen dichas técnicas se pueden clasificar en *downscaling dinámico*, si su desarrollo parte de modelos matemáticos de base física, o *downscaling estadístico*, en el caso de que se desarrollen a partir de modelos estadísticos (Moncada et al., 2020).

A su vez, los métodos estadísticos comprenden métodos paramétricos y no paramétricos. Los métodos paramétricos pertenecen a la rama de la estadística inferencial que asume distribuciones conocidas para describir fenómenos, dichas distribuciones son determinadas usando un número finito de parámetros. Por el contrario, los métodos no paramétricos, siguen reglas probabilísticas conservando ciertos atributos presentes en las series históricas (Moncada et al., 2020) y permiten modificarse según los cambios previstos por la señal de cambio climático proveniente de los MCG. En la Tabla 2-3 se presentan algunas técnicas estadísticas propuestas para la reducción de escala.

Tabla 2-3. Algunas técnicas estadísticas de reducción de escala.

Método	Referencia	Descripción
Δ Delta		Incrementos constantes Temperatura: aditivos: e.g. +1°C Precipitación: multiplicativos: e.g. 1.05% Pr histórico
BCCA (Bias Corrected Constructed Analogs)	Maurer et al., (2010)	Preprocesamiento (PP): Eliminación de tendencias y mapeo de cuantiles Downscaling (DS): Análogos construidos Posprocesamiento (PosP): Ninguno
BCSD (Bias Corrected Statistical Disaggregation)	Wood et al., (2002, 2004)	Preprocesamiento (PP): Eliminación de tendencias y mapeo de cuantiles para el llenado de vacíos Downscaling (DS): Interpolación Posprocesamiento (PosP): Ninguno
ARRM	Stoner et al., (2013)	Preprocesamiento (PP): Ninguno Downscaling (DS): Interpolación Posprocesamiento (PosP): BC (Regresión asincrónica de cuantiles)
MACA (Multivariate Adaptive Constructed Analogs)	Abatzoglou & Brown (2012)	Preprocesamiento (PP): Eliminación de tendencias y mapeo de cuantiles para el llenado de vacíos Downscaling (DS): Análogos construidos Posprocesamiento (PosP): BC y reemplazo de tendencia
k-NN Bootstrapping (k Nearest Neighbors)	Gangopadhyay et al., (2015) Yates et al., (2003)	
JVSD (Joint Variable Statistical Downscaling)	Zhang & Georgakakos (2012)	
BCSA	Hwang & Graham (2013)	
HMM/NHMM (Homegeneous and Non-Homegeous)	Robertson et al., (2004)	

Método	Referencia	Descripción
Hidden Markov Method)		

Fuente: *Earth System CoG* (2016).

En cuanto a la aplicación de los métodos de reducción de escala, los paramétricos resultan de gran utilidad ya que mantienen atributos climáticos en diferentes escalas temporales, conservan la correlación espacial de las observaciones y permiten la creación de conjuntos de series según contextos de planificación definidos como eventos de sequía e inundación.

2.12 Modelos hidrológicos agregados

Los factores climáticos y los cambios en el uso del suelo afectan el equilibrio hídrico en una cuenca, influyendo en la infiltración y la percolación del agua. Estos procesos determinan los caudales máximos, la capacidad de retención de humedad del suelo y la regulación del flujo de agua. Los modelos hidrológicos se centran en capturar los mecanismos físicos que generan la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos subterráneos a través de la precipitación y la evapotranspiración (Ocampo López & Vélez Upegui, 2014).

Se han desarrollado diferentes tipos de modelos hidrológicos que pueden clasificarse de acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos, la naturaleza de los algoritmos básicos o la representación espacial. En esta investigación se utilizaron modelos conceptuales agregados, caracterizados por la incorporación de leyes físicas en forma simplificada y la presunción de que la cuenca es homogénea, en sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, así, la cuenca se representa como un único elemento con características constantes. Para brindar heterogeneidad a los procesos propios de la cuenca, se sugiere la implementación de técnicas multimodelo como se aborda en el capítulo 4.4.

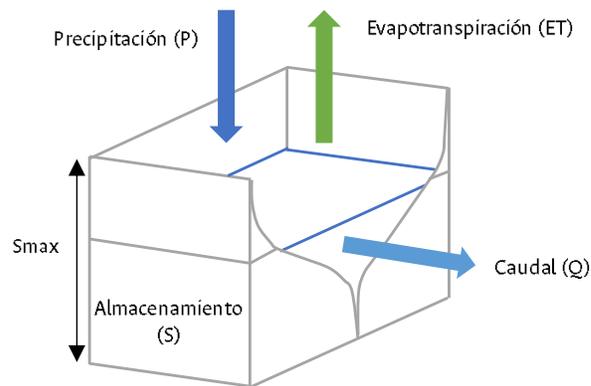
En este estudio, se emplean seis modelos hidrológicos agregados de tipo conceptual, los cuales se basan en datos de precipitación (P) y evapotranspiración (ETP) para calcular el flujo de descarga de la cuenca mediante la resolución de un balance hidrológico. Estos modelos suelen presentar una estructura compuesta por zonas de almacenamiento de agua, también denominadas tanques, que están organizadas jerárquicamente y permiten la transferencia de flujos entre ellas. Dichas zonas de almacenamiento están influenciadas por una variedad de procesos hidrológicos, tales como la interceptación, la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía, entre otros. La cantidad de tanques de almacenamiento, su orden de jerarquía para la transferencia de flujos y los procesos hidrológicos asociados varían según cada modelo utilizado (Vélez Upegui et al., 2022).

En esta sección se presentan en síntesis los modelos hidrológicos agregados de escala diaria usados en el estudio.

2.12.1 Modelo TPHM

El Modelo Hiperbólico de Dos Parámetros (TPHM) consta de un solo tanque para la representación de la precipitación-escorrentía diaria. Expresa matemáticamente la relación entre el almacenamiento de la cuenca y la escorrentía a partir de la combinación de una tangente hiperbólica y una función de potencia. El modelo considera una abertura en forma de cuña desde la parte superior de un tanque hasta el fondo para representar una relación almacenamiento-descarga no lineal utilizando un solo tanque de almacenamiento.

Figura 2-4. Esquema del modelo agregado TPHM.



Fuente: Adaptado de Song et al. (2019).

Se parte de la calibración de dos parámetros y un almacenamiento inicial (Song et al., 2019):

- α : Coeficiente de prontitud de la respuesta de la cuenca a la lluvia.
- S_{max} : Capacidad de almacenamiento de la cuenca.

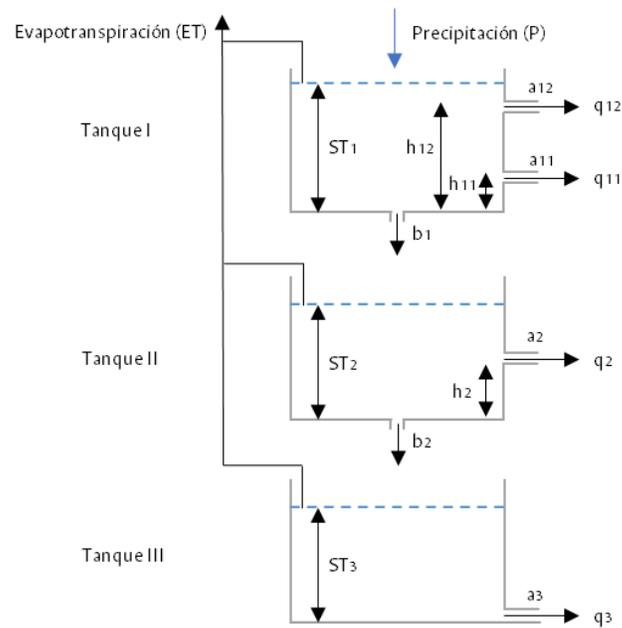
2.12.2 Modelo de tres tanques

Consta de tres tanques con salidas localizadas en la parte inferior y lateral de cada uno. El agua fluye por las salidas laterales de los tanques representado la escorrentía superficial, la escorrentía intermedia y el flujo base, respectivamente (Kim & Park, 1988; Song et al., 2016). El modelo considera tres condiciones de almacenamiento iniciales y nueve parámetros de calibración Song et al. (2019).

- a_{11} : Coeficiente de salida lateral para la primera salida lateral en el primer tanque.
- a_{12} : Coeficiente de salida lateral para la segunda salida lateral en el primer tanque.
- h_{11} : Altura de la salida lateral para la primera salida lateral en el primer tanque.
- h_{12} : Altura de la salida lateral para la segunda salida lateral en el primer tanque.
- b_1 : Coeficiente de salida por el fondo del primer tanque.
- a_2 : Coeficiente de salida lateral en el segundo tanque.

- h_2 : Altura de la salida lateral en el segundo tanque.
- b_2 : Coeficiente de salida por el fondo del segundo tanque.
- a_3 : Coeficiente de salida lateral en el tercer tanque.

Figura 2-5. Esquema del modelo agregado de tres tanques.

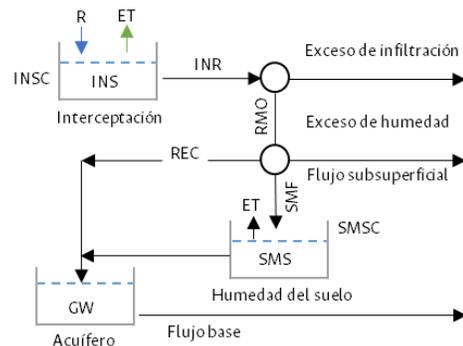


Fuente: Adaptado de Song et al. (2019).

2.12.3 Modelo SIMHYD

El modelo agregado SIMHYD consta de tres tanques de almacenamiento, que son, interceptación, humedad del suelo y agua subterránea, y los flujos entre estos. A su vez, considera siete parámetros de calibración (Chiew et al., 2002).

Figura 2-6. Esquema del modelo agregado SIMHYD.

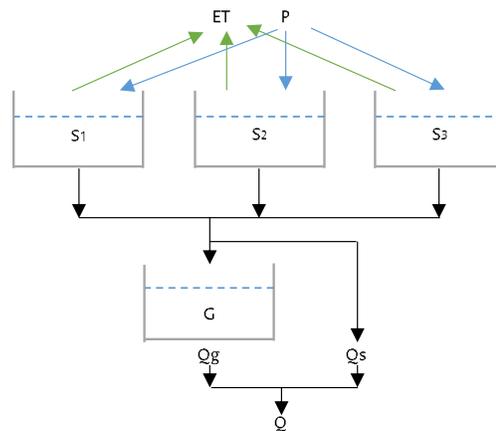


Fuente: Adaptado de Cabezas (2015).

2.12.4 Modelo AWBM

Cuenta con tres depósitos superficiales de almacenamiento de agua. El balance hídrico de cada uno de ellos se estima de forma independiente, lo que da lugar a tres excedentes. Una parte de estos excedentes se transforma en caudal, y la otra parte se filtra a un depósito de almacenamiento de aguas subterráneas o acuífero, que a su vez pasa a ser flujo subterráneo. El caudal total se obtiene sumando las dos escorrentías (Boughton, 2004; Pérez-Sánchez et al., 2019).

Figura 2-7. Esquema del modelo agregado AWBM.



Fuente: Adaptado de Pérez-Sánchez et al (2019).

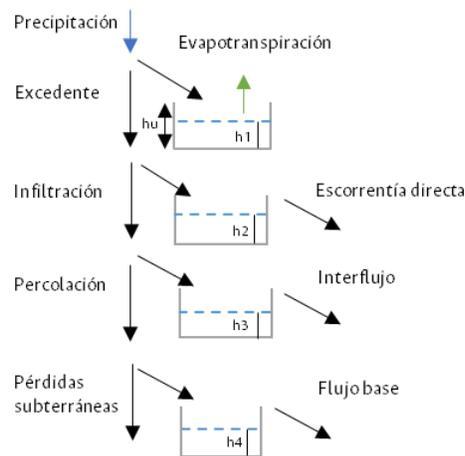
2.12.5 Modelo SHIA

Este modelo considera una configuración con cuatro tanques de almacenamiento, los cuales corresponden a las condiciones iniciales del modelo (J. I. Vélez Upegui, 2001):

- Almacenamiento estático (H1): Cuya salida es la producida por la evapotranspiración real.
- Almacenamiento superficial (H2): El agua que no es infiltrada está disponible para ser escurrida superficialmente.
- Almacenamiento gravitacional (H3): Dentro del cual se percola agua al subsuelo o queda disponible para conformar el interflujo.
- Almacenamiento subterráneo o acuífero (H4): El agua que ingresa proveniente del tanque superior puede convertirse en una pérdida del sistema o fluir horizontalmente como flujo base.

Los parámetros agregados del modelo SHIA son: agua útil o almacenamiento capilar (H_u), conductividad hidráulica saturada del suelo (k_s), conductividad hidráulica saturada del subsuelo (k_p), pérdidas subterráneas al subsuelo (k_{pp}), tiempo de residencia del flujo superficial ($Tr1$), tiempo de residencia del flujo subsuperficial ($Tr2$), tiempo de residencia del flujo subterráneo ($Tr3$), factor corrector de la lluvia y factor corrector de la evapotranspiración.

Figura 2-8. Esquema del modelo agregado SHIA.

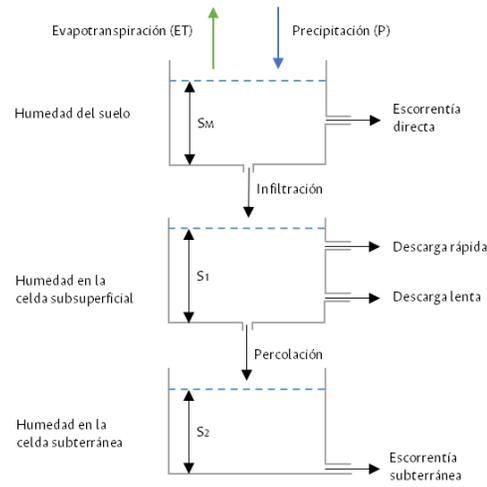


Fuente: Adaptado de Vélez Upegui (2001).

2.12.6 Modelo HBV

Consta de cuatro módulos principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y un módulo de estimación de escoorrentía (Bergström, 1976).

Figura 2-9. Esquema del modelo agregado HVB.



Fuente: Adaptado de Instituto Geológico y Minero de España (2015).

2.13 Modelación hidráulica

La modelación matemática del flujo de agua en un río implica predecir los valores de las variables hidráulicas como nivel, velocidad y caudal, mediante la resolución numérica de ecuaciones derivadas de ciertas suposiciones. Para estudiar los efectos de la propagación de inundaciones en los ríos, se pueden emplear modelos de hasta tres dimensiones, los cuales permiten analizar y comprender el comportamiento del flujo de agua en diferentes escenarios y condiciones (Bladé et al., 2014).

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y fricción superficial por viento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

en donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y ν_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

donde, $V_{X,10}, V_{Y,10}$ son las 2 componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura y C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} |V_{10}| < 5,6 \text{ m/s} &\rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} \\ |V_{10}| \geq 5,6 \text{ m/s} &\rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{|V_{10}|} \right)^2 \end{aligned}$$

Todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente.

3. Área de estudio

Por su importancia en la planificación territorial del municipio de Manizales y la disponibilidad de información, se seleccionó como caso de estudio para analizar la variación de la amenaza de inundación por efecto del cambio climático la cuenca de la quebrada Olivares.

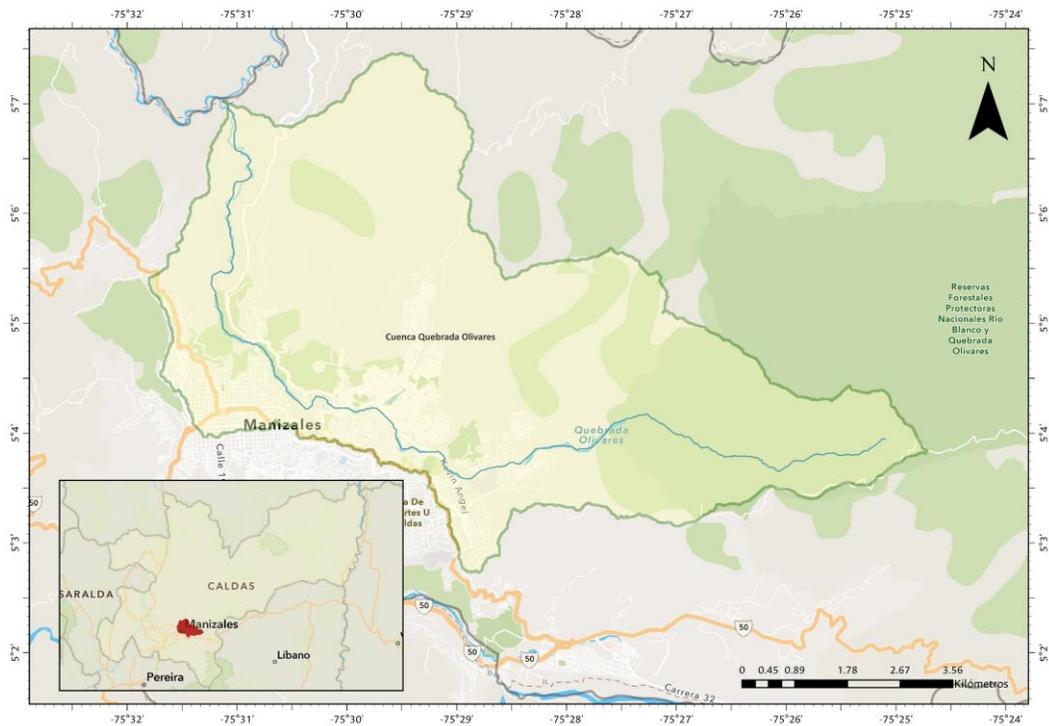
El nacimiento de la quebrada se encuentra ubicado en el Alto de la Coca, corregimiento río Blanco, municipio de Manizales (Caldas) y pertenece a la zona alta de la cuenca del río Chinchiná. Además de la importancia en el ordenamiento territorial del área urbana del municipio, desde la perspectiva ambiental la Reserva Forestal Protectora de las Cuencas Hidrográficas de Río Blanco y quebrada Olivares adquieren un rol preponderante en el suministro de agua a la ciudad, el cual se aproxima al 35% de la demanda (Corpocaldas, 2010a).

La quebrada Olivares realiza su recorrido por la zona norte de Manizales en dirección Este - Oeste, luego de cruzar la ciudad se encañona y cambia su dirección Sur - Norte hasta su confluencia con el río Guacaica, tributario del río Chinchiná (Corpocaldas, 2013). La cuenca se emplaza entre las longitudes -75.4119 y -75.53, y las latitudes 5.0456 y 5.1244 en el sistema de coordenadas WGS 1984. La Figura 3-1 presenta la localización de la cuenca de la quebrada Olivares.

La quebrada Olivares se caracteriza por su inicio de cabecera empinada hasta la bocatoma río Blanco del acueducto de Manizales; a partir de la cual presenta pequeñas llanuras de inundación embolsilladas denominadas “flood plain pockets” que se alternan con cortos estrechamientos o “gargantas” pasando por el sector de La Aurora hasta la zona del Popal. A partir de la confluencia con la quebrada el Popal, el cauce se encajona para luego abrirse en un valle amplio donde se ubican la escuela de carabineros Alejandro Gutiérrez y el barrio La Toscana. Aguas abajo, en orillas y espacios del cauce se encuentran talleres mecánicos, el matadero municipal, las oficinas de Aguas de Manizales, infraestructura vial y de alcantarillado de la ciudad por lo que la quebrada se encuentra canalizada en tierra y en algunos tramos con muros de contención. Tras el estrechamiento en el barrio Villa del Río, la quebrada Olivares-Minitas presenta su última llanura de inundación, ocupada por instalaciones deportivas, edificios municipales, viviendas y talleres mecánicos del barrio La Asunción. Tras lo cual el cauce se encajona de nuevo a su paso por el barrio Los Cedros y hasta la glorieta de salida al municipio de Neira, donde debido a la topografía, la quebrada discurre por una muy pronunciada garganta hasta su desembocadura en el río Guacaica (Parra

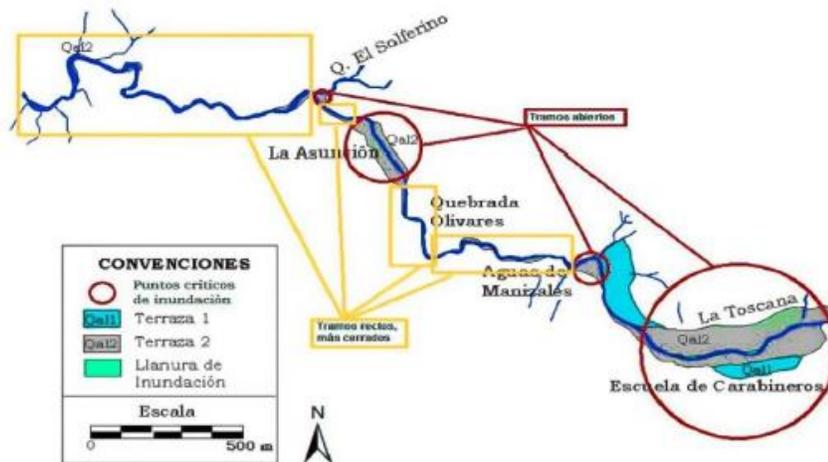
Gómez, 2023). Los puntos críticos de inundación en la ciudad de Manizales identificadas por Ramírez Cardona (2015) se presentan en la Figura 3-2.

Figura 3-1. Ubicación de la cuenca urbana Olivares.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Puntos críticos de inundación en la cuenca media de la quebrada Olivares.



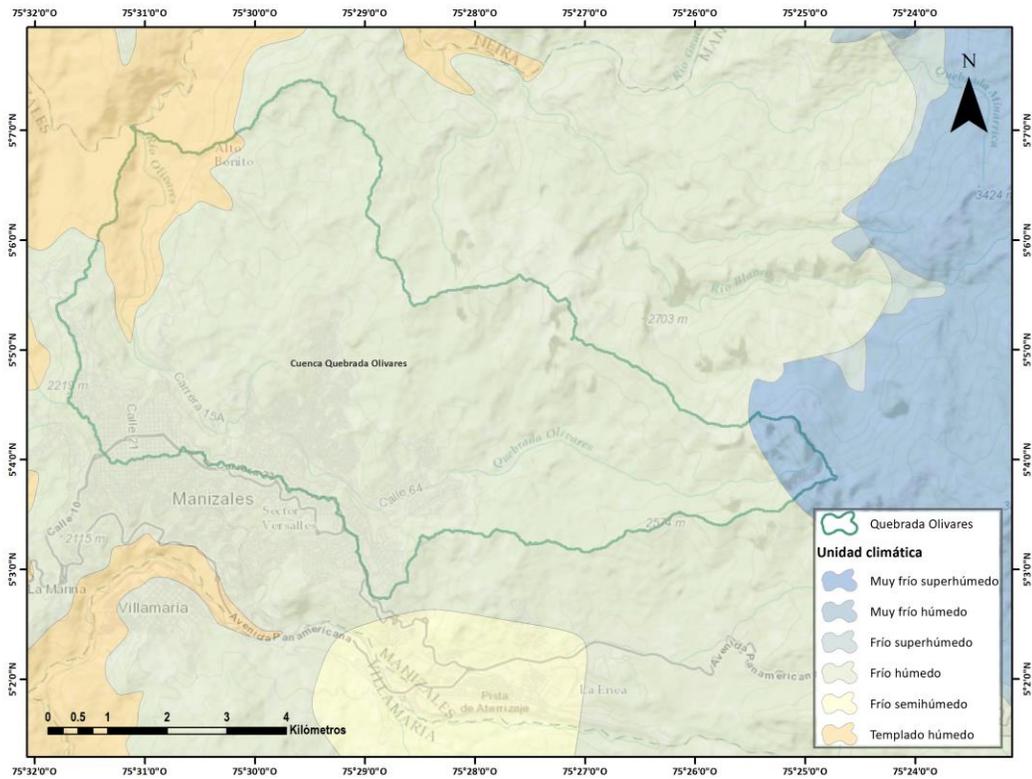
Fuente: Ramírez Cardona (2015).

Adicional al desarrollo urbanístico en las márgenes de la quebrada Olivares, que influye en la variación de los componentes en la gestión del riesgo y acentúa la contaminación asociada al vertimiento de secciones de la red de alcantarillado de la ciudad de Manizales, en la confluencia del afluente con la zona urbana se presenta explotación informal de material de arrastre, lo cual puede impactar de forma adicional el ciclo hidrológico del cauce.

3.1.1 Clima

La cuenca de la quebrada Olivares se emplaza dentro de la Zona de Interconfluencia Tropical, la cual debido a la presencia de flujos convergentes se caracteriza por máximos de humedad y precipitación (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 2016). Según la clasificación climática propuesta por Caldas – Lang, en la cuenca de la quebrada Olivares se presentan las unidades climáticas expuestas en la Figura 3-3. En esta se observa que la zona climática predominante corresponde a clima frío húmedo, con presencia de clima muy frío superhúmedo en su nacimiento y templado húmedo en su desembocadura (Corpocaldas, 2010b).

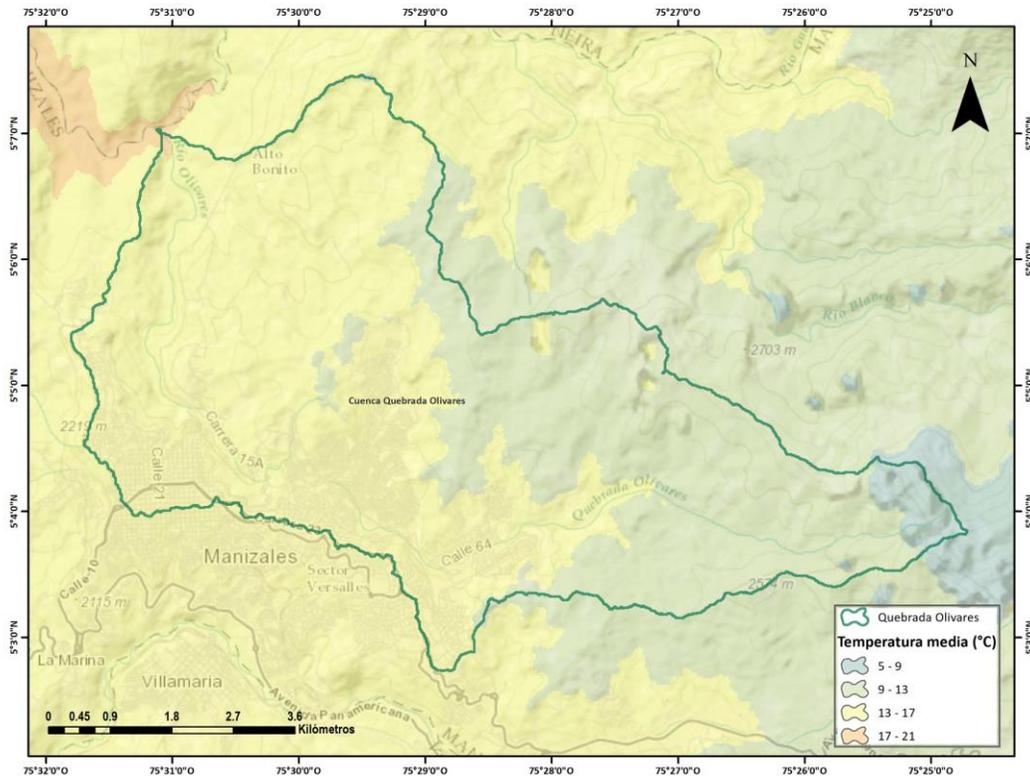
Figura 3-3. Unidades climáticas según clasificación Caldas – Lang presentes en la cuenca quebrada Olivares.



Fuente: Elaboración propia.

La cuenca se encuentra en una zona montañosa con considerables diferencias de nivel, su nacimiento se encuentra sobre los 3336 msnm y su parte baja sobre los 1415 msnm, resultando en un gradiente altitudinal de 1921 m. Debido a dicho gradiente se presentan dentro de la cuenca variables rangos de temperatura, los cuales se exponen en la Figura 3-4.

Figura 3-4. Distribución de la temperatura en la cuenca quebrada Olivares.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Parámetros morfométricos y fisiográficos

A partir de los resultados del procesamiento del Modelo de Elevación Digital dispuesto por la NASA en su portal EARTHDATA con resolución de 12.5 metros (NASA, 2023), se procedió a realizar una caracterización morfométrica y fisiográfica de la zona de estudio. La obtención de los parámetros específicos de la cuenca se realizó de forma automática con la herramienta ArcGIS. Los cálculos de índices fueron posibles a partir del procesamiento del modelo de elevación digital y el posterior tratamiento de los resultados obtenidos en hojas de cálculo. La Tabla 3-1 resume los parámetros morfométricos calculados para la cuenca.

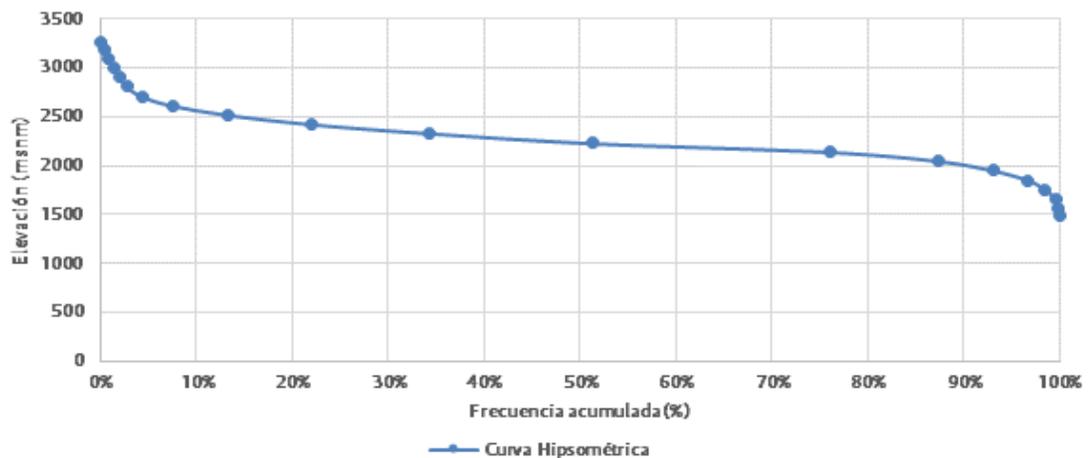
Tabla 3-1. Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Olivares.

Parámetro	Unidades	Resultado	Descripción
Área	km ²	51.58	Pequeña
Perímetro	km	53.13	
Coordenada X (Centroide)	Grados decimales	-75.48	
Coordenada Y (Centroide)	Grados decimales	5.08	
Longitud de la cuenca	km	13.22	
Ancho máximo	km	7.18	
Longitud del cauce principal	km	18.78	
Ancho de la cuenca	km	3.90	
Factor de forma		0.30	Alargada
Coefficiente de compacidad		2.07	Forma oval - alargada a alargada
Índice de alargamiento		1.84	Moderadamente alargada
Índice de asimetría		2.52	Cauce principal recargado a una de las vertientes
Pendiente media del cauce	%	1.02	
Pendiente media de la cuenca	%	36.97	Muy fuertemente accidentado
Elevación media	msnm	2223.40	
Tiempo de concentración (Kirpich)	min	9.57	
Tiempo de concentración (Guaire)	min	56.02	
Tiempo de concentración (Témez)	min	166.59	
Tiempo de concentración (Giandotti)	min	5.13	

Fuente: Elaboración propia.

Según la forma de la curva hipsométrica mostrada en la Figura 3-5, se concluye que la quebrada Olivares hasta la confluencia con el río Guacaica se clasifica como un río maduro, caracterizado por la producción y transporte de sedimentos.

Figura 3-5. Curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada Olivares.



Fuente: Elaboración propia.

La explotación de dichos sedimentos a lo largo del cauce se relaciona frecuentemente con fenómenos de desestabilización del cauce, afectando inclusive la calidad de los datos recabados por estaciones de medición de caudal en abscisas posteriores a la explotación minera. Como se mencionaba anteriormente,

en la zona El Popal se presentan problemáticas de minería informal de material de arrastre, que pueden afectar el régimen posterior de la quebrada.

3.1.3 Usos y cobertura del suelo

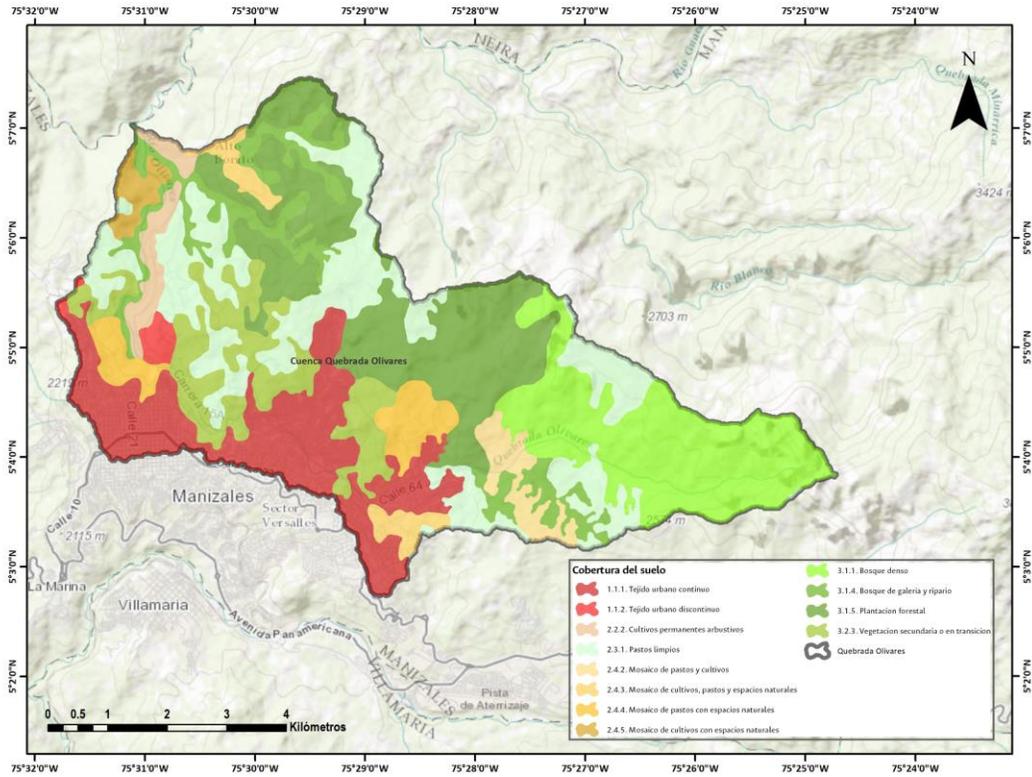
Para determinar las coberturas presentes en la zona de estudio se utilizó el mapa nacional de coberturas de la tierra elaborado por IDEAM (2014a). En su última actualización, la entidad custodia aplicó la metodología Corine Land Cover adaptada a Colombia, certificando el cumplimiento de los estándares establecidos en esta (IDEAM, 2015b). Las coberturas del suelo en el área de estudio se presentan en la Figura 3-6.

En el territorio predominan las plantaciones forestales (10 km²) ubicadas en la vertiente derecha del cauce, así mismo los pastos limpios ocupan zonas dispersas a lo largo de la cuenca (9.6 km²). En la parte alta de la cuenca se destaca la presencia de bosques densos (8.5 km²) pertenecientes a la RFPC de río Blanco y quebrada Olivares, limítrofe con zonas de pastoreo y cultivo. A lo largo de la vertiente izquierda del cauce se acentúa el desarrollo urbano de la zona norte de la ciudad de Manizales (8.5 km²).

En la Figura 3-7 se exponen los porcentajes ocupados por cada una de las coberturas en la cuenca, estos datos permiten concluir que las coberturas agrícolas representan la menor proporción del área, mientras que la explotación forestal de especies como pino y eucalipto predomina en la zona, seguida de zonas de pastos limpios y bosque denso.

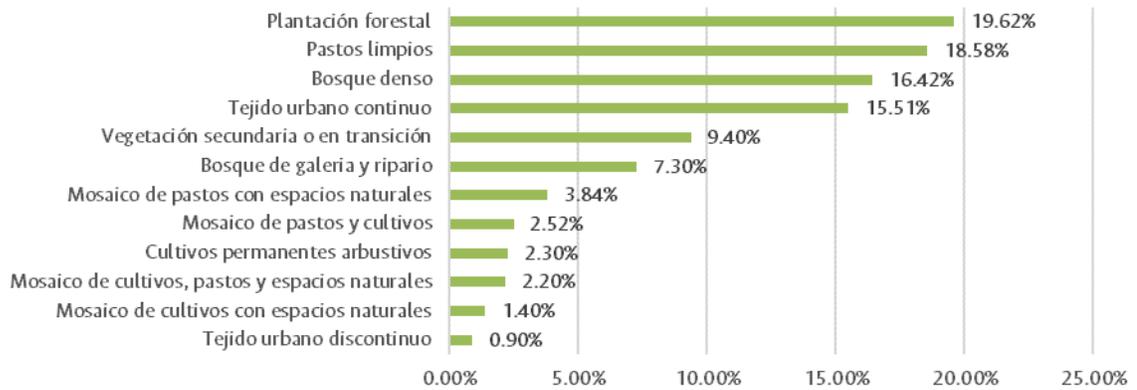
Debido a que la expansión de la mancha urbana en la ciudad de Manizales se proyecta en otras zonas de la cuenca del río Chinchiná, en esta investigación no se consideraron cambios de cobertura en el tiempo, sin embargo, se resalta la importancia de la inclusión de estos supuestos en investigaciones posteriores.

Figura 3-6. Cobertura del suelo en la cuenca de la quebrada Olivares.



Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2014a).

Figura 3-7. Distribución de las coberturas del suelo en la cuenca de la quebrada Olivares.

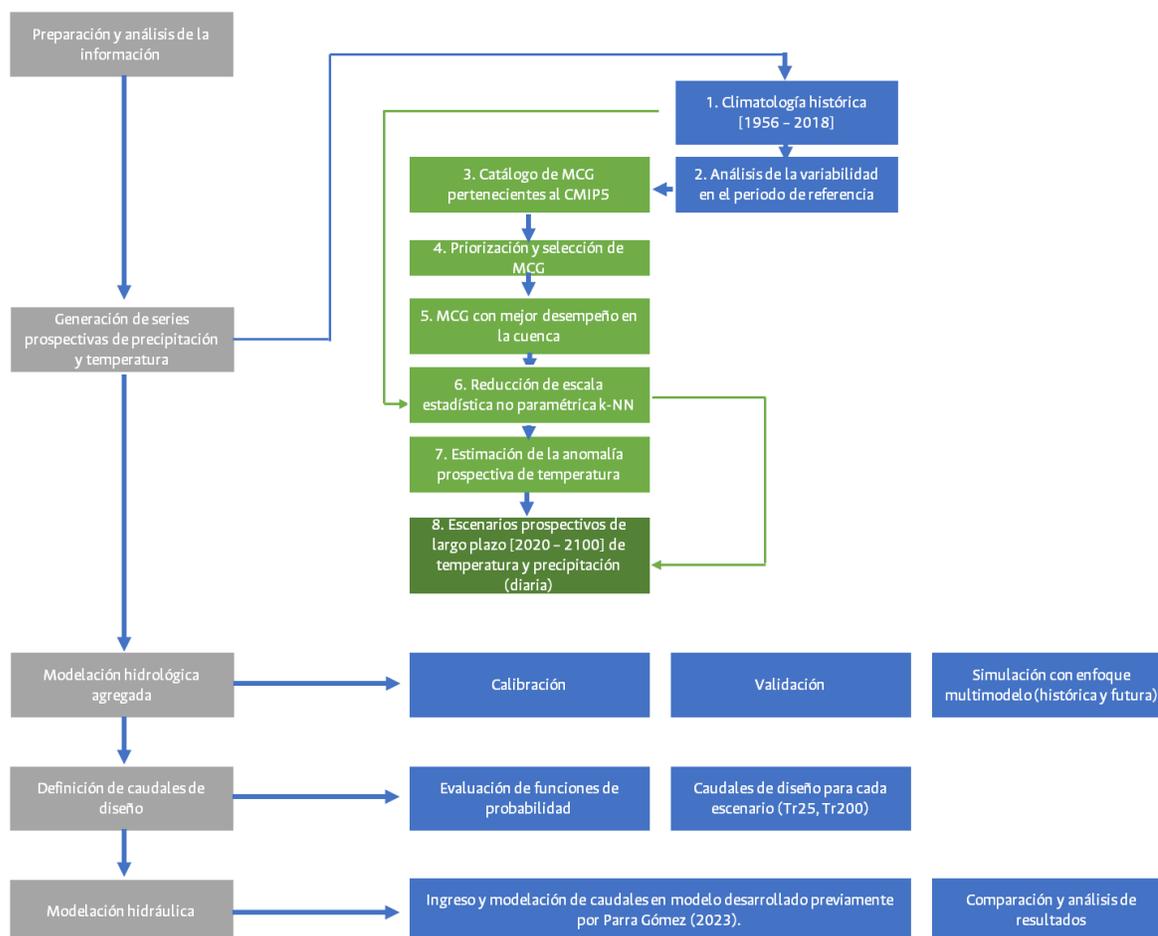


Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2014a).

4. Metodología

En esta sección se especifica punto por punto las actividades desarrolladas para evaluar la variación de la amenaza de inundación en la cuenca de la quebrada Olivares considerando variaciones en la hidrología por efectos de cambio climático, siguiendo el proceso que se muestra en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Flujo metodológico de la investigación.



Fuente: Elaboración propia

Se inicia con la preparación y análisis de la información disponible, la cual incluyó el análisis estadístico de series de precipitación y temperatura, permitiendo verificar la factibilidad del uso de la estación establecida en análisis posteriores.

Seguidamente se realizó la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura para la cuenca, considerando un proceso interno que consistió en la evaluación del desempeño de los MCG incluidos en el proyecto CMIP5 en la representación del clima local, la reducción de escala mediante el método no paramétrico k-NN y a partir de los resultados de los procesos anteriores, definir dos series para la cuenca considerando los productos de dos MCG.

Teniendo series definidas, se realizó la modelación hidrológica conceptual agregada considerando varios modelos usados previamente en la región, a partir de la información disponible de estaciones hidrometeorológicas emplazadas en el cauce de la quebrada Olivares. Los modelos considerados se sometieron a un proceso de calibración y validación para posteriormente realizar la simulación de caudales a partir de las series sintéticas producidas en apartados anteriores. A dichas series de caudal se aplicaron diferentes funciones de distribución de probabilidad con el fin de establecer los caudales para periodo de retorno de 25 y 200 años que, subsiguientemente se ingresarían en el modelo hidráulico desarrollado por Parra Gómez (2023) para la evaluación de su comportamiento en el cauce.

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es explicar de manera clara y concisa la metodología utilizada, preparando la investigación para la presentación de los resultados.

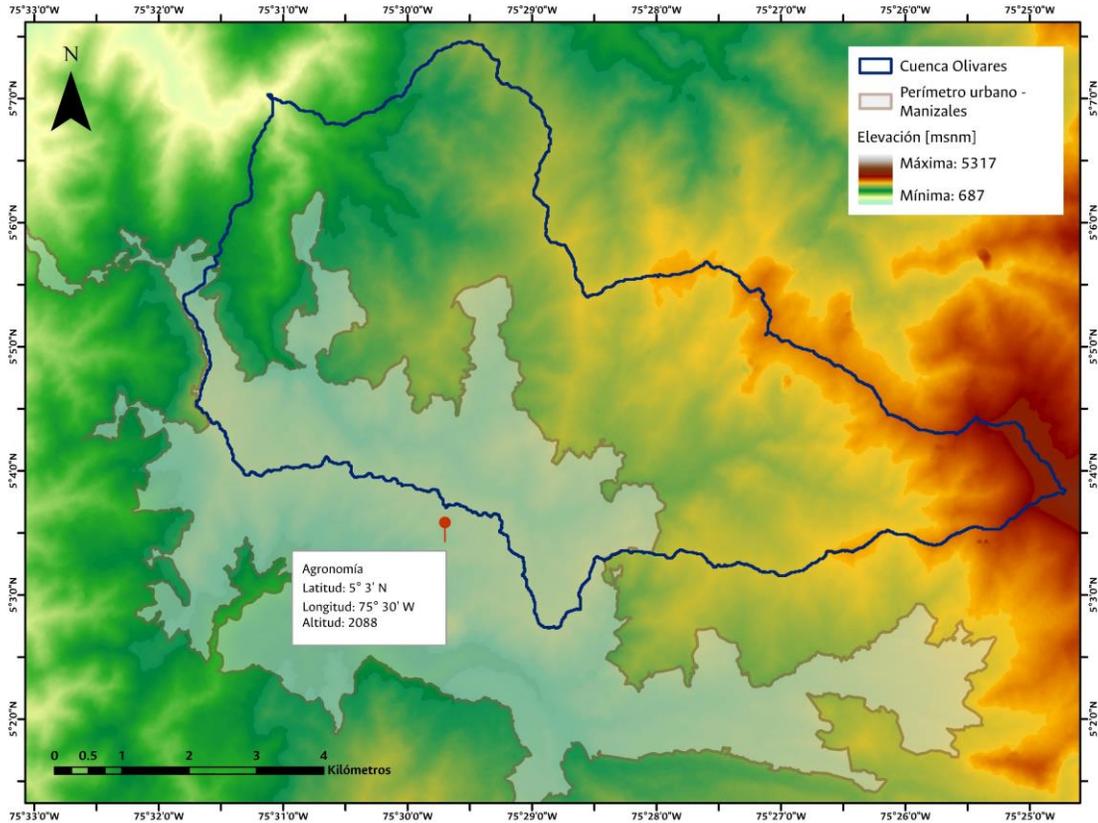
4.1 Preparación de la información

Para el desarrollo del estudio se consideró la información reportada por la estación meteorológica Agronomía, ubicada en la comuna Palogrande de la ciudad de Manizales (ver Figura 4-2). La ubicación y la longitud de sus registros fueron los criterios preponderantes en su elección como estación de referencia. Dicha estación pertenece al Centro Nacional de Investigaciones de Café -Cenicafé- y cuenta con registros diarios en un periodo de 62 años comprendido entre 1956 y 2018 de las variables: Precipitación, Temperatura media, Temperatura máxima y Temperatura mínima.

Para verificar que la serie histórica cumpliera con los principios de estacionalidad, consistencia y homogeneidad, se realizó un análisis previo que requirió el uso de técnicas de relleno de datos. La serie de datos consta de 22,950 registros, la variable Precipitación presentaba un porcentaje de datos faltantes equivalente al 2.3% de la longitud total de la serie (524 datos).

Así mismo, se consideraron los estadísticos principales de la serie diaria, en su agregación mensual y anual, los cuales se presentan en la Tabla 4-1. En los 62 años de registro de la estación, se calcula un promedio de 1911 mm anuales de precipitación.

Figura 4-2. Ubicación de la estación meteorológica Agronomía.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-1. Estadísticos principales de la serie de precipitación diaria, en agregación mensual y anual.

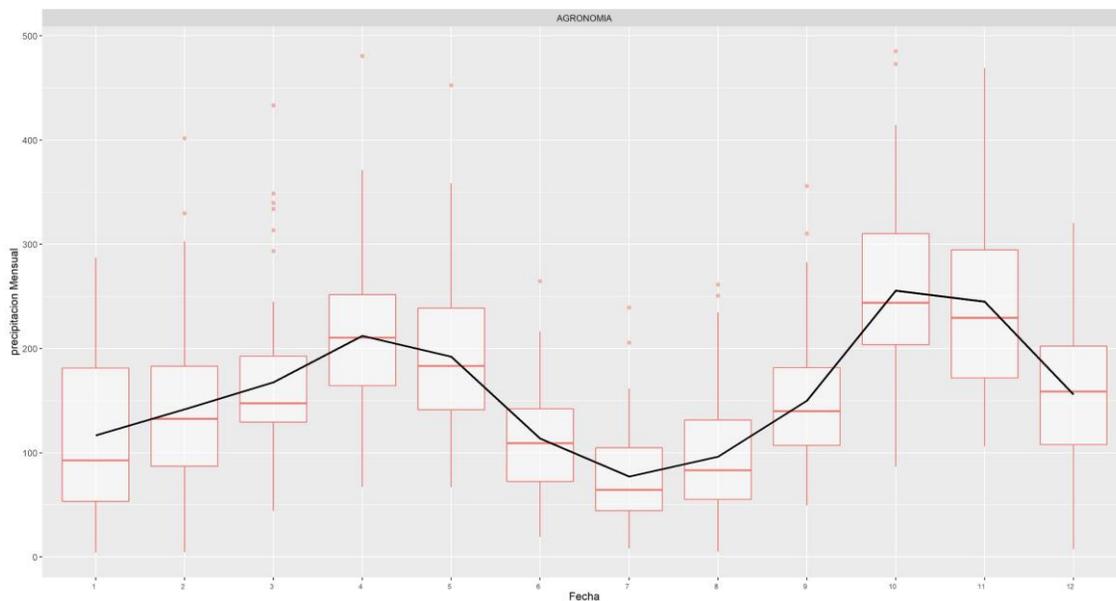
Estadístico	Serie diaria	Serie mensual	Serie anual
n Periodo	22646	744	
NAs Periodo	524	21	
%NAs Periodo	2.31	2.82	
Varianza	100.36	8108.27	150048.38
Desviación estándar	10.02	90.05	387.36
Coefficiente de variación	190.32	56.14	20.27
Rango intercuartílico	6	123.95	531
Asimetría	3.51	0.73	0.73
Curtosis	18.18	0.52	0.85
Mínimo	0	4.4	1251.6
Primer cuartil	0	90.65	1652.23
Mediana	0.9	149.2	1846.75
Promedio	5.26	160.39	1911.25
Tercer cuartil	6	214.6	2183.22

Estadístico	Serie diaria	Serie mensual	Serie anual
Máximo	134	485	3014.8

Fuente: Elaboración propia.

La agregación mensual de la serie de precipitación permitió verificar el régimen bimodal de la zona donde se emplaza la estación, caracterizada por una época de menos lluvias con valores promedio mínimos en el mes de julio y dos temporadas de lluvia con picos en los meses de abril y octubre. La distribución de la precipitación mensual en la estación Agronomía se presenta en la mediante el uso del diagrama de cajas y bigotes.

Figura 4-3. Diagrama de cajas y bigotes de la precipitación mensual multianual promedio en la estación Agronomía.



Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de realizar una primera evaluación del supuesto de normalidad de la serie de precipitación diaria se utilizaron gráficas de “cuantiles-cuantiles” o QQ para determinar si el conjunto de datos se ajusta a esta distribución teórica, tanto en escala diaria como en escala mensual. Ambas gráficas permiten inferir que la serie de precipitación diaria y su agrupación en escala mensual no siguen la distribución normal, siendo evidente la desviación en las colas en los dos casos.

Para la serie diaria de precipitación, se aplicaron pruebas de normalidad, aleatoriedad, tendencias, cambios en la media/mediana, diferencias en la media/mediana en dos diferentes periodos de la serie y de estabilidad de la varianza. De las pruebas de normalidad realizadas se reafirma que la serie no sigue una distribución normal, confirmando lo inferido a partir de los gráficos de “cuantiles-cuantiles”. Se concluye que los datos no provienen de un proceso aleatorio. En términos de tendencias, dos de las tres pruebas

realizadas no rechazan la hipótesis, por lo tanto, se infiere que los datos no presentan una tendencia significativa. Sin embargo, sí se presentan cambios tanto en la media, como en la varianza (Más información en el Anexo 8.3).

A continuación, se utilizó el método de la “*curva doblemente másica*” para completar la serie de precipitación, se tuvieron en cuenta los registros de la estación Aeropuerto La Nubia por ser la estación más cercana con mayor número de registros para la extrapolación de los datos faltantes.

La serie de Temperatura presenta 3.8% de datos ausentes (876 datos). Como en la variable anterior, se consideraron los estadísticos principales de la serie diaria, en su agregación mensual y anual (promedio), los cuales se presentan en la Tabla 4-2. En los 62 años de registro de la estación, se calcula un promedio de 13.29 °C de temperatura en la estación.

Tabla 4-2. Estadísticos principales de la serie de temperatura media, en agregación mensual y anual.

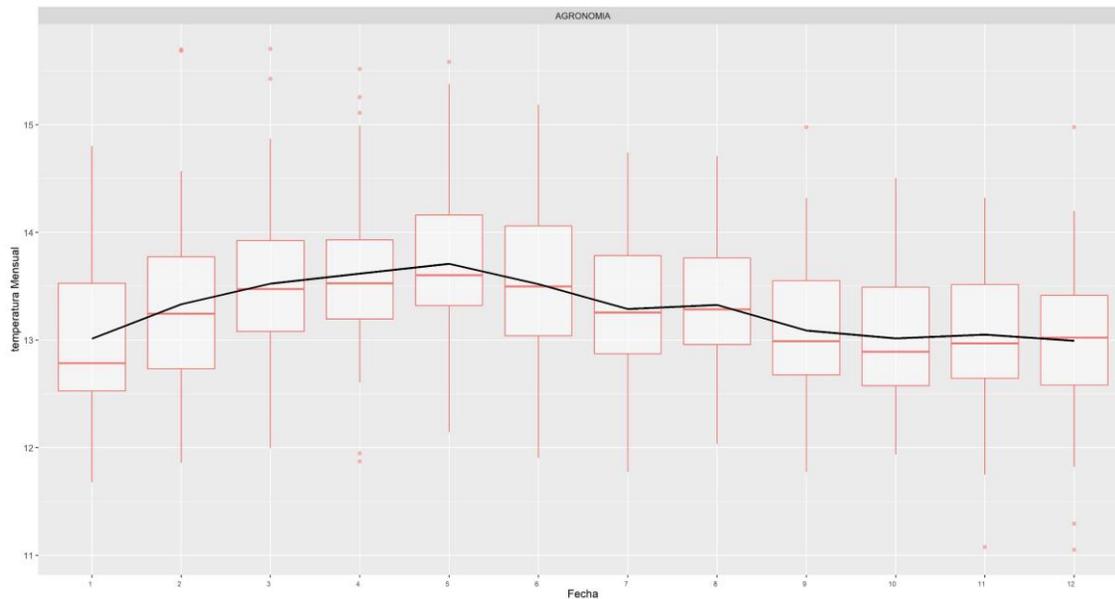
Estadístico	Serie diaria	Serie mensual	Serie anual
n Periodo	22646	744	
NAs Periodo	877	38	
%NAs Periodo	3.87	5.11	
Varianza	1.12	0.53	0.33
Desviación estándar	1.06	0.73	0.57
Coeficiente de variación	7.97	5.46	4.33
Rango intercuartílico	1.4	0.98	0.76
Asimetría	-0.07	0.29	0.42
Curtosis	0.28	0.37	0.37
Mínimo	8	11.05	12.02
Primer cuartil	12.6	12.77	12.92
Mediana	13.3	13.28	13.18
Promedio	13.29	13.29	13.28
Tercer cuartil	14	13.75	13.67
Máximo	17.1	15.7	14.79

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de la temperatura mensual en la estación Agronomía se presenta en la Figura 4-4 mediante el uso del diagrama de cajas y bigotes, en el cual se evidencia el máximo promedio en el mes de mayo y el mínimo en la temperatura promedio en el mes de enero.

Previo a la realización de pruebas de homogeneidad, se evaluó el supuesto de normalidad de la serie de temperatura media diaria a partir de gráficas de “cuantiles-cuantiles” o QQ para determinar si el conjunto de datos se ajusta a esta distribución teórica. De estas gráficas se infiere que la serie de temperatura diaria y su promedio mensual no siguen la distribución normal, siendo evidente la desviación en las colas mayormente en la gráfica mensual.

Figura 4-4. Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura mensual multianual promedio en la estación Agronomía.



Fuente: Elaboración propia.

Para la serie de temperatura diaria también se aplicaron las pruebas de homogeneidad propuestas para la serie de precipitación. De las pruebas de normalidad realizadas se reafirma que la serie no sigue una distribución normal. Se concluye que los datos no provienen de un proceso aleatorio. En términos de tendencias, se infiere con alto grado de probabilidad que la serie presenta tendencias, además de presentar cambios tanto en la media, como en la varianza (Más información en el Anexo 8.3).

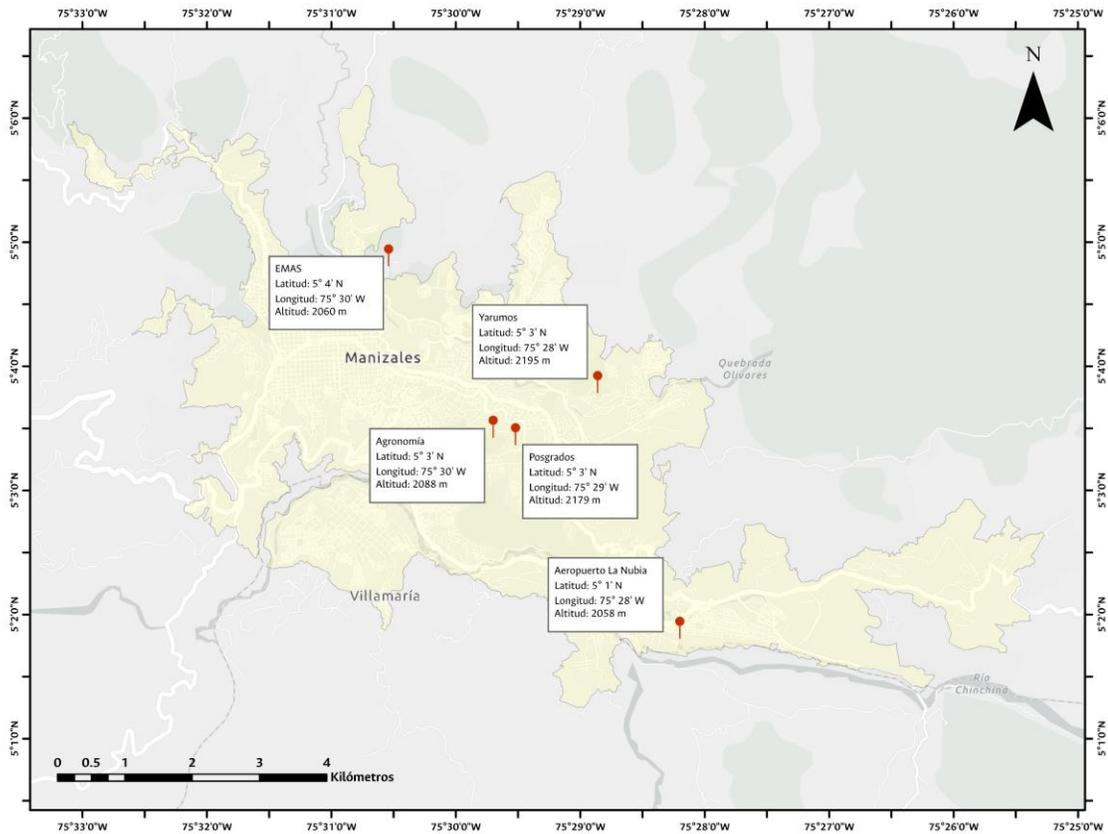
Debido a la carencia de estaciones con registros de temperatura en la zona para el periodo comprendido entre los años 1963 y 1976, se hizo necesario el uso de un método univariado que permitiera aprovechar la información contenida en la propia serie temporal (Barrera Escoda, 2004).

Posteriormente, se utilizó el método de la “*distancia inversa ponderada -IDW-*” con los registros de las estaciones Posgrados, Yarumos, Aeropuerto La Nubia y EMAS, de manera que se pudieran interpolar los datos faltantes en el periodo 2005 - 2009. En la Figura 4-5 se ilustra la ubicación de dichas estaciones en el municipio de Manizales.

Con el fin de verificar la naturaleza de las tendencias encontradas en las series de temperatura se utilizaron curvas de masa residual, las cuales magnifican los puntos donde se produce una variación e ilustra si esta variación se acerca o se aleja de la media. Debido a la cantidad de datos disponibles, se utilizaron los registros de las estaciones meteorológicas Cenicafé y Granja Lúker, ubicadas en el departamento de Caldas. Dichas curvas (Figura 4-6, Figura 4-7), permitieron establecer similitudes en el comportamiento de las variables de temperatura en ciertos periodos de tiempo, confirmando que las

tendencias encontradas en las series de la estación Agronomía obedecen a variaciones en los patrones climáticos.

Figura 4-5. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la verificación de datos de temperatura en la estación Agronomía.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-6. Curva de masa residual. Temperatura mínima.

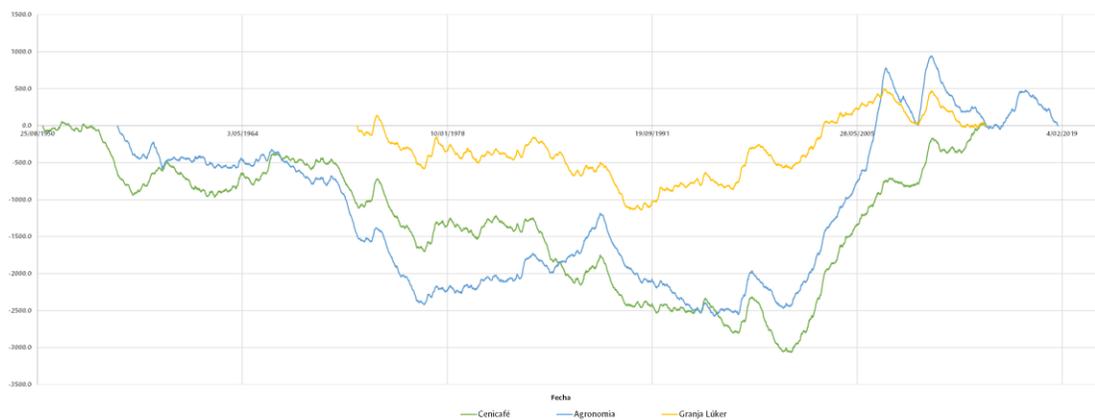
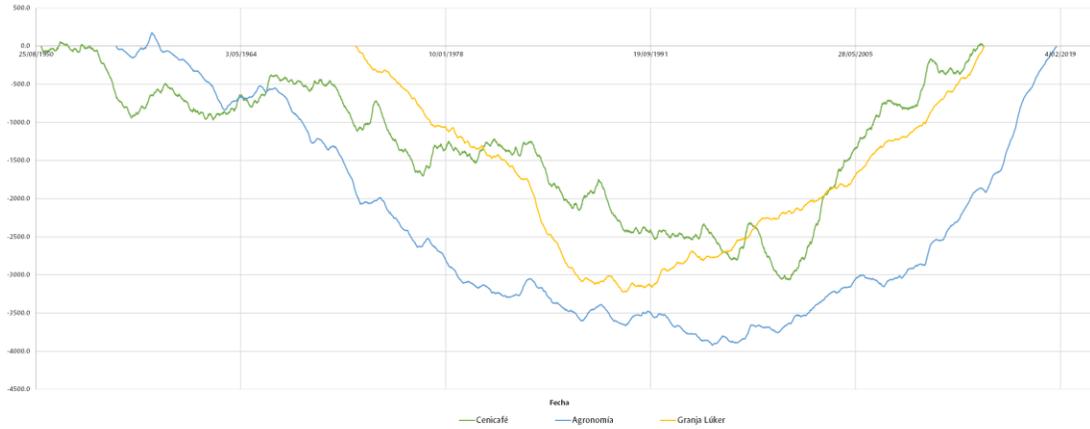


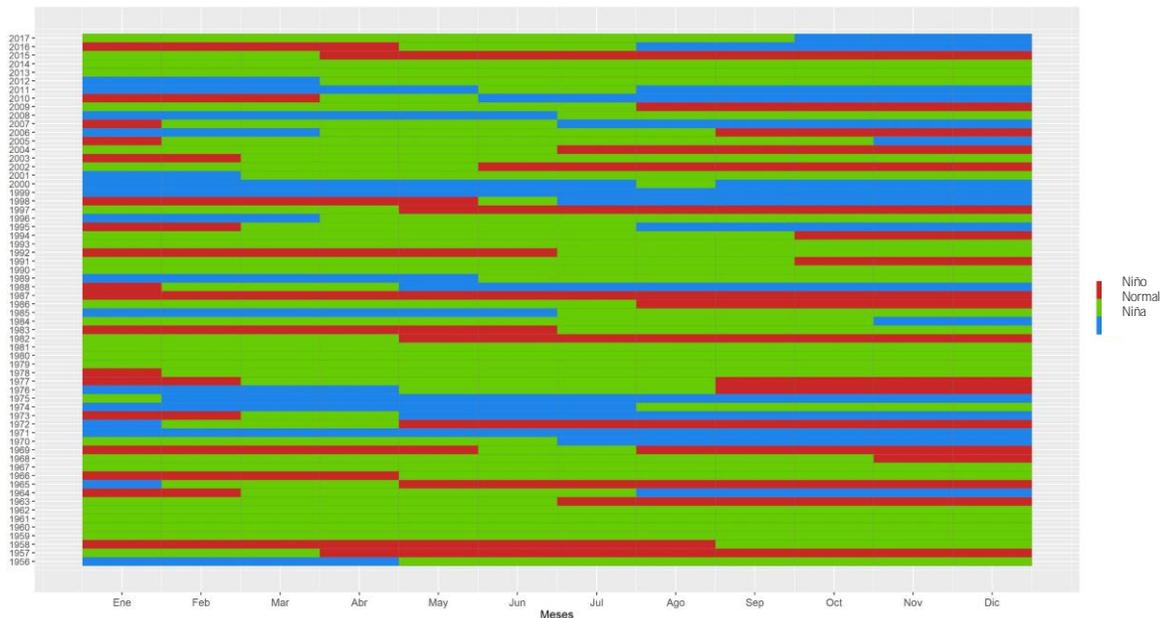
Figura 4-7. Curva de masa residual. Temperatura máxima.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se realizó el análisis de los valores atípicos presentes en las series, pudiendo establecer que estos eventos se encontraban asociados generalmente al régimen bimodal de precipitaciones propio del país y a la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática como La Niña y El Niño. Las fases del ENSO en el periodo de evaluación con las cuales se verificaron los valores atípicos, se presentan en la Figura 4-8.

Figura 4-8. Fases ENSO 1956 - 2017.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Serie de evapotranspiración de referencia (ET₀)

La evapotranspiración de referencia, ET₀, es la evapotranspiración que se presenta en un cultivo de gramíneas bajo condiciones óptimas de humedad y radiación, que permiten el desarrollo óptimo de la planta, se toma como valor de referencia y es usual en el trópico asimilarla a la evapotranspiración potencial, la cual es requerida por los modelos hidrológicos (FAO, 1998).

Considerando la dificultad para el cálculo de la ET₀ y las limitaciones en la información, se utilizó la fórmula propuesta por el Centro de Investigaciones de Café -Cenicafé- para la zona cafetera de Colombia. Esta ecuación fue propuesta por Jaramillo Robledo (2006) como una aproximación simplificada de la ecuación de Penmann - Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, en la cual solo se calcula la variable en función de la elevación media de la cuenca, puesto que, la temperatura en el trópico varía en función de la elevación, así mismo, la evapotranspiración. A continuación, se presenta la ecuación planteada, dónde la evapotranspiración se encuentra dada en mm/día.

$$ET_0 = 4.37 \cdot e^{(-0.0002 \cdot \text{Elevación})}$$

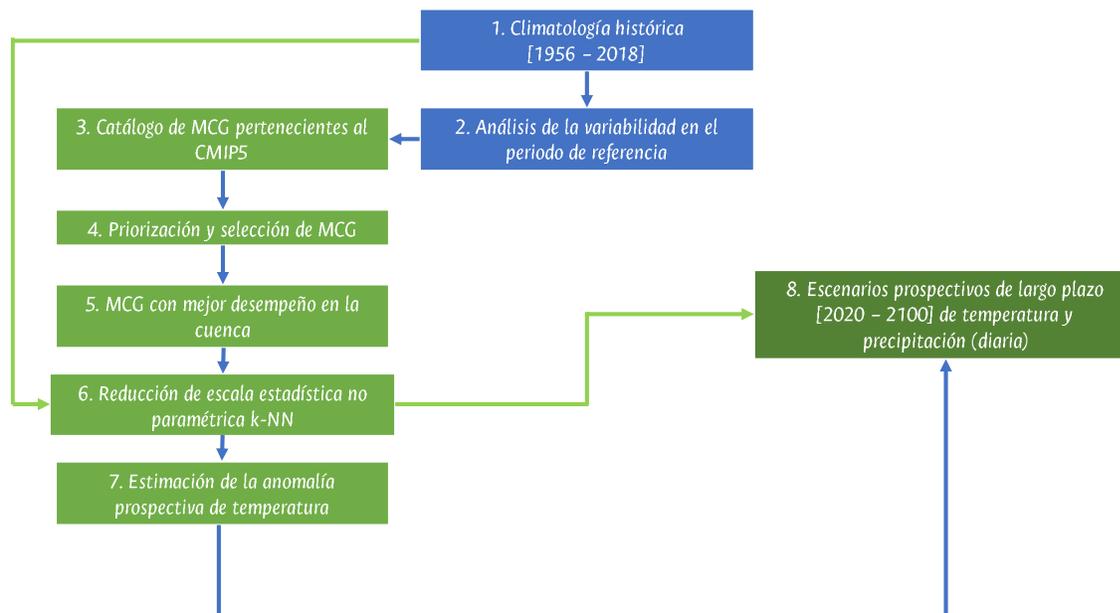
Con el fin de dar variabilidad temporal al resultado promedio obtenido mediante la ecuación de Jaramillo Robledo (2006), se utilizaron valores proporcionales según la temperatura registrada en la serie diaria correspondiente. Al considerar su uso posterior en modelos hidrológicos agregados, no se consideró la variación espacial de la variable.

4.3 Generación de series con afectación de cambio climático

Siendo el objetivo la representación de las condiciones climáticas futuras probables basadas en los registros históricos locales (1956 - 2018), se generaron dos escenarios prospectivos de cambio climático a largo plazo (2020 - 2100) para las variables precipitación y temperatura media. Los escenarios generados incluyen series climáticas de dos Modelos de Circulación General -MCG- resultantes de la aplicación de la metodología no paramétrica k-NN para la reducción de escala.

La propuesta metodológica consiste en la generación de proyecciones climáticas de precipitación y temperatura media para la cuenca de la quebrada Olivares, basadas en las proyecciones del CMIP5, que sumándose al clima actual permitan establecer un posible rango en el comportamiento hidrológico de la zona para el horizonte 2020-2100. En la Figura 4-9 se presenta en síntesis la metodología utilizada.

Figura 4-9. Metodología general para la generación de series climáticas.



Fuente: Moncada et al., (2020).

Para la consecución del objetivo principal de la sección se consideraron los siguientes objetivos intermedios:

1. Seleccionar los MCG pertenecientes al CMIP5 con resultados disponibles a resolución diaria en el área de estudio.
2. Determinar el desempeño de los modelos en la reproducción de las condiciones actuales de la cuenca, considerando diferentes atributos del clima e identificar los dos con mejor rendimiento.
3. Generar dos escenarios de cambio climático adaptados a las particularidades de la cuenca mediante el empleo de reducción de escala que representen condiciones extremas de humedad y temperatura, asociadas a variaciones en los regímenes hidrológicos presentes en las simulaciones del clima global.

4.3.1 Modelos de Circulación General – Proyecto CMIP5

Como se enuncia en el apartado , una de las herramientas principales para la generación de escenarios de cambio climático reside en los productos compilados por el proyecto CMIP5. En este estudio, fueron utilizados 17 de los 61 MCG disponibles, provenientes de distintas instituciones, los cuales se listan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Modelos climáticos globales (CMIP5) utilizados.

Modelo	Instituto de investigación
BCC-CSM1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration

Modelo	Instituto de investigación
BNU-ESM	Beijing Normal University
CESM1-BGC	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research
CESM1-CAM5	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA (USA)
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA (USA)
GFDL-ESM2m	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA (USA)
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IPCC (2013a) y European Network for Earth System Modelling (2019).

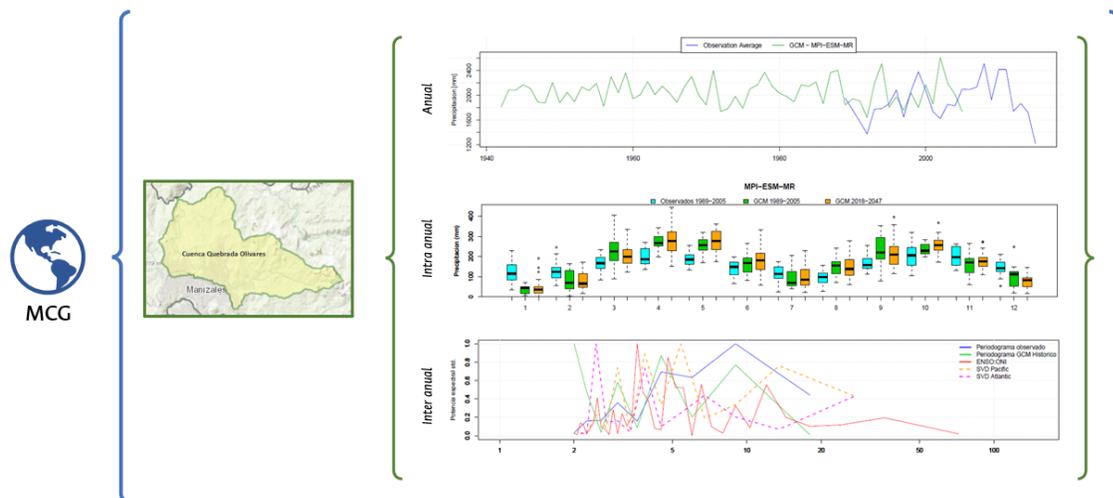
Teniendo en cuenta la modelación de eventos extremos que se plantea para el estudio, se consideró el escenario de máximas emisiones, RCP 8.5, para la totalidad de las simulaciones realizadas en los MCG seleccionados.

En vista de que esta fase de la investigación se desarrolló previo a la presentación del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2021b) se conservó el uso del CMIP5 considerado en el informe anterior (2013a).

4.3.2 Evaluación de desempeño y priorización de modelos

Las particularidades climáticas de una región y su variabilidad se pueden caracterizar a partir de ciertos atributos de naturaleza estadística en diferentes resoluciones temporales. En el caso de los resultados diarios de los MCG, se pueden confrontar con los estadísticos locales observados a partir de agregaciones temporales anuales, intra anuales (estacionalidad) e interanual (oscilaciones seculares, teleconexiones macroclimáticas), como se ejemplifica en la Figura 4-10.

Figura 4-10. Caracterización de atributos del clima a diferentes escalas.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la metodología propuesta por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (National Center for Atmospheric Research -NCAR-) de los Estados Unidos y el Instituto de Ambiente de Estocolmo (Stockholm Environment Institute -SEI-) se evaluó el desempeño de diferentes modelos en la representación de atributos climáticos a partir de un conjunto de ocho indicadores tanto cuantitativos como cualitativos. Los indicadores planteados (Tabla 4-4) permiten identificar y priorizar aquellos modelos que representen de manera más precisa el clima observado.

Tabla 4-4. Indicadores utilizados para caracterizar atributos del MCG y del clima observado.

Indicador	Fórmula	Descripción
Sesgo (Bias)	$\frac{\bar{X}_{GCM}}{\bar{X}_{obs}}$	\bar{X}_{MCG} : Media de la señal del MCG \bar{X}_{obs} : Media regional de la señal observada
Longitud de rachas secas (Dry_spell_length)	$\frac{D_d}{N_d}$	D_d : Total de días secos en el periodo analizado ($P \leq 0.1$ mm) N_d : Número de periodos sin lluvia en el periodo analizado
Media diaria (Daily mean)	$\frac{\sum_i X_i}{N}$	X_i : Señal (MCG u Observada) N: Número de días del periodo
Magnitud de eventos extremos	P_{95}	P_{95} : Percentil 95 (probabilidad de excedencia 0.05)
Fracción de días con lluvia ($P > 0.1$ mm) Wet fraction	$\frac{D_w}{N}$	D_w : Total de días húmedos en el periodo analizado ($P > 0.1$ mm) N: Número de días del periodo
Longitud media de días húmedos (Wet spell length)	$\frac{D_w}{N_w}$	D_w : Total de días húmedos en el periodo analizado ($P > 0.1$ mm) N_w : Número de periodos con lluvia en el periodo analizado
Estacionalidad mensual		Reproduce o no el patrón estacional

Indicador	Fórmula	Descripción
Oscilaciones de baja frecuencia y teleconexiones macroclimáticas	$F(ONI)$ $F(X_{GCM_a})$ $F(X_{obs_a})$	<i>F</i> : Periodograma <i>ONI</i> : Señal niño oceánica (media anual) <i>X_{GCM_a}</i> : Señal media anual del MCG <i>X_{obs_a}</i> : Señal media anual del registro observado

Fuente: Adaptado de Gutmann et al. (2014).

4.3.3 Reducción de escala

Ya que se tiene un interés particular en captar atributos climáticos para condiciones más extremas (consecuentes con la modelación posterior de inundaciones), en este estudio se implementó el método *k*-NN *bootstrapping* con el fin de generar series de precipitación y temperatura diarias a partir de la información provista por los MCG.

Como se señala anteriormente, la metodología propuesta a continuación fue desarrollada en colaboración por NCAR y el SEI para ser aplicada en el contexto de Latinoamérica. Producto de dicha cooperación se elaboró una rutina de programación en lenguaje R, actualmente custodiada por el SEI, cuyo uso fue aprobado para el desarrollo de esta investigación. A continuación, se describe el método *k*-NN *bootstrapping* publicado por Gangopadhyay et al. (2005) y Yates et al. (2003), compendiado por Angarita et al. (2020).

Mediante el método *k*-NN se generan series aleatorias de precipitación en las cuales se conserva la probabilidad conjunta de los estados de humedad consecutivos *-J-* del clima regional a escala temporal diaria, como se presenta a continuación:

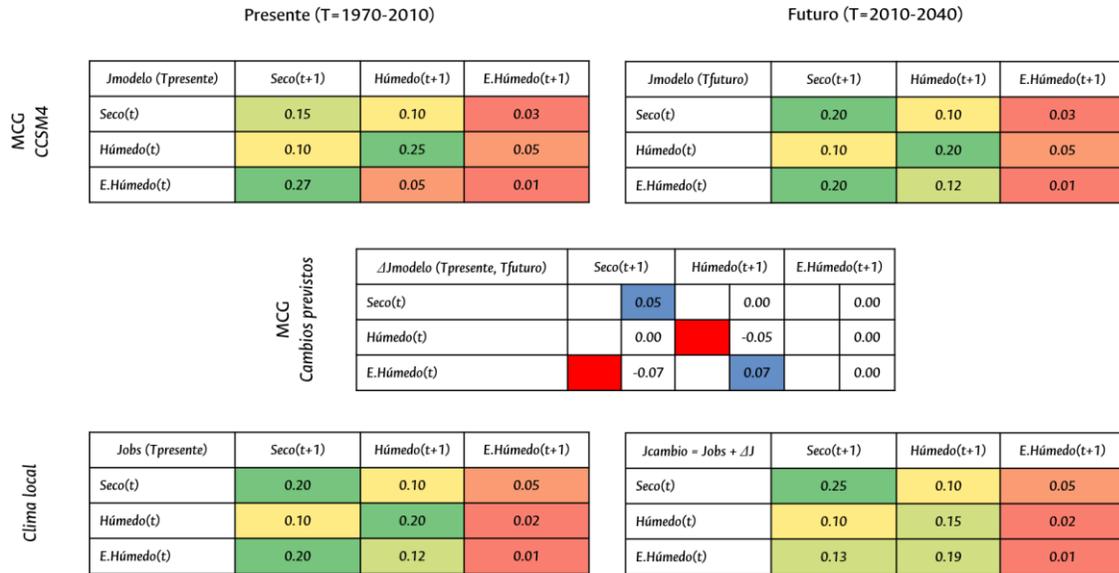
- Seco: Precipitación media diaria regional inferior a mínimo (0.3 mm, P0.05).
- Húmedo: Precipitación media regional entre 0.3 mm y P95.
- Extremadamente húmedo: Precipitación media regional superior a P95.

La Figura 4-11 ilustra la matriz de probabilidad conjunta que determina la regla de probabilidad *-J-*, la cual se deriva del análisis de la señal observada y los resultados obtenidos del MCG.

Donde:

- $J_{MCG}(T)$: Probabilidad del MCG para el periodo climático presente *-T-*, entre 1850-2005.
- $J_{MCG}(G)$: Probabilidad del MCG, para un periodo climático específico.
- $J_{obs}(T)$: Probabilidad observada para el periodo climático presente *-T-*, entre 1850-2005.
- $J_{cambio}(Y) = J_{obs}(T) + [J_{GCM}(G) - J_{GCM}(T)]$ Probabilidad para el periodo proyectado.

Figura 4-11. Ejemplo de matriz de probabilidad conjunta.



Fuente: Moncada et al. (2020).

El algoritmo k-NN inicia con la construcción de las secuencias de estado del tiempo a partir de un recorrido aleatorio de los registros históricos seleccionados del clima regional en una ventana de $2 \times W$ (días alrededor del día juliano¹ n que se requiere predecir) (1). El método procede a la simulación seleccionando aleatoriamente una fecha en la ventana comprendida entre $[n-W, n+W]$ (2). Según el estado de humedad registrado en la fecha seleccionada y utilizando la matriz de probabilidad conjunta producto del modelo de transición de cadena de Markov informado por el MCG, se define el estado de humedad del periodo siguiente (3). Posteriormente, se identifican los valores observados en la ventana de tiempo que cumplen con la condición de estados de humedad consecutivos establecida en el procedimiento anterior (por ejemplo, húmedo seco) (4). Se calcula la distancia entre el estado de humedad presente y el estado de humedad de los puntos candidatos, se ordenan y entre los candidatos se determina aleatoriamente el siguiente valor de la simulación.

Habiendo seleccionado el valor correspondiente al día siguiente, se repite la secuencia anteriormente descrita a partir del paso (3). Se obtiene como resultado una secuencia de fechas, que puede ser utilizada para reconstruir series sintéticas del estado del tiempo en las estaciones locales que poseen observaciones. La Figura 4-12 ilustra un ejemplo el proceso seguido en la utilización del método k-NN.

¹ El día juliano es un sistema de referencia temporal ampliamente utilizado en astronomía, geodesia, y otras áreas científicas que requieren una medida precisa del tiempo. En este sistema, cada día se asigna un número entero consecutivo, comenzando desde el 1 de enero del año 4713 a.C. del calendario juliano. Este número se conoce como el día juliano y representa la fracción de tiempo transcurrida desde un punto de origen común. Es importante destacar que el día juliano no está relacionado con el calendario gregoriano y se cuenta de forma continua sin tener en cuenta los años bisiestos.

Figura 4-12. Ejemplo del algoritmo del método k-NN bootstrapping.

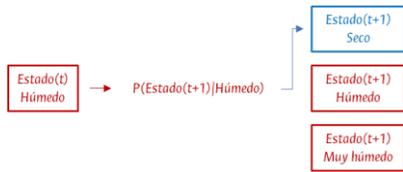
1.

N	Ene 1-W	...	Dic 31	Ene 1	Ene 2	...	Ene 1+W
1970	12			0.3			
1971				Pr (t) 2.5 Ene 1 1971			
1972				12.0			
...				0.1			
			2.6	0			
2010				0			

2.

N	Ene 1-W	...	Dic 31	Ene 1	Ene 2	...	Ene 1+W
1970	12			0.3			
1971				2.5 Húmedo			
1972				12.0			
...				0.1			
			2.6	0			
2010				0			

3.



N	Ene 1-W	...	Dic 31	Ene 1	Ene 2	...	Ene 1+W
1970				0.3			
1971				2.5		Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco
1972	Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco		12.0			
...				0.1			
		Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco	0			
2010				0	Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco	

4.

N	Ene 1-W	...	Dic 31	Ene 1	Ene 2	...	Ene 1+W
1970				0.3			
1971				2.5		Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco
1972	Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco		12.0			
...				0.1			
		Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco	0			
2010				0	Estado(t) Húmedo	Estado(t+1) Seco	

N	Ene 1-W	...	Dic 31	Ene 1	Ene 2	...	Ene 1+W
1970				0.3			
1971				2.5			
1972				12.0			
...				0.1			
				0			
2010				0	Estado(t) Húmedo	Pr(t+1) Ene 3/1970	

Fuente: Adaptado de Moncada et al. (2020).

Las series sintéticas generadas por este método no incluyen señal de cambio de temperatura ya que se basan en las magnitudes del periodo histórico. En el método la señal de incremento de temperatura se estima como (Moncada et al., 2020):

$$\Delta T(t) = Ta_{MCG}(t) - \widetilde{Ta}_{MCG}[T]$$

Dónde,

- $Ta_{MCG}(d)$: Media móvil de W días de la señal de temperatura en el MCG para el día t.
- $\widetilde{Ta}_{MCG}[T]$: Media móvil de W días de la señal media de temperatura en el modelo para el periodo de referencia T.

4.4 Modelación hidrológica

En la evaluación del balance hídrico de una cuenca, es esencial el empleo de modelos hidrológicos que capturen los principales procesos involucrados en la evolución de los diferentes términos del balance. Sin embargo, estos procesos suelen ser complejos, presentar variaciones espaciotemporales y no ser lineales con respecto a los términos del balance. En zonas de montaña, donde la disponibilidad de datos suele ser limitada, se recurre con frecuencia a modelos hidrológicos agregados de tipo conceptual, también conocidos como modelos lluvia-escorrentía. No obstante, los resultados de estos modelos están sujetos a incertidumbre, derivada tanto de los datos medidos como de la estimación de los parámetros del modelo. Dado que cada modelo genera y propaga la incertidumbre de manera única, resulta difícil limitar la incertidumbre asociada a los términos del balance mediante un único modelo. En respuesta a esta problemática, han surgido las técnicas multimodelo como herramientas para estimar la variabilidad de la incertidumbre asociada a los términos del balance (Vélez Upegui et al., 2022).

La modelación hidrológica propuesta en la cuenca de estudio se realizó a escala diaria, usando seis modelos agregados. Esta metodología es coherente y responde al planteamiento inicial, que contempla el uso de la información climatológica proveniente de una sola estación de registro, considerando que en el territorio esta estación es la única que cuenta con registros suficientemente extensos para una reproducción detallada del comportamiento climatológico de la zona y posteriores proyecciones de cambio climático. Se mantuvo la fecha de finalización de registro de la estación Agronomía (31 de octubre de 2018) como última fecha de la modelación ya que no fue posible la actualización de estos registros debido a la suspensión de operaciones de dicha estación en la ciudad de Manizales (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia & Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020).

A partir del enfoque multimodelo se logra comprender la dinámica del ciclo hidrológico en la cuenca de la quebrada Olivares y evaluar las incertidumbres asociadas a cada modelo mediante el análisis de registros temporales en las variables precipitación, temperatura y caudal. Los modelos conceptuales contemplados en el enfoque multimodelo requieren un periodo de calibración y validación, sin embargo, sobre el cauce de la quebrada Olivares existen solo tres estaciones de aforo con registro de caudal (Figura 4-13), que no superan los siete años de registro (hasta el año 2018), por lo cual se consideran periodos de calibración y validación más cortos de lo sugerido. La Tabla 4-5 presenta las principales características de las estaciones de aforo sobre el cauce de la quebrada Olivares.

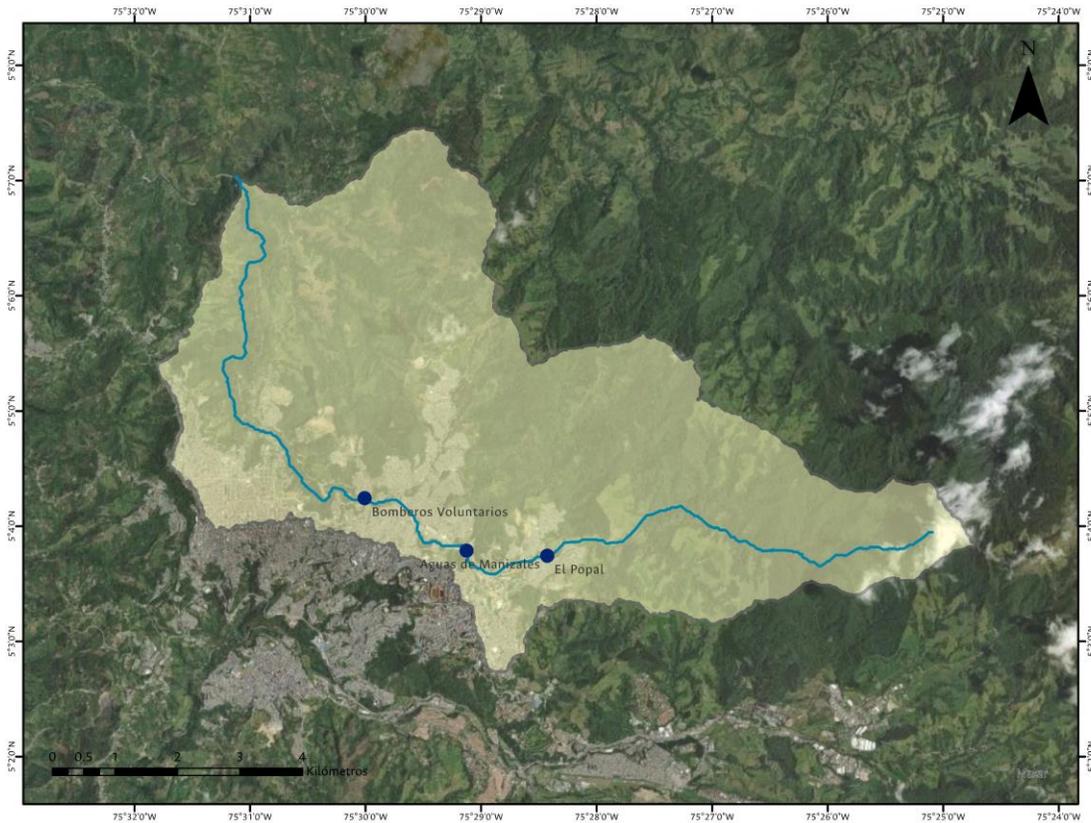
Tabla 4-5. Estaciones hidrometeorológicas dispuestas en la quebrada Olivares.

Dato	Q.Olivares - El Popal	Q. Olivares – Aguas de Manizales	Q.Olivares – Bomberos Voluntarios
Código	170010302015	170010302030	170010302042
Tipo	Hidrometeorológica	Hidrometeorológica	Hidrometeorológica

Dato	Q.Olivares - El Popal	Q. Olivares – Aguas de Manizales	Q.Olivares – Bomberos Voluntarios
Red	Caldas	Hidrometeorológica Cuenca Manizales	SAT cuenca Q. Olivares
Latitud	5° 3' 44.6" N	5° 3' 47.3" N	5° 4' 14.6" N
Longitud	75° 28' 25.7" W	75° 29' 7.6" W	75° 30' 0.5" W
Altitud	2002 m	2064 m	2030 m
Ubicación	Bodega El Popal - Aguas de Manizales S.A E.S.P	Aguas de Manizales S.A E.S.P - Sede Administrativa	Sede Bomberos voluntarios - Av. Kevin Ángel
Propietario	Corpocaldas	Corpocaldas	Corpocaldas
Fecha de activación	07/09/2010	13/05/2015	01/05/2014

Fuente: Elaboración propia a partir de IDEA Manizales (2023).

Figura 4-13. Ubicación de las estaciones de aforo consideradas en el modelo hidrológico.



Fuente: Elaboración propia.

Considerando los periodos de registro, la calidad de la información recopilada y la necesidad de representar la situación existente en la cuenca, se decidió descartar las estaciones Aguas de Manizales y Bomberos Voluntarios del proceso de calibración y validación de modelos hidrológicos para la simulación

de caudales. Si bien, la estación Aguas de Manizales posee un corto periodo de registro y anomalías causadas por la influencia de la ocupación urbana del cauce, se reconoce su importancia debido a la representación de la magnitud de caudal en este punto de la ciudad, por lo cual, se tuvo en cuenta en cierta medida en el proceso de modelación, sin someterla al proceso de calibración y validación. Por otra parte, se ha considerado que la curva de calibración de caudales de la estación Bomberos Voluntarios presumiblemente no cumple con los estándares esperados para su uso, ya que requiere de procesos rigurosos de afinamiento para su correcta implementación.

De esta manera, se utilizó la estación El Popal para la simulación de los caudales necesarios para la posterior modelación hidráulica. La estación permite establecer las condiciones de caudal en la confluencia de la quebrada Minitas con la quebrada Olivares, en su entrada al perímetro urbano.

4.4.1 Recopilación de información

Para la obtención de series de caudal en la quebrada Olivares se consulta la información dispuesta en la plataforma del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas -SIMAC- y el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas -CDIAC- (IDEA Manizales, 2023). Los registros de precipitación y temperatura en la estación *Agronomía* corresponden a los históricos usados en la generación de series sintéticas de cambio climático en secciones anteriores.

4.4.1.1 Análisis de calidad de series temporales

Se procede a depurar y ordenar la información de manera que se facilite el análisis. Se obtienen indicadores como porcentaje de datos faltantes, número de datos registrados, promedios y máximos valores alcanzados. Los periodos de registro y porcentaje de datos faltantes se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Información de estaciones de caudal sobre la quebrada Olivares.

Estación	Q.Olivares – El Popal	Q. Olivares – Aguas de Manizales
Fecha inicio	7/09/2010	31/12/2015
Fecha fin	31/10/2018	31/10/2018
Datos faltantes (%)	2.6	8.2

Fuente: Elaboración propia.

Se consideraron los estadísticos principales de las series diarias, los cuales se presentan en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Estadísticos principales de la serie de precipitación diaria, en agregación mensual y anual.

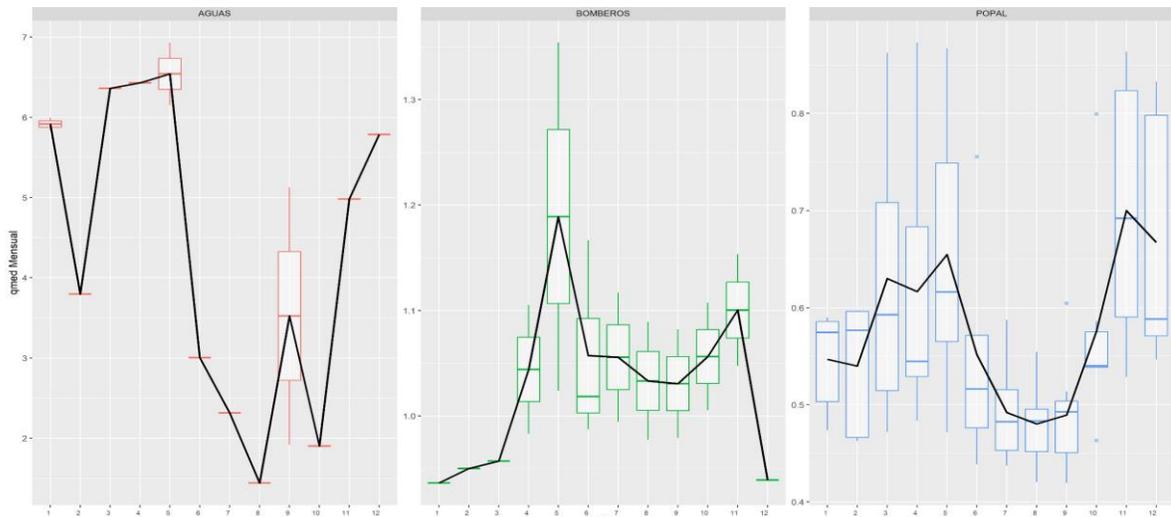
Estadístico	El Popal	Aguas de Manizales
Varianza	0.02	6.95
Desviación estándar	0.15	2.64
Coefficiente de variación	26.41	54.19
Rango intercuartílico	0.14	3.14

Estadístico	El Popal	Aguas de Manizales
Asimetría	2.26	1.44
Curtosis	7.23	4.78
Mínimo	0.4	0.66
Primer cuartil	0.47	2.97
Mediana	0.53	4.73
Promedio	0.57	4.87
Tercer cuartil	0.62	6.12
Máximo	1.64	19.42

Fuente: Elaboración propia.

Los promedios mensuales resultado del análisis, permiten apreciar que el caudal en los diferentes puntos de aforo sobre la quebrada Olivares no corresponde plenamente a la dinámica esperada según el régimen de precipitación (ver Figura 4-3) de la zona, siendo menos evidente esta diferencia en la estación *El Popal*, por su parte, la intervención urbana en la cuenca se hace más notoria en las demás estaciones, particularmente en la ubicada en el sector de Aguas de Manizales, afectando el comportamiento del cauce a lo largo de año como se observa en la Figura 4-14.

Figura 4-14. Diagrama de cajas y bigotes del caudal promedio en las estaciones sobre la quebrada Olivares.



Fuente: Elaboración propia.

A la serie de caudal medio diario, se aplicaron pruebas de normalidad, aleatoriedad, tendencias, cambios en la media/mediana, diferencias en la media/mediana en dos diferentes periodos de la serie y de estabilidad de la varianza. De las pruebas de normalidad realizadas se reafirma que la serie no sigue una distribución normal. En términos de tendencias, se infiere con alto grado de probabilidad que la serie presenta tendencias negativas, además de presentar cambios tanto en la media, como en la varianza, sin embargo, se decide hacer uso de ella debido a que la intervención humana tanto en la cuenca como en las

dinámicas del cauce pueden afectar los resultados de las pruebas realizadas sin dar lugar a correcciones (Más información en el Anexo 8.3).

4.4.1.2 Delimitación de secciones de la cuenca

Posterior a la evaluación de los datos registrados en la estación de aforo y con el objetivo de definir el área de la cuenca para tener en cuenta en la modelación hidrológica, se realizó la delimitación interna de la cuenca hasta los puntos de interés, cuyas características principales se listan en la Tabla 4-8. Los puntos de interés se definieron para evaluar las condiciones hidráulicas bajo eventos extremos en localizaciones que históricamente han presentado eventos de inundaciones, afectando la infraestructura existente y la movilidad en el área urbana. Así, se conservaron los puntos críticos definidos por Ramírez Cardona (2015) a lo largo de la quebrada Olivares enunciados en el capítulo 3. Inicialmente se prioriza la ubicación de la Escuela de Carabineros Alejandro Gutiérrez y el barrio La Toscana. Aguas abajo, se evalúan las orillas y espacios del cauce donde se encuentran el matadero municipal, las oficinas de Aguas de Manizales, infraestructura vial y de alcantarillado de la ciudad. Finalmente, se evalúa el sector de La Asunción, ocupado por instalaciones deportivas, edificios municipales, viviendas y talleres mecánicos; hasta la confluencia con la quebrada El Guamo, vía a los barrios Caribe, San Sebastián y Solferino.

Tabla 4-8. Características de las subcuencas delimitadas hasta los puntos de interés.

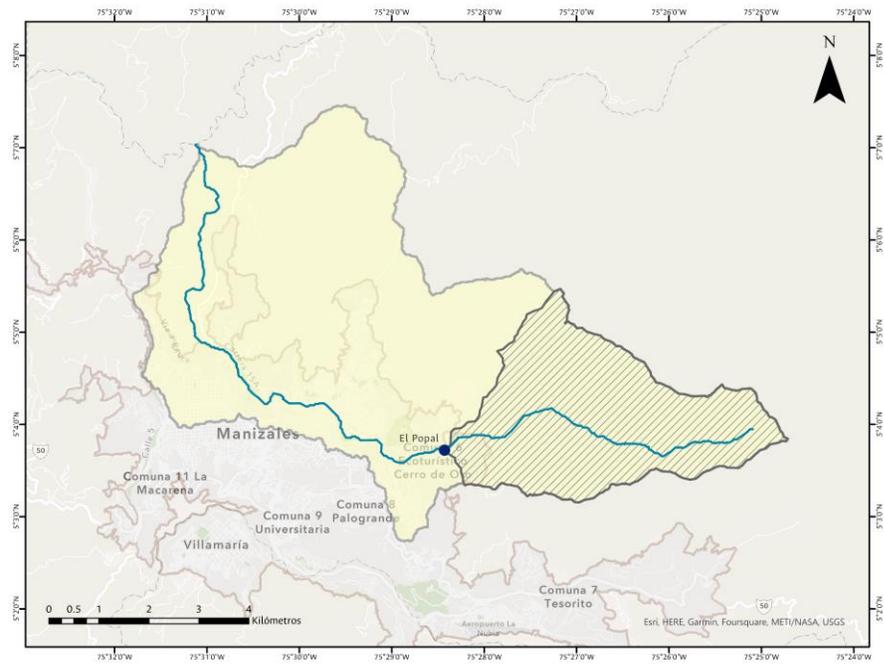
Estación	Área [km ²]	Elevación media [m]	Porcentaje de la cuenca
El Popal	14.69	2472.51	28.48
Escuela de Carabineros	20.49	2433.98	39.73
Aguas de Manizales	22.35	2412.16	43.33
La Asunción	23.51	2399.75	45.58

Fuente: Elaboración propia.

Se resalta que el área aforada hasta la estación Bomberos Voluntarios corresponde al 57% del área de la cuenca, comprendiendo el recorrido de la quebrada a lo largo de la zona norte de la ciudad de Manizales, particularmente en las comunas Ecoturística Cerro de Oro y Ciudadela de Norte. Teniendo en cuenta este dato, se calcula que el 43% no cuenta con monitoreo de caudal.

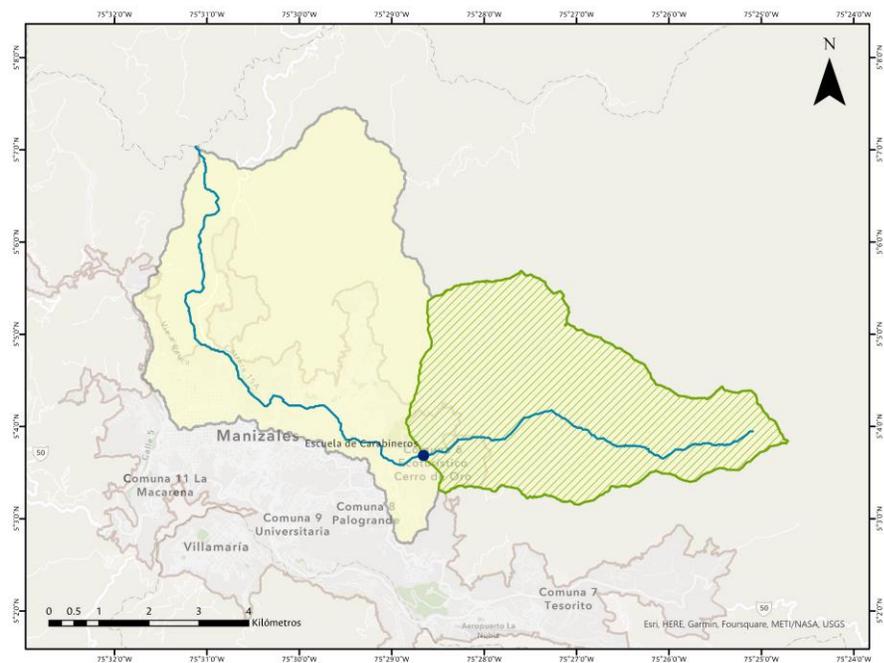
Mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica se delimitaron las subcuencas que se presenta en las siguientes figuras (Figura 4-15, Figura 4-16).

Figura 4-15. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto El Popal.



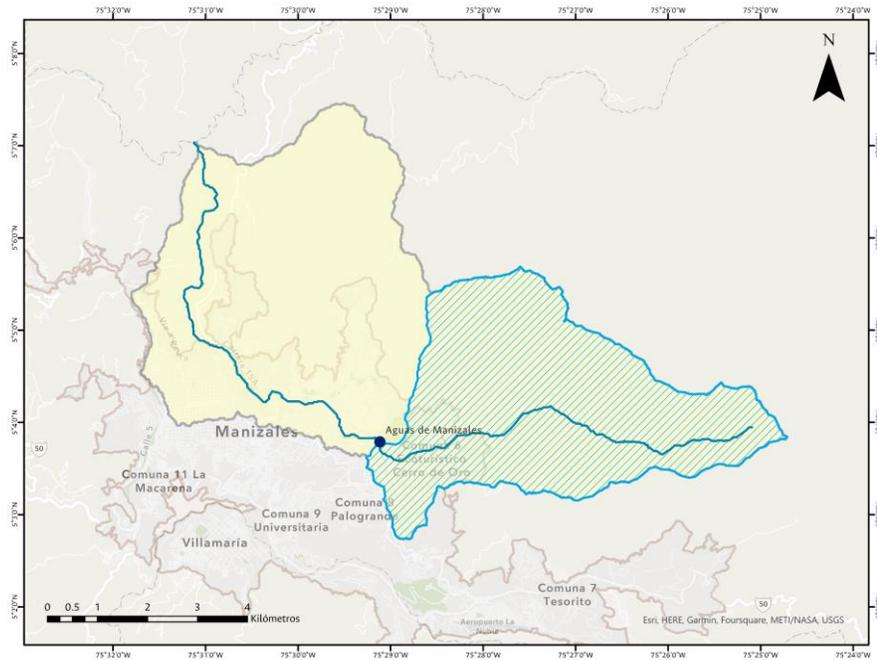
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-16. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico Escuela de Carabineros.



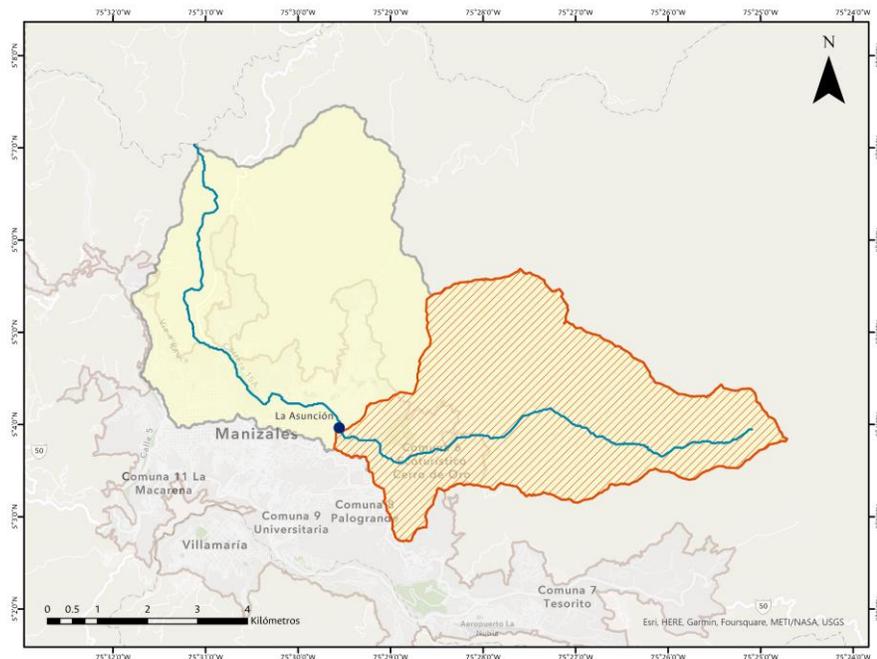
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-17. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico Aguas de Manizales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-18. Delimitación de la cuenca de la quebrada Olivares en punto crítico La Asunción.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Evaluación de parámetros de calibración de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos de tipo conceptual requieren de un proceso de calibración de los parámetros, garantizando que los parámetros que tienen sentido físico no lo pierdan durante la calibración, con el objeto de asegurar la coherencia de los modelos y de disminuir el efecto de la equifinalidad en los parámetros de los modelos. Posteriormente, los resultados de la calibración deben someterse a un proceso de validación para poder ser utilizados en períodos más extensos de simulación.

La iteración de los parámetros correspondientes a cada modelo permitió que se obtuviera el mejor resultado posible, tanto en indicadores numéricos de desempeño como en ajuste visual, principalmente en el ajuste de la curva de duración de caudales. Con el fin de facilitar el proceso de calibración manual de los modelos hidrológicos agregados se utilizó la hoja de cálculo desarrollada por Jorge Julián Vélez Upegui para el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Nacional, Sede Manizales.

Se tuvieron en cuenta tres criterios numéricos para la evaluación del desempeño de los modelos:

- Raíz de error cuadrado medio (RMSE): Mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos.
- PBIAS: Mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que los datos observados.
- Índice de Nash-Sutcliffe (NSE): Mide que proporción de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Los rangos para su evaluación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4-9. Evaluación del índice NSE.

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011).

4.4.3 Modelos hidrológicos agregados

4.4.3.1 Calibración de modelos hidrológicos

La calibración de modelos hidrológicos en la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal se realizó en el periodo comprendido entre las fechas 07/09/2010 y 28/01/2016. Los modelos hidrológicos empleados adoptan un enfoque conceptual, lo que puede implicar la presencia de desafíos relacionados

con la equifinalidad de los parámetros. Para mitigar la incertidumbre inherente a su estimación, se sugiere establecer un intervalo aceptable para cada parámetro, basado en la experiencia adquirida en cuencas colombianas similares. Además, se ha observado una coherencia en los patrones de almacenamiento y flujo dentro del modelo, lo que confiere una validez lógica y física al proceso de calibración. En este contexto, se anticipa que los parámetros óptimos identificados manualmente reflejen un óptimo global dentro del rango establecido.

La calibración de modelos hidrológicos busca minimizar los índices de desempeño lo que puede conducir a un sobreajuste de los picos de caudal. Sin embargo, para garantizar la adecuada representación del comportamiento de la descarga de la cuenca durante períodos de caudales bajos, como estiajes estacionales y sequías, es necesario verificar que la Curva de Duración de Caudales (CDC) generada por el modelo durante el periodo de calibración sea consistente con la observada, mostrando correspondencia entre ambas distribuciones para validar la calidad del modelo (Vélez Upegui et al., 2022).

Se evaluaron los modelos TPHM, Tres tanques, SIMHYD, AWBM, HBV y SHIA, en cada caso se evidencia que los parámetros de calibración y condiciones iniciales seleccionadas manualmente tienen un sentido lógico, físico y se encuentran dentro de los rangos admisibles, por lo tanto, se consideran aceptables. Los indicadores de desempeño obtenidos para los modelos considerados a escala diaria se presentan en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de calibración. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.

Indicador	TPHM	Tres tanques	SIMHYD	AWBM	HBV	SHIA
RMSE	78.31	29.13	38.9	29.71	41.4	5.73
Índice Nash	0.74	0.54	0.19	0.53	0.08	0.39
PBIAS	10.37	-1.6	1.97	0.12	5.35	-1.13

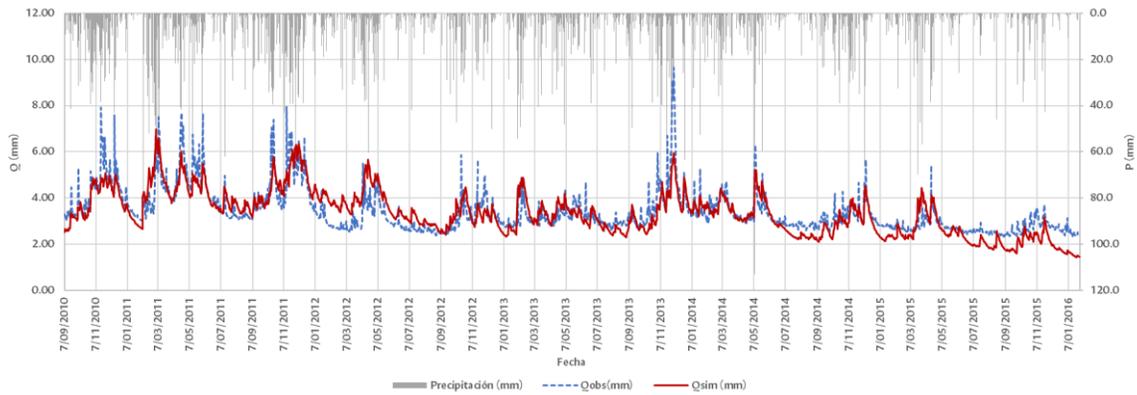
Fuente: Elaboración propia.

En general, se obtuvieron resultados satisfactorios en la totalidad de los modelos, sin embargo, se priorizó una baja diferencia en volumen y la reproducción de la curva de duración de caudales. Así, se resalta el desempeño de los modelos tres tanques, AWBM, HBV y SHIA, aunque sus índices de desempeño no son los más convenientes representan de manera sobresaliente la distribución de probabilidad de caudales.

A pesar de que el índice de Nash obtenido en la evaluación del modelo TPHM presenta un ajuste muy bueno, tanto la representación de los caudales diarios observados como el ajuste en la curva de duración de caudales demuestran resultados deficientes. Resultados similares se obtuvieron en la calibración del modelo SIMHYD.

Se destaca la capacidad de los modelos de tres tanques y SHIA para la simulación notable de la serie de caudales diarios observados y el buen ajuste en la totalidad de la curva de duración de caudales, manteniendo la cantidad de flujos esperados para cada estructura de modelo. A manera de ilustración, se presenta en la Figura 4-19 los caudales observados y simulados por el modelo tres tanques en el periodo de calibración, en donde se evidencia su desempeño satisfactorio en la representación de caudales bajos y en la conservación de la dinámica del cauce en el periodo de referencia.

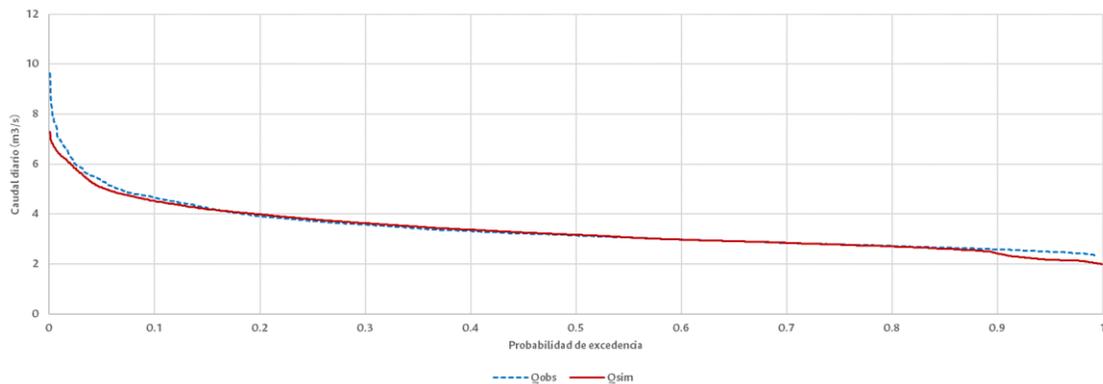
Figura 4-19. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, se presenta en la curva de duración de caudales producida por el modelo SHIA, en la cual se demuestra un ajuste excelente en la totalidad de la curva.

Figura 4-20. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.



Fuente: Elaboración propia.

El Anexo 8.5 proporciona detalle sobre los parámetros iniciales y aquellos sujetos a calibración, así como todo el material gráfico asociado a la simulación de caudales y curvas de duración.

4.4.3.2

4.4.3.2 Validación de modelos hidrológicos

La validación de modelos se realizó en el periodo comprendido entre las fechas 10/03/2016 y 31/10/2018. Se conservaron los parámetros obtenidos en la calibración y se iteraron las condiciones iniciales de manera que se obtuviera el mejor resultado posible, tanto en indicadores numéricos de desempeño como en ajuste visual, principalmente en el ajuste de la curva de duración de caudales. Se aclara que se evidencia un cambio en la tendencia positiva de caudales en comparación con el periodo de calibración, por lo tanto, se considera la posibilidad de que los modelos presenten un menor desempeño.

Se evaluó el desempeño de los mismos modelos considerados anteriormente, preservando parámetros de calibración y condiciones iniciales con sentido lógico, físico y dentro de los rangos admisibles, sin embargo, en el proceso de evaluación de métricas fueron descartados los modelos SIMHYD y AWBM, ya que no fue posible la obtención de resultados aceptables. Los indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de validación para los modelos considerados se presentan en la *Tabla 4-11*.

Tabla 4-11. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de validación. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.

Indicador	TPHM	Tres tanques	HBV	SHIA
RMSE	66.67	27.20	32.20	5.26
Índice Nash	0.62	0.12	-0.23	-0.13
PBIAS	3.47	3.92	9.13	2.59

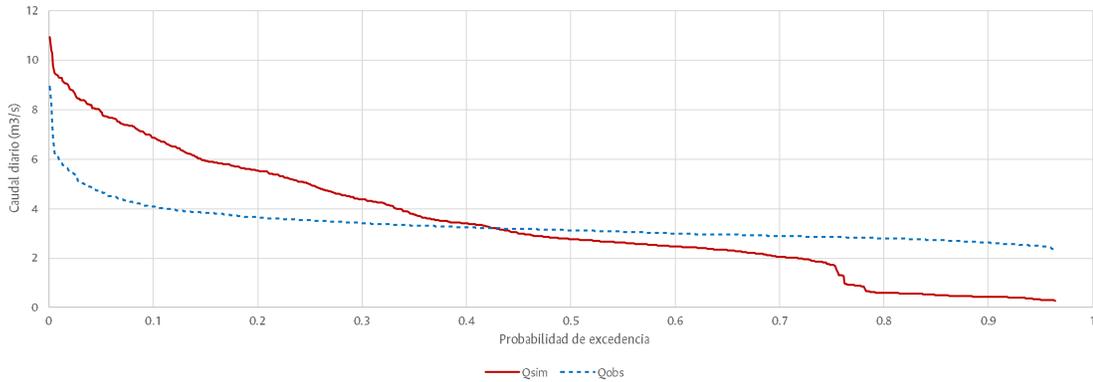
Fuente: *Elaboración propia.*

De la misma manera que en el proceso de calibración, los mejores indicadores de desempeño se obtuvieron en la evaluación del modelo TPHM, sin embargo, en la representación de los caudales observados y simulados no se observa coherencia. La curva de duración de caudales demuestra un ajuste insuficiente en su totalidad, presentando diferencias tanto en la simulación de caudales altos como bajos, como se presenta a modo de ejemplo en la *Figura 4-21*.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con este modelo tanto en el proceso de calibración como en la validación, no se considerará su uso en el enfoque multimodelo ni en el proceso de simulación. Si bien las métricas de desempeño son satisfactorias, se concluye que su uso no es apropiado para las características locales.

En el proceso de validación se destaca el desempeño de los modelos de tres tanques, HBV y SHIA, aunque se evidencia que los valores de los índices de desempeño numéricos disminuyeron significativamente su magnitud, incluso alcanzando índices de Nash negativos. Sin embargo, considerando la reproducción de la serie de caudales diarios y la curva de duración de caudales, se resolvió su uso posterior en la etapa de simulación.

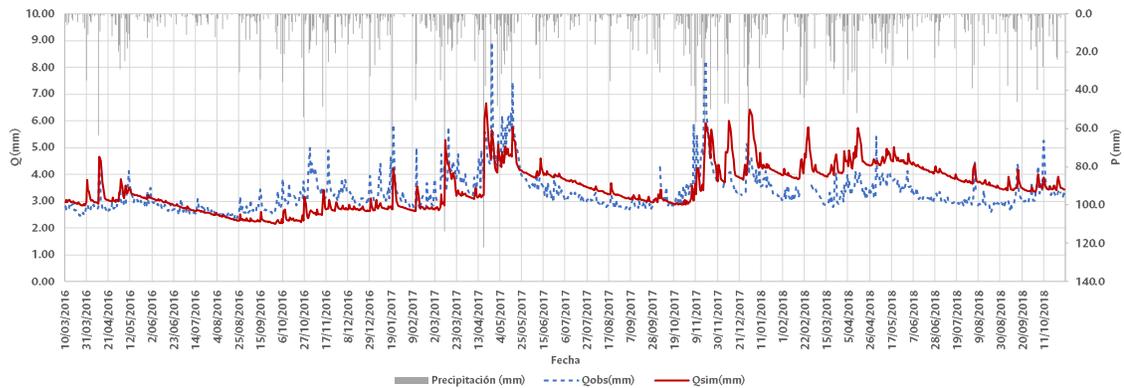
Figura 4-21. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo TPHM.



Fuente: Elaboración propia.

Como ejemplo, se presenta en la Figura 4-22 los caudales observados y simulados por el modelo HBV en el periodo de validación, en donde se evidencia su desempeño aceptable en la representación de picos de caudal y en la conservación de la dinámica del cauce en el periodo de referencia.

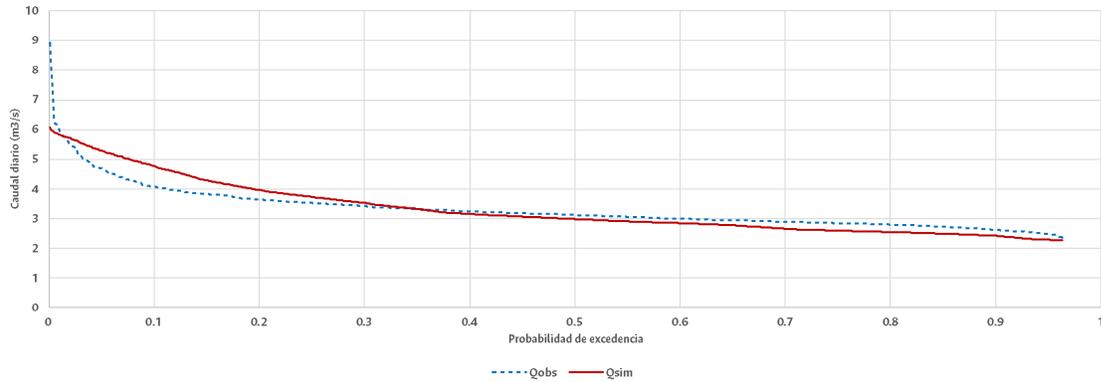
Figura 4-22. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo HBV.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso del modelo SHIA, aunque la simulación de caudales diarios presenta resultados menos ajustados, la curva de duración de caudales presentada en la Figura 4-23, demuestra un muy buen ajuste, conservando un patrón bueno con una sobrestimación de los caudales más altos, sin embargo, se considera que el modelo representa satisfactoriamente la curva de duración de caudales.

Figura 4-23. Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.



Fuente: Elaboración propia.

Como era esperado los resultados en la etapa de validación son inferiores a los obtenidos en la calibración, confirmando el impacto del cambio de tendencia en la serie de caudales en este periodo.

4.4.3.3 Simulación del periodo histórico

La simulación se realizó en el periodo comprendido entre las fechas 01/01/1989 y 31/10/2010, para abarcar aproximadamente 30 años. Se conservaron los parámetros obtenidos en la calibración (Anexo 8.5), dado que el periodo de registro de la estación hidrométrica considerada es más corto, solo se tuvo en cuenta para el cálculo de métricas de desempeño en el intervalo común entre las dos series. Los indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de simulación para los modelos considerados se presentan en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de simulación. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.

Indicador	Tres tanques	HBV	SHIA
RMSE	52.01	74.55	8.76
Índice Nash	0.20	-0.27	0.14
PBIAS	-1.15	9.26	2.68

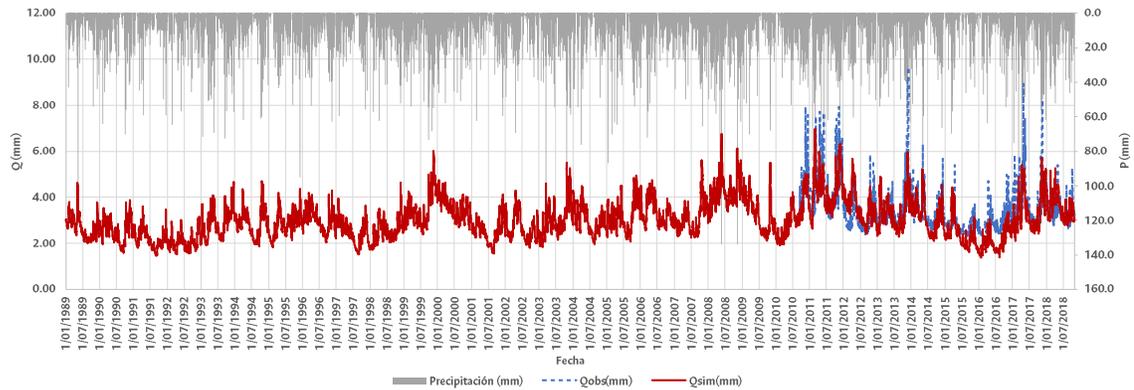
Fuente: Elaboración propia.

Así como en la validación, en la fase de simulación se evaluó el desempeño de los modelos SIMHYD y AWBM tanto numéricamente como en representación gráfica de la serie de caudales diarios y la curva de duración de caudales y se obtuvieron resultados altamente deficientes por lo tanto las series producidas para el periodo histórico por estos modelos se descartan para el ensamble multimodelo posterior.

Por otra parte, los modelos de tres tanques, HBV y SHIA, presentan resultados satisfactorios tanto en comportamiento como en magnitud en la simulación de las observaciones disponibles en el periodo.

Como ejemplo, se presenta en la Figura 4-24 la serie obtenida con el modelo de tres tanques para el periodo histórico.

Figura 4-24. Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.3.4 Balance hídrico del periodo histórico

A partir de las modelaciones realizadas, se calcula el balance hídrico anual expuesto en la Tabla 4-13. Dicho balance resume los procesos involucrados en la simulación y sus correspondientes valores. Considerando el desempeño de los modelos analizados se decidió asignar los siguientes pesos en el cálculo de la serie multimodelo: SHIA (40%), HBV (40%) y 3 tanques (20%). Si bien la representación de los caudales en el modelo de tres tanques tiene un desempeño sobresaliente, no considera el componente de evapotranspiración y presenta un componente de interflujo muy inferior, por lo tanto, se les da prioridad a los demás modelos con flujos más contrarrestados.

Finalmente, la serie producida en comparación con la serie histórica disponible produce un error volumétrico bajo y un índice de Nash satisfactorio, por lo cual, se considera adecuado el uso del enfoque multimodelo para la simulación de caudales a partir de series sintéticas de precipitación.

Tabla 4-13. Resumen del balance hídrico de la quebrada Olivares en estación El Popal.

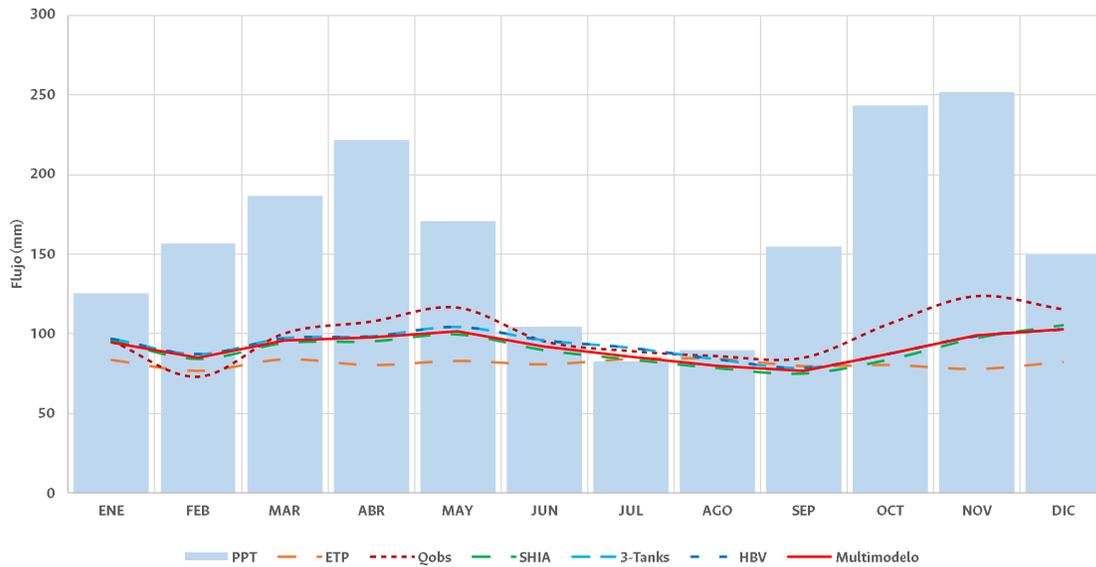
Variable	SHIA	3-Tanks	HBV	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
PBIAS	2.68	-1.15	9.26	-0.38	2.68	7.94	3.33
RMSE	8.76	52.01	74.55	17.41	52.01	70.04	269.84
NSE	0.14	0.20	0.27	0.16	0.20	0.25	0.23
Precipitación	1448.16	1448.16	1448.16				
Evapotranspiración	810.13	0.00	818.13	162.03	810.13	951.71	651.30
Esc. Superficial	0.03	275.84	17.29	3.48	17.29	278.55	62.10
Interflujo	185.99	0.97	38.73	8.53	38.73	300.61	90.08
Flujo base	892.12	817.11	1062.36	832.11	892.12	1062.36	945.21

Variable	SHIA	3-Tanks	HBV	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
Qsimulado	1078.14	1093.92	1118.38	1081.29	1093.92	1118.38	1097.39
Coef. Escorrentía	0.74	0.76	0.77	0.75	0.76	0.77	0.76
% ETR	55.94	0.00	56.49	11.19	55.94	65.72	44.97
% Esc. Dir	0.00	19.05	1.19	0.24	1.19	19.23	4.29
% Interflujo	12.84	0.07	2.67	0.59	2.67	20.76	6.22
% Flujo Base	61.60	56.42	73.36	57.46	61.60	73.36	65.27

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de verificar las magnitudes y la estacionalidad seguida por la serie generada con el enfoque multimodelo se agruparon y graficaron mensualmente los valores obtenidos por la serie definitiva, se aprecia que conserva los momentos de mayor (mayo) y menor caudal (febrero y septiembre), subestimando el caudal en un menor grado en el segundo y tercer trimestre del año, como se aprecia en la Figura 4-25.

Figura 4-25. Comportamiento mensual del caudal observado y simulado (1989-2018). Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.3.5 Simulación de caudales en el periodo histórico en puntos críticos definidos

Teniendo en cuenta las inconsistencias presentadas en la serie observada de la estación de registro Aguas de Manizales, se procedió a verificar los datos recopilados, concluyendo que la curva de niveles versus caudales existente para la estación se produjo a partir de pocos puntos, por lo tanto, se considera que los caudales en esta sección no logran capturarse adecuadamente. Por esta razón, no se consideró realizar el proceso de calibración y validación de modelos agregados con la información disponible para este sector.

Debido a la importancia de caracterizar la amenaza de inundaciones en sectores posteriores a la estación El Popal, influenciados particularmente por el área urbana de la ciudad de Manizales y con mayor infraestructura vulnerable, se decidió considerar la cuenca como una cuenca natural, conservando los parámetros de calibración y validación obtenidos para la estación El Popal. Dicha determinación, responde a la capacidad de los modelos de simular satisfactoriamente los caudales pico en el cauce, hecho consistente con el planteamiento de modelación de caudales máximos en simulaciones posteriores. No obstante, a pesar de este criterio definido, fue necesario considerar la intervención urbana en el territorio y sus implicaciones en diferentes componentes de los modelos hidrológicos. Así, se disminuyeron los parámetros de almacenamiento capilar (H_u) y conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s) en el modelo SHIA, con el fin de que se simulara de manera más adecuada una zona urbana y de que los caudales simulados tuvieran la magnitud aproximada según los aforos realizados en los años 2017 y 2018 (Instituto de Estudios Ambientales, 2020). De la misma manera, en el modelo HBV se disminuyeron los parámetros asociados a la percolación y al máximo almacenamiento de humedad del suelo y, se aumentó el parámetro equivalente a la escorrentía directa. Por último, en el modelo de los tres tanques se incrementaron los parámetros a_{11} y a_{12} asociados al tanque que representa la escorrentía superficial.

Se conservó el enfoque multimodelo determinado para la estación El Popal, y los parámetros que se relacionaron anteriormente. A partir de las modelaciones realizadas, se calcula el balance hídrico anual para la zona urbana expuesto en la Tabla 4-14.

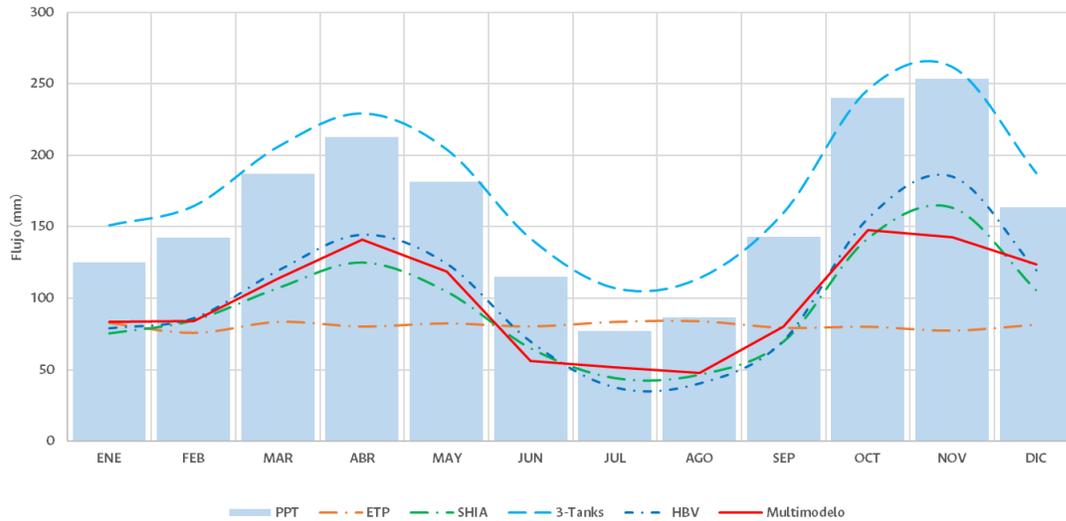
Tabla 4-14. Resumen del balance hídrico de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales.

Variable	SHIA	HBV	3-Tanks	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
Precipitación	1934.24	1934.24	1934.24				
Evapotranspiración	656.43	651.73	0.00	130.35	651.73	655.49	523.26
Esc. Superficial	637.02	852.44	1454.11	680.10	852.44	1333.77	886.61
Interflujo	0.12	77.20	0.57	0.21	0.57	61.88	31.04
Flujo base	363.86	122.97	431.74	171.15	363.86	418.16	281.08
Qsimulado	1000.99	1065.33	1886.41	1013.86	1065.33	1722.20	1203.81
Coef. Escorrentía	0.52	0.55	0.98	0.52	0.55	0.89	0.62
% ETR	33.94	33.69	0.00	6.74	33.69	33.89	27.05
% Esc.Dir.	32.93	44.07	75.18	35.16	44.07	68.96	45.84
% Interflujo	0.01	3.99	0.03	0.01	0.03	3.20	1.60
% Flujo Base	18.81	6.36	22.32	8.85	18.81	21.62	14.53

Fuente: Elaboración propia.

Como en el caso de la serie producida para la estación El Popal, se verificaron las magnitudes y la estacionalidad seguida por la serie generada, como se aprecia en la Figura 4-26.

Figura 4-26. Comportamiento mensual del caudal simulado (1989-2018). Cuenca de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales.



Fuente: Elaboración propia.

Este balance se aplicó a las secciones definidas para los puntos Carabineros, Aguas de Manizales y La Asunción, siendo el factor determinante el área de cada subcuenca en la definición de flujos. De esta manera, se definieron las series de caudales máximos para cada punto para la posterior definición de caudales de diseño.

4.5 Análisis de frecuencia de extremos hidrológicos

Con el fin de evaluar la recurrencia de eventos de hidrológicos en el escenario histórico y en escenarios prospectivos de cambio climático, se empleó el software AFINS 2.0 (2006) de la Universitat Politècnica de València para el análisis de la frecuencia de extremos de caudal y lluvia, en un punto dado. AFINS permite trabajar con información sistemática y no sistemática, bajo las suposiciones de estacionaridad e independencia de la muestra observada.

La variable aleatoria de interés es el máximo anual de caudal o precipitación, siendo crucial para la interpretación del período de retorno en años. AFINS ofrece diversas funciones de distribución de probabilidad acumulada, incluyendo Exponencial, LogNormal de 2 parámetros, Gumbel, Pareto de 3 parámetros, GEV, TCEV y SQRT-ETmáx para datos sin límite superior, y EV4, LN4 y TDF para datos con límite superior.

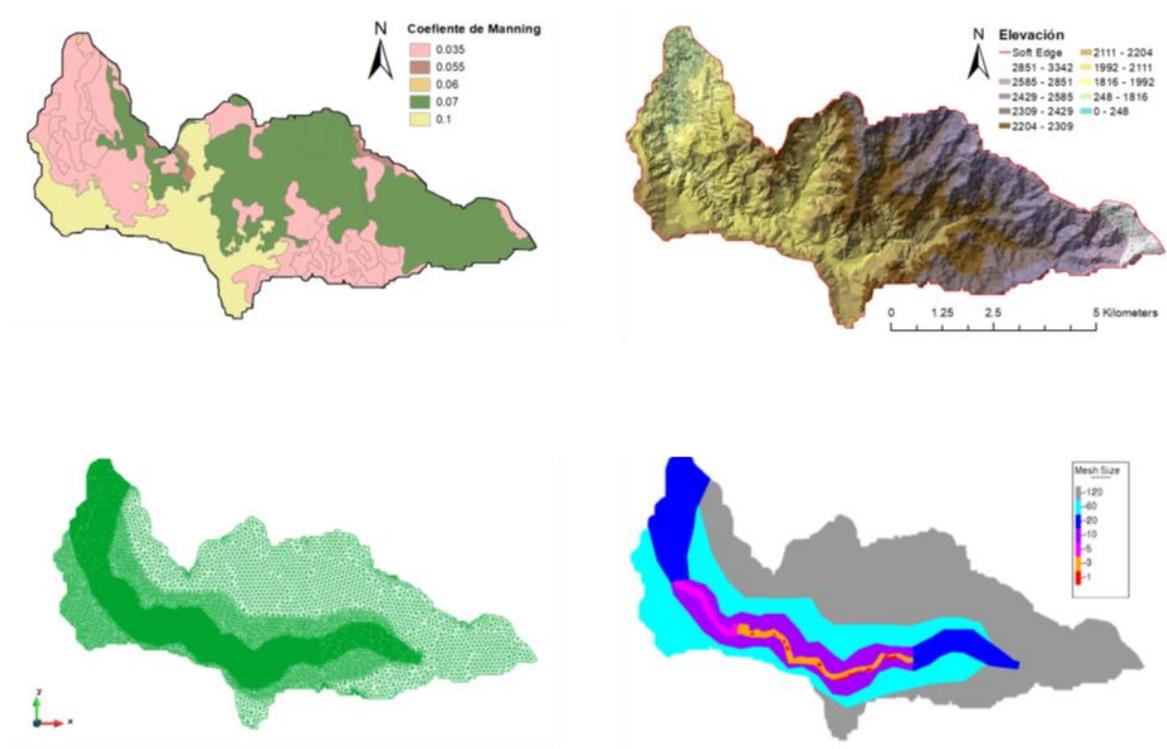
La estimación de los parámetros se realiza mediante el método de Máxima Verosimilitud, con la posibilidad de utilizar el método de los Momentos para una estimación inicial.

Es esencial tener en cuenta que AFINS se desarrolló utilizando IDL (Interactive Data Language) y se ejecuta utilizando IDL Virtual Machine 6.1, que permite la ejecución sin licencia de programas construidos bajo IDL 6.1.

4.6 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó a partir del modelo desarrollado por Parra Gómez (2023) en Iber para la cuenca de la quebrada Olivares. Dicho modelo se construyó a partir de la definición de coeficientes de rugosidad de Manning de la cuenca según la Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Gobierno Español (Parra Gómez, 2023), la distribución del coeficiente se presenta sección superior izquierda de la *Figura 4-27*. El modelo digital de elevación de la quebrada Olivares usado en el modelo hidrológico se construyó a partir imágenes satelitales obtenidas del visor Land Viewer con celdas de tamaño 9.5 m x 9.5 m, densificadas en la zona urbana priorizando la zona cercana al cauce con curvas de nivel metro a metro sobre la base de imágenes suministradas por MASORA, empresa que realiza la actualización catastral de Manizales (sección superior derecha *Figura 4-27*).

Figura 4-27. Mapas considerados en el modelo hidráulico.

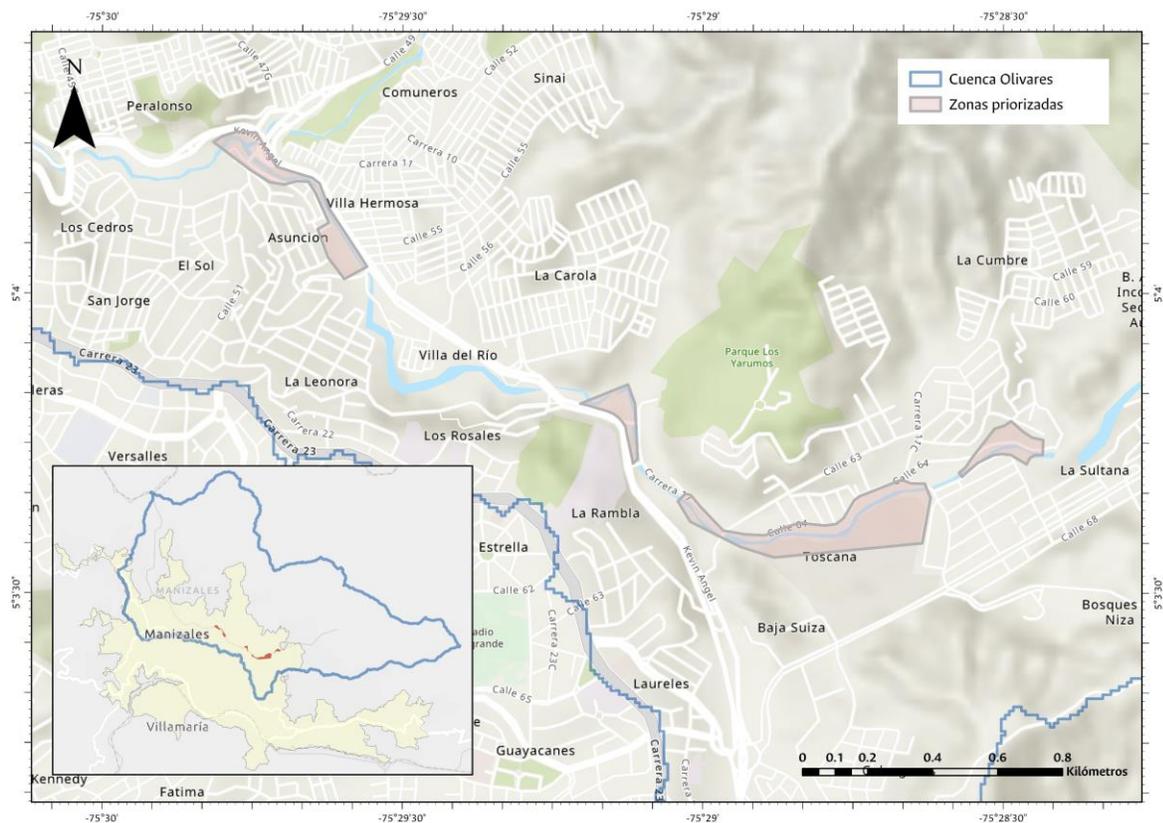


Fuente: Parra Gómez (2023).

El modelo hidráulico realizado en Iber incluyó la presencia de once estructuras civiles sobre el cauce. Dichas estructuras modifican la malla con el fin de representar su interferencia en el flujo. En este caso, se contempló el uso de una malla no estructurada seccionada en elementos de diferentes tamaños según la necesidad de precisión (sección inferior izquierda de la *Figura 4-27*). Las zonas más cercanas al cauce principal, cuenta con elementos de 1 m de lado o máximo 3 m de lado, en las llanuras de inundación con elementos de máximo 5 m de lado y en la medida que aumenta la distancia a la quebrada se trabajan elementos de lados 10, 20, 60 y 120 m, debido a que en estas zonas no es relevante una precisión topográfica, como se presenta en la sección inferior derecha de la *Figura 4-27* (Parra Gómez, 2023).

De esta manera, se incluyeron en los elementos previos de la malla que representan el cauce al punto crítico, los caudales de diseño calculados en la sección de Resultados a partir de la modelación hidrológica y se simuló la respuesta del cauce y las zonas de inundación en los sectores priorizados (*Figura 4-28* y *Figura 4-29*).

Figura 4-28. Ubicación de zonas priorizadas para análisis hidráulico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-29. Zonas priorizadas para análisis hidráulico.

Zona 1. El Popal



Zona 2. Escuela de Carabineros



Zona 3. Aguas de Manizales



Zona 4. La Asunción



Fuente: Elaboración propia. Google Maps (2024).

5. Resultados

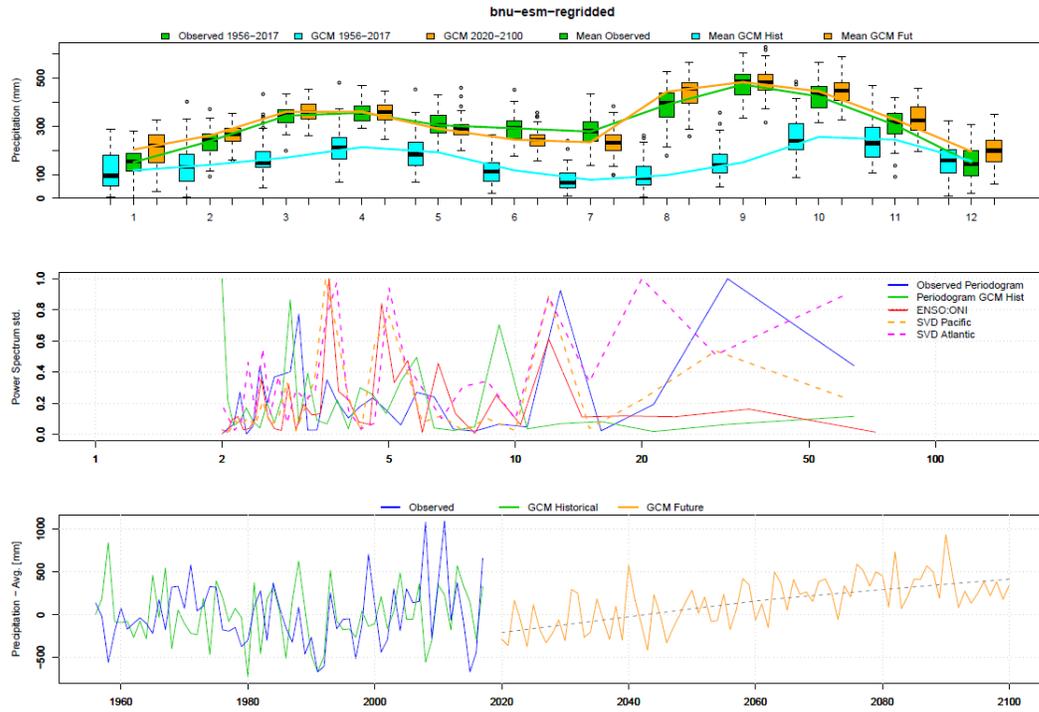
5.1 Priorización de Modelos Climáticos Globales -MCG-

La fase de priorización de los MCG a utilizar partió de la verificación de que el patrón estacional histórico descrito por el clima observado (1956 – 2018) fuera representado por los modelos en su periodo de línea base (1805 – 2005). El análisis de patrones se realizó a partir de los productos obtenidos del procesamiento de los resultados de los MCG en el cuadrante en el cual se emplaza la cuenca. El procesamiento y posterior generación de series sintéticas se realizó mediante la ejecución de la herramienta desarrollada en lenguaje R por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (*National Center for Atmospheric Research -NCAR-*) de los Estados Unidos y el Instituto de Ambiente de Estocolmo (*Stockholm Environment Institute -SEI-*) para este fin, previa autorización de uso por parte del SEI, actual custodio de la información.

En las siguientes figuras (Figura 5-1 a Figura 5-5) se presentan algunos ejemplos de resultados obtenidos con el fin de evaluar la representación de atributos climáticos a diferentes escalas temporales. Para cada modelo se presenta, en primer lugar, el patrón estacional histórico de la precipitación (observaciones y MCG) y proyectado por el modelo; el patrón espectral o periodograma de las señales observadas, del MCG y del indicador macroclimático ENSO-ONI y por último, la media de la precipitación observada y simulada por el modelo a escala anual, y la anomalía de la variable hasta el año 2100. Se priorizó en este caso la representación del patrón bimodal de precipitación en la zona de estudio, con una temporada de lluvias entre los meses marzo – mayo y una siguiente entre los meses septiembre – noviembre (Ver Figura 4-3).

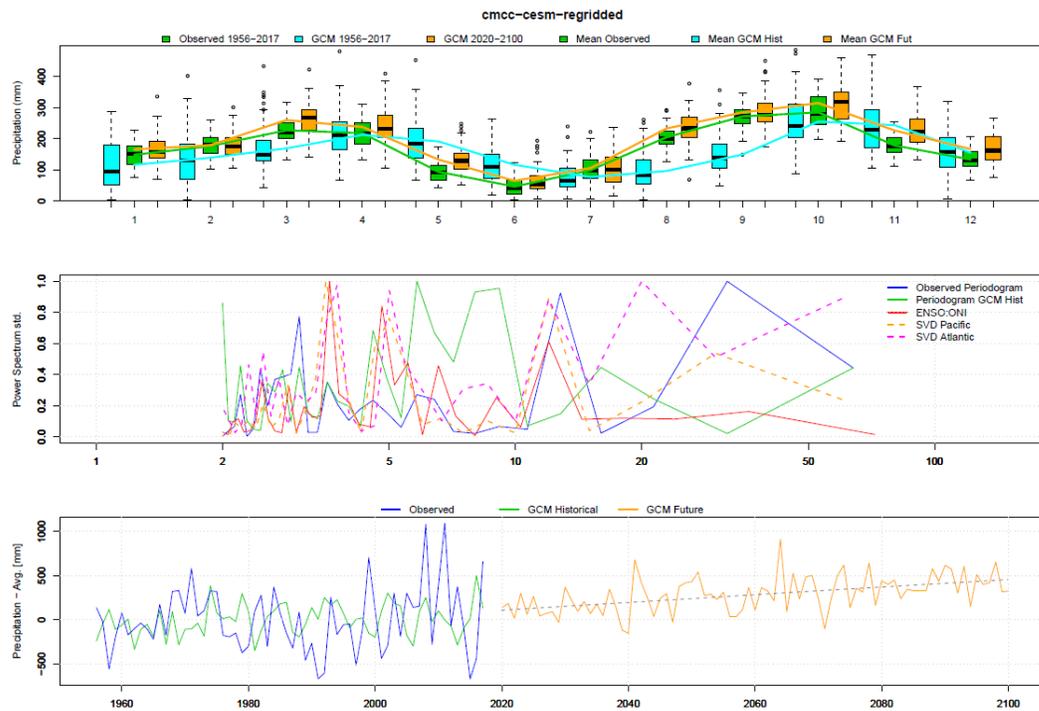
En el Anexo 8.4 se presentan los resultados obtenidos para la totalidad de modelos contemplados.

Figura 5-1. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (BNU-ESM).



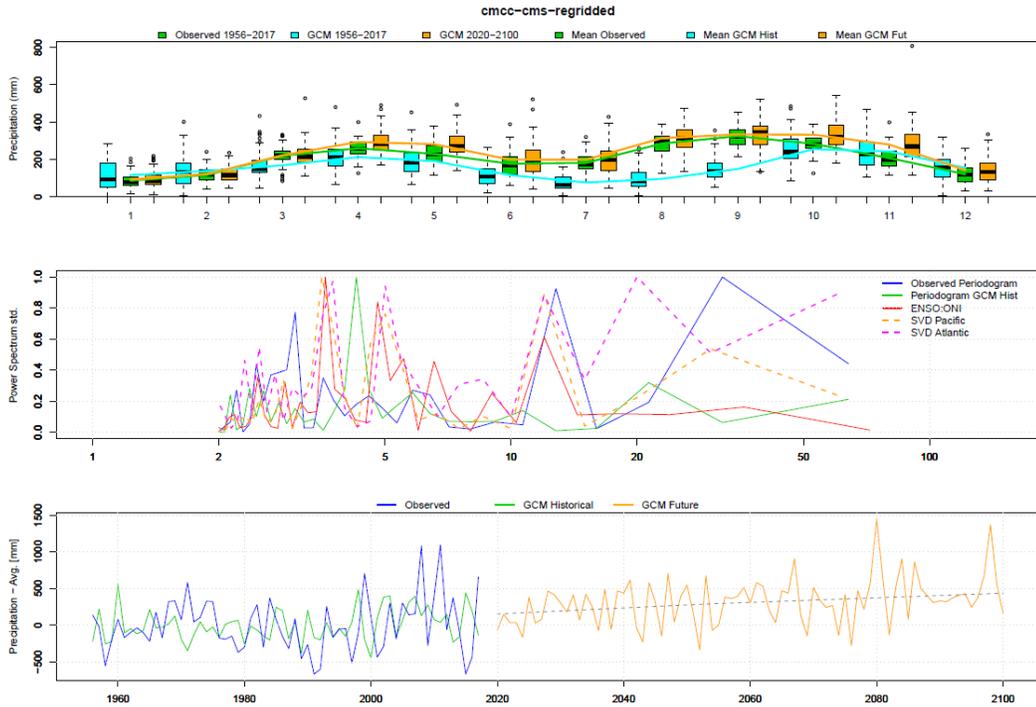
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-2. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (CMCC-CESM).



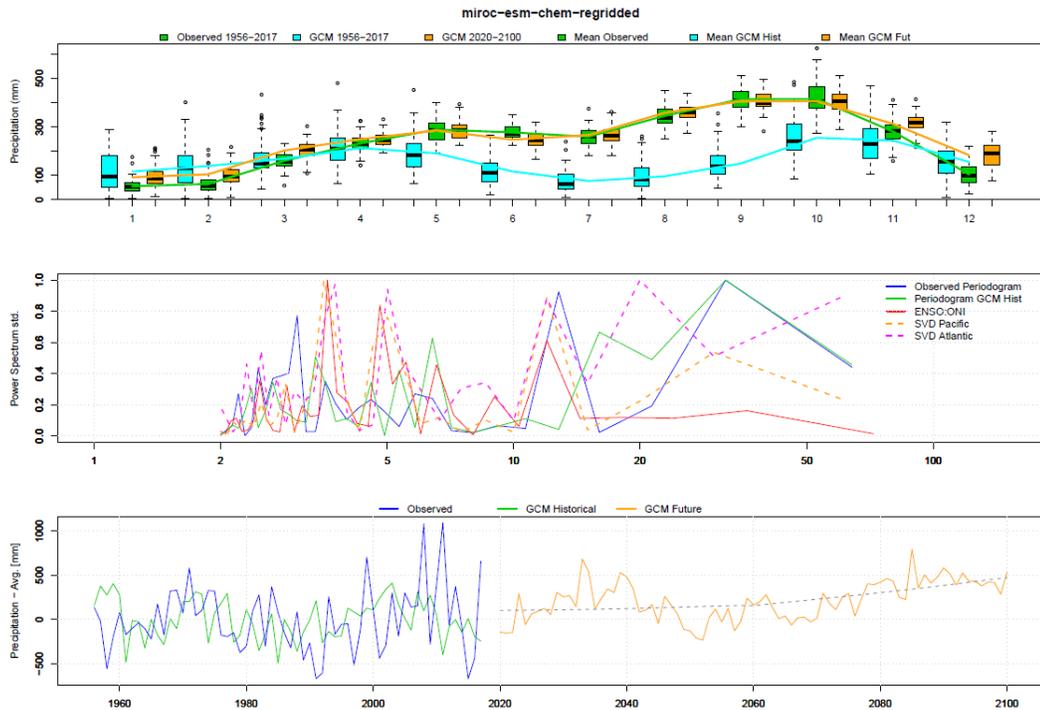
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-3. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (CMCC-CMS).



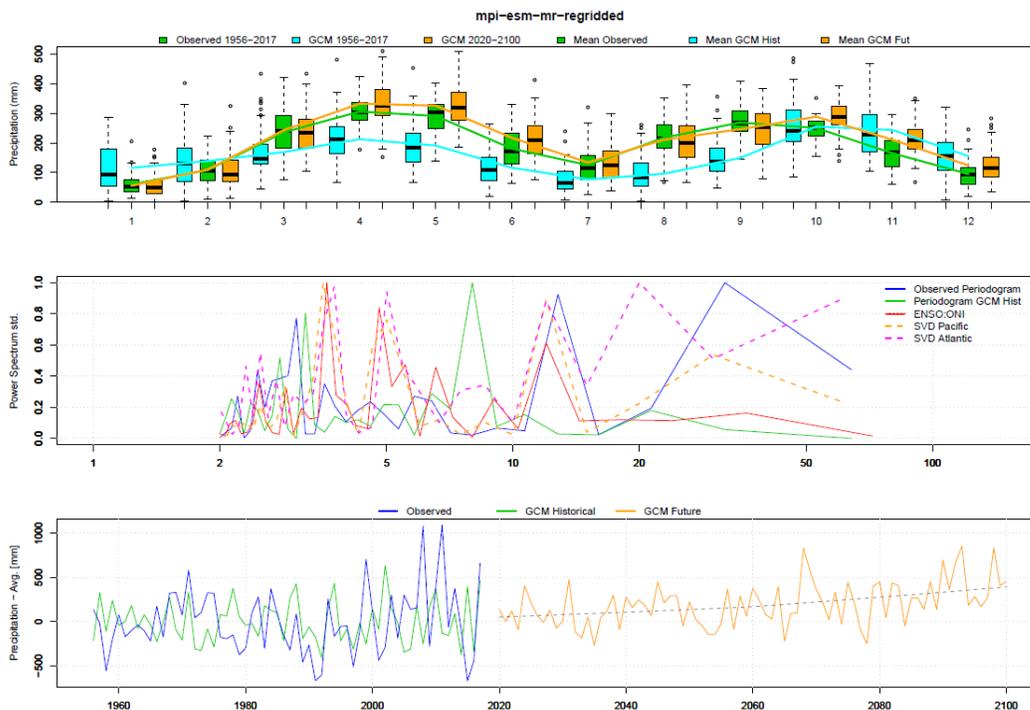
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-4. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (MIROC-ESM-CHEM).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-5. Resultados de atributos climáticos a escala temporal observados y simulados (MPI-ESM-MR).



Fuente: Elaboración propia.

Confirmada la simulación del régimen de lluvias y con el fin de valorar la representación de la dinámica de la cuenca a diferentes escalas temporales se usaron las métricas de desempeño enunciadas en la Tabla 4-4, se comparó la magnitud de los atributos históricos de la serie climática y aquellos asociados a cada MCG. Con el fin de explorar detalladamente los resultados de los atributos en la serie, se consideró su división en periodos de 30 años, por lo tanto, se presentan los resultados en los intervalos 1956 - 1985 y 1986 - 2018 (Tabla 5-1 y Tabla 5-2).

Tabla 5-1. Atributos climatológicos observados y simulados en los MCG en el periodo 1956 - 1985.

Modelo	Fracción de días con lluvia	Longitud media de días húmedos	Longitud media de días secos	Percentil 95	Sesgo	Media diaria
Serie histórica	0.49	2.64	2.73	25.20		5.27
BCC-CSM1-1-M	0.97	40.78	1.39	26.42	0.69	8.79
BCC-CSM1-1	0.78	12.12	3.35	46.19	1.08	10.81
BNU-ESM	0.93	60.50	4.81	20.62	0.96	10.15
CESM1-BGC	0.81	15.26	3.54	30.59	0.68	8.71
CESM1-CAM5	0.87	27.07	3.87	26.77	0.72	8.92
CMCC-CESM	0.82	13.86	3.05	13.84	0.08	5.58
CMCC-CM	0.78	7.79	2.19	29.47	0.52	7.91
CMCC-CMS	0.83	11.13	2.28	19.18	0.29	6.70
GFDL-CM3	0.94	31.26	2.13	14.11	0.21	6.27

Modelo	Fracción de días con lluvia	Longitud media de días húmedos	Longitud media de días secos	Percentil 95	Sesgo	Media diaria
GFDL-ESM2G	0.57	16.91	12.62	17.34	-0.04	4.99
GFDL-ESM2M	0.62	18.73	11.65	18.55	0.09	5.65
IPSL-CM5A-LR	0.75	21.48	7.18	25.18	0.66	8.60
IPSL-CM5A-MR	0.80	19.12	4.71	39.83	1.28	11.83
MIROC5	0.98	100.81	1.99	51.23	3.16	21.61
MIROC-ESM-CHEM	0.85	18.67	3.35	20.26	0.54	7.99
MIROC-ESM	0.86	20.25	3.34	20.75	0.60	8.30
MPI-ESM-MR	0.76	9.27	2.96	18.29	0.22	6.32

Fuente: Elaboración propia.

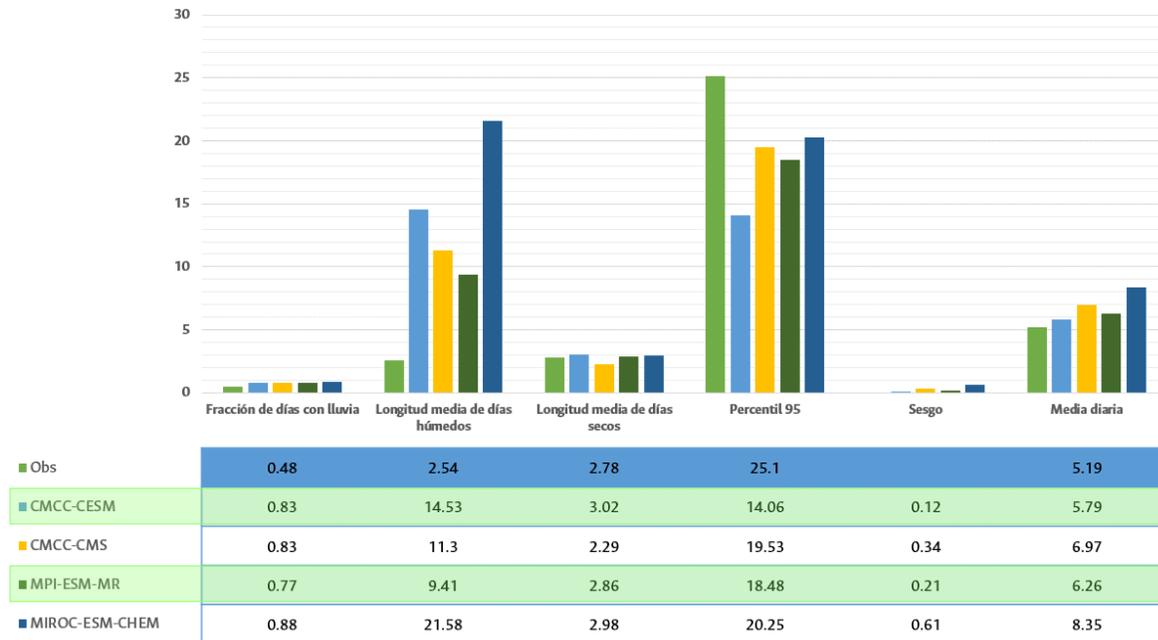
Tabla 5-2. Atributos climatológicos observados y simulados en los MCG en el periodo 1986 – 2018.

Modelo	Fracción de días con lluvia	Longitud media de días húmedos	Longitud media de días secos	Percentil 95	Sesgo	Media diaria
Serie histórica	0.48	2.54	2.78	25.10		5.19
BCC-CSM1-1-M	0.97	44.87	1.35	25.05	0.67	8.65
BCC-CSM1-1	0.77	11.61	3.53	49.72	1.10	10.91
BNU-ESM	0.94	72.33	4.61	20.54	0.94	10.08
CESM1-BGC	0.81	16.01	3.80	31.82	0.72	8.92
CESM1-CAM5	0.87	28.17	4.06	28.93	0.82	9.44
CMCC-CESM	0.83	14.53	3.02	14.06	0.12	5.79
CMCC-CM	0.78	7.62	2.19	30.67	0.56	8.10
CMCC-CMS	0.83	11.30	2.29	19.53	0.34	6.97
GFDL-CM3	0.93	31.21	2.26	13.71	0.18	6.13
GFDL-ESM2G	0.61	15.87	10.18	18.76	0.06	5.51
GFDL-ESM2M	0.62	17.78	10.69	18.92	0.11	5.77
IPSL-CM5A-LR	0.77	21.98	6.43	25.67	0.71	8.87
IPSL-CM5A-MR	0.80	18.73	4.79	40.38	1.32	12.05
MIROC5	0.98	85.42	1.60	50.93	3.13	21.44
MIROC-ESM-CHEM	0.86	21.46	3.53	19.76	0.53	7.96
MIROC-ESM	0.88	21.58	2.98	20.25	0.61	8.35
MPI-ESM-MR	0.77	9.41	2.86	18.48	0.21	6.26

Fuente: Elaboración propia.

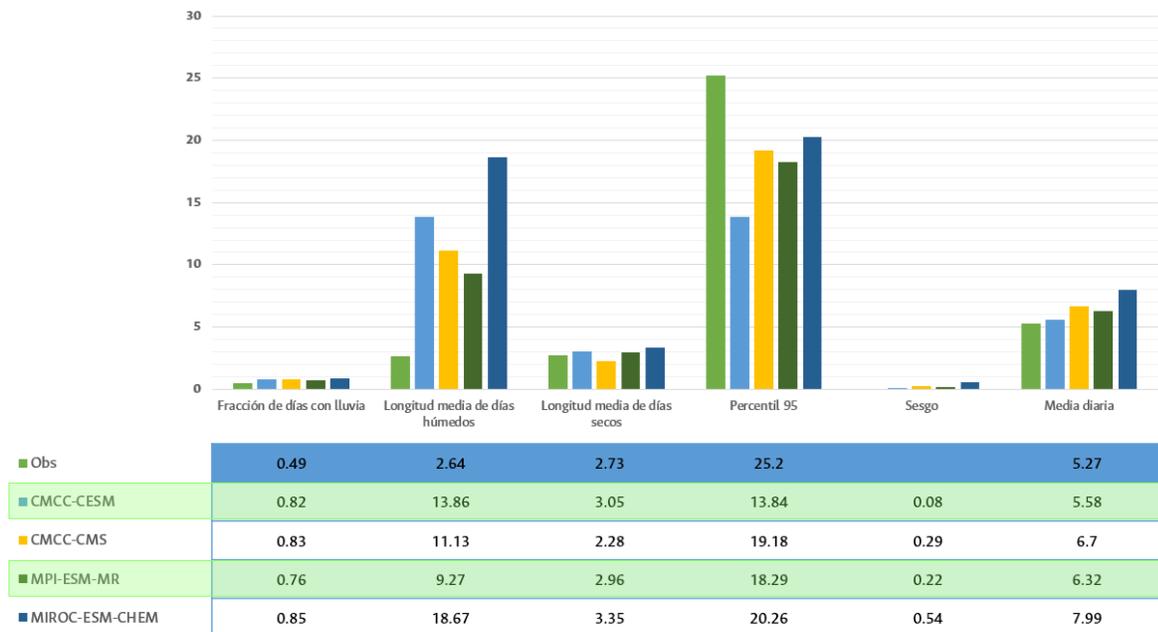
La comparación del patrón estacional histórico observado entre los modelos y el clima local (1956 - 2018) y el análisis de atributos climatológicos observados y simulados, permitieron priorizar algunos MCG sobre otros, reduciendo el grupo a cuatro (4) modelos: CMCC-CESM, CMCC-CMS, MPI-ESM-MR y MIROC-ESM-CHEM resaltados en azul, cuyos atributos se presentan en la Figura 5-6 y en la Figura 5-7.

Figura 5-6. Comparación de atributos climáticos históricos de los MCG con el clima observado para el periodo 1956 - 1985).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-7. Comparación de atributos climáticos históricos de los MCG con el clima observado para el periodo 1986 - 2018).



Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia, en parámetros como la longitud media de días húmedos y el valor del percentil 95, se encuentra una notable heterogeneidad en la gama de resultados obtenidos mediante los MCG. Considerando los demás atributos en ambos periodos definidos, principalmente la media diaria de precipitación [mm] simulada por los modelos y el sesgo presentado con respecto a la serie observada, se demuestran tanto subestimaciones como sobrestimaciones, sin embargo, que los modelos CMCC-CESM y MPI-ESM-MR presentan mejores resultados al describir comportamientos similares a la serie histórica de la cuenca, por lo tanto, se seleccionaron estos modelos para la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura a largo plazo y su posterior reducción de escala mediante el método k-NN *bootstrapping*.

5.2 Generación de series sintéticas de precipitación y temperatura

Seleccionados los modelos con mejores resultados se procedió a la generación de las series sintéticas para el periodo proyectado de las variables precipitación y temperatura. La estimación de la temperatura se realiza mediante la aplicación de la metodología detallada en la Sección 4.3.3 *Reducción de escala*. Esta metodología parte de la media móvil de las señales de temperatura en los modelos considerados.

La metodología k-NN se ejecutó 5² veces para los modelos CMCC-CESM y MPI-ESM-MR, ejecuciones suficientes para generar series climáticas sintéticas con diversos atributos que apoyen la construcción de una narrativa de cambio climático. De las series sintéticas generadas se seleccionó una por modelo, dando prioridad a aquellas con mayor magnitud en los parámetros longitud media de días húmedos y fracción de días con lluvia. Dicha prioridad se otorgó considerando las etapas posteriores de este estudio, respondiendo a la necesidad de simular escenarios de inundación en el territorio de la cuenca bajo un contexto de cambio climático.

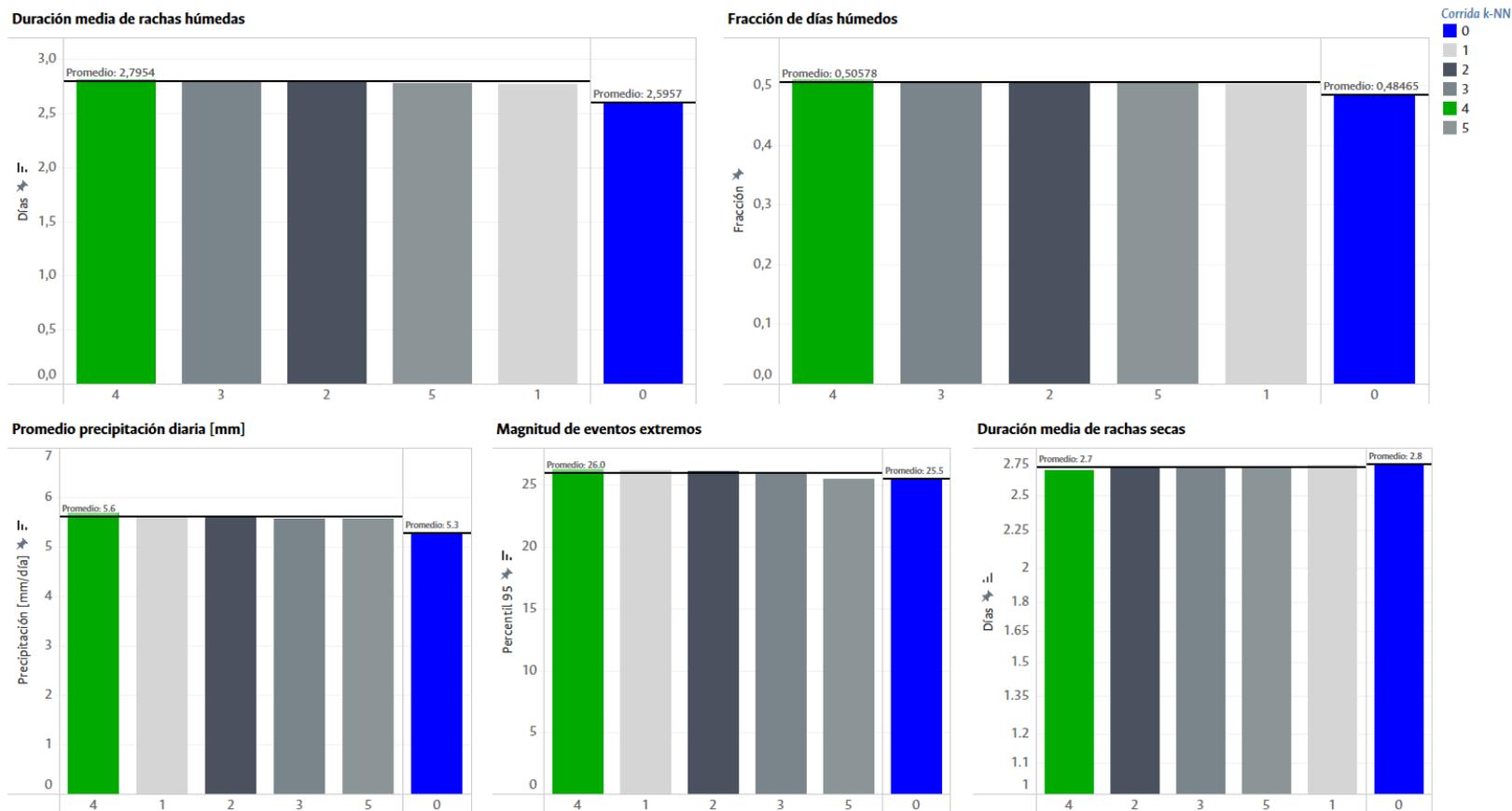
En la *Figura 5-8* y *Figura 5-9* se presentan los resultados de los cinco atributos climáticos usados para evaluar el desempeño de las series sintéticas generadas, los cuales permitieron la selección de dos series por MCG (MPI-ESM-MR y CMCC-CESM) que a su vez, permitieron construir y respaldar una narrativa de cambio climático. Se resaltan en color verde aquellas series que presentan atributos más deseables bajo el contexto planteado y en color azul los atributos de clima histórico como referencia.

En el caso del modelo MPI-ESM-MR se observa que la serie sintética número 4 presenta las condiciones deseadas en el contexto propuesto, superando a las demás series en los parámetros asociados a periodos húmedos en la zona y un valor inferior en el caso de duración media de rachas secas. Por su parte, el

² La base de datos asociada a los Modelos Climáticos Globales -MCG- y su procesamiento para la obtención de resultados en la grilla espacial definida requiere gran capacidad computacional, por este motivo, se trabajó un número moderado de simulaciones. Para este fin se recomienda el uso de una Work Station.

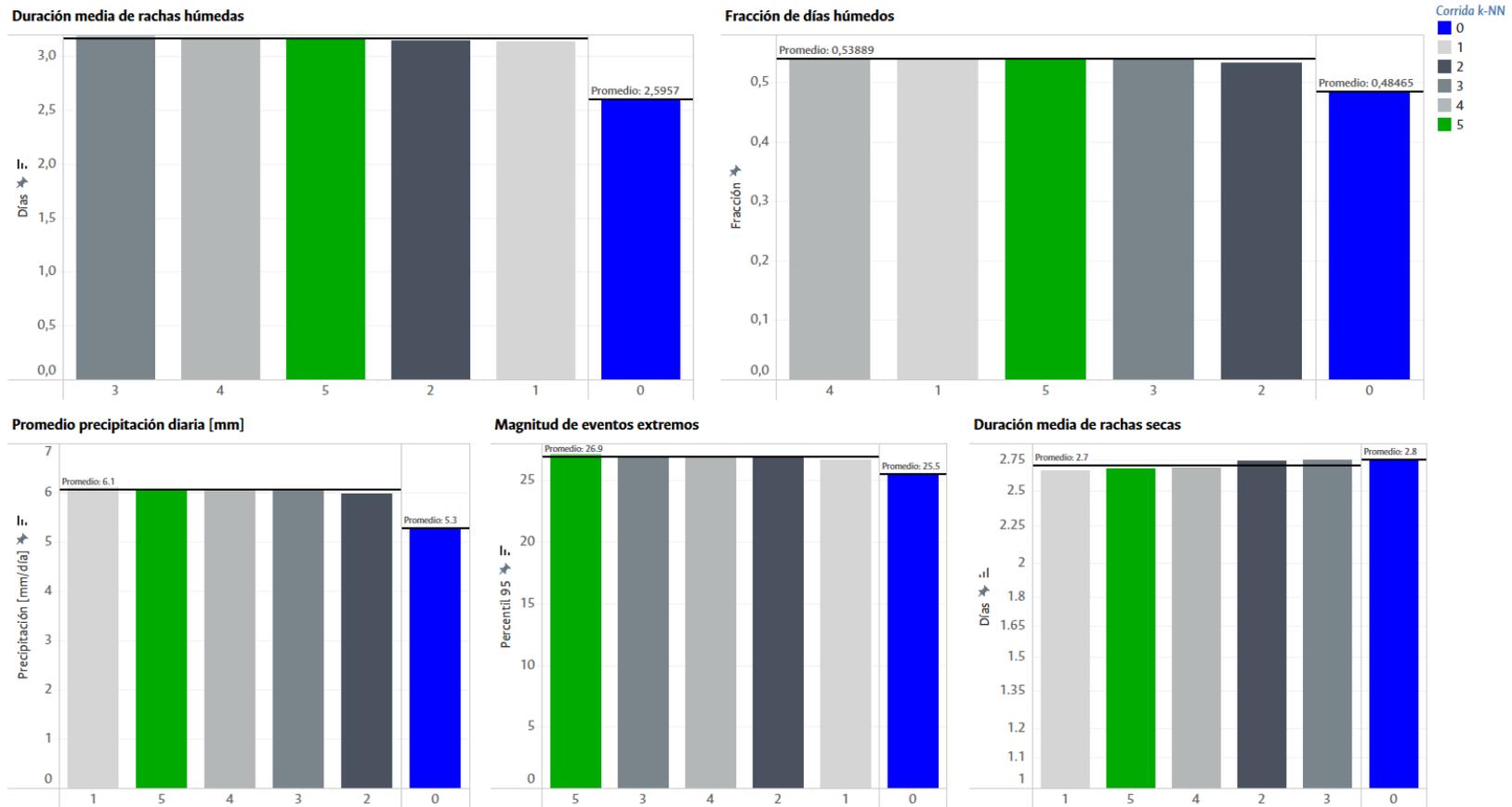
modelo CMCC-CESM presenta resultados variados en los que no se encuentra una ventaja evidente de una serie sobre otra, sin embargo, se seleccionó la serie número 5 dando prioridad al promedio diario de precipitación diaria y a la magnitud de eventos extremos, consecuentes con la narrativa deseada.

Figura 5-8. Visualización de los atributos climáticos para 5 series generadas con el modelo MPI-ESM-MR.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-9. Visualización de los atributos climáticos para 5 series generadas con el modelo CMCC-CESM.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los atributos de las series sintéticas seleccionadas en el periodo 2020 - 2100 (RCP 8.5) presentado en la *Tabla 5-3* permitió identificar una ligera tendencia de aumento en los atributos asociados a la precipitación, dicha tendencia se aprecia con mayor claridad al realizarse una comparación relativa (*Figura 5-10*).

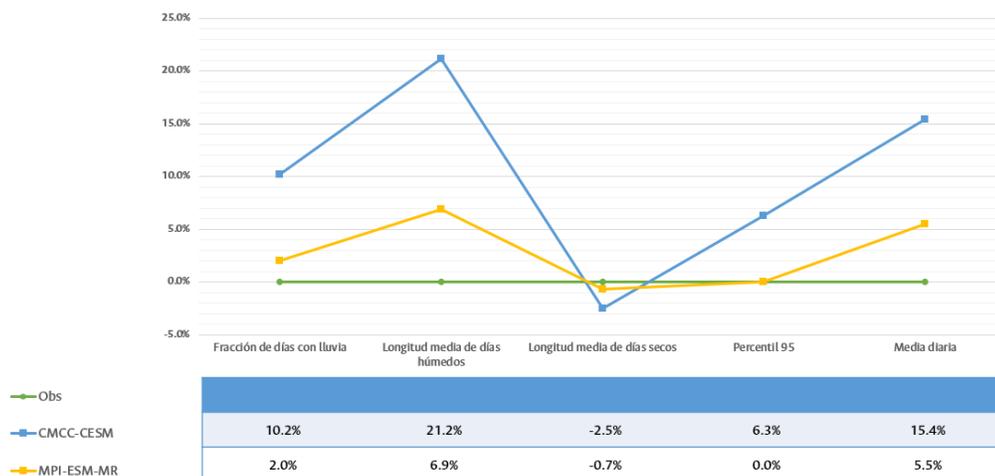
Tabla 5-3. Atributos climatológicos observados históricos y simulados en las series sintéticas seleccionadas (2020 - 2100).

Periodo	Modelo	Fracción de días con lluvia	Longitud media de días húmedos	Longitud media de días secos	Percentil 95	Media diaria
1956 - 2018	Serie histórica	0.49	2.60	2.76	25.5	5.27
2020-2100	CMCC-CESM	0.54	3.15	2.69	27.10	6.08
	MPI-ESM-MR	0.50	2.78	2.74	25.50	5.56

Fuente: *Elaboración propia.*

Se observa en la *Figura 5-10* que particularmente la serie sintética generada a partir del MCG CMCC-CESM produce un amplio espectro de variaciones porcentuales en la totalidad de los atributos considerados, siendo el más notorio el aumento de la longitud media rachas húmedas en un valor superior al 20%. La serie generada a partir del MCG MPI-ESM-MR presenta variaciones más modestas, sin embargo, valiosas para la modelación en etapas posteriores.

Figura 5-10. Cambios porcentuales en los atributos climáticos para la cuenca de estudio considerando las series sintéticas generadas para el periodo 2020 - 2100.



Fuente: *Elaboración propia.*

En la *Tabla 5-4* y *Tabla 5-5* se presentan los valores promedio, mínimo y máximo de las variables precipitación y temperatura, respectivamente, y sus variaciones con respecto a los valores de la serie histórica. Se confirman variaciones más significativas en la serie sintética generada a partir del modelo

CMCC-CESM, resaltándose un incremento porcentual del 15.3% en el promedio mensual de la precipitación y un aumento del 57.2% en el valor máximo presentado, lo cual permite reafirmar la hipótesis de que los eventos extremos en la zona incrementarían su magnitud considerando dicha serie.

Tabla 5-4. Estadísticas mensuales de las series sintéticas de precipitación y variación con respecto a los valores históricos.

Modelo	Precipitación mensual [mm]			Variación [%]		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
Observado	160.4	485	4.4			
CMCC-CESM	184.9	762.3	7.9	15.3	57.2	79.5
MPI-ESM-MR	172.9	602.6	9.7	7.8	24.2	120.5

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la temperatura, se contempla un aumento en el promedio de la variable de aproximadamente 3°C en ambas series sintéticas generadas equivalente a un incremento porcentual cercano al 18% del valor promedio histórico. La temperatura mínima en la zona se contempla semejante a los mínimos observados en el periodo de referencia.

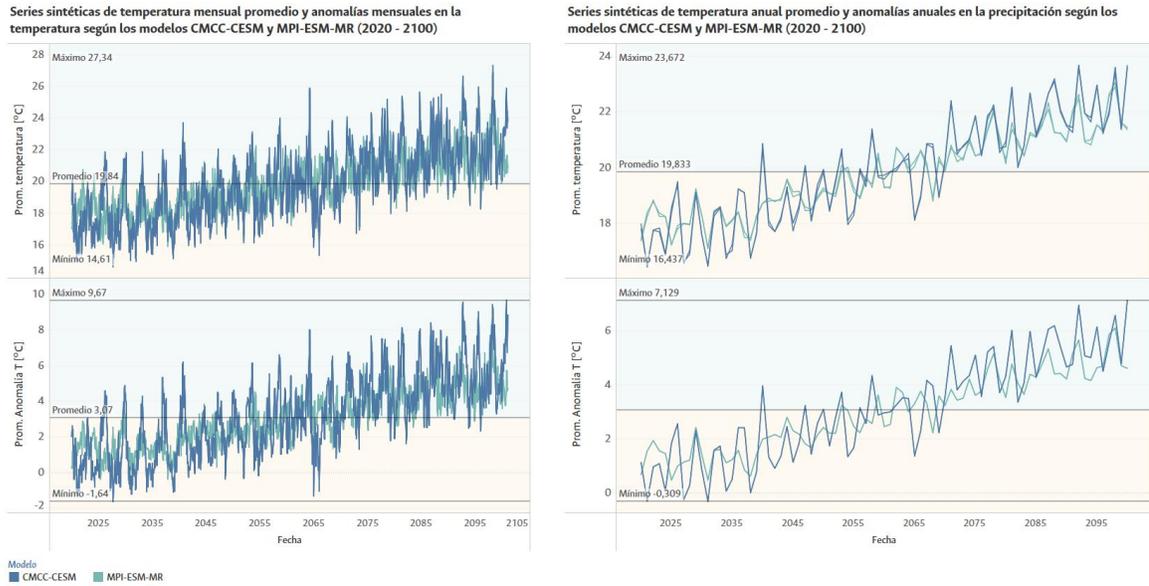
Tabla 5-5. Estadísticas mensuales de las series sintéticas de temperatura y variación con respecto a los valores históricos.

Modelo	Temperatura [°C]			Variación [%]		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
Observado	16.8	19.5	15			
CMCC-CESM	19.9	26.8	15	18.5	37.4	0.0
MPI-ESM-MR	19.8	24.9	15.9	17.9	27.7	6.0

Fuente: Elaboración propia.

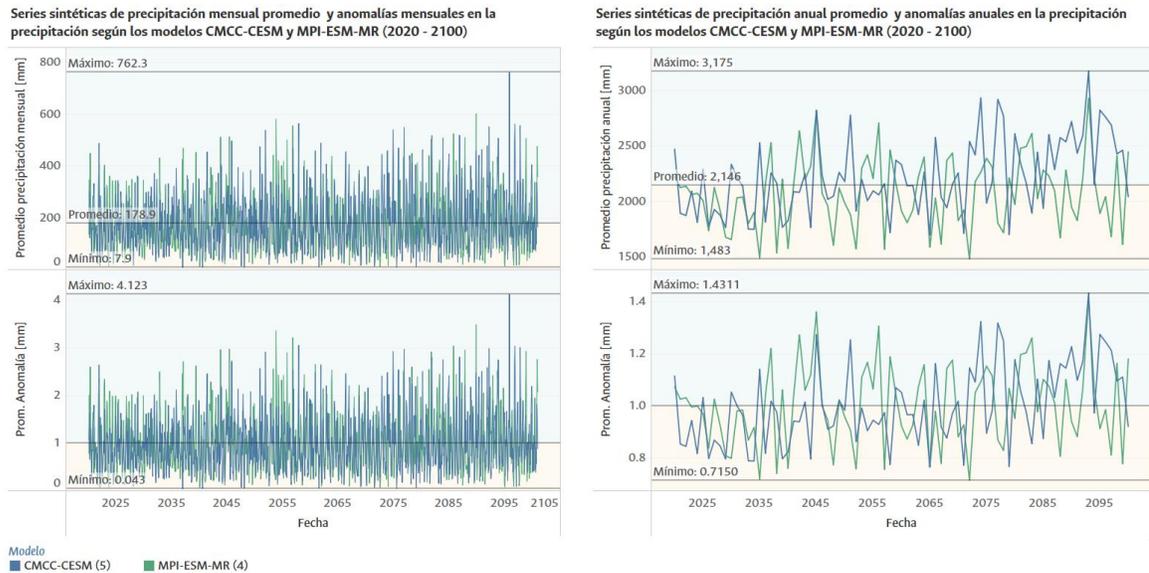
En las siguientes figuras (Figura 5-11 a Figura 5-12) se presentan las series sintéticas tanto de temperatura como de precipitación, a escala mensual y anual generadas a partir de los MCG seleccionados. En ambas variables se aprecia una tendencia progresiva de signo positivo, más notoria en las series generadas por el modelo CMCC-CESM. Se aprecia de forma particular en el caso de la precipitación que los valores superiores a la media superan notablemente en frecuencia a los valores inferiores, lo anterior apoya la narrativa de cambio climático propuesta para esta fase de análisis y posterior uso de las series sintéticas.

Figura 5-11. Series sintéticas de temperatura generadas con el modelo MPI-ESM-MR para el periodo 2020 - 2100.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-12. Series sintéticas de precipitación generadas con los MCG para el periodo 2020-2100.



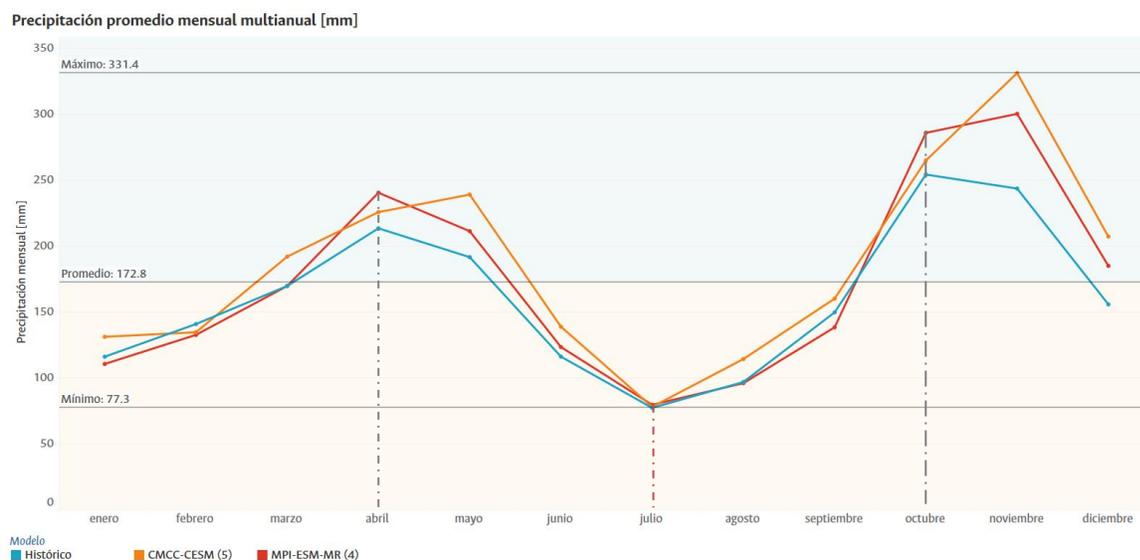
Fuente: Elaboración propia.

5.3 Representación estacional del clima futuro

Finalmente, se comparó el patrón estacional histórico con el descrito por las series sintéticas de precipitación seleccionadas. Desde esta perspectiva, la Figura 5-13 ilustra el régimen de precipitación según los datos considerados, destacando los meses tradicionalmente más lluviosos con líneas grises y el mes de julio con menores precipitación con una línea roja discontinua, el cual en todos los casos muestra un promedio inferior. Aunque las series sintéticas generadas respetan ciertos puntos estructurales en el régimen habitual, el modelo CMCC-CESM presenta un claro desplazamiento temporal del pico de lluvias. No obstante, se considera que las series generadas son adecuadas para definir las lluvias de diseño en etapas posteriores.

Se sugiere que los análisis que surjan a partir de las comparaciones del clima histórico local y las series sintéticas elegidas se realicen con precaución, debido a que como se aprecia en secciones anteriores la serie histórica presenta una tendencia positiva, comportamiento que puede influenciar los resultados de reducción de escala.

Figura 5-13. Comparación del patrón estacional del clima histórico con el patrón estacional de los modelos del clima futuro (2020 – 2100)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos son consistentes con las conclusiones expuestas por el IPCC en el capítulo “Cambios en el ciclo del agua” de su último informe, en el cual se afirma con un alto grado de confianza que la precipitación media y la evaporación global aumentarían con el calentamiento global, con una tasa variable según el modelo utilizado. Este aumento en la precipitación responde a la temperatura media

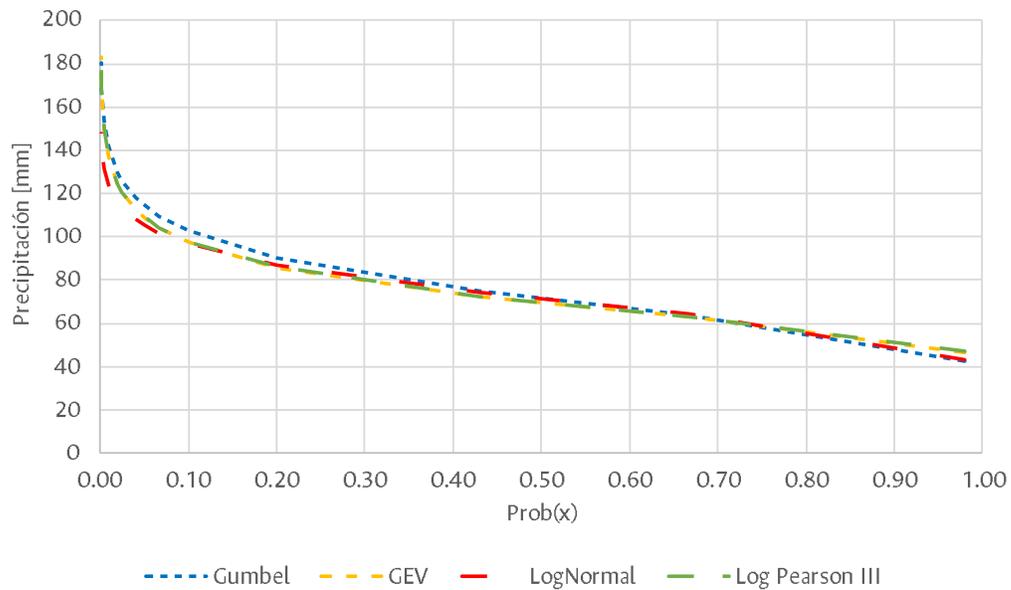
global del aire en la superficie, sin embargo, debe aclararse que los cambios en el uso y la cobertura del suelo también provocan cambios regionales en el ciclo del agua a partir de su influencia en los balances hidrológicos y la energía de los sistemas (IPCC, 2021b). En el mismo documento, se resalta que el incremento en la capacidad de retención de agua en la atmósfera (aproximadamente 7% por cada grado de calentamiento) se traduce en una intensificación de los eventos extremos de precipitación, aumentando la magnitud de los riesgos de inundación asociados a estos eventos, no obstante, las alteraciones en los modelos de circulación atmosférica afectan la ubicación y la frecuencia de la aparición de estos fenómenos extremos, mostrando variaciones significativas a nivel regional y contrastes marcados entre las estaciones del año (IPCC, 2021b).

5.4 Análisis de eventos de precipitación

Con el fin de evaluar la recurrencia de eventos extremos de precipitación en el escenario histórico y en escenarios prospectivos de cambio climático, se definieron las precipitaciones diarias máximas en los años de simulación. Las series de máximos definidas permitieron realizar el análisis de frecuencia de extremos y la determinación de precipitaciones con diferentes periodos de retorno. Se evaluaron las funciones de distribución Gumbel, GEV -General Extreme Value-, LogNormal y LogPearson. Para la definición de parámetros en cada función de distribución y definición de lluvias asociadas a múltiples probabilidades de ocurrencia se utilizó la herramienta AFINS 2.0 desarrollada por el Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Politécnica de Valencia. A modo de ejemplo, se presenta en la *Figura 5-14* la distribución de eventos extremos de precipitación obtenida a partir del análisis de frecuencias de la serie histórica de la estación Agronomía (1956-2018) con diferentes funciones de probabilidad.

El resultado del análisis de frecuencias (ver *Tabla 5-6*) de las series de precipitación sintéticas generadas a partir de los modelos de circulación general permite establecer que en el escenario provisto por el modelo CMCC-CESM la recurrencia de eventos extremos disminuiría. Aunque en secciones anteriores se identificó que la serie proveniente de este modelo presentaba mayores estadísticos relacionados a la precipitación, el análisis de frecuencias permite concluir que el aumento de precipitación se da de forma distribuida en los eventos de menor magnitud. Por otra parte, el escenario generado con el modelo MPI-ESM-MR prevé una exacerbación de los eventos extremos de precipitación en la cuenca, haciéndolo más relevante bajo la narrativa de aumento de fenómenos que pudieran ocasionar inundaciones.

Figura 5-14. Curva de excedencia de eventos de precipitación según serie histórica. Estación Agronomía.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-6. Eventos de precipitación con diferentes periodos de retorno. Serie histórica y proyectadas con efecto de cambio climático.

Tr (años)	prob (x)	P(x)	Histórico [mm]	CMCC-CESM [mm]	MPI-ESM-MR [mm]
1.02	0.9804	0.0196	44.8	41.7	39.8
1.5	0.6667	0.3333	63.4	62.2	68.6
2.33	0.4292	0.5708	73.4	72.4	83.8
5	0.2000	0.8000	87.2	85.4	104.1
10	0.1000	0.9000	98.5	95.3	120.3
15	0.0667	0.9333	104.9	100.7	129.4
20	0.0500	0.9500	109.5	104.4	135.6
25	0.0400	0.9600	113.0	107.2	140.4
40	0.0250	0.9750	120.4	113.0	150.4
50	0.0200	0.9800	123.9	115.6	155.1
100	0.0100	0.9900	135.0	123.7	169.5
200	0.0050	0.9950	146.2	131.5	183.6
500	0.0020	0.9980	161.5	141.6	202.2
1000	0.0010	0.9990	173.5	149.0	216.1

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Generación de caudales de diseño

A partir de las series de precipitación sintéticas generadas en apartados anteriores y usando el enfoque multimodelo calibrado y validado en la sección 4.4, se produjeron las series de caudal para el periodo de modelación (2024-2053). Posteriormente, se calculó el balance hídrico anual en el caso de cada modelo expuestos en las siguientes tablas.

Tabla 5-7. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación El Popal (2024-2053). Modelo CMCC-CESM.

Variable	SHIA	3-Tanks	HBV	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
ETR	826.8	0.0	851.6	165.4	826.793	846.6	671.4
Esc.Sup	0.0	298.7	19.0	3.8	18.958	242.8	67.3
Interfl	178.8	1.0	42.8	9.4	42.773	151.6	88.8
Fl.Base	1025.0	879.5	1179.4	908.6	1024.976	1148.5	1057.6
Qsim	1203.8	1179.3	1241.1	1184.2	1203.831	1233.6	1213.8
Coef.Escorr	0.63	0.62	0.65	0.62	0.632	0.65	0.64
%ETR	43.43	0.00	44.73	8.69	43.428	44.47	35.26
% Esc.Dir.	0.00	15.69	1.00	0.20	0.996	12.75	3.54
% Interflujo	9.39	0.05	2.25	0.49	2.247	7.96	4.67
%Flujo Base	53.84	46.20	61.95	47.73	53.838	60.33	55.55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-8. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación El Popal (2024-2053). Modelo MPI-ESM-MR.

Variable	SHIA	3-Tanks	HBV	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
ETR	819.2	0.0	833.7	163.8	819.166	830.8	661.2
Esc.Sup	0.0	286.4	18.4	3.7	18.406	232.8	64.6
Interfl	170.3	1.0	40.9	9.0	40.898	144.4	84.7
Fl.Base	966.7	842.5	1108.8	867.4	966.733	1080.4	998.7
Qsim	1137.1	1129.9	1168.1	1131.3	1137.089	1161.9	1148.0
Coef.Escorr	0.61	0.61	0.63	0.61	0.609	0.62	0.62
%ETR	43.90	0.00	44.69	8.78	43.905	44.53	35.44
% Esc.Dir.	0.00	15.35	0.99	0.20	0.987	12.48	3.46
% Interflujo	9.13	0.05	2.19	0.48	2.192	7.74	4.54
%Flujo Base	51.81	45.16	59.43	46.49	51.814	57.90	53.53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-9. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales (2024-2053). Modelo CMCC-CESM.

Variable	SHIA	HBV	3-Tanks	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
ETR	785.4	781.2	0.0	156.2	781.2	784.6	626.7
Esc.Sup	807.1	1108.8	1819.3	867.5	1108.8	1677.2	1130.2
Interfl	0.1	94.7	0.7	0.2	0.7	75.9	38.1
Fl.Base	448.2	140.2	515.6	201.8	448.2	502.1	338.5
Qsim	1255.5	1358.2	2335.6	1276.0	1358.2	2140.1	1512.6
Coef.Escorr	0.60	0.65	1.12	0.61	0.65	1.02	0.72
%ETR	37.60	37.40	0.00	7.48	37.40	37.56	30.00
% Esc.Dir.	38.64	53.08	87.10	41.53	53.08	80.29	54.11
% Interflujo	0.01	4.53	0.03	0.01	0.03	3.63	1.82
%Flujo Base	21.46	6.71	24.68	9.66	21.46	24.04	16.20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-10. Resumen del balance hídrico anual de la quebrada Olivares en estación Aguas de Manizales (2024-2053). Modelo MPI-ESM-MR.

Variable	SHIA	HBV	3-Tanks	P.10	P.50	P.90	Multimodelo
ETR	770.3	761.0	0.0	152.2	761.0	768.4	612.5
Esc.Sup	776.4	1046.8	1744.1	830.5	1046.8	1604.6	1078.1
Interfl	0.1	91.9	0.7	0.2	0.7	73.7	36.9
Fl.Base	417.0	140.2	498.1	195.6	417.0	481.9	322.5
Qsim	1193.6	1301.1	2242.8	1215.1	1301.1	2054.5	1446.4
Coef.Escorr	0.60	0.65	1.12	0.61	0.65	1.03	0.72
%ETR	38.57	38.10	0.00	7.62	38.10	38.48	30.67
% Esc.Dir.	38.87	52.41	87.32	41.58	52.41	80.34	53.98
% Interflujo	0.01	4.60	0.03	0.01	0.03	3.69	1.85
%Flujo Base	20.88	7.02	24.94	9.79	20.88	24.13	16.15

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la serie de evapotranspiración se utilizó la misma metodología expuesta en apartados anteriores y las series de temperatura generadas a partir de los Modelos de Circulación General. Las series de caudal resultantes reflejan lo concluido en secciones anteriores (5.2, 5.3), en las cuales se denota una mayor cantidad de flujos en el balance obtenido a partir del modelo CMCC-CESM, producto de una mayor precipitación. Definidas las seis series de caudales, se calcularon máximos anuales con el fin de realizar el análisis de frecuencia de extremos y la determinación de caudales con periodos de retorno, evaluando las mismas funciones de distribución usadas en el apartado 5.4.

Las evaluaciones realizadas en cada caso permitieron definir los caudales mediante los promedios obtenidos de las funciones de distribución para cada periodo de retorno. La Tabla 5-11 presenta los caudales obtenidos a partir de cada serie analizada y la variación porcentual con respecto a los valores arrojados de la evaluación del periodo histórico. Los resultados divergen según el modelo de circulación general considerado, como era esperado según el análisis de la precipitación. En el caso del modelo CMCC-CESM, los caudales disminuyen hasta en un 20%, exceptuando en la estación El Popal. Por otro lado, considerando el modelo MPI-ESM-MR los resultados permiten inferir que el efecto del cambio climático podría incrementar los caudales máximos anuales en la quebrada Olivares, particularmente aquellos con menores periodos de retorno como es el caso del punto Aguas de Manizales.

Tabla 5-11. Caudales de diseño y variación porcentual respecto al caudal histórico.

Estación	Tr (años)	Histórico (1989-2018) [m³/s]	CMCC-CESM (2024-2053)		MPI-ESM-MR (2024-2053)	
			[m³/s]	Variación [%]	[m³/s]	Variación [%]
El Popal	1.02	0.476	0.536	12.6	0.537	12.8
	1.5	0.700	0.777	11.0	0.751	7.3
	2.33	0.817	0.897	9.8	0.861	5.4
	5	0.971	1.054	8.5	1.009	3.9
	10	1.094	1.177	7.6	1.128	3.1
	15	1.162	1.246	7.2	1.194	2.8
	20	1.209	1.293	6.9	1.240	2.6
	25	1.245	1.329	6.7	1.275	2.4
	40	1.321	1.404	6.3	1.349	2.1
	50	1.356	1.439	6.1	1.384	2.1
	100	1.465	1.547	5.6	1.492	1.8
	200	1.573	1.653	5.1	1.599	1.7
	500	1.715	1.792	4.5	1.741	1.5
1000	1.822	1.896	4.1	1.850	1.5	
Escuela de Carabineros	1.02	5.773	5.341	-7.5	4.527	-21.6
	1.5	7.836	7.881	0.6	9.145	16.7
	2.33	9.101	9.231	1.4	11.566	27.1
	5	11.040	11.067	0.2	14.804	34.1
	10	12.825	12.556	-2.1	17.367	35.4
	15	13.930	13.395	-3.8	18.783	34.8
	20	14.753	13.984	-5.2	19.764	34.0
	25	15.417	14.439	-6.3	20.514	33.1
	40	16.899	15.393	-8.9	22.067	30.6
	50	17.647	15.847	-10.2	22.794	29.2
	100	20.187	17.260	-14.5	25.020	23.9
	200	23.115	18.690	-19.1	27.210	17.7
	500	27.740	20.617	-25.7	30.066	8.4
1000	31.958	22.109	-30.8	32.209	0.8	
	1.02	6.319	5.826	-7.8	4.937	-21.9

Estación	Tr (años)	Histórico (1989-2018) [m³/s]	CMCC-CESM (2024-2053)		MPI-ESM-MR (2024-2053)	
			[m³/s]	Variación [%]	[m³/s]	Variación [%]
Aguas de Manizales	1.5	8.548	8.597	0.6	9.975	16.7
	2.33	9.918	10.069	1.5	12.616	27.2
	5	12.017	12.072	0.5	16.149	34.4
	10	13.952	13.696	-1.8	18.943	35.8
	15	15.151	14.612	-3.6	20.489	35.2
	20	16.043	15.254	-4.9	21.559	34.4
	25	16.763	15.750	-6.0	22.376	33.5
	40	18.371	16.791	-8.6	24.070	31.0
	50	19.183	17.285	-9.9	24.863	29.6
	100	21.942	18.827	-14.2	27.291	24.4
	200	25.123	20.386	-18.9	29.679	18.1
	500	30.151	22.487	-25.4	32.795	8.8
1000	34.738	24.114	-30.6	35.132	1.1	
La Asunción	1.02	5.683	6.128	7.8	5.194	-8.6
	1.5	8.991	9.043	0.6	10.493	16.7
	2.33	10.927	10.592	-3.1	13.271	21.5
	5	13.720	12.699	-7.4	16.986	23.8
	10	16.107	14.406	-10.6	19.926	23.7
	15	17.502	15.369	-12.2	21.552	23.1
	20	18.502	16.045	-13.3	22.677	22.6
	25	19.285	16.566	-14.1	23.537	22.0
	40	20.966	17.661	-15.8	25.318	20.8
	50	21.781	18.180	-16.5	26.153	20.1
	100	24.396	19.801	-18.8	28.707	17.7
	200	27.157	21.441	-21.0	31.219	15.0
500	31.071	23.650	-23.9	34.496	11.0	
1000	34.262	25.360	-26.0	36.955	7.9	

Fuente: Elaboración propia.

Si bien en apartados anteriores se definió que el modelo CMCC-CESM producía mayor magnitud de precipitación, los resultados en la simulación de caudales demuestran que este modelo produce máximos anuales de menor magnitud por lo cual, en la evaluación de este modelo habría una variación negativa de la amenaza de inundaciones, por lo tanto, el aumento del caudal se encontraría distribuido en la simulación de caudales medios. Por otro lado, se puede concluir que la serie de caudales producida a partir de la serie de precipitación generada por el modelo MPI-ESM-MR, genera máximos anuales de mayor magnitud, por lo tanto, en este escenario incrementarían los eventos extremos tanto en magnitud como en ocurrencia.

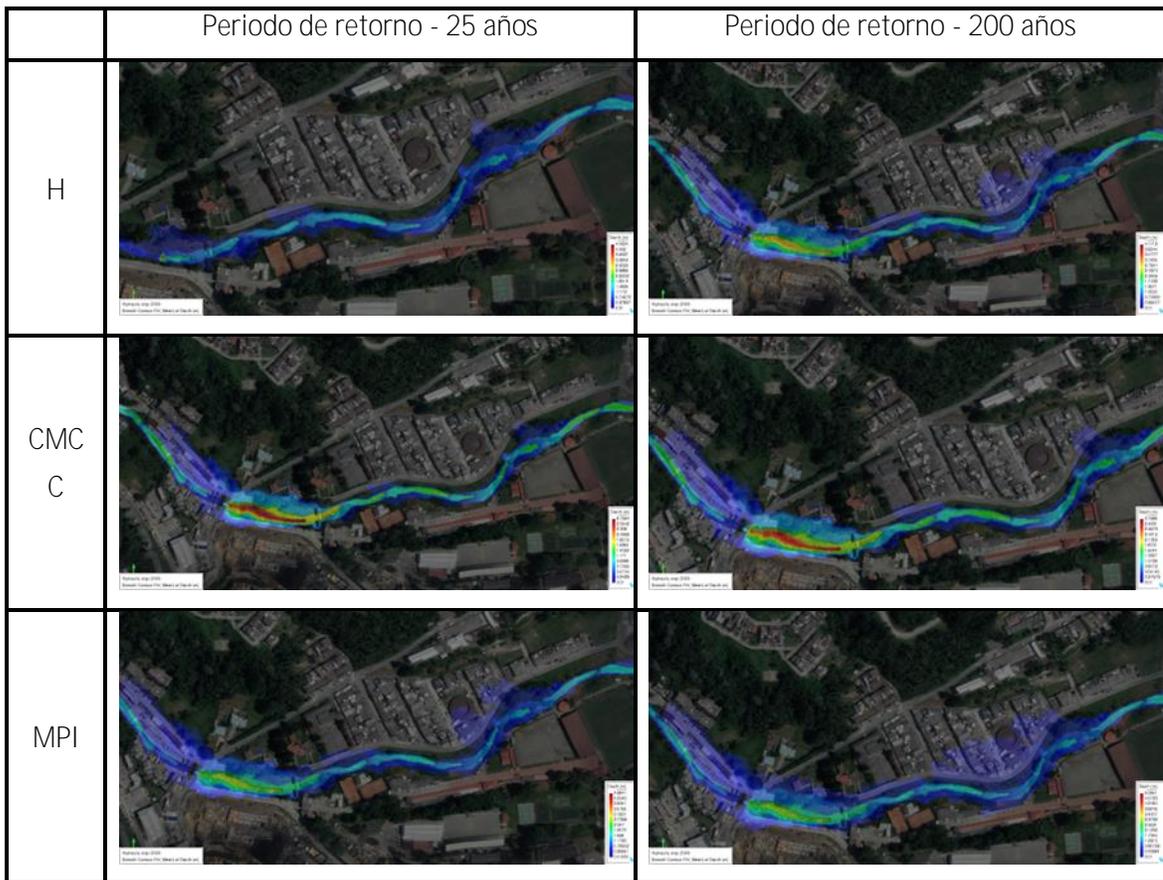
5.6 Modelación hidráulica

Para exponer los resultados se presentarán las imágenes de las manchas de inundación a niveles máximos en las zonas de interés en los periodos de retorno definidos para el análisis (25 y 200 años), para poder comparar el escenario histórico con cada uno de los escenarios de cambio climático considerados.

En el caso de la zona El Popal, en ninguno de los casos se simularon eventos que pudieran afectar la infraestructura aledaña (caserío El Popal – invasión) por lo cual, se decidió no presentar los resultados en apartados posteriores.

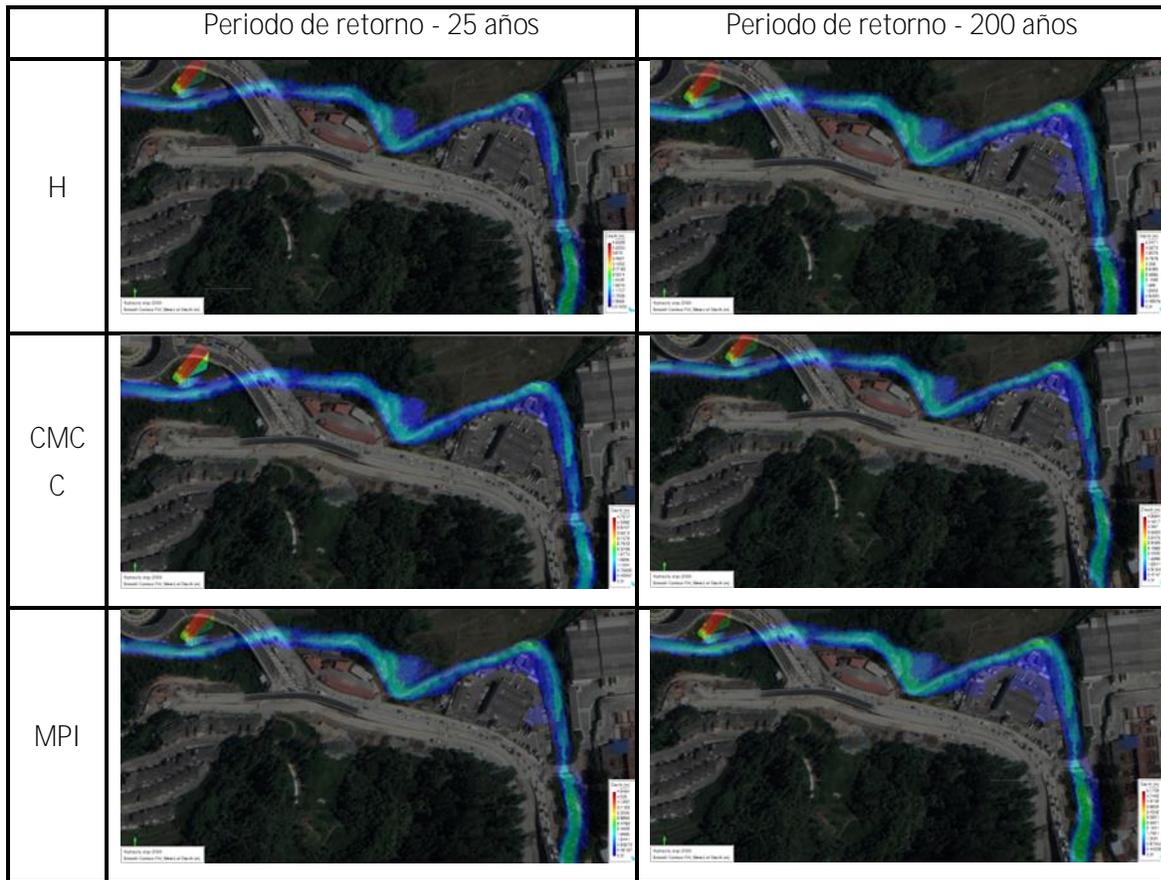
En la totalidad de los casos, el escenario más pesimista corresponde al simulado por el modelo MPI-ESM-MR, siendo más evidente el aumento en la mancha de inundación en la zona de la Escuela de Carabineros. Considerando los caudales históricos y un periodo de retorno de 25 años, se presentan inundaciones en todas las zonas priorizadas en el área urbana. A continuación, se presentan las imágenes asociadas a cada escenario y posteriormente, se analizan los resultados más relevantes de la modelación.

Figura 5-15. Manchas de inundación en el sector Escuela de Carabineros en escenario histórico y de cambio climático.



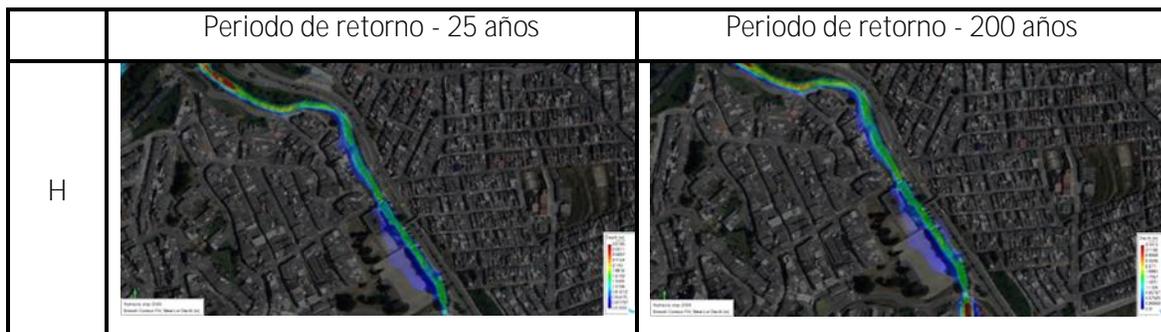
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-16. Manchas de inundación en el sector Aguas de Manizales en escenario histórico y de cambio climático.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-17. Manchas de inundación en el sector La Asunción en escenario histórico y de cambio climático.





Fuente: Elaboración propia.

La modelación hidráulica de escenarios históricos y bajo efectos de cambio climático, permite inferir que en cualquier escenario la ciudad presenta amenaza de inundaciones en las zonas priorizadas. Teniendo los resultados proporcionados por el modelo, se definieron las áreas naturalmente ocupadas por el cauce y se calculó el área que podría ser afectada bajo eventos de inundación en los escenarios propuestos, las áreas calculadas y la variación con respecto a los escenarios históricos se presentan en la *Tabla 5-12*.

Tabla 5-12. Áreas afectadas por eventos de inundación en los escenarios propuestos.

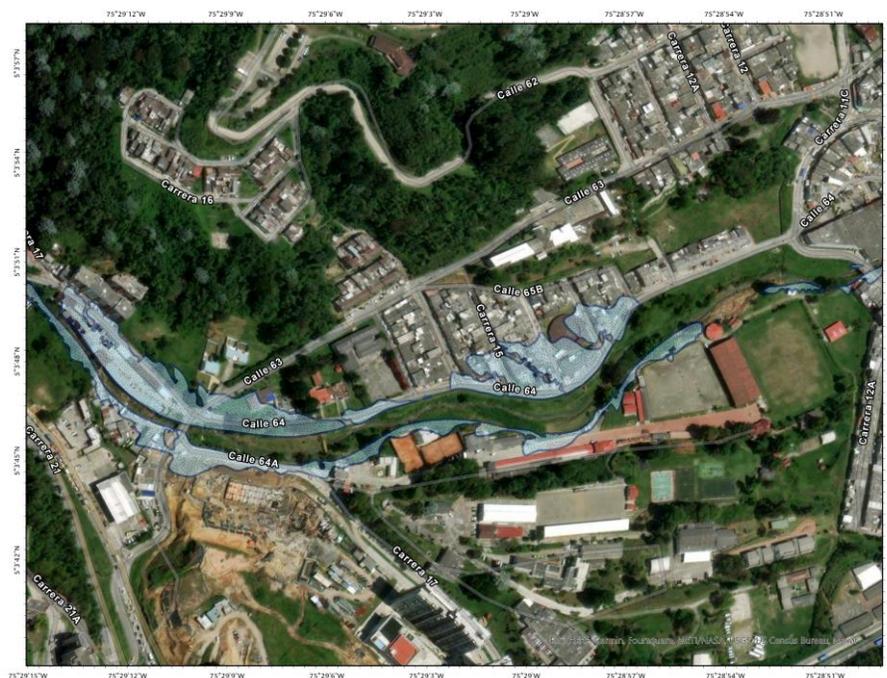
Estación	Tr (años)	Histórico [m ²]	CMCC-CESM		MPI-ESM-MR	
			[m ²]	Variación [%]	[m ²]	Variación [%]
Escuela de Carabineros	25	13611.0	11625.3	-15%	16351.8	20%
	200	18393.2	13020.2	-29%	23847.4	30%
Aguas de Manizales	25	3252.0	2950.3	-9%	4127.0	27%
	200	4656.0	3431.9	-26%	5456.5	17%
La Asunción	25	9265.9	9030.0	-3%	10413.3	12%
	200	11762.9	9248.7	-21%	13035.2	11%

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, el sector de la Escuela de Carabineros presenta amenaza de inundación en ambos costados del cauce, con mayor extensión hacia el barrio La Toscana y en la vía que conduce a la central de sacrificio municipal. Las inundaciones en el sector afectarían principalmente la vía que conduce del barrio La Toscana a la salida hacia la Avenida Kevin Ángel y al desvío que conduce a la central de sacrificio, en la cual además de la infraestructura vial se encuentran varios edificios residenciales. A modo de ejemplo se

presenta en la Figura 5-18 el área afectada por el evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para el periodo prospectivo para un periodo de retorno de 200 años.

Figura 5-18. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. Escuela de Carabineros.



Fuente: Elaboración propia.

En escenarios de mayor caudal (eventos con periodo de retorno 200 años) se afectaría la movilidad en las recientes construcciones de la urbanización Bella Suiza, el ingreso a la Escuela de Carabineros y Policlínica, y se presentarían graves afectaciones en la sede de incorporación de la Policía Nacional, antiguo jardín infantil Carabineritos. Por el creciente desarrollo del sector, se concluye que la mayor afectación en eventos extremos se presentaría en este punto. La mayor variación se produciría bajo el escenario simulado por el MPI-ESM-MR para un evento con periodo de retorno de 200 años, en el cual el área afectada podría aumentar en un 30% con respecto a un evento de igual periodo de retorno en el escenario histórico.

En el caso del sector Aguas de Manizales, se confirma la afectación en todos los escenarios de la sede administrativa de empresa de servicios públicos, siendo más evidente en los escenarios generados por el modelo MPI-ESM-MR. El talud en el margen derecho del cauce también se vería afectado por las crecientes, coadyuvando a la situación de inestabilidad actual de la zona. Los mayores incrementos del área afectada con respecto a los eventos producidos a partir de series históricas podrían darse en la simulación de aquellos eventos con menor periodo de retorno. Eventos extremos como el simulado por

el modelo ya mencionado en un periodo de retorno de 200 años, podrían aumentar 11% el área afectada con respecto a un evento de similares características en el escenario histórico. Como ejemplo se presenta en la Figura 5-19 el área afectada por un evento simulado en la zona.

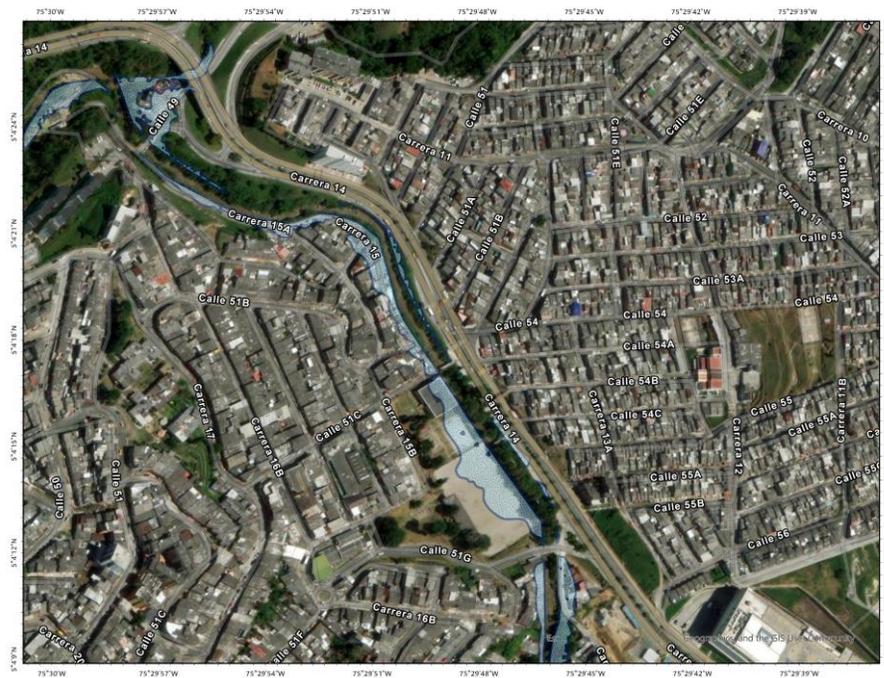
Figura 5-19. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. Aguas de Manizales.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, en el sector de la Asunción, se verían gravemente afectadas las instalaciones deportivas y administrativas de Confa La Asunción. Adicionalmente, en escenarios más severos se presentarían intrusiones del cauce en la Avenida Kevin Ángel, en el sector de La Daniela, donde se encuentran corredores viales indispensables para la ciudad de Manizales. Se destaca que la zona previa a la confluencia de la quebrada El Guamo con la quebrada Olivares podría ser una de las más afectadas por caudal de mayor importancia, en esta zona se encuentran emplazadas viviendas en condición de vulnerabilidad y conexiones viales de importancia para el transporte público. Se muestra en la Figura 5-20 el evento simulado con mayor afectación en la zona.

Figura 5-20. Evento simulado por el modelo MPI-ESM-MR para periodo de retorno 200 años. La Asunción.



Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones y recomendaciones

La ubicación e interacción de la quebrada Olivares con la ciudad de Manizales la hace un corredor fluvial de vital importancia para la dinámica de la ciudad. La expansión de la mancha urbana a lo largo de su cauce implica afectaciones tanto en cantidad como en calidad del recurso, y aumenta la situación de vulnerabilidad de las zonas pobladas que se emplazan a sus alrededores.

Si bien dentro de la cuenca de la quebrada Olivares hay disponibilidad de estaciones de registro de variables hidrometeorológicas, estas han sido de reciente instalación, por lo cual, no cuentan con periodos significativamente extensos de registro. Respondiendo a la necesidad de las modelaciones de cambio climático de realizarse a partir de periodos de referencia superiores a 30 años para capturar el comportamiento histórico de manera precisa, se empleó la estación Agronomía, a pesar de que se encuentra fuera del área de la cuenca, considerando su cercanía y periodo de registro (1956 -2018).

Actualmente no existe un consenso sobre el incremento o disminución de eventos de inundaciones fluviales o de intensa precipitación asociada a inundaciones en la región, por lo tanto, es de vital importancia impulsar el desarrollo de investigaciones que contribuyan a la recolección de evidencias sobre estas hipótesis y permitan prever la situación del territorio, con el fin de apoyar la toma de decisiones y medidas de adaptación soportadas en información robusta.

Se determinaron precipitaciones y temperaturas considerando modelos de cambio climático y se compararon varios modelos de circulación general con el fin de determinar el más adecuado la zona. La metodología de generación de series sintéticas de cambio climático a partir de los Modelos de Circulación Global considerados y su posterior reducción de escala mediante el método k-NN Bootstrapping, aunque no se constituye como una predicción sino como una representación de un futuro plausible, demostró representar de manera satisfactoria las características del clima histórico y local. Por lo cual se concluye que los métodos empleados son apropiados para el territorio y útiles en la consideración del cambio climático en análisis posteriores. Para realizar estas simulaciones se requiere una capacidad de almacenamiento y procesamiento computacional de alto nivel, por consiguiente, se realizó un número moderado de simulaciones.

Se destaca que en el desarrollo de esta investigación se usaron los modelos incluidos en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5 [CMIP5], en primer lugar debido a que esta fase de la

investigación se desarrolló previo a la presentación del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2021b) y presentación del CMIP6; y en segundo lugar, se consideró que los resultados obtenidos a partir de estos modelos son comparables con aquellos obtenidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- en su Tercera Comunicación de Cambio Climático, vigente actualmente. Así, los resultados obtenidos en esta investigación corroboran los resultados del IDEAM en los que se establecen aumentos de la precipitación en la región, sin embargo, las magnitudes pueden diferir debido a la precisión en la escala de modelación.

Los análisis de cambio climático realizados mediante la metodología considerada en esta investigación permiten la evaluación de los recursos hídricos bajo diversas narrativas coherentes con las características y contexto latinoamericano.

Se realizó la modelación hidrológica en la cuenca de la quebrada Olivares con el fin de simular eventos con diferentes periodos de retorno. Teniendo en cuenta la generación de series sintéticas para una sola estación se empleó un enfoque multimodelo que consideró varios modelos hidrológicos conceptuales agregados para la generación de caudales a partir de las series de precipitación generadas anteriormente. Dichos modelos demostraron buen desempeño tanto en el proceso de calibración y validación, particularmente en la representación de la curva de duración de caudales, por lo tanto, se consideran adecuados para el desarrollo de la investigación.

Debido a la inconsistencia de los datos reportados por la estación de registro de caudales Aguas de Manizales, emplazada en la zona urbana del recorrido del cauce, se concluye que dicha estación presenta muy pocos puntos en la curva de nivel – caudal para ofrecer correlaciones adecuadas para la estimación de caudales. Considerando lo anterior, se optó por la consideración de la cuenca como una cuenca natural para la modelación hidrológica. Dicha decisión se soporta en la simulación apropiada de caudales pico en la estación previa El Popal, de la cual se conservaron los parámetros de calibración y validación, exceptuando aquellos inconsistentes con una cobertura del suelo de uso urbano, para la simulación de caudales en los puntos críticos definidos.

Se adaptó la modelación hidráulica previamente desarrollada por Parra (2023) en secciones de la quebrada Olivares propensas a inundaciones en el software Iber. La definición de caudales de diseño a partir de la serie de caudales diarios máximos anuales y mediante la evaluación de diferentes funciones de distribución, permite concluir que, aunque en los análisis de las series generadas con afectación de cambio climático, el modelo CMCC-CESM produjo una serie con mayor cantidad de precipitación acumulada y mayores estadísticos asociados a esta variable, dicha serie produce inferiores picos de caudal con respecto al modelo MPI-ESM-MR. Así, dicho modelo considera la disminución de la magnitud de eventos máximos en la quebrada Olivares en los puntos considerados, exceptuando el sector El Popal, en el cual no se evidenciaron eventos de inundación en ningún escenario.

Se evaluó el efecto del cambio climático en la recurrencia y magnitud de inundaciones en la cuenca de la quebrada Olivares a partir de la definición de caudales en diferentes periodos de retorno (*Tabla 5-10. Caudales de diseño y variación porcentual respecto al caudal histórico*) en los puntos críticos del recorrido del cauce.

La variación en la amenaza de inundación por efecto del cambio climático en el periodo 2024 – 2053 en la cuenca de la quebrada Olivares no es concluyente en una sola dirección, sin embargo, se analizaron las manchas de inundación en ambos casos, menores caudales máximos (CMCC-CESM) y mayores caudales máximos (MPI-ESM-MR). La divergencia entre los resultados producto de los dos modelos de circulación general priorizados es consecuente con la incertidumbre inherente a la modelación de escenarios futuros mediante métodos estocásticos.

De considerarse los resultados producidos por el modelo MPI-ESM-MR, importantes corredores viales e infraestructura de la ciudad de Manizales podrían verse afectados por eventos asociados a caudales máximos en la quebrada Olivares, aumentando el componente de amenaza que aunado a la vulnerabilidad de los sectores habitados de la cuenca incrementa el riesgo de este sector de la ciudad de Manizales, aspecto de importancia en planificaciones y gestiones territoriales futuras. Se establece que el sector que más afectación presentaría en escenarios extremos de precipitación y caudal sería el barrio La Toscana y la Escuela de Carabineros de la Policía Nacional, con incrementos del área inundada de hasta el 30%.

La recopilación de datos de calidad sobre la cuenca es indispensable para el impulso de investigaciones robustas que contribuyan a la gestión integral del recurso hídrico y a la gestión del riesgo en la ciudad de Manizales.

Como se establece en esta investigación, al considerarse aumentos de precipitación y temperatura asociados al cambio climático, se estima adicionalmente aumentos en la evapotranspiración, por lo cual, podría presentarse un fenómeno de compensación de las variaciones a partir de los ciclos naturales de la vegetación presente en la cuenca, particularmente en la Reserva Forestal Protectora de las Cuencas Hidrográficas de río Blanco y quebrada Olivares. Reconociendo la importancia de las coberturas en el ciclo hidrológico de las cuencas, se destaca la necesidad posterior de realizar estudios que consideren cambios en esta variable y escenarios de cambio climático.

Se recomienda en investigaciones posteriores tener en cuenta en la dinámica fluvial de la quebrada Olivares el sistema de drenaje y alcantarillado de la ciudad de Manizales, ya que este representa un factor determinante tanto en la cantidad como en la calidad del recurso, alterando la respuesta de la cuenca y del cauce en eventos de precipitación extrema.

Esta investigación permite otorgar una noción inicial sobre la condición de la cuenca urbana de la quebrada Olivares en la ciudad de Manizales bajo narrativas de cambio climático con aumento en las

precipitaciones. Se resalta la importancia de replicar este tipo de estudios en zonas del país más propensas a eventos de inundaciones, con mayor exposición y vulnerabilidad, considerando los ya evidentes impactos de un clima futuro cambiante.

Investigaciones de esta naturaleza permiten la consideración de diferentes escenarios futuros del territorio y sus impactos en los sistemas humanos, posibilitando la toma de decisiones informadas y orientadas a la adaptación.

7. Bibliografía

2° Institute. (2020a). *Methane Levels: Current & Historic Atmospheric CH4*.

<https://www.methanelevels.org/#sources>

2° Institute. (2020b). *Nitrous Oxide Levels: Current & Historic Atmospheric N2O* . <https://www.n2olevels.org/>

Abatzoglou, J. T., & Brown, T. J. (2012). A comparison of statistical downscaling methods suited for wildfire applications. *International Journal of Climatology*, 32(5), 772–780.

<https://doi.org/10.1002/joc.2312>

Agencia Espacial Europea, Centro Nacional de Estudios Espaciales, & CGI. (2015). *Sea level rise data*.

https://doi.org/10.5270/esa-sea_level_cci-MSLA-1993_2015-v_2.0-201612

Alcaldía de Manizales. (2019a). *Implementación Sistema de Alerta temprana por Inundación de la Ciudad de Manizales, para las quebradas Manizales, El Guamo y Olivares*.

<https://Planeacion.Manizales.Gov.Co/Gestionriesgo/Index.Php/Component/Content/Article?Id=146>.

Alcaldía de Manizales. (2019b). *Secretaría de Planeación*.

Amat Rodrigo, J. (2017, July). *Test de Wilcoxon Mann Whitney como alternativa al t-test*.

https://www.cienciadedatos.net/documentos/17_mann%E2%80%93whitney_u_test#Comparaci%C3%B3n_entre_t-test_y_test_de_Mann%E2%80%93Whitney%E2%80%93Wilcoxon

American Chemical Society. (2020a). *Greenhouse gases - ACS*.

<https://www.acs.org/content/acs/en/climate-science/greenhousegases/properties.html>

American Chemical Society. (2020b). *Sources and Sinks - ACS*.

<https://www.acs.org/content/acs/en/climate-science/greenhousegases/sourcesandsinks.html>

Barrera Escoda, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España*. Universidad de Barcelona.

Barros, V., Menéndez, Á., & Nagy, G. (2005). El cambio climático en el río de La Plata. In *Fundación Ciudad. Instituto Nacional del Agua de Argentina*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

- BC Noticias. (2021). Aguacero causó inundaciones y caída de árboles en Manizales.
<https://www.bcnoticias.com.co/aguacero-causo-inundaciones-y-caida-de-arboles-en-manizales/>.
- BC Noticias. (2022). Manizales despidió septiembre con lluvias torrenciales e inundaciones.
<https://www.bcnoticias.com.co/manizales-despidio-septiembre-con-lluvias-torrenciales-e-inundaciones/>.
- Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. In *Ideam*. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Boughton, W. (2004). The Australian water balance model. *Environmental Modelling & Software*, 19(10), 943–956. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.007>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 2–12.
http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf
- Cabezas, F. (2015). *Análisis estructural de modelos hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas*. Universidad de Murcia.
- CAIT Climate Data Explorer. (2019). *Country Greenhouse Gas Emissions*. Washington, DC: World Resources Institute. <http://cait.wri.org>
- Calvin, K., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Edmonds, J., Eom, J., Hartin, C., Kim, S., Kyle, P., Link, R., Moss, R., McJeon, H., Patel, P., Smith, S., Waldhoff, S., & Wise, M. (2017). The SSP4: A world of deepening inequality. *Global Environmental Change*, 42, 284–296.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.010>
- Caracol Noticias. (2022). Estragos en Manizales por las fuertes lluvias registradas en las últimas horas.
- Carbon Brief. (2020, April 15). *Mapped: How climate change affects extreme weather around the world*.
<https://www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world>
- Castro, L. M., & Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 9, 15–25.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2311116434002>

- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. (2016, May 9). *Zona de Confluencia Intertropical*. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe3.php>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (2015, July 27). *Efectos del cambio climático en Colombia. ¿Por qué debemos buscar respuestas en la Antártida?* <https://www.cioh.org.co/index.php/es/2015-07-27-19-20-22/1735-efectos-del-cambio-climatico-en-colombia-ipor-que-debemos-buscar-respuestas-en-la-antartida.html>
- Chiew, F. H. S., Peel, M. C., & Western, A. W. (2002). Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In *Mathematical models of small watershed hydrology and applications* (pp. 335–367).
- CIIFEN. (2016). *Efecto Invernadero*. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es
- Clarke, L. E., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric. In *Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research* (p. 154).
- Climate & Clean Air Coalition. (2020). *Methane | Climate & Clean Air Coalition*. <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/methane>
- Cole-Dai, J. (2010). Volcanoes and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(6), 824–839. <https://doi.org/10.1002/wcc.76>
- Comisión Europea. (2019). *EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research*. <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>
- Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda. (2017). Morfometría. In *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Risaralda*.
- Corpocaldas. (2010a). *Plan de Manejo. Reserva Forestal Protectora de las Cuencas Hidrográficas de Río Blanco y quebrada Olivares*.
- Corpocaldas. (2010b). *PLAN DE MANEJO. RESERVA FORESTAL PROTECTORA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE RÍO LANCO Y QUEBRADA OLIVARES*. 145.
- Corpocaldas. (2013). Síntesis del diagnóstico. In *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná* (p. 160). <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1508/2017/03-09/01-SintesisPOMCARioChinchina.pdf>

- Death, R. G., Fuller, I. C., & Macklin, M. G. (2015). Resetting the river template: the potential for climate-related extreme floods to transform river geomorphology and ecology. *Freshwater Biology*, 60(12), 2477–2496. <https://doi.org/10.1111/fwb.12639>
- Debortoli, N. S., Camarinha, P. I. M., Marengo, J. A., & Rodrigues, R. R. (2017). An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, 86(2), 557–582. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>
- Department of the Environment - Australian Government. (2013). *Representative Concentration Pathways (RCP): Fact Sheet*. http://www.climatechange.gov.au/sites/climatechange/files/documents/09_2013/WA - RCP Fact Sheet.pdf
- Earth System CoG. (2016). *Downscaling Methods*. <https://earthsystemcog.org/projects/downscalingmetadata/methods>
- Easterbrook, D. J. (2016). Greenhouse gases. In *Evidence-Based Climate Science* (pp. 163–173). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804588-6.00009-4>
- Ebi, K. L., Hallegatte, S., Kram, T., Arnell, N. W., Carter, T. R., Edmonds, J., Kriegler, E., Mathur, R., O'Neill, B. C., Riahi, K., Winkler, H., van Vuuren, D. P., & Zwickel, T. (2014). A new scenario framework for climate change research: Background, process, and future directions. *Climatic Change*, 122(3), 363–372. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3>
- Ehhalt, D., & Prather, M. (2001). Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Agriculture.+In+Climate+Change+2007:+Mitigation.+Contribution+of+Working+Group+III+to+the+Fourth+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change+\[B.#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Agriculture.+In+Climate+Change+2007:+Mitigation.+Contribution+of+Working+Group+III+to+the+Fourth+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change+[B.#0)
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L., & Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669–693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- European Network for Earth System Modelling. (2019, July 10). *CMIP5 Models and Grid Resolution*. <https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, & Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Anuario Meteorológico Cafetero 2019*.

- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of climate models. In V. B. and P. M. M. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia (Ed.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* *Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Interg* (pp. 741–866). Cambridge University Press.
- Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H. X., Guerreiro, S., Haerter, J. O., Kendon, E. J., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D. L., Obersteiner, M., Pachauri, S., ... Riahi, K. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>
- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., & Kainuma, M. (2017). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
- Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., & Matsuoka, Y. (2016). Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model. *The Energy Journal*, 27(Special Issue: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy), 343–353. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-17>
- Gangopadhyay, S., Clark, M., & Rajagopalan, B. (2005). Statistical downscaling using K-nearest neighbors. *Water Resources Research*, 41(2), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2004WR003444>
- Global Climate Observation System. (2018). *Global Climate Indicators*. <https://gcos.wmo.int/en/global-climate-indicators>
- Gómez Tobón, L. A. (2009). *Márgenes de inundación de la quebrada Olivares-Minitas para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años*.

- Goosse, H., Barriat, P. Y., Loutre, M. F., & Zunz, V. (2010). Energy Balance, Hydrological and Carbon Cycles. In *Introduction to climate dynamics and climate modeling* (pp. 25–57). Centre de recherche sur la Terre et le climat Georges Lemaître-UCLouvain. <http://www.climate.be/textbook>
- Gutmann, E., Pruitt, T., Clark, M. P., Brekke, L., Arnold, J. R., Raff, D. A., & Rasmussen, R. M. (2014). An intercomparison of statistical downscaling methods used for water resource assessments in the United States. *Water Resources Research*, 50(9), 7167–7186. <https://doi.org/10.1002/2014WR015559>. Received
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., & Von Schuckmann, K. (2011). Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 13421–13449. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>
- Hausfather, Z. (2018, April 19). *Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change* | Carbon Brief. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>
- Hays, J. D., Imbrie, J., & Shackleton, N. J. (1976). Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194(4270), 1121–1132. <https://doi.org/10.1126/science.194.4270.1121>
- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, T., & Kainuma, M. (2008). Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environment Engineering*, 13, 97–108.
- Hwang, S., & Graham, W. D. (2013). Development and comparative evaluation of a stochastic analog method to downscale daily GCM precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4481–4502. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4481-2013>
- IDEA, I. D. E. A. -. (2019). OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO A LAS REDES HIDROMETEOROLÓGICAS, DE CALIDAD DEL AIRE Y SÍSMICA EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS.
- IDEA Manizales. (2023). *Geoportal-SIMAC*. <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/geoportal-simac/>
- IDEAM. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. *Nota Técnica Del IDEAM*, 47. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Climático+en+Colombia+con+base+en+información+estadística.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- IDEAM. (2013). Cambio Climático: Contexto nacional, avances y retos. *Primer Foro Departamental de Cambio Climático*.

- IDEAM. (2014a). Mapa de cobertura de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia durante el periodo 2010-2012.
- IDEAM. (2014b). Radiación solar. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>
- IDEAM. (2015a). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia.
<http://www.solarviews.com/span/sun.htm#stats>
- IDEAM. (2015b, May 15). Coberturas Nacionales. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>
- IDEAM. (2023). Estudio Nacional del Agua (2022).
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2017). Resumen Ejecutivo. Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación de Cambio Climático (F. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, Ed.).
https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/4617350_Colombia-NC3-1-RESUMEN EJECUTIVO TCNCC COLOMBIA A LA CMNUCC 2017.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, & GEF. (2010). Resumen Ejecutivo. Segunda Comunicación ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- IIASA. (2018). SSP Database. International Institute for Applied Systems Analysis.
<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=20>
- Instituto de Estudios Ambientales. (2020). Aforos líquidos en ríos y quebradas de Manizales y el departamento de Caldas 2017-2019. In Operación y mantenimiento preventivo y correctivo a las redes hidrometeorológicas, de calidad de aire y sísmica en el departamento de Caldas.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2015). Calibración y explotación del modelo agregado en HBV de las cuencas hidrológicas de los ríos Bérchules y Mecina en el ámbito de Sierra Nevada (Granada).
http://info.igme.es/SidPDF/166000/950/166950_0000001.pdf
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In IPCC.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

- IPCC. (2012). Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (Vol. 9781107025, pp. 109–230). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006>
- IPCC. (2013a). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC. (2013b). Summary for Policymakers. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2013c). What is a GCM? https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, Eds.). <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>
- IPCC. (2021a). Cambio Climático 2021: Bases físicas. In *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- IPCC. (2021b). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. www.ipcc.ch
- IPCC. (2023). *IPCC WGI Interactive Atlas*. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-synthesis#eyJ0eXBIIjoiQ0Eliwic2VsZWN0ZWRJbmRleCI6WyJyaXZlcl9mbG9vZCIsImh1YXZ5X3ByZWNpcGloYXRpb24iXSwic2VsZWN0ZWRWYXJpYWJsZSI6ImNvbWZpZGVuY2UiLCJzZWxiY3RIZENvdW50cnkiOiJOV1MiLCJtb2RlIjoiSEVYIiwiaWY29tbW9ucyI6eyJsYXQiOiJkb3NzImlmxuZyl6NDAwNjkyLCJ6b29tIjo0LCJwcm9qIjoiRVBTRzo1NDZzMCI6Im1vZGUiOiJjb21wbGV0ZV9hdGxhcyJ9fQ==>

- Jaramillo Robledo, Á. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*.
- Kim, H. Y., & Park, S. W. (1988). Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs, 1; modelling inflow rates by a linear reservoir model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*.
- Koutsoyiannis, D. (2010). A random walk on water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 585–601. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/585/2010/>
- Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B. L., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, J. P., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Lotze-Campen, H., ... Edenhofer, O. (2017). Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 297–315. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015>
- Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H., & Wilbanks, T. (2012). The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: A new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22(4), 807–822. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.05.005>
- Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R., Moss, R. H., & Wilbanks, T. J. (2010). Socio-economic Scenario Development for Climate Change Analysis. *CIREN Working Paper DT/WP No 2010-23, October*.
- Ledley, T. S., Sundquist, E. T., Schwartz, S. E., Hall, D. K., Fellows, J. D., & Killeen, T. L. (1999). Climate change and greenhouse gases. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 80(39), 453–458. <https://doi.org/10.1029/99EO00325>
- Lindsey, R. (2020, February 20). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. NOAA Climate.Gov. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Manizales de frente al futuro. Informe de gestión 2002 - 2005*. (2005).
- Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley R. S, Hughes, M. K., Shindell, D., & Felzer, B. (2009). Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326(5957), 1253–1256. <https://doi.org/10.1126/science.1177303>
- Maurer, E. P., Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., & Cayan, D. R. (2010). The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California.

- Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 1125–1138. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1125-2010>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Michigan State University. (2015, November 23). *Greenhouse Gas Basics*. https://www.canr.msu.edu/resources/greenhouse_gas_basics_spanish_e3148
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico - Gobierno de España. (2020). *Gases fluorados*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/fluorados.aspx>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling*.
- Moncada, A., Angarita, H., & Pérez, C. (2020). *Escenarios de cambio climático: Método k-NN. SEI Discussion Brief*.
- Montoya, C., & Ospina, G. (2004). *Análisis del grado de susceptibilidad a la ocurrencia de procesos erosivos en la parte alta de la cuenca de la quebrada Olivares y análisis de amenaza por inundación en el tramo comprendido entre el sector de Aguas de Manizales y el puente que une los barrios Minitas-La Sultana*. Universidad de Caldas.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., ... Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=940991
- Moss, Richard., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Vol. 20489).
- NASA. (2019a). *Causes, Facts – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. <https://climate.nasa.gov/causes/>

- NASA. (2019b). *What Is the Sun's Role in Climate Change? – Climate Change: Vital Signs of the Planet*.
<https://climate.nasa.gov/blog/2910/what-is-the-suns-role-in-climate-change/>
- NASA. (2022). *What is the greenhouse effect? – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. Global Climate Change. <https://climate.nasa.gov/faq/19/what-is-the-greenhouse-effect/>
- NASA. (2023). *ASF Data Search Vertex*. EARTHDATA. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- National Climate Change Adaptation Research Facility. (2017). *What are the RCPs?* In *Coast Adapt*.
<https://coastadapt.com.au/how-to-pages/how-to-use-climate-change-scenarios-to-evaluate-risk-plan-and-make-decisions>
- National Geographic. (2011). *Greenhouse Effect - National Geographic Society*.
<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/greenhouse-effect/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020a). *ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network*. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020b). *NOAA/ESRL Global Monitoring Laboratory - The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI)*. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>
- Ocampo López, O. L. (2017). *Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ocampo López, O. L., & Vélez Upegui, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: Caso del río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43–58.
- Oceana. (2020). *Gases de efecto invernadero | Oceana EU*. <https://eu.oceana.org/es/node/46897>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2015). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Organización Meteorológica Mundial. (2019a). *The Global Climate in 2015 - 2019*. *World Meteorological Organization*, 1179, 32.
- Organización Meteorológica Mundial. (2019b). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018*.

- Pabón, J. D. (2012). Cambio Climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261–278.
- Parra Gómez, L. F. (2023). *Gestión natural de inundaciones*. Universidad Nacional de Colombia.
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). Physics of climate. In *Reviews of Modern Physics*.
- Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Segura-Méndez, F., Pulido-Velazquez, D., & Srinivasan, R. (2019). Evaluating Hydrological Models for Deriving Water Resources in Peninsular Spain. *Sustainability*, 11(10), 2872. <https://doi.org/10.3390/su11102872>
- Prentice, I. C., Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. J., Khesghi, H. S., Le Quéré, C., Scholes, R. J., & Wallace, D. W. R. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In *Cambridge University Press*.
- Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison. (2008, September 15). *CMIP5 Overview*. <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>
- Rahman, M., Ningsheng, C., Mahmud, G. I., Islam, M. M., Pourghasemi, H. R., Ahmad, H., Habumugisha, J. M., Washakh, R. M. A., Alam, M., Liu, E., Han, Z., Ni, H., Shufeng, T., & Dewan, A. (2021). Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101224. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101224>
- Ramírez Cardona, J. L. (2015). *Propuesta metodológica para la valoración ambiental de corrientes hídricas desde la perspectiva de la restauración fluvial. Caso de estudio quebrada Olivares-Minitas Manizales (Caldas)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rampino, M. R., & Self, S. (1992). Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature*, 359(6390), 50–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/359050a0>
- Rampino, M. R., Self, S., & Stothers, R. B. (1988). Volcanic winters. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16(1), 73–99.
- Rao, S., & Riahi, K. (2006). The Role of Non-CO₃ Greenhouse Gases in Climate Change Mitigation: Long-term Scenarios for the 21st Century. *The Energy Journal*, 27(Special Issue: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate), 177–200. <https://doi.org/10.2307/23297081>
- Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887–935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>

- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Riebeek, H. (2011, June 16). *The Carbon Cycle*. Earth Observatory - NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page1.php>
- Robertson, A. W., Kirshner, S., & Smyth, P. (2004). Downscaling of daily rainfall occurrence over Northeast Brazil using a hidden Markov model. *Journal of Climate*, 17(22), 4407–4424. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3216.1>
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191–219. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Semana. (2017, January 20). Efectos del cambio climático en Colombia. *Revista Semana*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/efectos-del-cambio-climatico-en-colombia/512637>
- Smith, S. J., & Wigley, T. M. L. (2006). Multi-Gas Forcing Stabilization with Minicam Published by : International Association for Energy Economics Linked references are available on JSTOR for this article : Multi-Gas Forcing Stabilization with Minicam. *The Energy Journal Special Issue*, 3, 373–392.
- Sofia, G., Roder, G., Dalla Fontana, G., & Tarolli, P. (2017). Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction. *Scientific Reports*, 7(1), 40527. <https://doi.org/10.1038/srep40527>
- Song, J. H., Her, Y., Park, J., & Kang, M. S. (2019). Exploring parsimonious daily rainfall-runoff model structure using the hyperbolic tangent function and Tank model. *Journal of Hydrology*, 574, 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.054>
- Song, J. H., Kang, M. S., Song, I., & Jun, S. M. (2016). Water balance in irrigation reservoirs considering flood control and irrigation efficiency variation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(2).
- Spiegel, D. S., Raymond, S. N., Dressing, C. D., Scharf, C. A., & Mitchell, J. L. (2010). Generalized milankovitch cycles and long-term climatic habitability. *Astrophysical Journal*, 721(2), 1308–1318. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1308>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., Bréon, F.-M., Church, J. A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J. M., Hartmann, D. L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Kumar, K. K., ... Xie, S.-P. (2013). Technical Summary. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M.

- Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 33–109). Cambridge University Press.
- Stoner, A. M. K., Hayhoe, K., Yang, X., & Wuebbles, D. J. (2013). An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables. *International Journal of Climatology*, 33(11), 2473–2494. <https://doi.org/10.1002/joc.3603>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tett, S. F. B., Jones, G. S., Stott, P. a., Hill, D. C., Mitchell, J. F. B., Allen, M. R., Ingram, W. J., Johns, T. C., Johnson, C. E., Jones, A., Roberts, D. L., Sexton, D. M. H., & Woodage, M. J. (2002). Estimation of natural and anthropogenic contributions to 20th Century Temperature Change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D16), ACL 10-1-ACL 10-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000JD000028>
- United States Environmental Protection Agency. (2020a). *Global Greenhouse Gas Emissions Data - US EPA*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data#Reference> 1
- United States Environmental Protection Agency. (2020b). *Overview of Greenhouse Gases - US EPA*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2006). *AFINS 2.0*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- University Corporation for Atmospheric Research, & National Earth Science Teachers Association. (2006a). *Carbon dioxide - UCAR*. UCAR. <https://scied.ucar.edu/carbon-dioxide>
- University Corporation for Atmospheric Research, & National Earth Science Teachers Association. (2006b). *Methane - UCAR*. UCAR. <https://scied.ucar.edu/methane>
- van Vuuren, D. P., & Carter, T. R. (2014). Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: Reconciling the new with the ol. *Climatic Change*, 122(3), 415–429. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0974-2>
- van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G. J., Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., Van Ruijven, B., Wonink, S., & Van Houdt, R. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: An assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81(2), 119–159. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>

- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- van Vuuren, D. P., Eickhout, B., Lucas, P. L., & den Elzen, M. G. J. (2006). Long-Term Multi-Gas Scenarios to Stabilise Radiative Forcing – Exploring Costs and Benefits Within an Integrated Assessment Framework Published by : International Association for Energy Economics Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/23297082> Your use. *The Energy Journal*, 27(Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy), 201–233. <https://doi.org/10.2307/23297082>
- van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for Climate Change Research: Scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3), 373–386. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>
- van Vuuren, D. P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S. K., & Arnell, N. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22(1), 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.002>
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., Doelman, J. C., van den Berg, M., Harmsen, M., de Boer, H. S., Bouwman, L. F., Daioglou, V., Edelenbosch, O. Y., Girod, B., Kram, T., Lassaletta, L., Lucas, P. L., van Meijl, H., Müller, C., van Ruijven, B. J., van der Sluis, S., & Tabeau, A. (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, 42, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>
- Vélez Upegui, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas*. Universidad de La Rioja.
- Vélez Upegui, J. J., Zambrano Nájera, J., Jódar, J., & Martos Rosillo, S. (2022). Evaluación preliminar de los recursos hídricos para la Siembra de Agua en la cuenca del río Palomino (Colombia). In *Siembra y Cosecha de Agua en Iberoamérica*. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.
- Watson, R. T., Meira Filho, L. G., Sanhueza, E., & Janetos, A. (1992). Greenhouse gases: Sources and Sinks. *Climate Change*, 92, 25–46. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809665-9.09961-4>
- Watson, R. T., Rodhe, H., Oeschger, H., & Siegenthaler, U. (1990). Greenhouse gases and aerosols. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, 1, 17.

- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S. J., Janetos, A., & Edmonds, J. (2009). Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, 324(5931), 1183–1186. <https://doi.org/10.1126/science.1168475>
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62(1–3), 189.
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., & Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), ACL 6-1-ACL 6-15. <https://doi.org/doi:10.1029/2001JD000659>
- Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B., & Strzepek, K. (2003). A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research*, 39(7), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2002WR001769>
- Zhang, F., & Georgakakos, A. P. (2012). Joint variable spatial downscaling. *Climatic Change*, 111(3), 945–972. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0167-9>

8. Anexos

8.1 Producto 1

Durante el curso de esta investigación, se participó en el XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica realizado en Brasil en el año 2022 con la ponencia oral "Comparación entre diferentes estrategias de modelación para evaluar los recursos hídricos en una cuenca tropical andina". La ponencia incluyó la aplicación de la metodología de ensamble multimodelo de modelos hidrológicos conceptuales agregados en una cuenca de la región. A continuación, se presenta el certificado de participación.



CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho intitulado
COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN PARA EVALUAR LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA TROPICAL ANDINA

de autoria de:
Jorge Julián Vélez Upegui; Angie Tatiana Forero Hernández; Elmer Hernández Ramírez; Jhon Alexander Molano Montoya

Foi apresentado na forma ORAL, no XXX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, realizado no período de 07 a 11 de Novembro de 2022, no Hotel Golden Park Internacional Foz & Convenções, em Foz do Iguaçu – PR, Brasil.

Foz do Iguaçu/PR, 11 de Novembro de 2022.

[Assinatura]
Comissão Organizadora
XXX CLH2022

[Assinatura]
Comissão Científica
XXX CLH2022



8.2 Producto 2

Adicionalmente, se participó en la publicación del siguiente artículo de investigación científica y tecnológica en la revista *Scientia et Technica* Año XXV, Vol. 25, No. 04, de diciembre de 2020 de la Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 y ISSN-e: 2344-7214.

Scientia et Technica Año XXV, Vol. 25, No. 04, diciembre de 2020. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 y ISSN-e: 2344-7214

595

Análisis de tendencias climáticas con RCLimindex en el departamento de Caldas, Colombia

Analysis of climatic trends with RCLimindex in Caldas, Colombia.

O. L. Ocampo-López  ; J.J. Vélez-Upegui  ; T. Forero-Hernández  ; J.P. Marín-Salazar 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.22771>

Artículo de investigación científica y tecnológica

Resumen— La presente investigación buscó establecer la existencia de tendencias en los índices extremos climáticos para el departamento de Caldas. Los resultados se obtuvieron a partir del análisis de series históricas con un registro superior a 30 años, 55 en el caso del estudio de las variables asociadas a precipitación y 10 en el caso de la variable temperatura. El análisis se realizó mediante la herramienta RCLimindex, con la cual se identificó la presencia de tendencias crecientes y decrecientes, en aquellas estaciones que presentaron diferencias estadísticamente significativas (P Values $< 0,10$) en los indicadores climáticos evaluados. Este análisis de tendencias de variables climatológicas permite asegurar con un nivel de confianza del 90% que en el departamento podría presentarse un aumento, tanto en la cantidad precipitación como en la duración de los periodos húmedos, pero se concluye que es necesario el fortalecimiento de la red de estaciones en el territorio, con el fin de generar análisis de mayor cobertura, dado que es evidente la ausencia de series históricas en las subregiones Magdalena Caldense, Occidente Próspero y Alto Occidente.

Palabras clave— Clima, Eventos extremos, Lluvia, Índices climáticos, Temperatura.

Abstract— The present research sought to establish the existence of trends in the indices of climate extremes for the department of Caldas. The results were obtained from the analysis of historical series with a record superior to 30 years, 55 in the case of the study of the variables associated to precipitation and 10 in the case of the temperature variable. The analysis was performed using the RCLimindex tool, which identified the presence of increasing and decreasing trends, in those stations that presented statistically significant differences (P Values < 0.10) in the climatic indicators evaluated. This trend analysis of climatological variables allows to ensure with a level of confidence of 90% that in the department there could be an increase, both in the amount of precipitation and in the duration of the wet periods, but it is concluded that the strengthening of the network of stations in the territory in order to generate analysis of greater coverage, given that the absence of historical series in Magdalena Caldense, Occidente Próspero and Alto Occidente subregions is evident.

Index Terms— Climate, Extreme Events, Rain, Indices, Temperature.

I. INTRODUCCIÓN

EL análisis de tendencias climáticas basado en el tratamiento de series históricas del territorio se ha constituido como una herramienta fundamental en el estudio de la climatología característica de una región, lo cual permite identificar patrones de comportamiento asociados a fenómenos como la variabilidad climática, y en el contexto actual, variaciones producidas por efecto del cambio climático.

La interpretación de los resultados obtenidos mediante estudios de este tipo se vincula con la definición de amenazas climáticas y, por lo tanto, con la formulación de planes y programas para la gestión adecuada del recurso hídrico, el riesgo y el cambio climático, que a su vez articulen los esfuerzos realizados por las autoridades territoriales y los representantes de los diferentes sectores económicos, los cuales propenden por el desarrollo de un territorio climáticamente resiliente.

Según lo reportado en los informes del IPCC [1], se han presentado cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos de naturaleza extrema, algunos asociados a factores antropogénicos como el aumento de la temperatura, la elevación del nivel del mar y el incremento de las precipitaciones intensas en todo el planeta; éste último, se relaciona con el aumento de caudales extremos y, consecuentemente, con el incremento de los indicadores de amenaza y riesgo de inundaciones en el contexto regional.

En Colombia, aunque gran parte de las variaciones en los regímenes de precipitación se atribuyen a la ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña [2], [3], se estima que los eventos extremos serán cada vez más recurrentes por la afectación del cambio climático [1].

Investigadores como Pabón [4], [5], [6], Mesa *et al.* [7], Pérez *et al.* [8], Quintana-Gómez [9], León [10], Pabón *et al.*

Este manuscrito fue enviado el 30 de agosto de 2019 y aceptado 23 de noviembre 2020. Trabajo de investigación con el apoyo de la Universidad Autónoma de Manizales, la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corporacaldas).

O. Ocampo está vinculada al Departamento de Mecánica y Producción de la Universidad Autónoma de Manizales, Antigua estación del Ferrocarril, Manizales. (e-mail: olocampo@autonoma.edu.co).

J.J. Vélez está vinculado al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Campus Palogrande (e-mail: jivelezu@unal.edu.co).

A.T. Forero es estudiante de la Maestría en recursos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (e-mail: atforeroh@unal.edu.co).

J.P. Marín es graduada de la Maestría en recursos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (email: jepmarinsa@unal.edu.co).



[11], Poveda *et al.* [12], Acevedo [13] y Poveda [14] analizaron el fenómeno de cambio climático en Colombia, evidenciando tendencias a largo plazo en las variables temperatura y precipitación. Los diversos estudios permitieron establecer que la temperatura media en el país está aumentando entre 0,1 y 0,2°C por década, con un valor promedio de aumento de 0,13°C cada 10 años; en el caso de la variable precipitación, se han presentado reducciones en los valles de los ríos Magdalena y Cauca e incrementos en zona del Piedemonte Llanero y la región Pacífica del país.

Instituciones de carácter nacional como el INVEMAR [15], el IDEAM [16], [17] y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, han realizado estudios para evaluar los posibles impactos del cambio climático en el país. Se destacan los estudios realizados por el IDEAM, los cuales han permitido continuamente comprender el comportamiento del clima en el país [18], [19] y la estimación de la oferta hídrica [20], [21]. Estos estudios evidencian que en Colombia está aumentando la variabilidad temporal de las series hidrológicas y ciertas áreas experimentan reducciones en su oferta hidrológica natural; no obstante, se evidencian también tendencias de calentamiento a largo plazo en las series de temperatura máxima [22] y mínima [23]. Las tendencias de calentamiento estudiadas permiten a su vez caracterizar olas de calor y frío en el territorio nacional [24], facilitando la determinación de señales de cambio climático [25].

El análisis de tendencias en series climáticas ha sido estudiado por diferentes autores como Pérez-Rendón, Ramírez-Builes, & Peña-Quñones [26], quienes mediante el uso del estadístico de Mann-Kendall, identificaron tendencias en las series anuales de temperatura del aire en la región cafetera colombiana y diversas señales de cambio climático. Por otra parte, Mayorga, Hurtado & Benavides [25] estudiaron posibles tendencias en el periodo 1971–2010 empleando la herramienta RCLindex y obtuvieron evidencias de un aumento generalizado tanto de las precipitaciones, como de las tormentas y lluvias intensas en el país, exceptuando zonas en San Andrés, Arauca, Casanare y Alto Cauca donde se detectaron tendencias de reducción en la precipitación.

Con el objetivo de medir y analizar constantemente las señales de cambio climático, los diversos estudios del IDEAM [27] caracterizan los indicadores que presentan cambios en el sistema climático nacional, teniendo como resultados promedios nacionales de las tasas lineales de calentamiento: 0,15°C para el periodo 1961-2010 y 0,20°C para el periodo 1980-201; por otra parte, se estableció el periodo 2001-2010 como el decenio más caluroso y lluvioso, con una temperatura promedio de 22,36°C y una precipitación mensual equivalente a 178,5 mm, siendo el año 2010 el más lluvioso, seguido por el año 2011. En cuanto a la variación del nivel del mar, diversos análisis han estudiado su tasa de incremento, variando en el rango de 3 y 5 mm al año en la costa Pacífica y entre 1 y 2 mm en la costa Caribe [28], [29], [30], [15].

Según estadísticas de la Organización Meteorológica Mundial, durante los últimos cincuenta años, los eventos meteorológicos extremos han causado nueve de cada diez desastres en el mundo [31], [32]; particularmente la primera década del siglo XXI se caracterizó por la ocurrencia de

fenómenos de precipitación extrema, generadores de inundaciones, desbordamientos y deslizamientos [33], [34].

El IPCC [35] define el evento extremo como aquel fenómeno meteorológico “raro” en términos de su distribución estadística de referencia; presenta una baja frecuencia de ocurrencia en el tiempo, esto quiere decir que, entre evento y evento existen periodos extensos [34]. No obstante, los registros evidencian que, en los últimos años, los fenómenos de esta naturaleza han sido más frecuentes e intensos [36], afectando los ecosistemas, el equilibrio en el medio ambiente, los sectores socioeconómicos y las poblaciones [37], especialmente aquellas con menos recursos, deficiente capacidad adaptativa y resiliencia limitada [38], [39], [34].

El análisis de eventos hidroclimáticos extremos permite mejorar la comprensión de la dinámica del clima local tanto en el tiempo como en el espacio [34], [39] y se constituye como una herramienta indispensable para el análisis hidrológico en el cual, se pueden evidenciar señales de la ocurrencia, intensidad y duración de fenómenos de variabilidad climática y cambio climático [3].

El departamento de Caldas, objeto de estudio del presente artículo, se encuentra ubicado en las cordilleras andinas Central y Occidental, que se caracterizan por poseer un clima húmedo y variaciones marcadas en la temperatura durante el día, influenciada por los gradientes altitudinales [40], [41]. El departamento, a pesar de su pequeña extensión, cuenta con cinco pisos térmicos, desde páramos altos hasta zonas cálidas. La abrupta topografía y la amplia variabilidad espacio temporal [40], [42], [43] de la precipitación en el territorio constituyen los factores más preponderantes en la definición de amenazas por deslizamientos.

II. METODOLOGÍA

El análisis de las variables climáticas fue realizado a partir de las series de registros diarios y horarios de las estaciones meteorológicas y pluviométricas administradas por el IDEAM, la CHEC, el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE), ISAGEN y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Las tendencias de las variables climáticas fueron obtenidas mediante el tratamiento de información histórica de las estaciones de monitoreo climático y meteorológico en el departamento de Caldas; para tal fin, se compilaron los resultados del estudio “Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas” [44]. Los índices climáticos analizados se presentan en la Tabla I.

Las series consideradas poseen una extensión superior a 30 años de registro, teniendo un promedio de registro de 42 años en variables asociadas a la precipitación y de 44 años en el registro de variables asociadas a la temperatura. En el caso de las series de precipitación, se consideraron estaciones con registros desde el año 1949 hasta el año 2015, por otra parte, las series de temperatura registran datos de hasta el año 1951. Las Tablas II y III relacionan las estaciones tanto de precipitación como de temperatura, que presentan evidencia de tendencias en su comportamiento.

TABLA I
ÍNDICES CLIMÁTICOS EXTREMOS [45]

Variable	ID	Nombre del indicador	Definición	Unidad	
Precipitación	RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en un día	mm	
	RX5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual de precipitación en 5 días	mm	
	SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos en un año	mm/día	
	CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1$ mm	día	
	CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1$ mm	día	
	R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	mm	
	R99p	Días extremadamente secos	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm	
	PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación total anual en los días húmedos	mm	
	Temperatura	TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura a máxima diaria	°C
		TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura a mínima diaria	°C
TNn		Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura a mínima diaria	°C	

Las series fueron validadas, tratadas estadísticamente y analizadas con la aplicación RCLimindex, para calcular los índices de extremos climáticos y detectar señales de cambio climático.

Para el análisis correspondiente no se complementaron las series históricas, no obstante, se realizaron las pruebas clásicas de homogeneidad.

Estadísticamente, un resultado es significativo cuando es improbable que haya sido debido al azar, para tal efecto se consideró un nivel de significancia del 90%.

TABLA II
ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN CON EVIDENCIA DE TENDENCIAS

Municipio	Estación	Latitud	Longitud	Periodo de registro	
Aguadas	Aguadas	5,600	-75,450	1970	2015
Aguadas	La María	5,583	-75,567	1962	2015
Aguadas	La Pintada	5,733	-75,583	1980	2015
Aguadas	Guaymaral	5,650	-75,450	1961	2014
Pácora	Pacora Plaza Feria	5,517	-75,450	1970	2015
Pácora	La Cascada	5,467	-75,550	1983	2014
Pácora	La Linda	5,550	-75,533	1983	2014
Salamina	Salamina	5,383	-75,483	1970	2015
Salamina	San Félix	5,367	-75,367	1970	2015
Samaná	Florencia	5,517	-75,033	1978	2014
Samaná	La Palma	5,517	-75,033	1964	2014
Norcasia	Norcasia	5,164	-75,517	1979	2015
Norcasia	El Vergel	5,566	-74,881	1980	2014
Victoria	La Victoria	5,317	-74,900	1974	2015
Victoria	La Pastorita	5,317	-74,967	1979	2014
Victoria	Cañaveral	5,321	-74,942	2012	2014
Manzanares	Manzanares	5,250	-75,133	1972	2014
Manzanares	Llanadas	5,200	-75,133	1956	1998
Marquetalia	Marquetalia	5,283	-75,050	1963	2015
Marquetalia	Santa Helena	5,318	-74,996	1980	2014
Marulanda	Marulanda	5,267	-75,267	1974	2015
Pensilvania	San José Pensilvania	5,367	-75,133	1974	2015
Pensilvania	Bolivia	5,327	-75,117	1964	2002
Pensilvania	Pensilvania	5,386	-75,156	1976	2014
Pensilvania	San Daniel	5,378	-75,077	1968	2002
Marmato	El Descanso	5,500	-75,608	1980	2013
Riosucio	Riosucio	5,417	-75,717	1970	2015
Riosucio	La Argentina	5,467	-75,700	1986	2014
Riosucio	La Manuelita	5,367	-75,6833	1970	2014
Supía	Rafael Escobar	5,458	-75,641	1971	2014
Anserma	Bellavista	5,267	-75,800	1963	2015
Chinchiná	La Esperanza Chinchiná	4,636	-75,686	1970	2014
Chinchiná	Cenicafé	5,000	-75,600	1951	2014

Chinchiná	La Francia	4,969	-75,650	1977	2014
Chinchiná	Naranjal	4,972	-75,652	1956	2014
Chinchiná	Ínsula	5,002	-75,648	1960	2012
Chinchiná	Montevideo	4,996	-75,576	1960	2012
Manizales	Apto La Nubia	5,030	-75,467	1968	2014
Manizales	Agronomía	5,057	-75,495	1956	2014
Manizales	Java	5,014	-75,541	1980	2014
Manizales	Planta Sancancio	5,040	-75,502	1960	2012
Manizales	Subestación Alta Suiza	5,059	-75,485	1975	2012
Manizales	Subestación Marmato	5,066	-75,518	1965	2010
Manizales	Subestación Uribe	5,060	-75,542	1975	2012
Neira	La Cristalina	5,193	-75,433	1970	2015
Neira	Neira	5,267	-75,267	1970	2015
Neira	Neira Rio Tapias	5,162	-75,607	1975	2012
Palestina	Apto Santaguada	5,083	-75,683	1949	1989
Palestina	Arauca	5,109	-75,705	1962	2012
Palestina	El Recreo	5,037	-75,647	1970	2014
Palestina	Granja Luker	5,067	-75,683	1964	2014
Palestina	Santaguada	5,073	-75,673	1964	2014
Villamaria	Las Brisas	4,902	-75,350	1981	2014
Villamaria	Papayal	4,951	-75,489	1970	2014
Villamaria	Montenegro Molinos	4,942	-75,469	1963	2012

TABLA III
ESTACIONES DE TEMPERATURA CON EVIDENCIA DE TENDENCIAS

Municipio	Estación	Latitud	Longitud	Periodo de registro	
Salamina	San Félix	5,3667	-75,3667	1983	2015
Manzanares	Llanadas	5,2	-75,1333	1956	1998
Marquetalia	Santa Helena	5,3175	-74,9961	1981	2014
Supia	Rafael Escobar	5,4578	-75,6411	1982	2005
Anserma	Bellavista	5,2667	-75,8	1978	2015
Chinchiná	Cenicafé	5	-75,6	1951	2014
Chinchiná	Naranjal	4,9719	-75,6522	1956	2014
Manizales	Agronomía	5,0567	-75,4953	1956	2014
Palestina	Granja Luker	5,0667	-75,6833	1972	2014
Palestina	Santaguada	5,0733	-75,6731	1965	2014

Finalizado el tratamiento con Rclimdex de 55 series históricas de precipitación y 10 de temperatura para el departamento de Caldas, se identificó la existencia de tendencias crecientes y decrecientes, en aquellas estaciones que presentaron diferencias estadísticamente significativas (P Values $< 0,10$) en los indicadores climáticos.

Las estaciones con sus correspondientes años de registro y georreferenciación se exponen en las Tablas I y II. El análisis

de tendencias arrojó diferencias estadísticamente significativas, en al menos un indicador de la variable precipitación, en 49 estaciones, las cuales se exponen en la Fig.1.

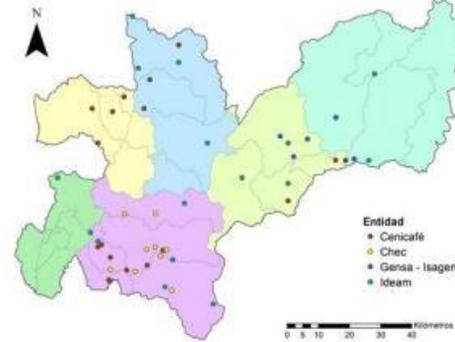


Fig. 1 Estaciones de precipitación con tendencias estadísticamente significativas.

El análisis con Rclimdex estimó tendencias en 7 estaciones, en al menos un índice climático extremo relacionado a la variable temperatura; su localización se expone en la Fig.2.

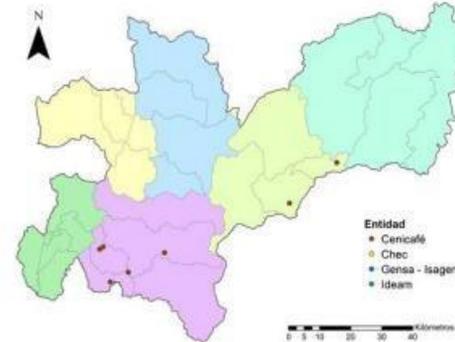


Fig. 2 Estaciones de temperatura con tendencias estadísticamente significativas.

III. RESULTADOS

El análisis de indicadores asociados a la variable precipitación se articula con la estimación de lluvias de diseño para obras de ingeniería. Por otra parte, los indicadores asociados a la variable temperatura se relacionan con los estudios y caracterizaciones de la climatología regional.

A continuación, se presentan en detalle los resultados de las tendencias identificadas en los índices climáticos extremos evaluados; cabe resaltar que el análisis se realizó en escala subregional.

A. Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1day)

En el análisis del comportamiento histórico de la

precipitación anual total y el número de días húmedos, se registraron tendencias en 22 estaciones localizadas en el departamento de Caldas, tal como se ilustra en la Fig.3.

Se registraron tendencias crecientes en las estaciones Guaymaral, Aguadas, La Palma, La Victoria, Pensilvania, San Daniel, Llanadas, Neira, Marmato, Planta Sancancio, El Recreo y Naranjal; mientras que, se reportaron tendencias decrecientes en las estaciones La Cascada, La Pastorita, Marulanda y Bellavista.

En las demás estaciones, no se registraron tendencias, crecientes o decrecientes, en las estaciones evaluadas, por lo cual se concluye que la variable tiene un comportamiento estable.

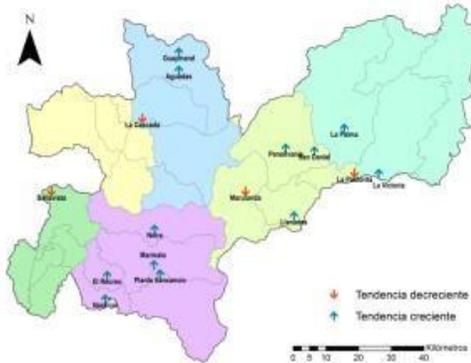


Fig. 3 Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1day)

B. Cantidad máxima de precipitación en 5 días (RX5day)



Fig. 4 Cantidad máxima de precipitación en 5 días (RX5day)

En el análisis del comportamiento histórico de la precipitación en un intervalo de 5 días, se registraron tendencias en 12 estaciones, como se ilustra en la Fig.4. Las estaciones Aguadas, San Félix, La Pastorita, La Victoria, Santa Helena, Pensilvania, El Descanso, La Manuelita, Subestación Alta Suiza, Planta Sancancio y Java mostraron tendencias crecientes, mientras que, la estación Marulanda, presentó

tendencias decrecientes.

C. Índice simple de intensidad diaria (SDII)

En el análisis del comportamiento histórico de la precipitación anual total y el número de días húmedos, se registraron tendencias en 22 estaciones, tal como se ilustra en la Fig.5.



Fig. 5 Índice simple de intensidad diaria (SDII)

Tendencias crecientes fueron evidentes en las estaciones Aguadas, San Félix, Cañaveral, Santa Helena, Bolivia, Planta Sancancio, Montevidéo, Papayal, Cenicafé, Montevidéo, Naranjal y Rafael Escobar; por otro lado, se reportaron tendencias decrecientes en las estaciones La Pintada, La Linda, La Cascada, Norcasia, La Pastorita, La Palma, San Daniel, San José Pensilvania, Marulanda, La Cristalina y Neira Río Tapias.

D. Días secos consecutivos (CDD)



Fig. 6 Días secos consecutivos (CDD)

En el análisis del comportamiento histórico del número máximo de días secos consecutivos, se registraron tendencias en 13 estaciones, presentadas en la Fig.6.

Tendencias crecientes se manifestaron en las estaciones Aguadas, Bolivia y Montevidéo y tendencias decrecientes en las estaciones La Pintada, La Linda, Norcasia, Marulanda, Subestación Alta Suiza, Apto La Nubia, Granja Luker, Apto

Santagueda, Neira Rio Tapias y La Manuelita.

E. Días húmedos consecutivos (CWD)

Según el análisis del comportamiento histórico del número máximo de días húmedos consecutivos, se registraron tendencias en 23 estaciones, como se ilustra en la Fig.7.

El análisis realizado presentó tendencias crecientes en las estaciones La Pintada, Norcasia, La Victoria, Cañaveral, La Pastorita, Pensilvania, San José Pensilvania, Manzanares, Papayal, Java, Ínsula, Neira Rio Tapias, Bellavista, La Manuelita, Riosucio y La Argentina.

Se reportaron tendencias decrecientes en las estaciones Lanadas, Montenegro Molinos, Montevideo, Cenicafé y Arauca.



Fig. 7 Días húmedos consecutivos (CWD)

F. Días muy húmedos (R95p)



Fig. 8 Días muy húmedos (R95p)

El comportamiento histórico de la precipitación anual total que se encuentra por encima del percentil 95, registró tendencias en 22 estaciones, como se muestra en la Fig.8.

Se reportaron tendencias crecientes en las estaciones Guaymaral, Aguadas, La María, San Félix, La Palma, La Pastorita, Santa Helena, Bolivia, Neira, Marmato, Subestación Alta Suiza, Planta Sancancio, Java, Uribe, Cenicafé, Naranjal,

El Recreo, Santagueda, Neira Rio Tapias y Riosucio, mientras que, solo se reportan tendencias decrecientes en la estación Marulanda.

G. Días extremadamente secos (R99p)

En el análisis del comportamiento histórico de la precipitación anual total que se encuentra por encima del percentil 99, se registraron tendencias en 15 estaciones, como se ilustra en la Fig.9.

Tendencias crecientes fueron evidentes en las estaciones Aguadas, San Félix, Pensilvania, San Daniel, Bolivia, Santa Helena, Llanadas, Neira, Uribe, Subestación Alta Suiza, Planta Sancancio y Naranjal y tendencias decrecientes en las estaciones La Pintada, La Cascada, La Pastorita y Marulanda.



Fig. 9 Días extremadamente secos (R99p)

H. Precipitación total anual en los días húmedos (PRCPTOT)

El análisis del comportamiento histórico de la precipitación anual total en los días húmedos registró tendencias en 19 estaciones localizadas en el departamento de Caldas, tal como se ilustra en la Fig.10.

Se presentaron tendencias crecientes en las estaciones Aguadas, Norcasia, La Pastorita, Bolivia, Pensilvania, Subestación Alta Suiza, Planta Sancancio, Java, Naranjal, La Francia, Neira Rio Tapias, Bellavista, La Manuelita, Riosucio, La Argentina y Rafael Escobar, mientras que, se reportaron tendencias decrecientes en las estaciones San Daniel, Montenegro Molinos y Montevideo.



Fig. 10 Precipitación total anual en los días húmedos (PRCPTOT)

I. Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria (TXx)

El comportamiento histórico de la máxima temperatura diaria registró tendencias en 3 estaciones, como se muestra en la Fig.11.

Los resultados del análisis en las estaciones Llanadas y Cenicafé mostraron tendencias crecientes; por su parte la estación Santa Helena presentó tendencias decrecientes.



Fig. 11 Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria (TXx)

J. Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria (TNx)

En el análisis del comportamiento histórico de la mínima temperatura diaria, se registraron tendencias en 6 estaciones, como se ilustra en la Fig.12.

Tendencias crecientes fueron expuestas en las estaciones Llanadas, Granja Luker, Agronomía, Santaguada, Cenicafé y Naranjal.



Fig. 12 Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria (TNx)

K. Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria (TNn)

En el análisis del comportamiento histórico de la mínima temperatura diaria, se registraron tendencias en 7 estaciones, como se ilustra en la Fig.13.

En las estaciones Santa Helena, Llanadas, Agronomía, Granja Luker, Santaguada, Cenicafé y Naranjal se evidenciaron tendencias crecientes.

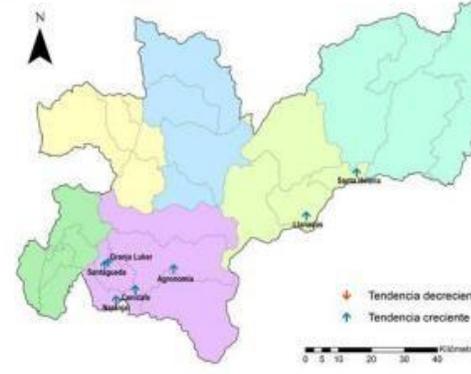


Fig. 13 Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria (TNn)

IV. CONCLUSIONES

El análisis de tendencias de variables climatológicas considerando efectos de cambio climático permite asegurar con un nivel de seguridad del 90% que en el departamento podría presentarse un aumento en la cantidad precipitación y en la duración de los periodos húmedos. En la Tabla IV, se exponen los resultados más relevantes de los índices evaluados a nivel subregional, siendo P las tendencias positivas y N las tendencias negativas.

TABLA IV
RESULTADOS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS EXTREMOS

Índice	Norte	Magdalena Caldense	Alto Oriente	Alto Occidente	Occidente Próspero	Centro Sur
RX1day	P - N	P - N	P - N		N	P
RX5day	P	P	P - N	P		P
SDII	P - N	P - N	P - N	P		P - N
CDD	P - N	N	P - N	N		P - N
CWD	P	P	P - N	P	P	P - N
R95p	P	P	P - N	P		P
R99p	P - N	N	P - N			N
PRCPTOT	P	P	P - N	P	P	P - N
TXx			P - N			P
TNx			P			P
TNn			P			P

REFERENCIAS

- [1] IPCC, 2014 "Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- [2] A. Velásquez y C. Rosales, "Los pasos de El Niño en Colombia 1980 - 2001." Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2002.
- [3] O. Ocampo, J. Vélez y A. Londoño, "Análisis de vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Chinchiná." Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2014.
- [4] J. D. Pabón, "Búsqueda de Series de Referencia para el Seguimiento de la Señal Regional del Calentamiento Global." *Cuadernos de Geografía*, nº 5, pp. 164-173, 1995.
- [5] J. D. Pabón, "El cambio climático global y su manifestación en Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, nº 12, pp. 111-119, 2003.
- [6] J. D. Pabón, "Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI" *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 36, nº 139, pp. 262-278, 2012.
- [7] O. J. Mesa, G. Poveda y L. F. Carvajal, Introducción al clima de Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 1997.
- [8] C. A. Pérez, G. Poveda, O. J. Mesa, L. Carvajal y A. Ochoa, "Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual." *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, vol. 3, nº 27, pp. 537-546, 1998.
- [9] R. Quintana Gómez, "Trends of Maximum and minimum Temperatures in Northern South America." *Journal of Climate*, vol. 6, nº 12, pp. 2104-2112, 1999. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2104:tomam>2.0.co;2
- [10] G. E. León, "Tendencia de la temperatura del aire en Colombia." *Meteorología Colombiana*, vol. 2, pp. 57-65, 2000.
- [11] Pabón-Caicedo J.D., "Cambios en los patrones de temperatura media anual del aire y precipitación anual en los páramos de Colombia" de *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor*, Bogotá D.C, Castaño-Urbe C, 2002, pp. 242-251.
- [12] G. Poveda, J. I. Vélez, O. Mesa, A. Cuartas, J. Barco, R. Mantilla, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, J. M. Ramírez, L. I. Ceballos, M. D. Zuluaga, P. A. Arias, B. A. Botero, M. I. Montoya, J. D. Giraldo y D. I. Quevedo, "Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia." *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 1, nº 12, pp. 1-4, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4)
- [13] L. Acevedo, "Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia.", Medellín: Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [14] G. Poveda, "Evidences of climate and environmental change on water resources and malaria in Colombia." de *IOP Conf. Series, Earth Environ. Sci.*, 2009. DOI: 10.1088/1755-1307/6/9/292054
- [15] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras 'José Benito Vives De Andreis', "Capacity Building to Improve Adaptability to Sea Level Rise in Two Vulnerable Points of the Colombian Coastal Areas (Tumaco-Pacific Coast and Cartagena-Caribbean Coast) with Special Emphasis on Human Population under Poverty Conditions." INVEMAR, Santa Marta, 2008.
- [16] IDEAM. Instituto Nacional de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, "Primera Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático." IDEAM, Bogotá D.C, 2001.
- [17] IDEAM. Instituto Nacional de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, "2ª Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático." IDEAM, Bogotá D.C, 2010.
- [18] IDEAM, "Atlas Climatológico de Colombia." Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. IDEAM., Bogotá D.C, 2005.
- [19] IDEAM, "Atlas Climatológico de Colombia." 2015. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/>.
- [20] IDEAM, "Estudio Nacional del Agua." IDEAM, Bogotá D.C, 2010.
- [21] IDEAM, "Estudio Nacional del Agua 2014." IDEAM, Bogotá D.C, 2015.
- [22] G. Hurtado, "Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia." IDEAM, Bogotá D.C, 2012.
- [23] G. Hurtado, "Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de las temperaturas mínimas medias para las regiones hidroclimáticas de Colombia." IDEAM, Bogotá D.C, 2012.
- [24] G. Hurtado, "Características y tendencias a largo plazo de las olas de calor y de frío en Colombia." IDEAM, Bogotá D.C, 2012.
- [25] R. Mayorga, G. Hurtado y H. Benavides, "Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística." Nota Técnica IDEAM, Bogotá D.C, 2011.
- [26] E. P. Pérez, V. H. Ramírez y A. J. Peña, "Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana." *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, vol. 89, nº 2016, p. 23-40, 2016. DOI: 10.14350/ig.38707
- [27] H. O. Benavides y C. E. Rocha, "Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia (Años y décadas más calientes y las más y menos lluviosas)." Nota Técnica IDEAM, Bogotá D.C, 2012.
- [28] E. S. Rangel y J. E. Montealegre, "Análisis de las series del nivel del mar en el Pacífico colombiano y su relación con el cambio climático." *Meteorología Colombiana*, vol. 7, pp. 53-66, 2003. DOI: 10.13140/RG.2.1.2006.1206
- [29] J. D. Pabón, "El cambio climático global y su manifestación en Colombia." *Cuadernos de Geografía*, Vols. %1 de %21-2, nº 12, pp. 111-119, 2003.
- [30] J. D. Pabón y J. A. Lozano, "Aspectos relacionados con las estimaciones globales y regionales del ascenso del nivel del mar y su aplicación a Colombia." *Cuadernos de Geografía*, nº 14, pp. 97-106, 2005.
- [31] Organización Meteorológica Mundial - OMM, "La información sobre el clima, un instrumento para reducir los riesgos de desastres." de *Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima*, Ginebra, 2009.
- [32] Organización Meteorológica Mundial - OMM, "El Clima y Tú." Ginebra, 2011.
- [33] Organización Meteorológica Mundial - OMM, "El estado del clima mundial 2001-2010. Un decenio de fenómenos climáticos extremos." Ginebra, 2013.
- [34] J. P. Marín, "Dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática." Manizales: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales,

- 2017.
- [35] IPCC, "Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático." Ginebra, 2012.
- [36] IPCC, "Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis." Ginebra, 2007.
- [37] J. Fallas y C. Valverde, "Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años." de Congreso Geoprocesamiento 2007. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica, 2007.
- [38] Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, "Panorama del Impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe." 2000.
- [39] Organización Meteorológica Mundial - OMM, "Resumen de conclusiones y cifras actualizadas sobre el cambio climático." Ginebra, 2011.
- [40] J. Eslava, "Climatología y Diversidad Climática de Colombia." Rev. Acad. Colomb. Cienc, vol. 18, n° 71, pp. 507-538, 1993.
- [41] R. Martínez, D. Ruiz, M. Andrade, L. Blacutt, D. Pabón, E. Jaimes, G. León, M. Villacis, J. Quintana, E. Montealegre y C. Euscátegui, "Sistemas del Clima de los Andes Tropicales." de Cambio climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales, Inter-American Institute for Global Change Research and Scientific Committee on Problems of the Environment, 2013, pp. 117-130.
- [42] J. D. Pabón, J. A. Eslava, J. Pelkowski, G. J. Montoya y E. E. Vega, "Resultados de la simulación del clima por CCM3." Meteorología Colombiana, vol. 4, pp. 61-64, 2001.
- [43] G. Poveda, "Mixed memory, (non) Hurst effect, and maximum entropy of rainfall in the tropical Andes." Advances in Water Resources, vol. 2, n° 34, pp. 243-256, 2011. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.11.007
- [44] O. L. Ocampo, "Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas, Manizales." Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2018.
- [45] X. Zhang y F. Yang, RCLimDex (1.0) Manual de Usuario, 2004.



Jorge Julián Vélez Upegui Ingeniero Civil de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Doctor En Planificación y Gestión de Recursos Hidráulicos de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Actualmente es Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, y en esta universidad se ha desempeñado además de docente e investigador como Director del Laboratorio de Hidráulica, Director del Instituto de Estudios Ambientales IDEA y Director del Departamento de Ingeniería Civil. Sus investigaciones se han centrado en Procesos Hidrológicos de cuenca, Modelación hidrológica, Análisis espacio temporal de variables climáticas, Hidráulica fluvial, transporte y monitoreo de sedimentos en corrientes naturales, Riesgos por inundación y Diseño de redes de monitoreo ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3856-1105>



Tatiana Forero Hernández Ingeniera Civil, Especialista en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Estudiante de Maestría en Ingeniería- Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Vinculada al Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Se desempeñó como contratista de la Universidad Autónoma de Manizales en los proyectos de Agendas de Cambio Climático y el Plan de Gestión Integral de Cambio Climático para el departamento de Caldas. Contratista del Instituto de Estudios Ambientales IDEA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8317-5177>



Olga Lucía Ocampo López es Ingeniera Química, Especialista en Ingeniería Ambiental, Maestría en Ingeniería Química, Doctora en Ingeniería Línea Automática de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Actualmente es profesora Asociada de la Universidad Autónoma de Manizales e investigadora Senior de los grupos Diseño Mecánico y Desarrollo Industrial y Desarrollo Regional Sostenible.

Sus investigaciones se centran en cambio climático y variabilidad climática, modelación hidrológica, sostenibilidad, gestión ambiental, gestión de procesos y tecnología, responsabilidad social e innovación. Coordinó los proyectos de Agendas de Cambio Climático y el Plan de Gestión Integral de Cambio Climático para el departamento de Caldas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6394-977X>



Jenny Paola Marín Salazar Ingeniera Civil, Especialista en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Maestría en Ingeniería- Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Ha sido contratista del Laboratorio de Hidráulica y del Instituto de Estudios Ambientales IDEA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales; se ha desempeñado como contratista del Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

8.3 Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a la información base

Resultados de pruebas realizadas a la serie diaria de precipitación en la estación Agronomía

Test	Prueba	Tipo	Hipótesis nula	Resultado	Conclusión
Normalidad	Kolmogorov Smirnov		Ho = Los datos siguen una distribución normal	$p=0$	Se rechaza la hipótesis nula
Normalidad	Jarque Bera		Ho = Los datos siguen una distribución normal	$p=0$	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Autocorrelación	Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, $z(0.05)=1960$	$z=26.483$	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Median Crossing	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, $z(0.05)=1960$	$z=38.492$	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Turning Point	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	$p=0$	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Rank Difference	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	$p=0.097$	No se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Linear regression	Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	$p=0.056$ (corr=0.013)	No se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Mann-Kendall	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	$p=0$	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Spearman's Rho	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	$p=0.752$ (rho=-0.002)	No se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Cumulative deviation	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	$Q=1.98$, Cambio=1998/10/11 ($Q(0.05)=1.36$)	No se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Worsley likelihood	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	$W=6.048$, Cambio=2017/10/27 ($W(0.05)=NA$)	No se rechaza la hipótesis nula
Diferencia en media/mediana en dos periodos	U Mann Whitney	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la mediana de los dos periodos	$p=0.037$	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	F	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	$p=0.002$	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Bartlett	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	$p=0.002$	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Siegel - Tukey	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	$p=0.104$	No se rechaza la hipótesis nula

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de pruebas realizadas a la serie diaria de temperatura en la estación Agronomía

Test	Prueba	Tipo	Hipótesis nula	Resultado	Conclusión
Normalidad	Kolmogorov Smirnov		Ho = Los datos siguen una distribución normal	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Normalidad	Jarque Bera		Ho = Los datos siguen una distribución normal	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Autocorrelación	Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, $z(0.05)=1960$	z=89.403	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Median Crossing	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, $z(0.05)=1960$	z=61.854	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Turning Point	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Rank Difference	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	p=0.056	No se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Linear regression	Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0 (corr=0.342)	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Mann-Kendall	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Spearman's Rho	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0 (rho=0.336)	Se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Cumulative deviation	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	Q=24.8, Cambio=1995/1 1/4 (Q(0.05)=1.36)	No se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Worsley likelihood	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	W=57.806, Cambio=2000/4/ 2 (W(0.05)=NA)	No se rechaza la hipótesis nula
Diferencia en media/mediana en dos periodos	U Mann Whitney	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la mediana de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	F	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Bartlett	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Siegel - Tukey	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0.091	No se rechaza la hipótesis nula

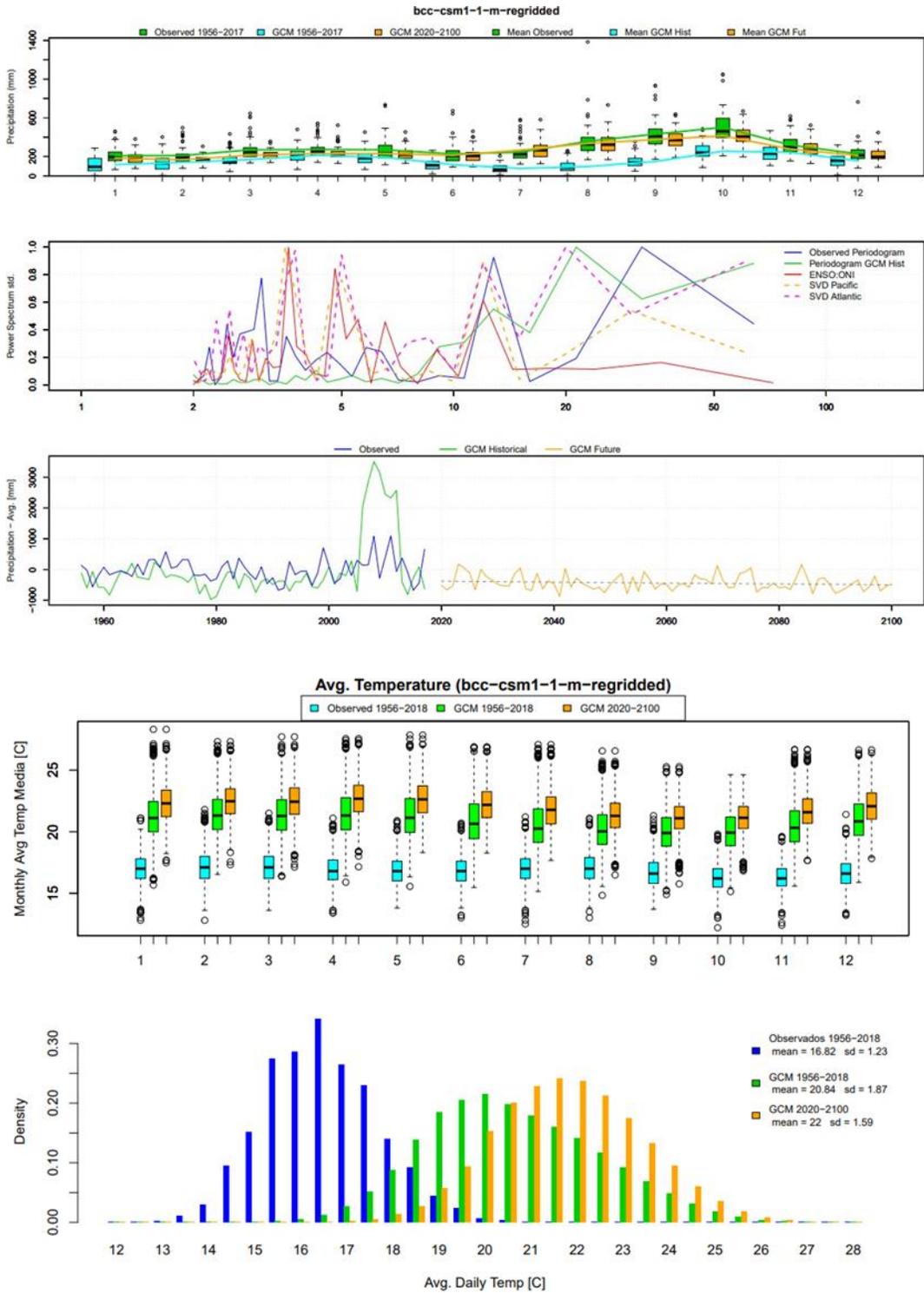
Fuente: Elaboración propia.

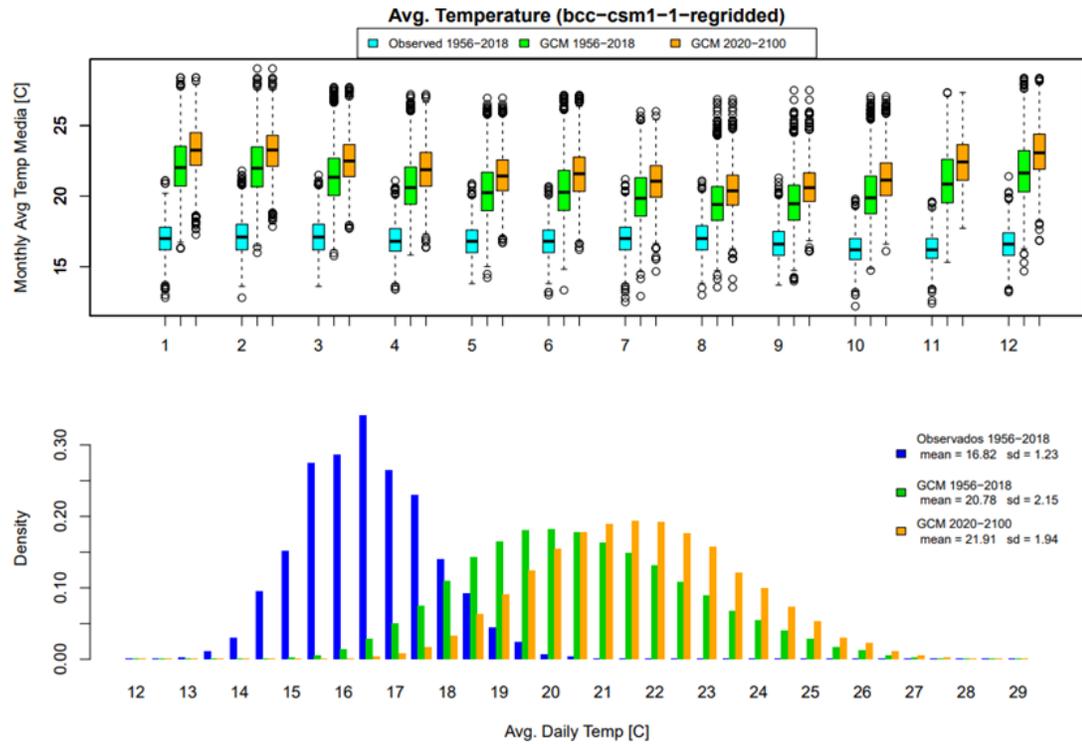
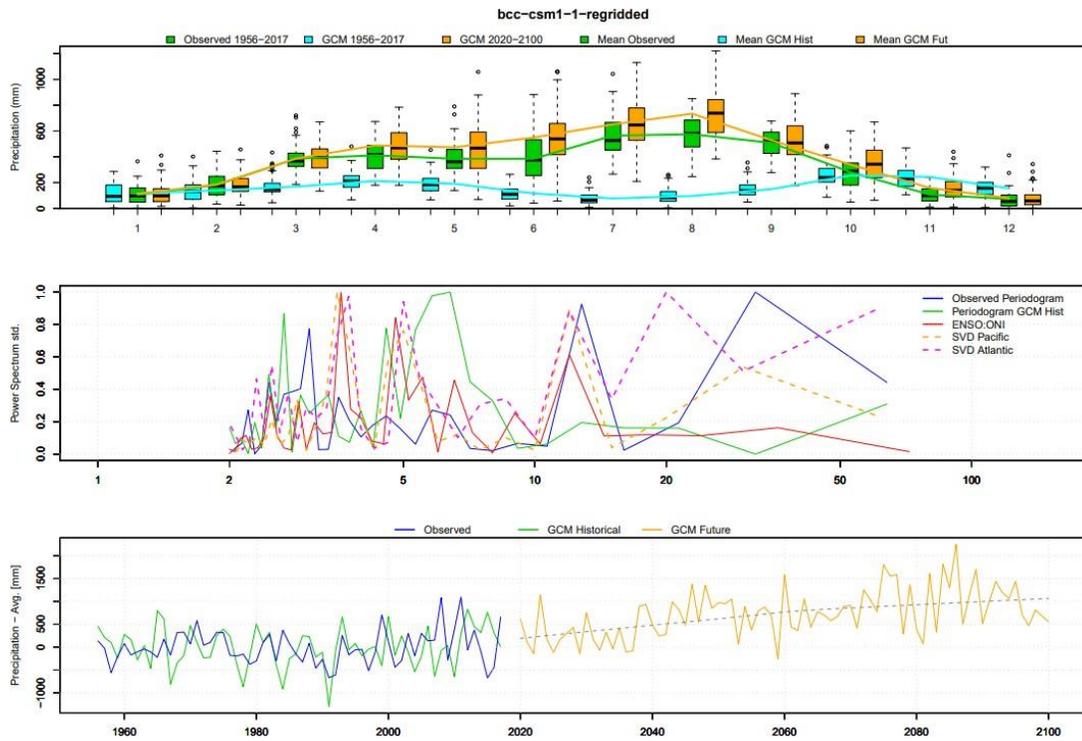
Resultados de pruebas realizadas a la serie de caudales medios diarios en la estación El Popal

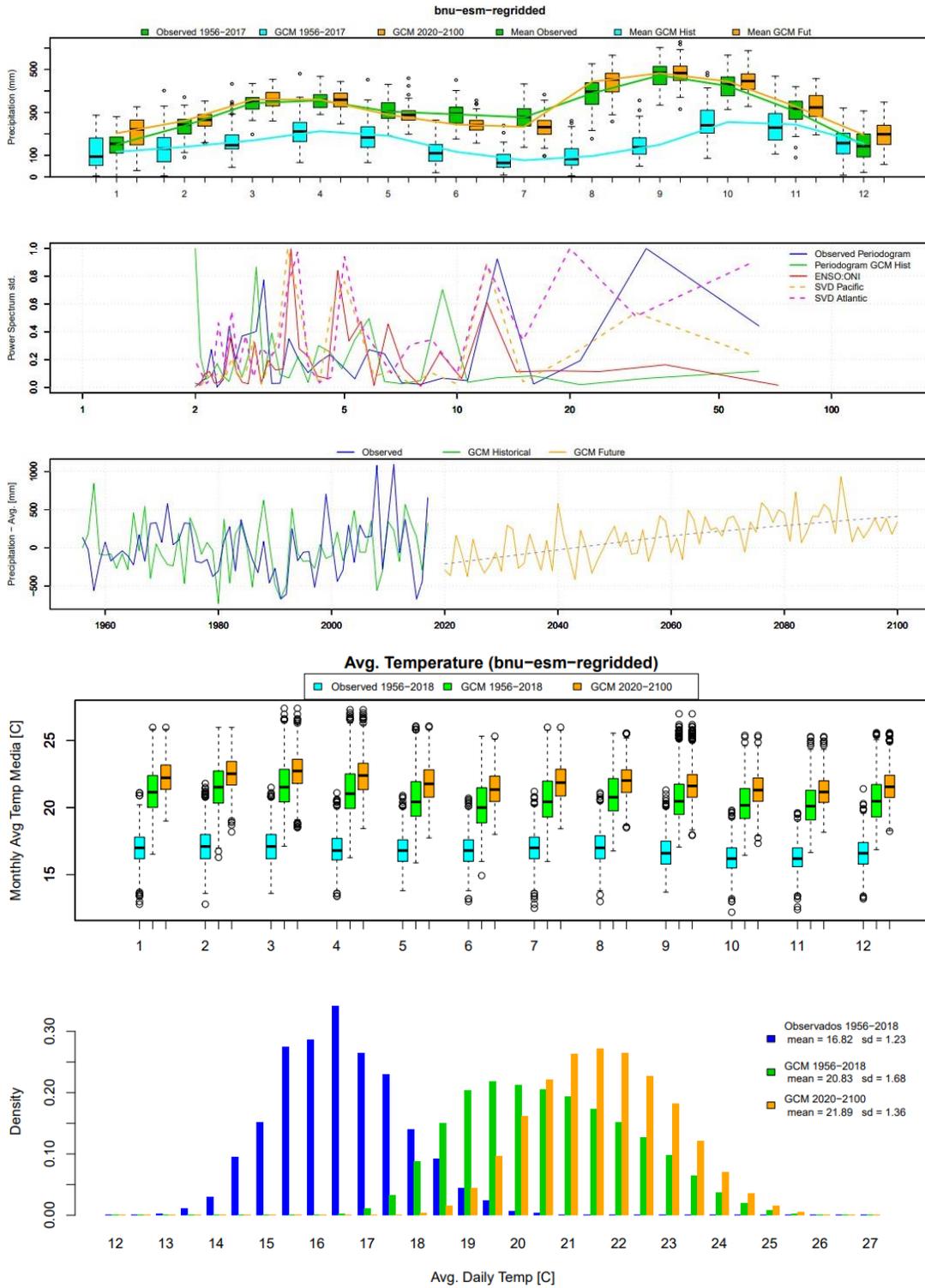
Test	Prueba	Tipo	Hipótesis nula	Resultado	Conclusión
Normalidad	Kolmogorov Smirnov		Ho = Los datos siguen una distribución normal	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Normalidad	Jarque Bera		Ho = Los datos siguen una distribución normal	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Autocorrelación	Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, z(0.05)=1960	z=43.86	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Median Crossing	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio, z(0.05)=1960	z=40.052	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Turning Point	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Aleatoriedad	Rank Difference	No Paramétrico	Ho = Los datos provienen de un proceso aleatorio	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Linear regression	Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0 (corr = -0.242)	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Mann-Kendall	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Tendencia	Spearman's Rho	No Paramétrico	Ho = Los datos no tienen tendencia	p=0 (rho = -0.252)	Se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Cumulative deviation	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	Q=7.95, Cambio=2012/1/24 (Q(0.05)=1.36)	Se rechaza la hipótesis nula
Cambio en media/mediana	Worsley likelihood	Paramétrico	Ho = No hay saltos en la media	W=24.985, Cambio=2011/12/27 (W(0.05)=NA)	Se rechaza la hipótesis nula
Diferencia en media/mediana en dos periodos	U Mann Whitney	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la mediana de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	F	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Bartlett	Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula
Estabilidad en la Varianza en dos periodos	Siegel - Tukey	No Paramétrico	Ho = No hay diferencia entre la varianza de los dos periodos	p=0	Se rechaza la hipótesis nula

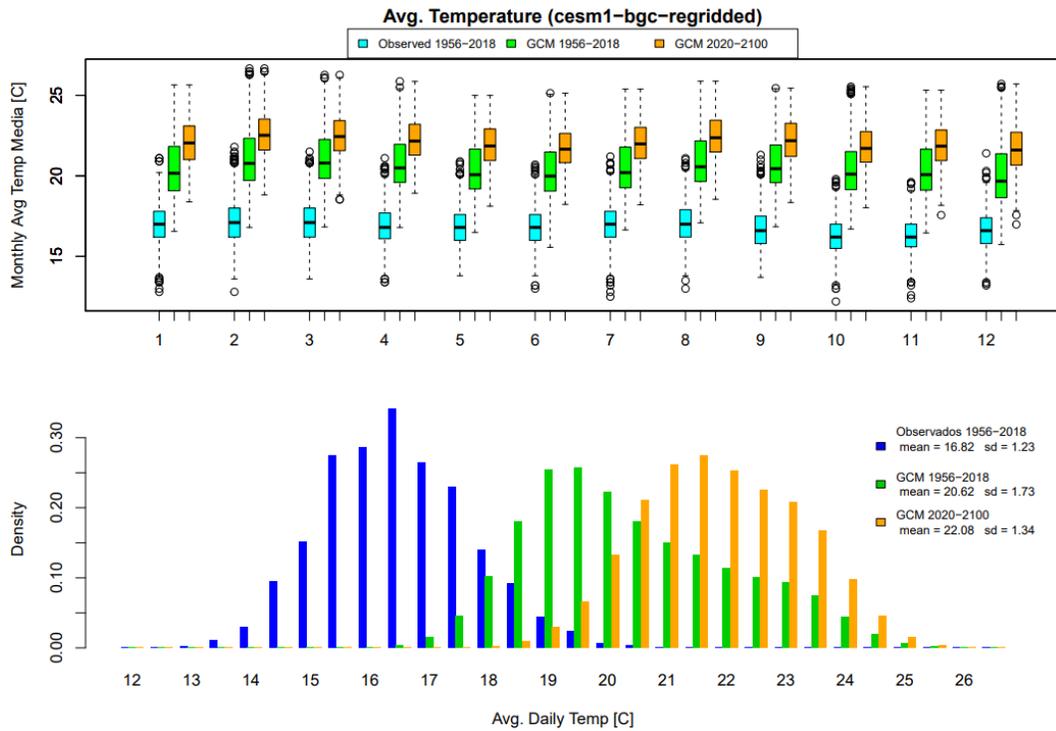
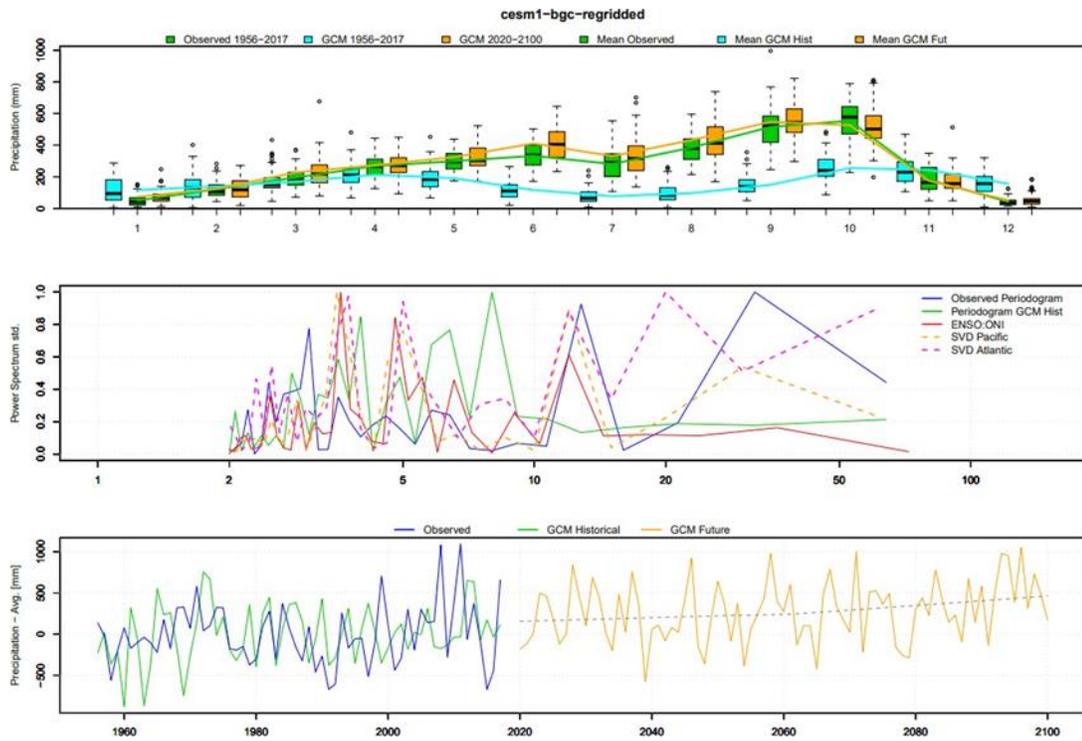
Fuente: Elaboración propia.

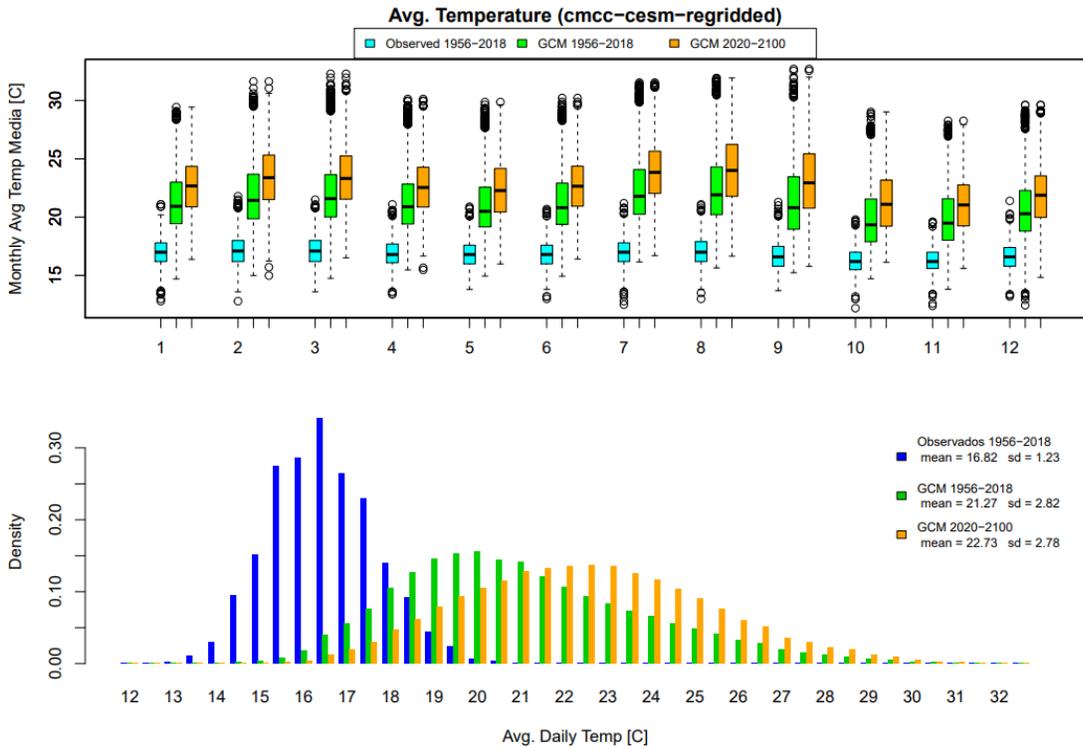
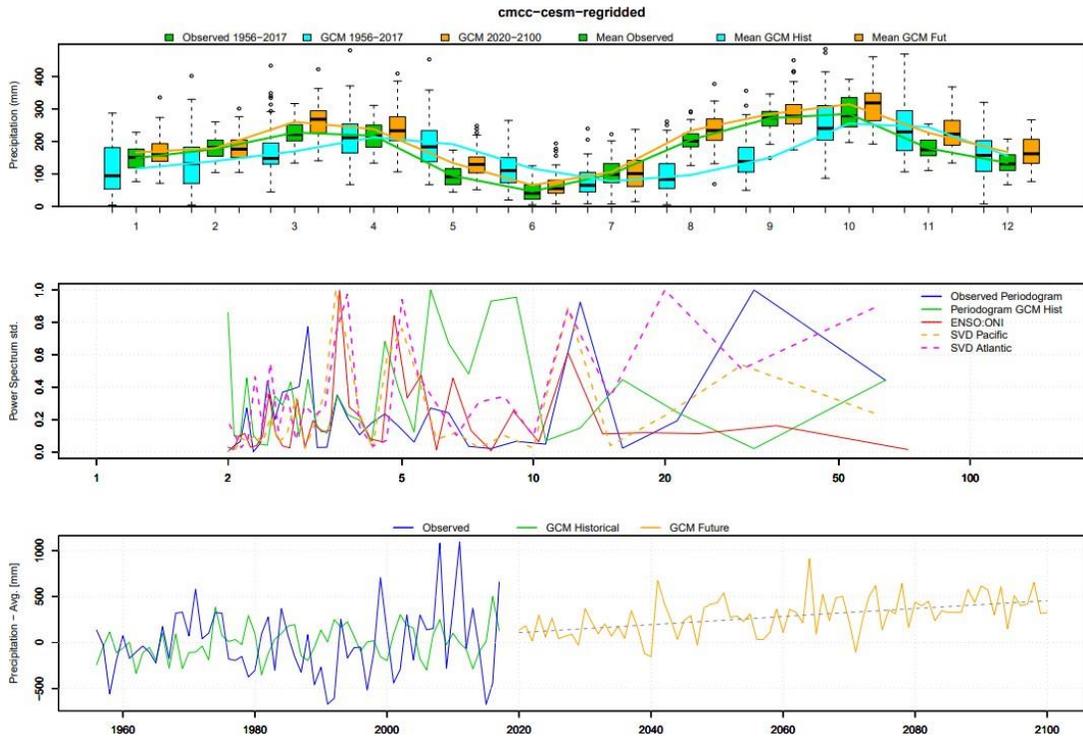
8.4 Resultados de simulación climática obtenidos a partir de MCG

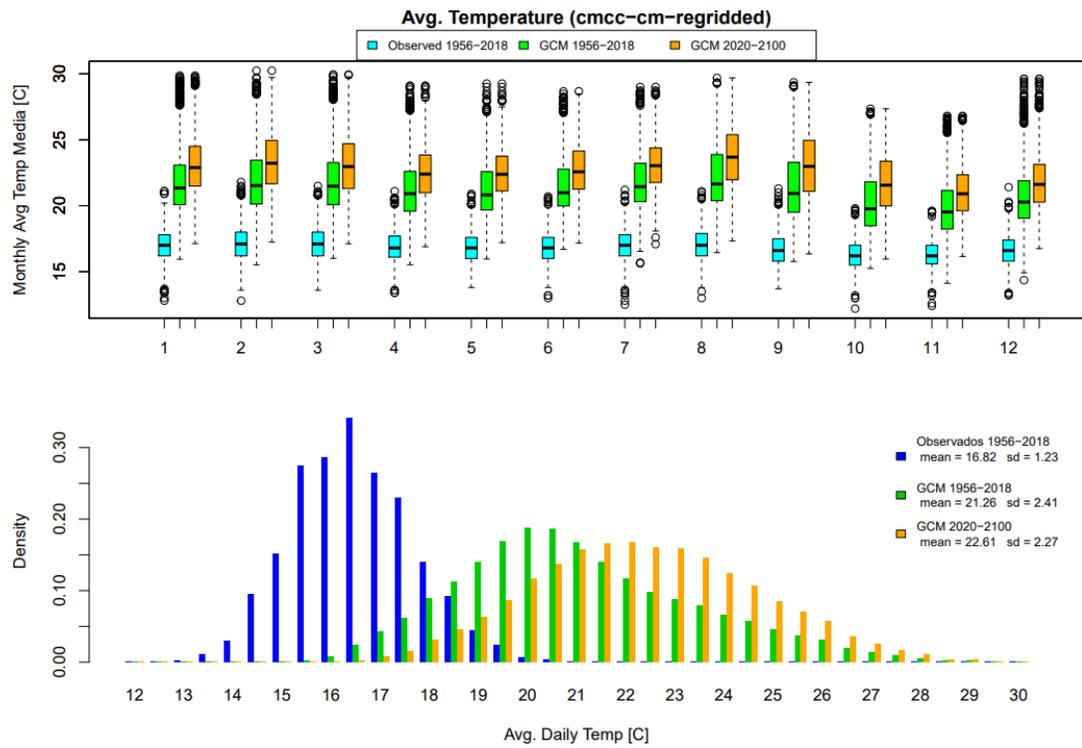
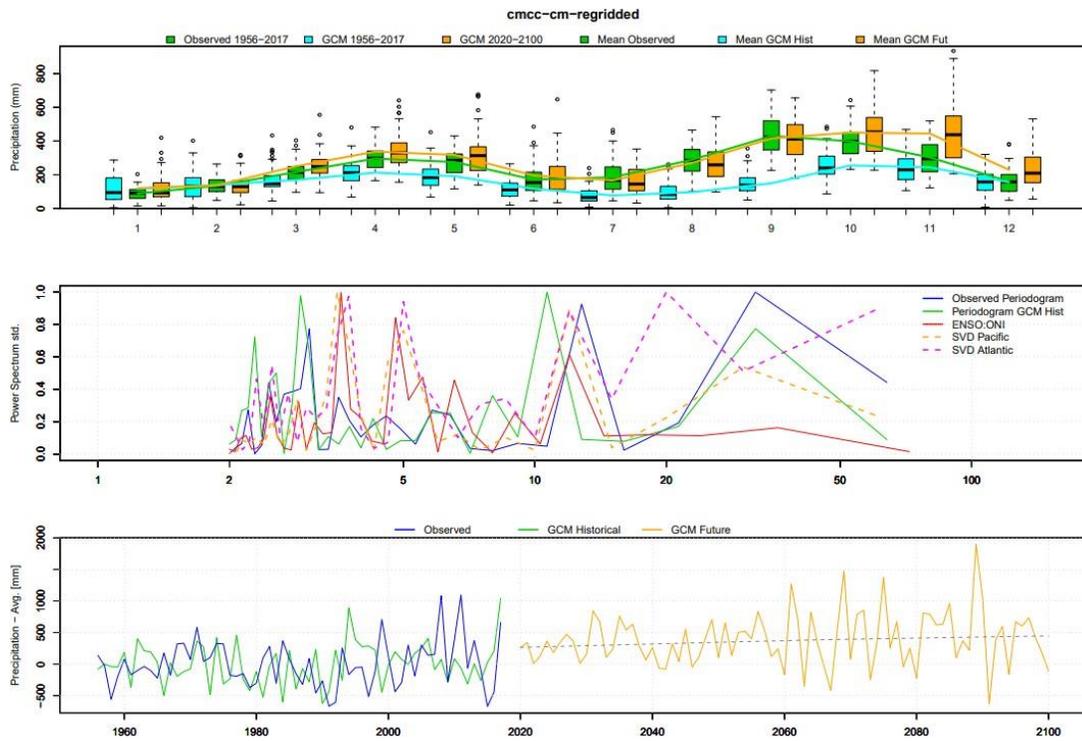


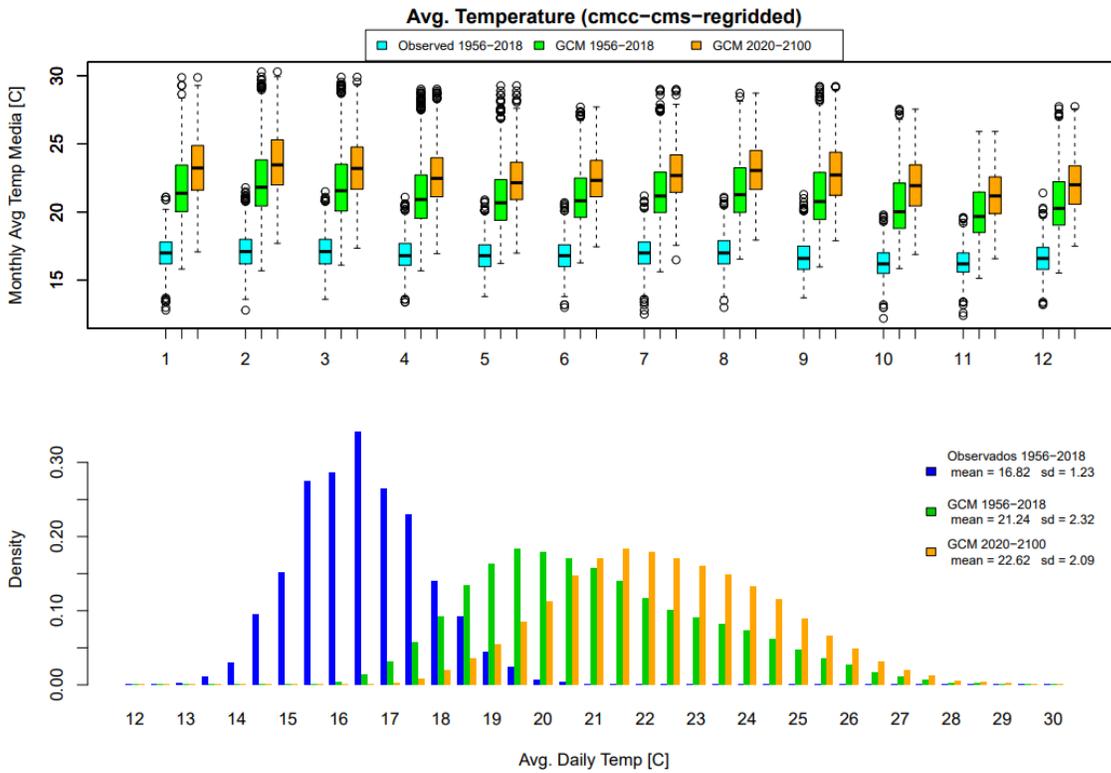
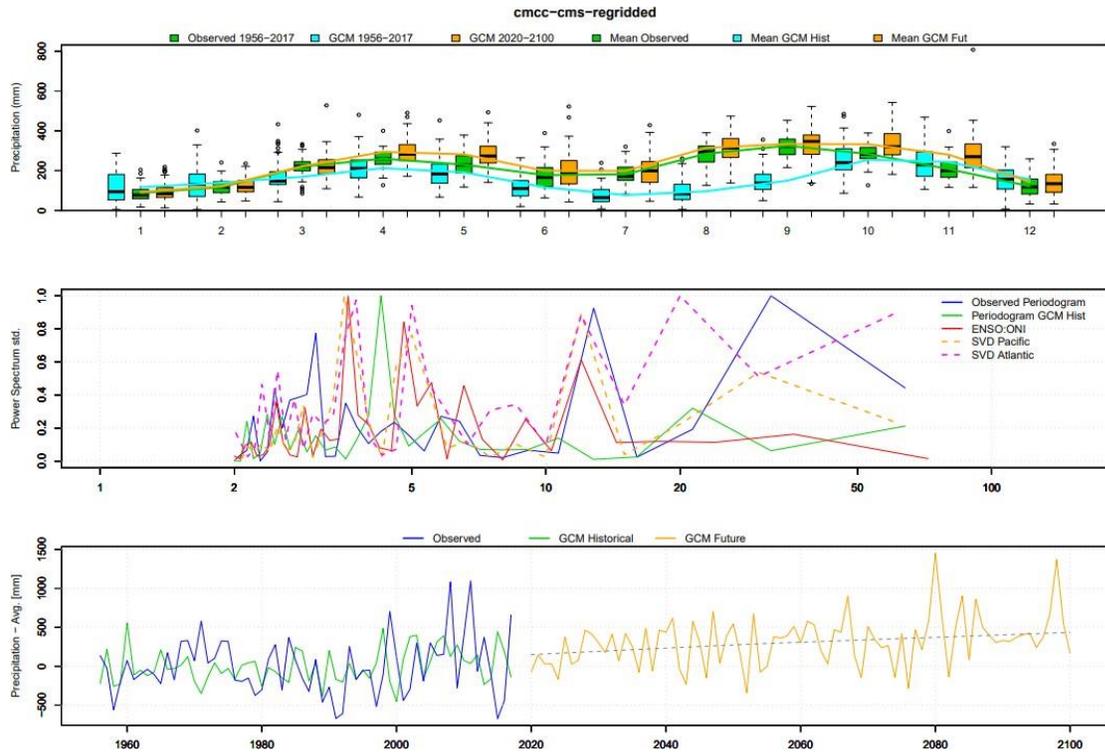


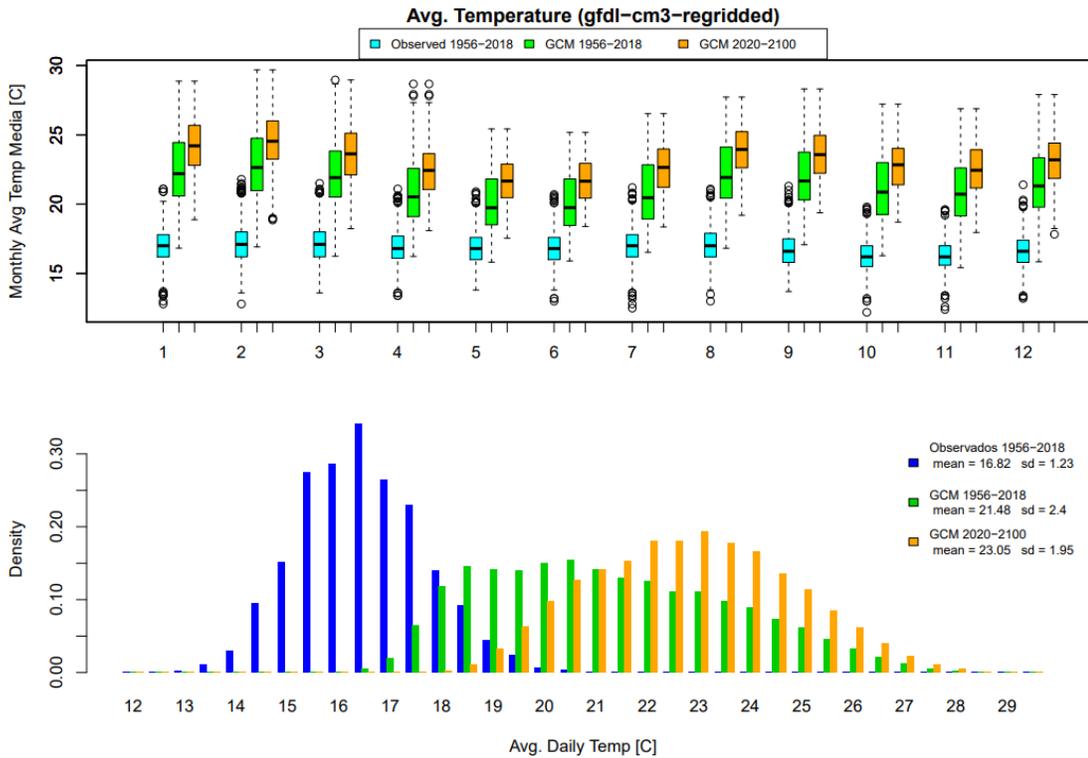
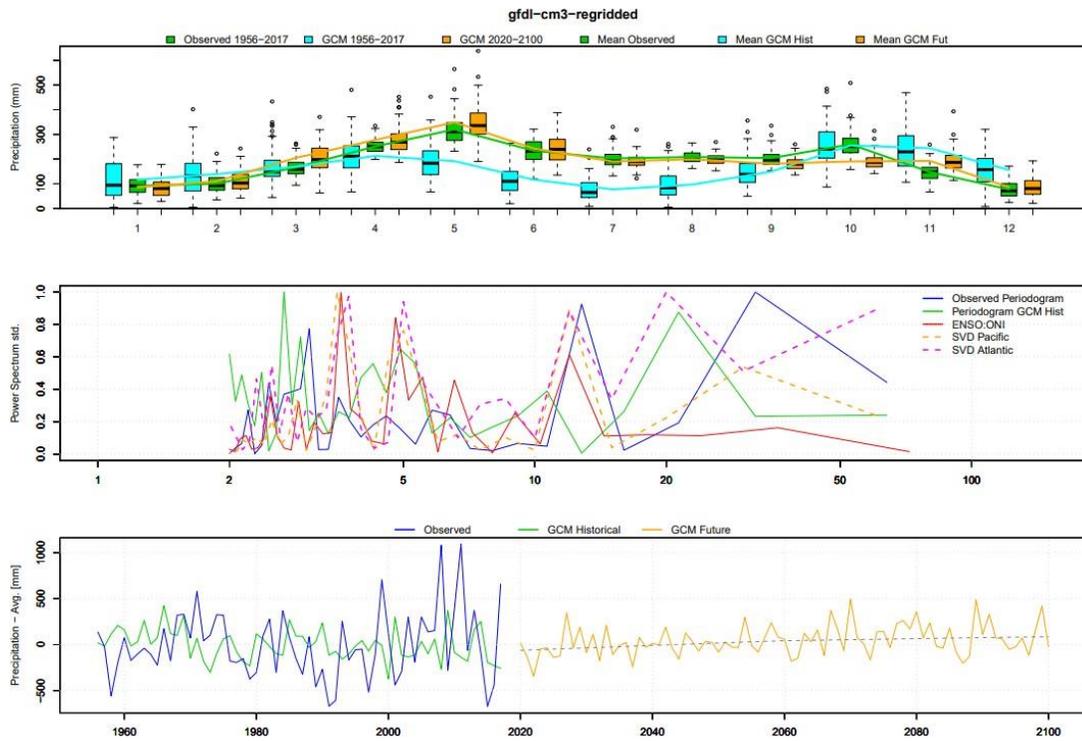


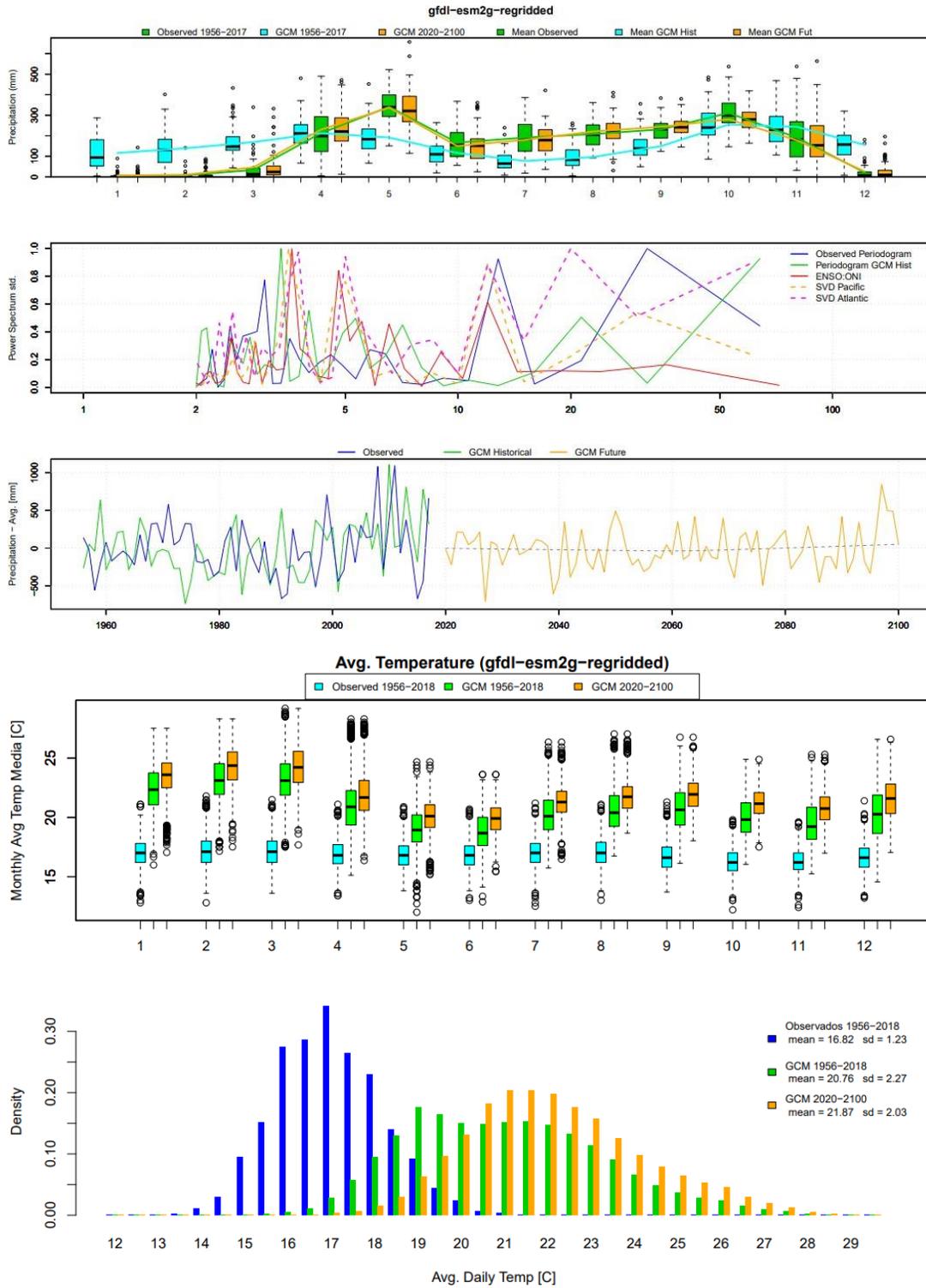


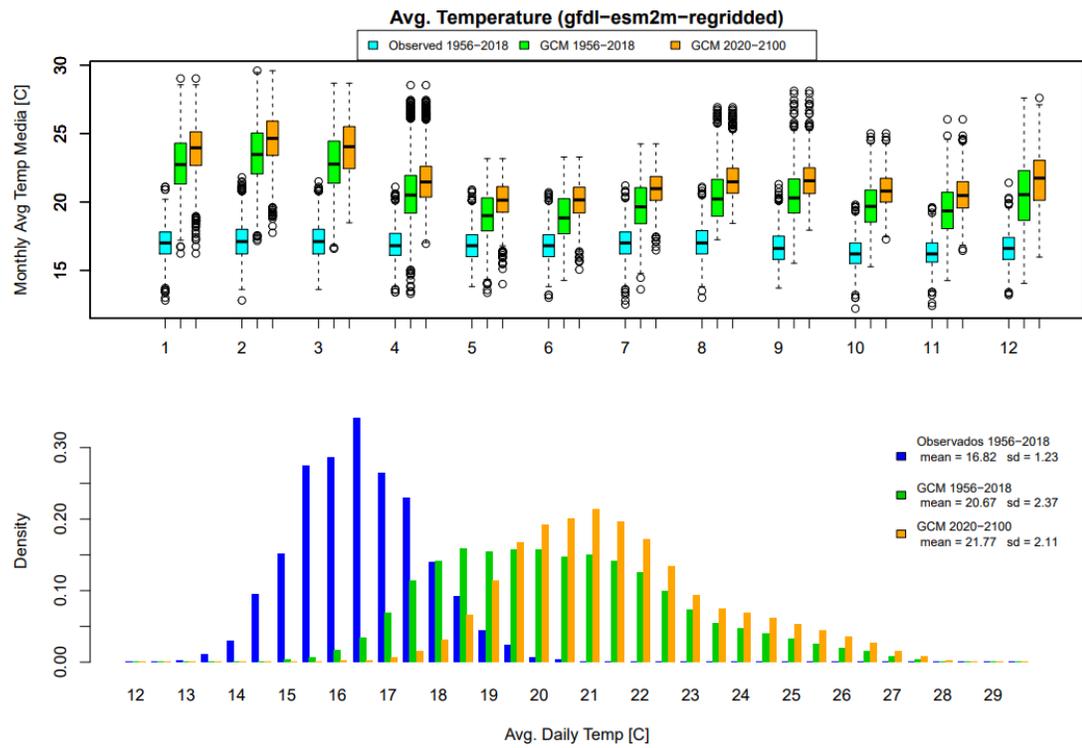
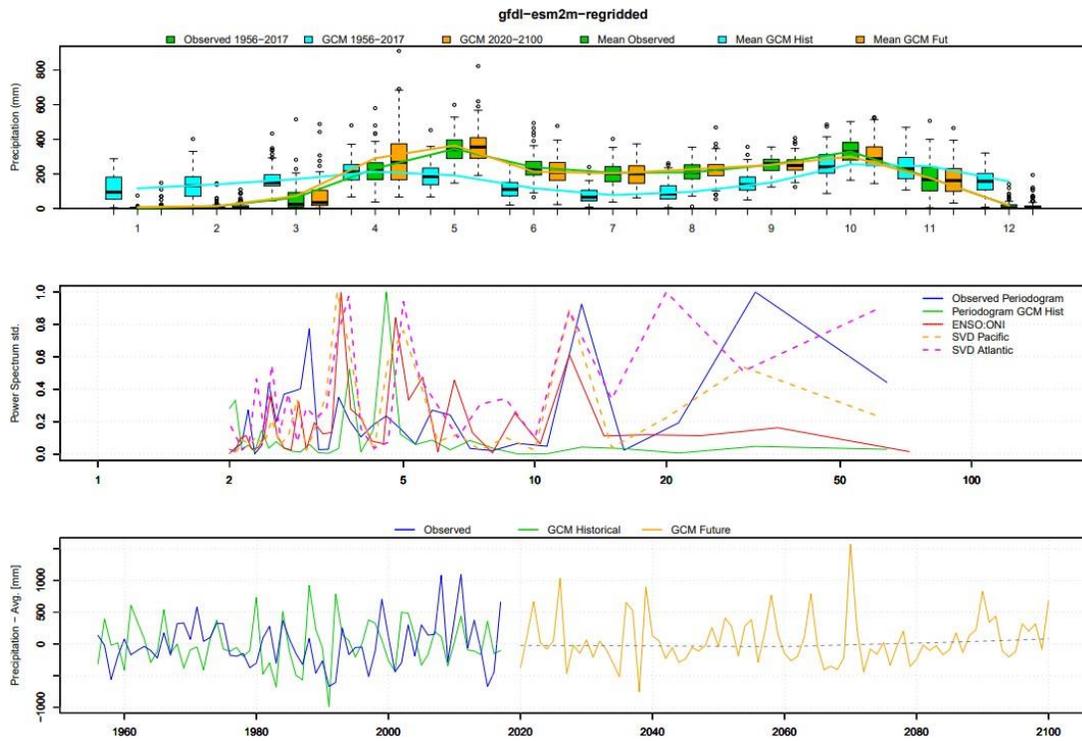


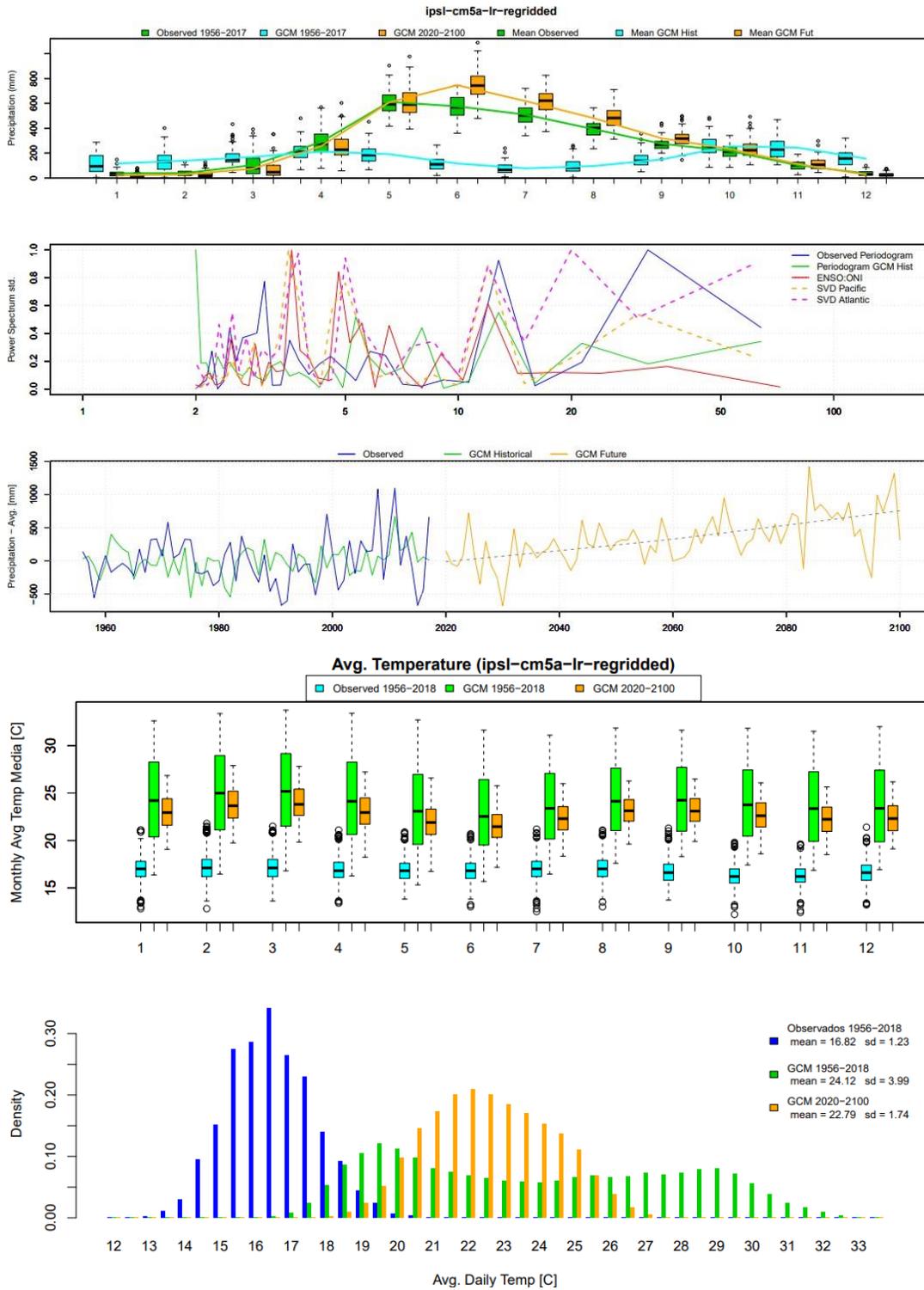


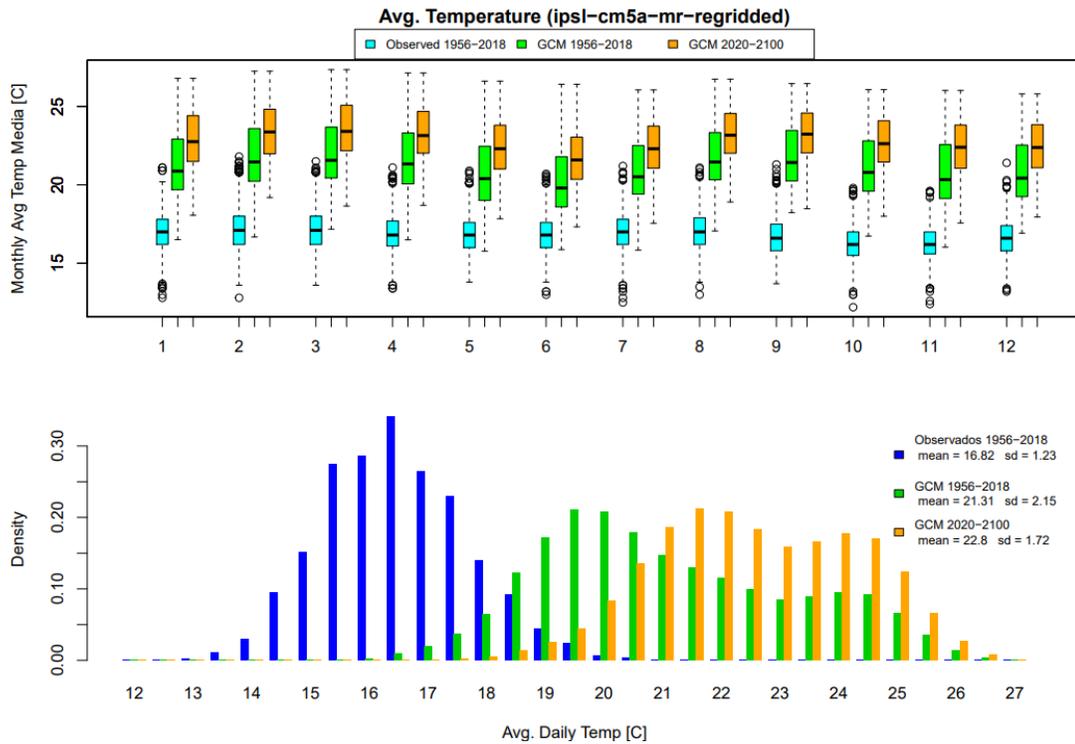
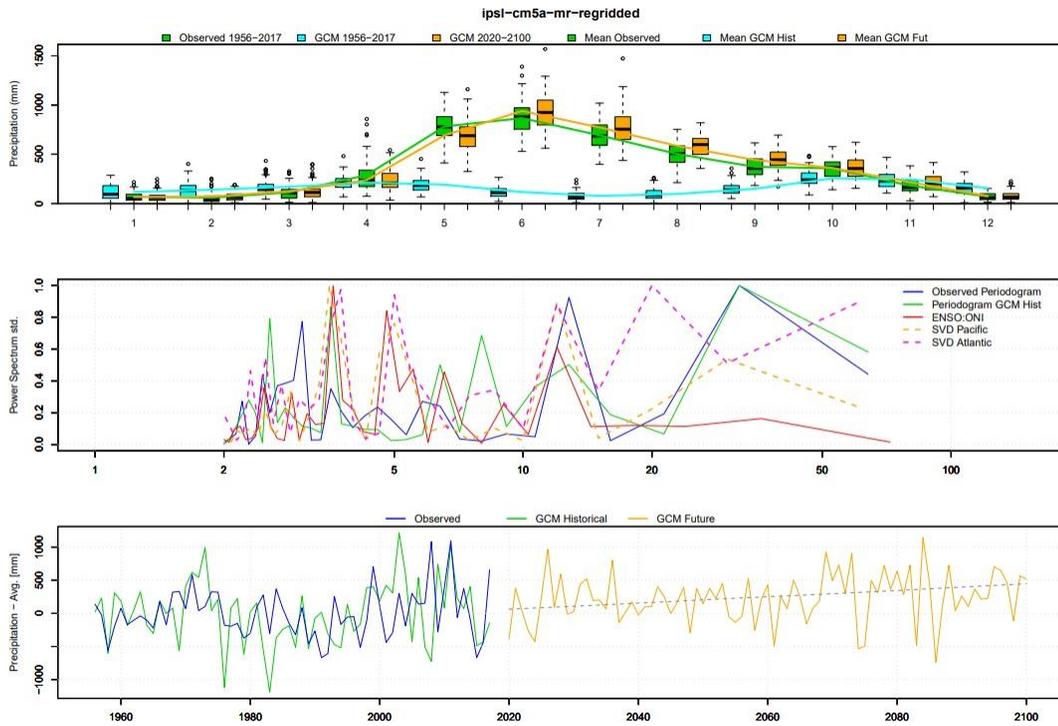


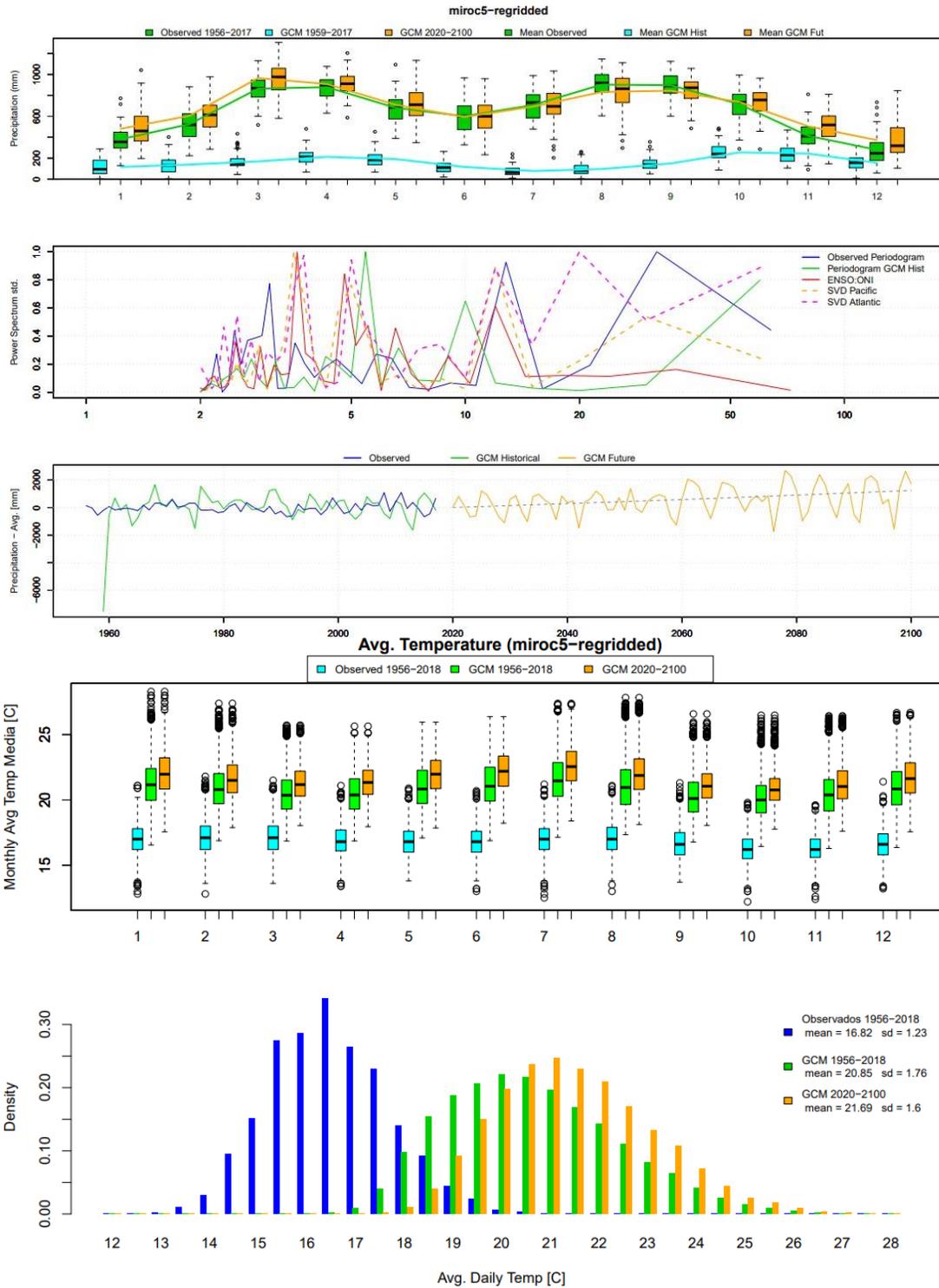


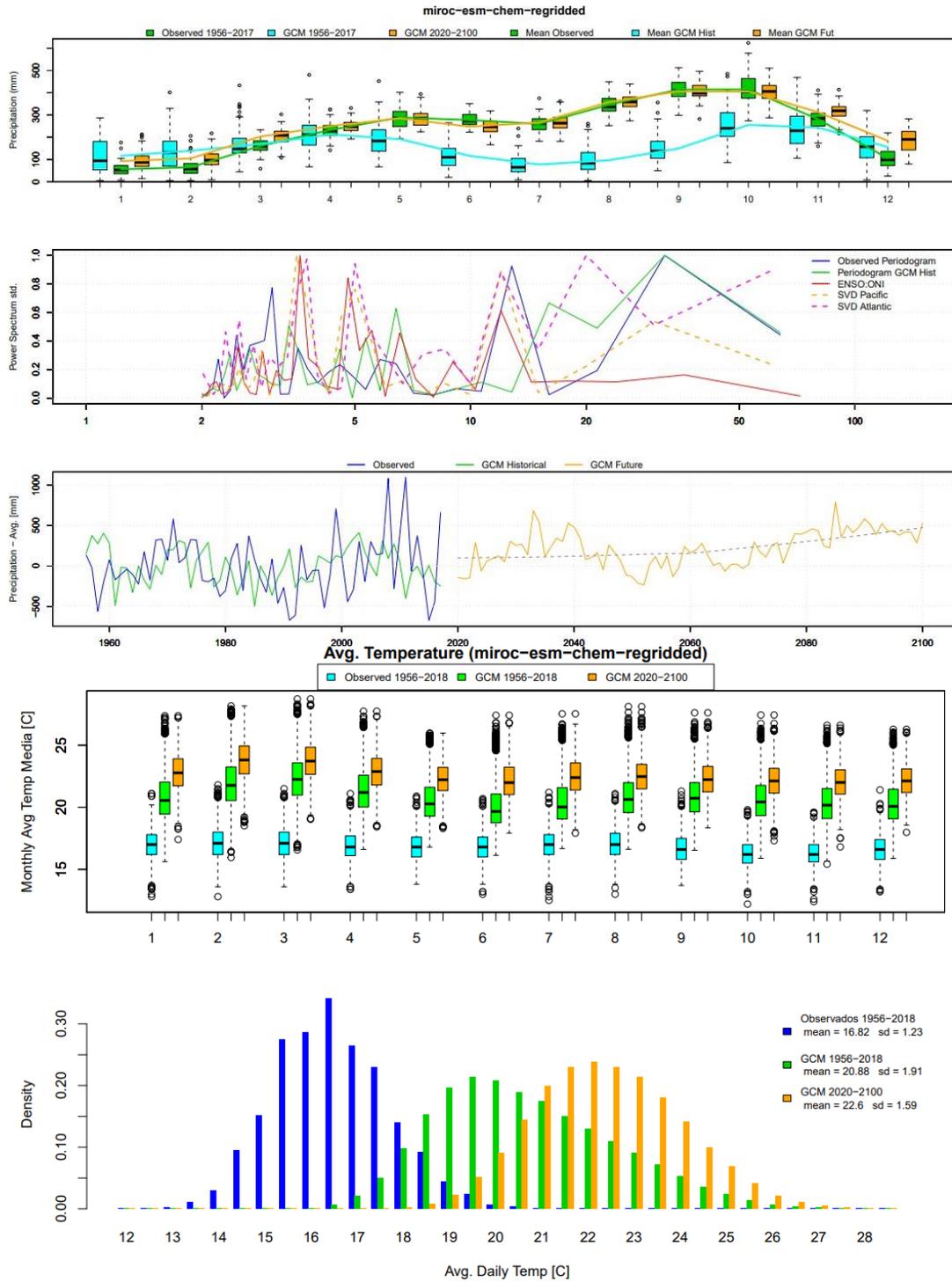


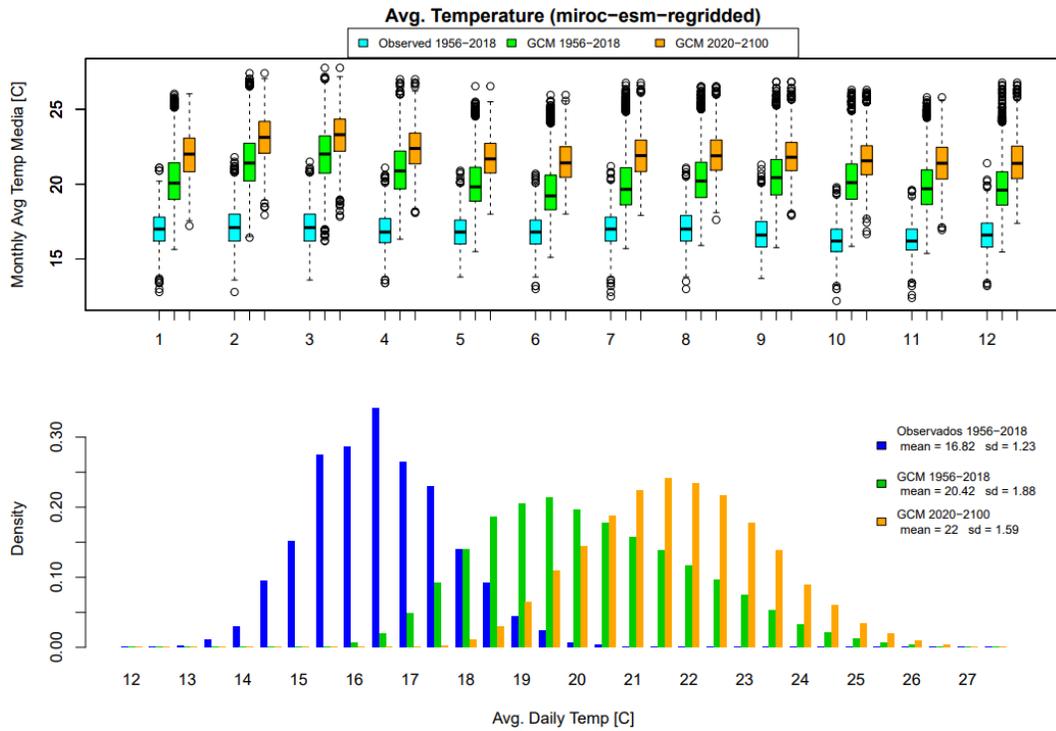
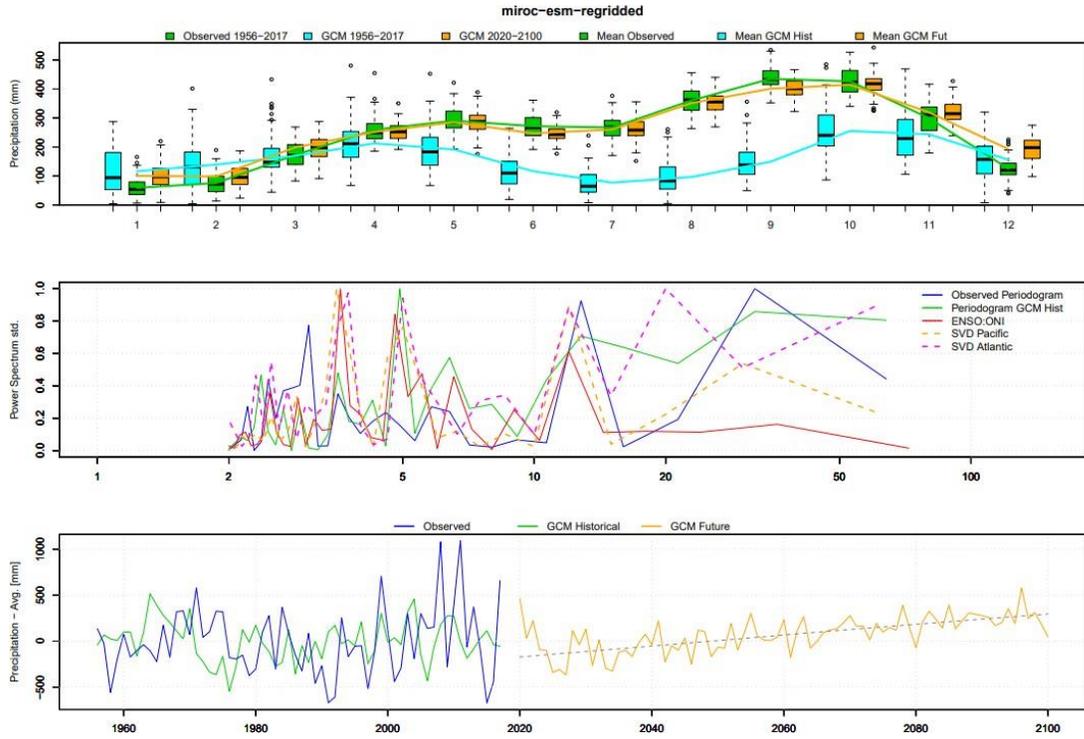


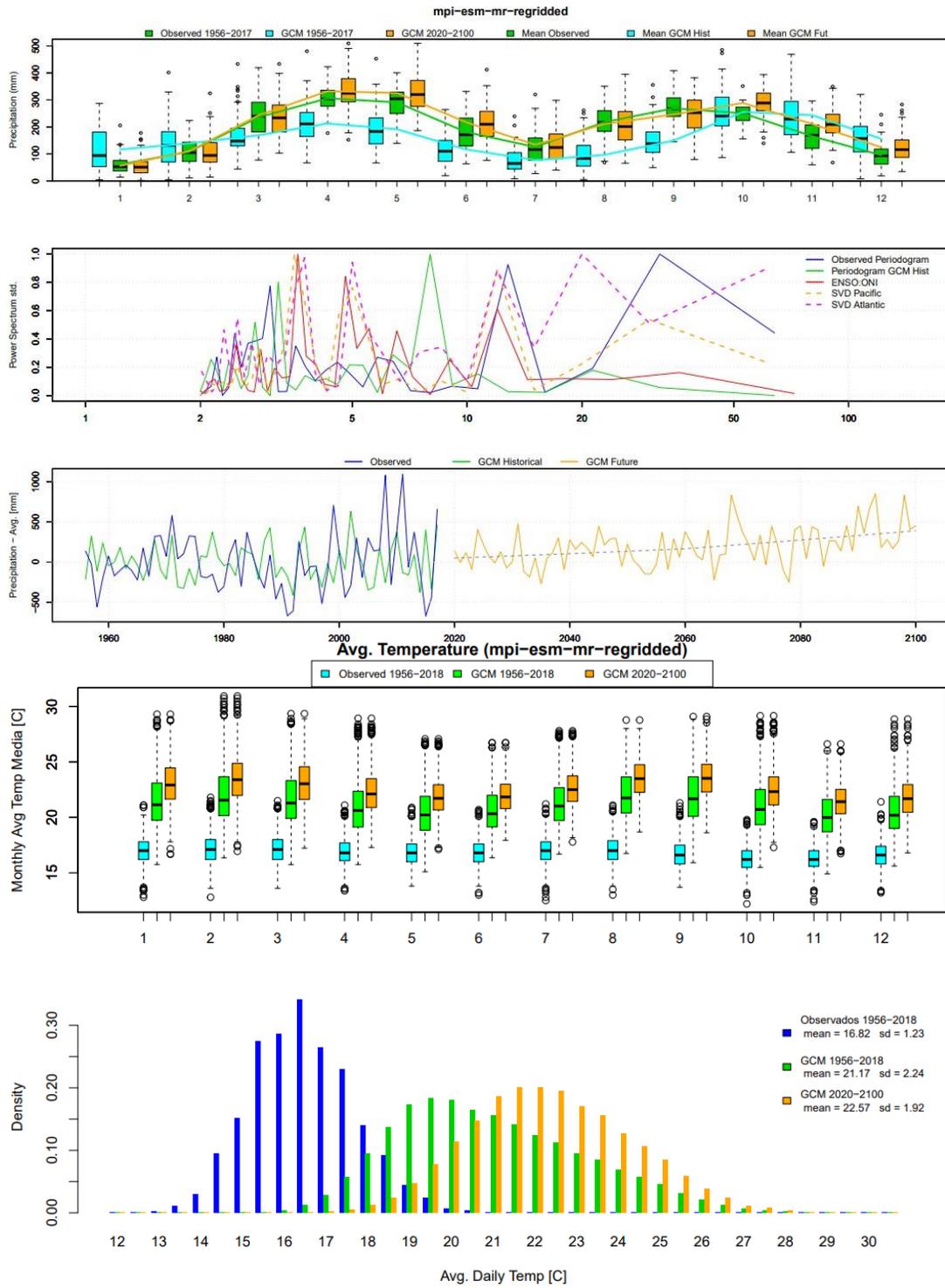












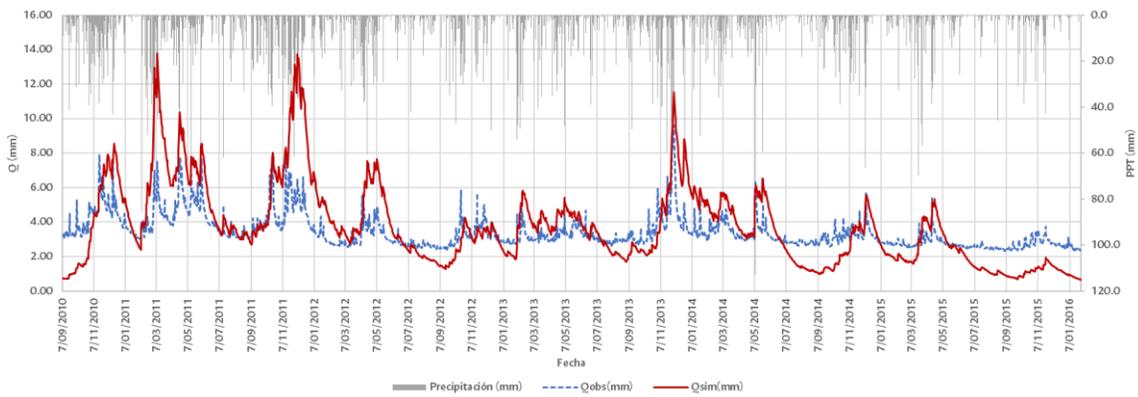
8.5 Detalle de calibración y validación de modelos hidrológicos

8.5.1 Calibración

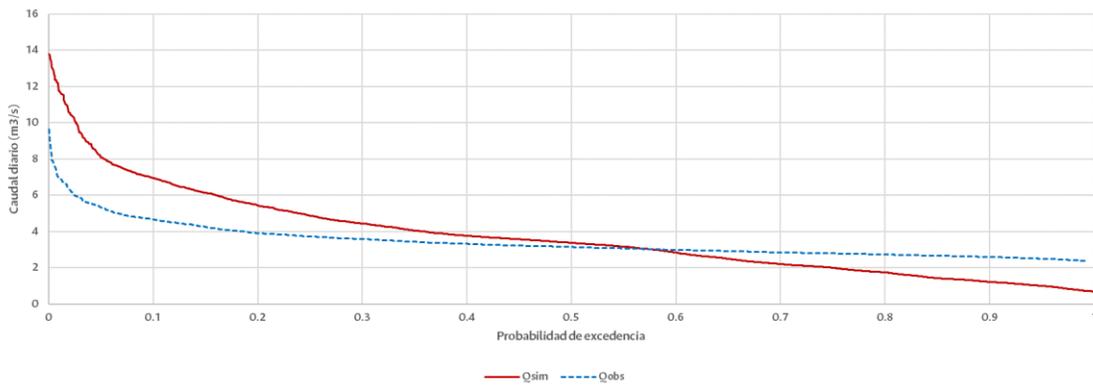
Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo TPHM.

Parámetros para calibrar	Smax	3000
	α	10
	SECP	0.004
	Kc	0.750
Condiciones iniciales	Si	1505.29
Indicadores de desempeño	RMSE	78.31
	Índice Nash	0.74
	PBIAS	10.37

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo TPHM.



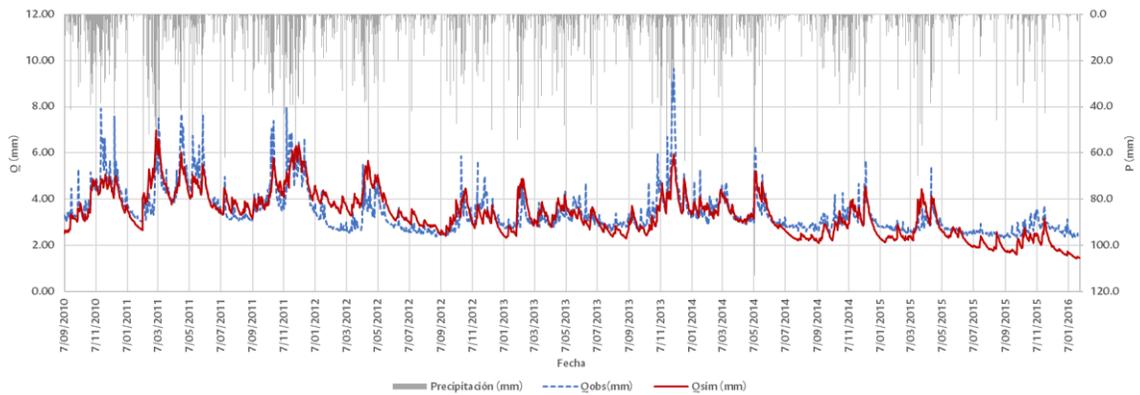
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo TPHM.



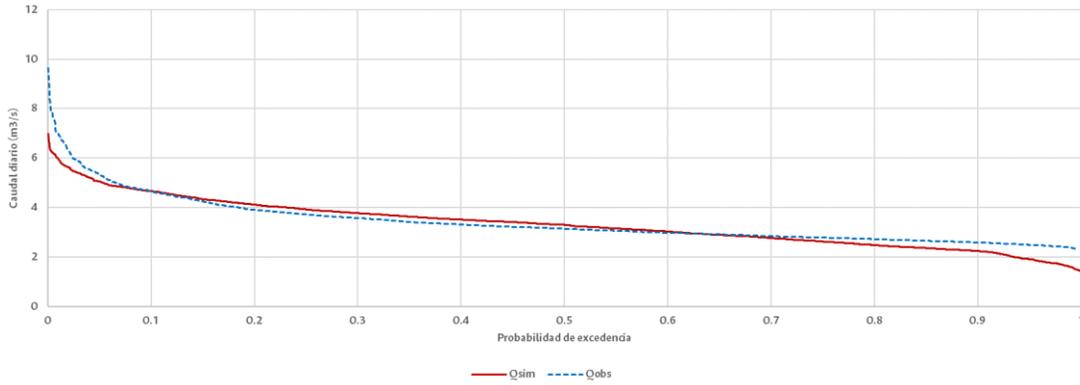
Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo de tres tanques.

Parámetros para calibrar	a11	0.008
	a12	0.008
	a2	0.001
	a3	0.005
	b1	0.092
	b2	0.303
	SECP	0.000
	h11	1.000
	h12	1.000
	h2	10.00
	Kc	0.20
Condiciones iniciales	S1	5.33
	S2	11.84
	S3	500.00
Indicadores de desempeño	RMSE	29.13
	Índice Nash	0.54
	PBIAS	-1.60

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo de tres tanques.



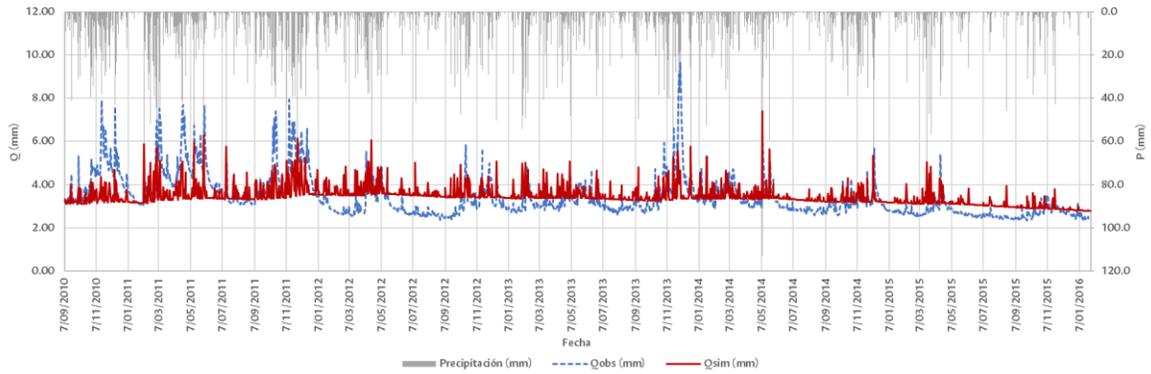
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo de tres tanques.



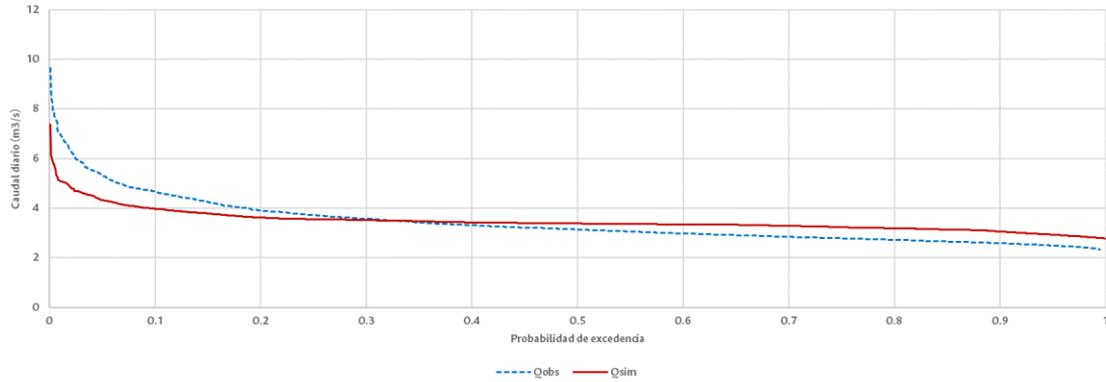
Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Calibración. Modelo SIMHYD.

Parámetros para calibrar	INSC	0.500
	SMSC	500
	COEFF	500
	SQ	1.000
	SUB	0.026
	CRACK	0.420
	K	0.001
	RISC	0.400
	Perv. Fract	0.960
Condiciones iniciales	SMS	422.7
	GW	5334.7
Indicadores de desempeño	RMSE	38.90
	Índice Nash	0.19
	PBIAS	1.97

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo SIMHYD.



Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo SIMHYD.

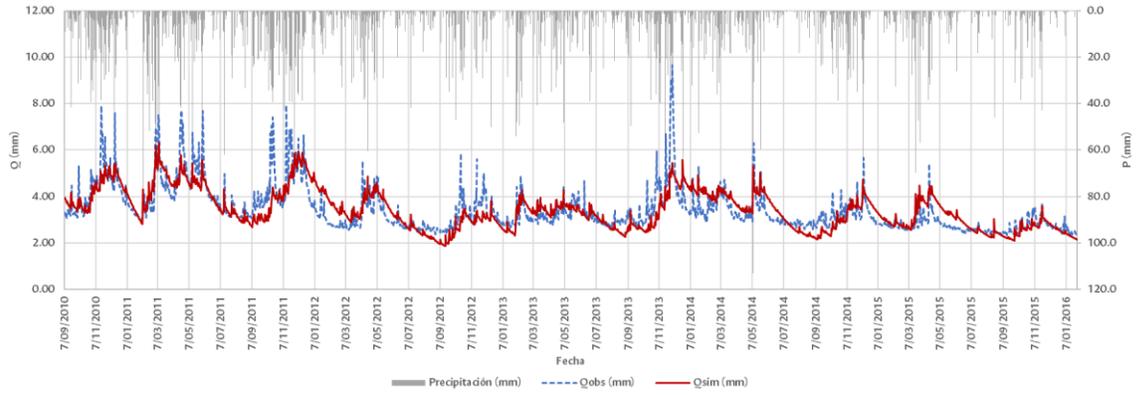


Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo AWBM.

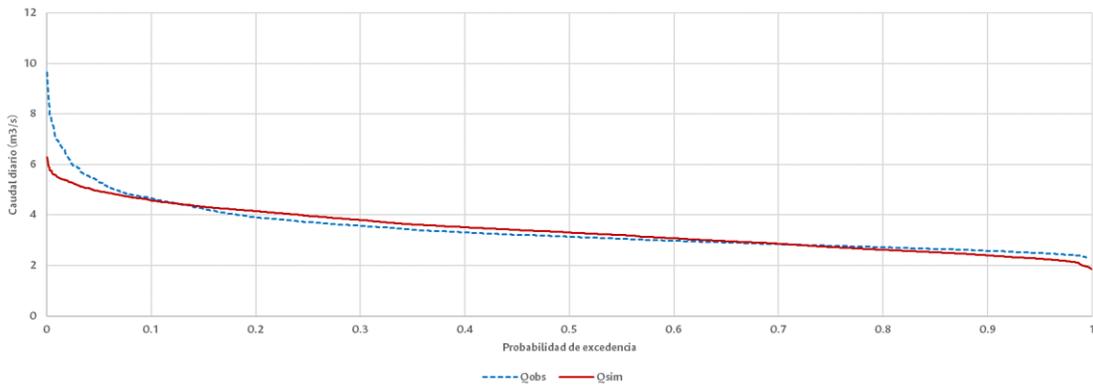
Parámetros para calibrar	Cave	100.000
	BFI	0.012
	Ks	0.980
	Kb	0.014
	A1	0.187
	A2	0.570
	A3	0.000
	CAP1	6.390
	CAP2	63.952
CAP3	100.000	
Condiciones iniciales	G0	3.9
	S1	5.6
	S2	57.2
	S3	80.0

Indicadores de desempeño	RMSE	29.71
	Índice Nash	0.53
	PBIAS	0.12

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo AWBM.



Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo AWBM.

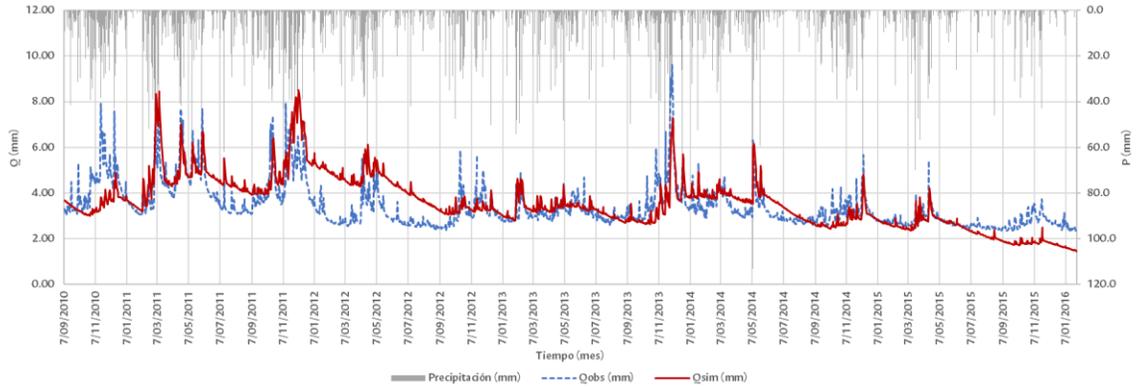


Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo HBV.

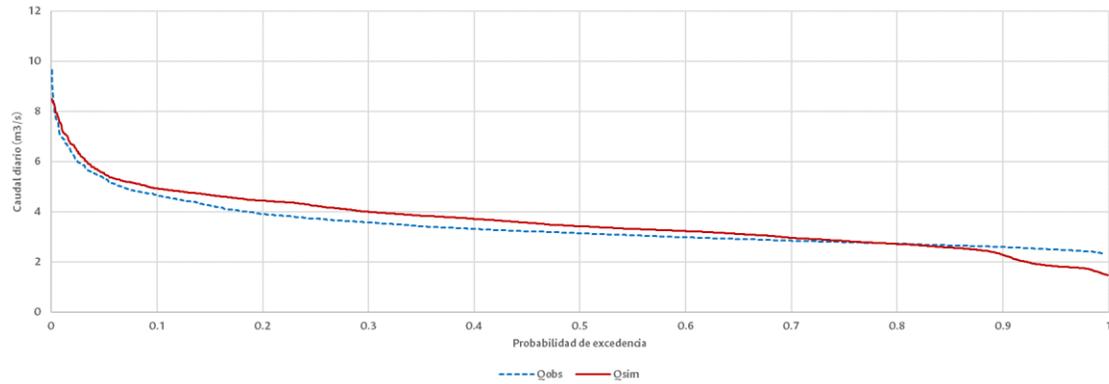
Parámetros para calibrar	K0	100.000
	K1	0.012
	K2	0.980
	PERC	0.014
	UZL	0.187
	α	0.570
Condiciones iniciales	SM	0.0
	SUZ	0.0
	SLZ	737.3

Indicadores de desempeño	RMSE	41.40
	Índice Nash	0.08
	PBIAS	5.35

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo HBV.



Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo HBV.

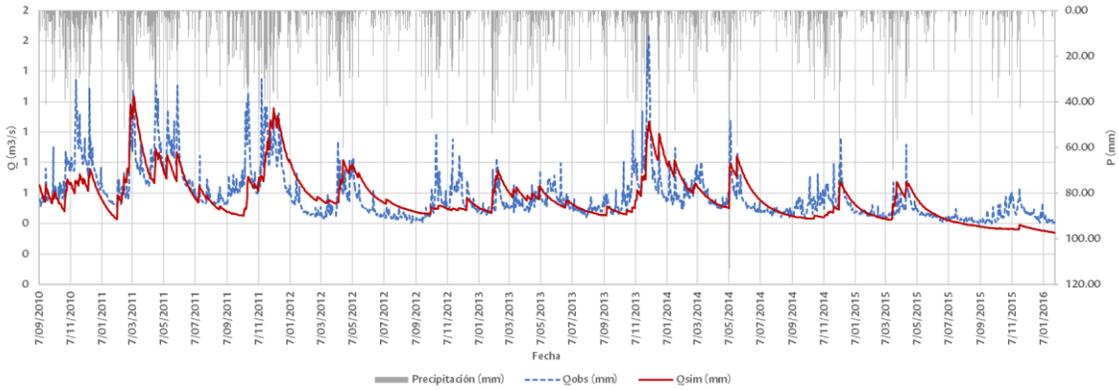


Parámetros de calibración e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo SHIA.

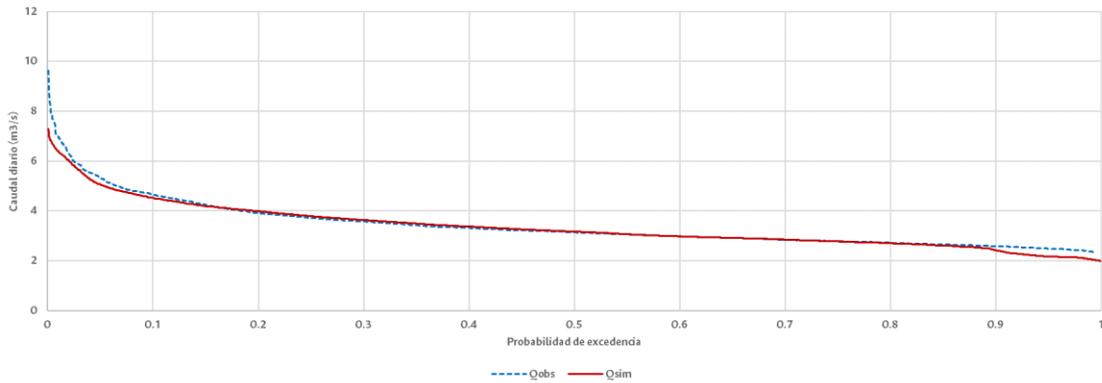
Parámetros para calibrar	Hu	520.20
	Ks	6.26
	Kp	0.59
	Kpp	0.01
	Tr1	1
	Tr2	32.16
Condiciones iniciales	Tr3	763.57
	H1	520.20
	H2	0
	H3	73.16

	H4	1185.90
Indicadores de desempeño	RMSE	5.73
	Índice Nash	0.39
	PBIAS	-1.13

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo SHIA.



Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Calibración. Modelo SHIA.

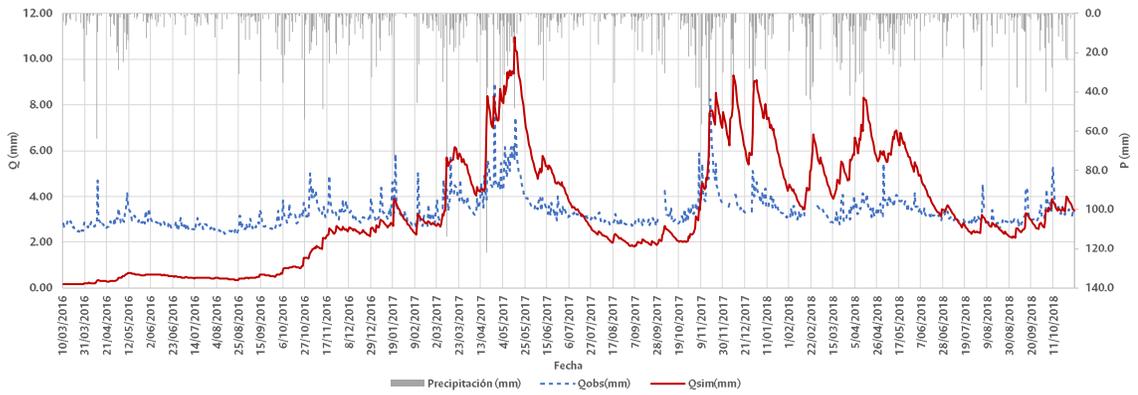


8.5.2 Validación

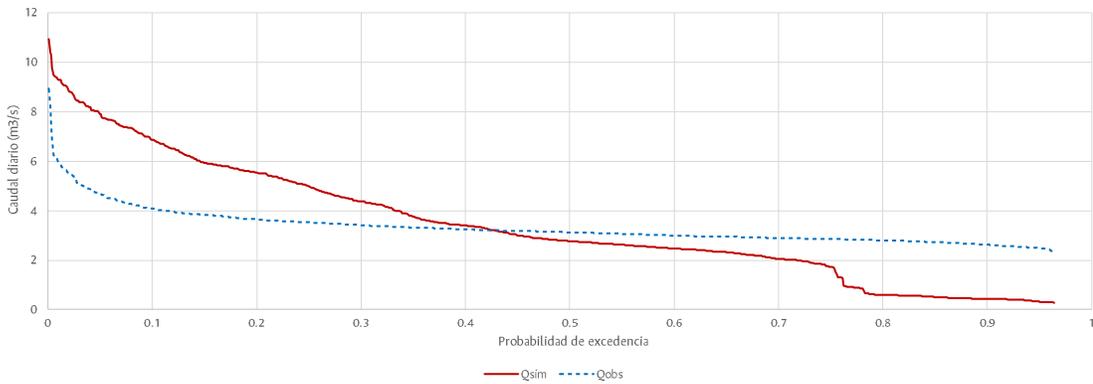
Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo TPHM.

Condiciones iniciales	Si	1300
Indicadores de desempeño	RMSE	66.67
	Índice Nash	0.62
	PBIAS	3.47

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo TPHM.



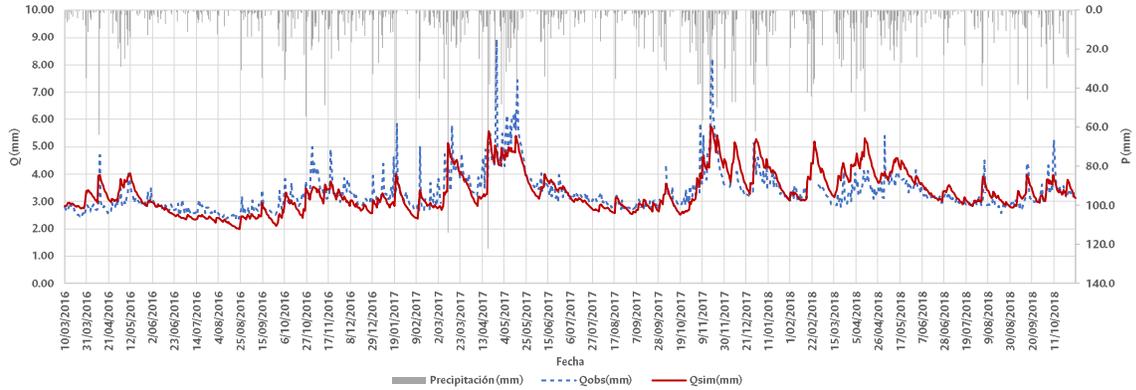
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo TPHM.



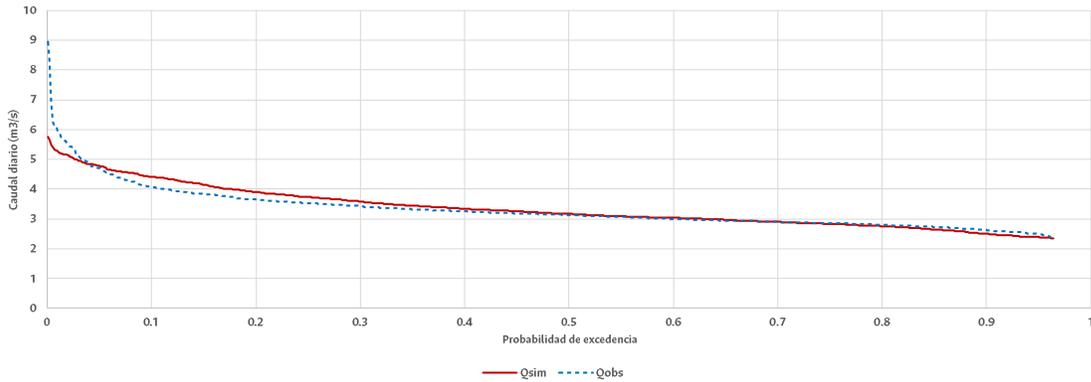
Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo de tres tanques.

Condiciones iniciales	S1	1.00
	S2	19.07
	S3	577.42
Indicadores de desempeño	RMSE	27.20
	Índice Nash	0.12
	PBIAS	3.92

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.



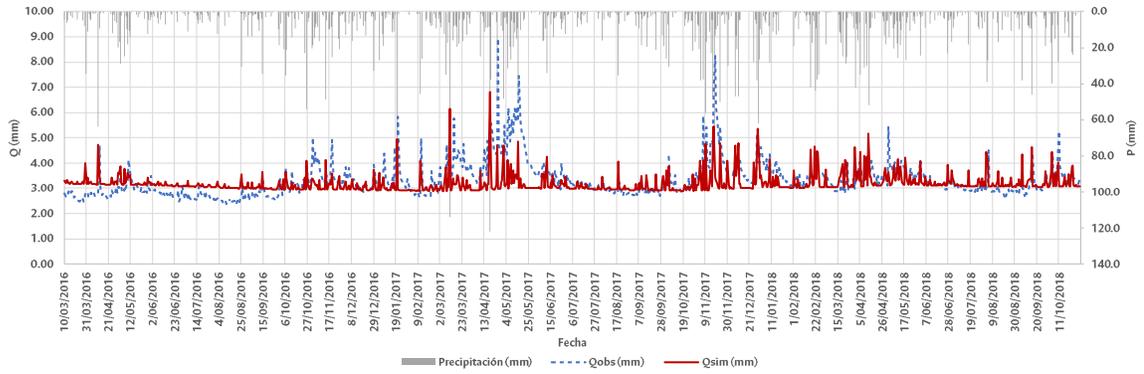
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo de tres tanques.



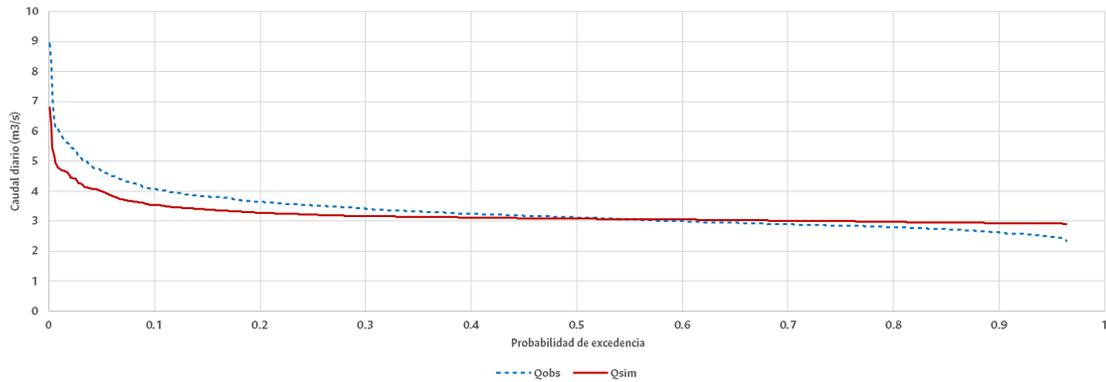
Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo SIMHYD.

Condiciones iniciales	SMS	505.5
	GW	5427.6
Indicadores de desempeño	RMSE	29.43
	Índice Nash	-0.03
	PBIAS	-0.22

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SIMHYD.



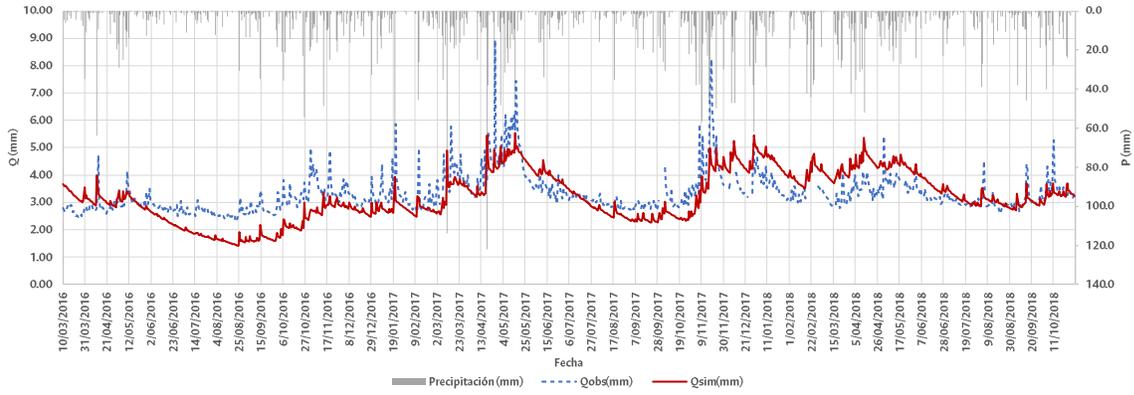
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SIMHYD.



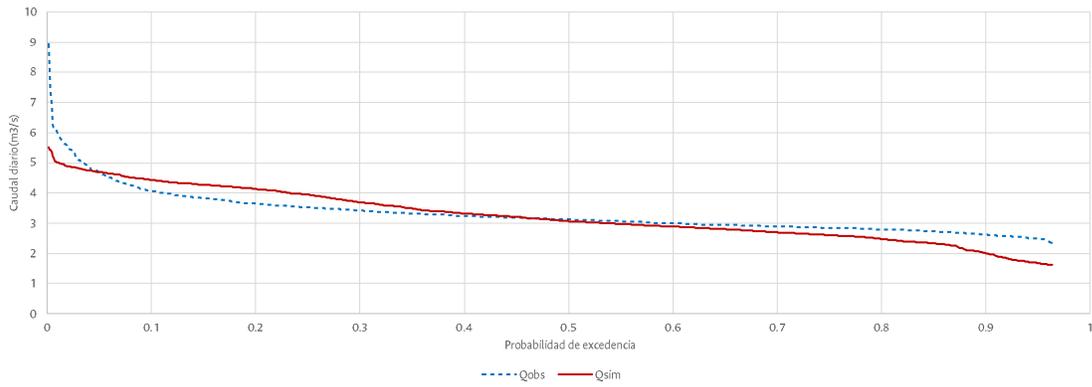
Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo AWBM.

Condiciones iniciales	GO	3.2
	S1	23.1
	S2	68.0
	S3	80.0
Indicadores de desempeño	RMSE	31.57
	Índice Nash	-0.18
	PBIAS	-7.25E-06

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo AWBM.



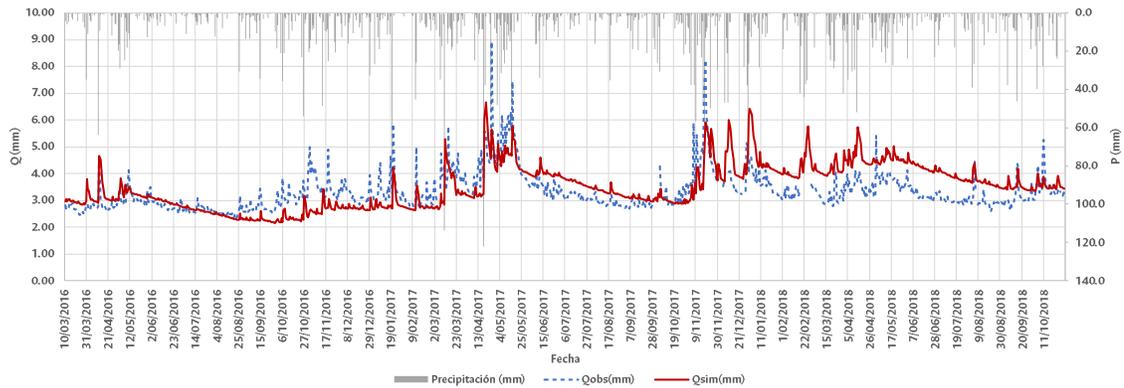
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo AWBM.



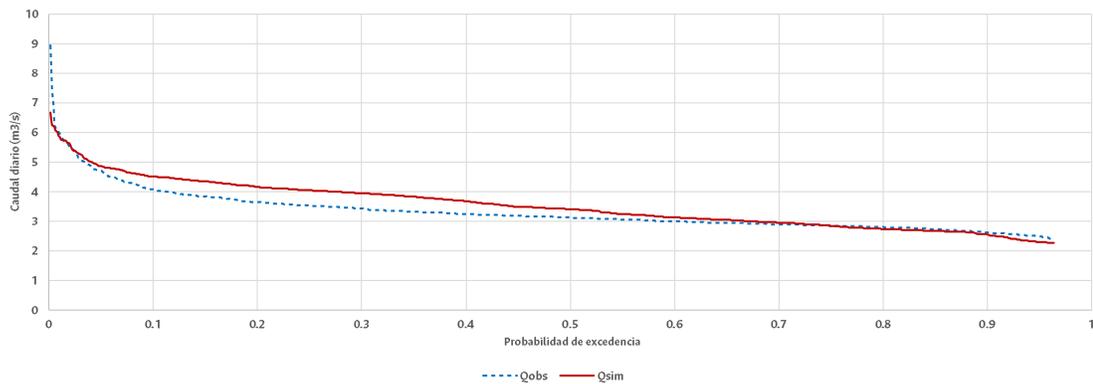
Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo HBV.

Condiciones iniciales	SM	602.9
	SUZ	0.0
	SLZ	592.5
Indicadores de desempeño	RMSE	32.20
	Índice Nash	-0.23
	PBIAS	9.13

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo HBV.



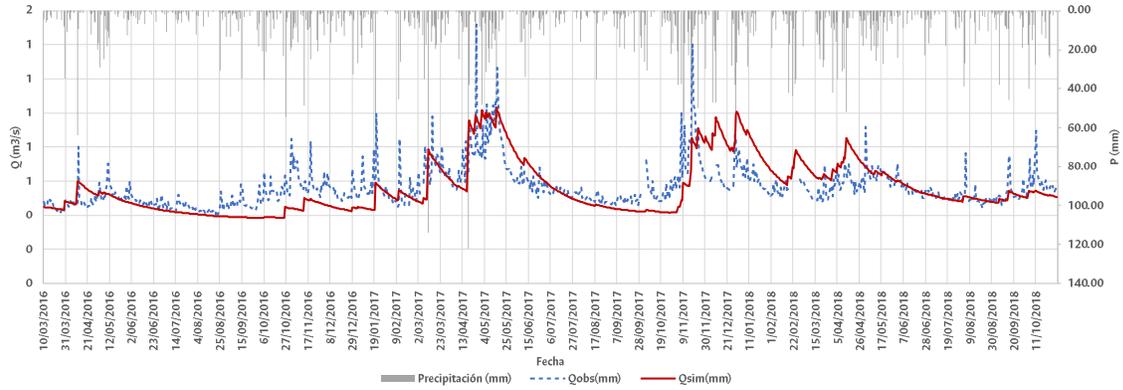
Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo HBV.



Parámetros de validación e indicadores de desempeño. Cuenca de la quebrada Olivares en estación El Popal. Modelo SHIA.

Condiciones iniciales	H1	467.93
	H2	0
	H3	4.14
	H4	1911.68
Indicadores de desempeño	RMSE	5.26
	Índice Nash	-0.13
	PBIAS	2.59

Caudales observados y simulados para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.



Curva de duración de caudales para la cuenca de la quebrada Olivares en la estación El Popal. Modelo SHIA.

