



**Modelación de los efectos del cambio climático sobre la recarga y el flujo en el
acuífero del Golfo de Urabá -Colombia**

Carlos Arturo Orrego Montoya

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directora
Teresita Betancur Vargas, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	Orrego Montoya [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] C.A. Orrego Montoya, “Modelación de los efectos del cambio climático sobre la recarga y el flujo en el acuífero del Golfo de Urabá -Colombia”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXI.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



CRAI Escuela Interamericana de Bibliotecología

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	1
FIGURAS	4
TABLAS	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. METODOLOGIA	14
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	14
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.3. GENERACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO 17	
2.3.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	17
2.3.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS	20
2.3.3. REDUCCIÓN DE ESCALA Y ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO	23
2.3.4. CORRECCIÓN DE SESGO	24
2.3.5. QUANTILE MAPPING (QM)	24
2.3.6. REDUCCIÓN DE ESCALA (DOWNSCALING) EN EL ÁREA DE ESTUDIO	25
2.4. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA E IMPACTOS	25
2.4.1. VARIABLES ESTÁTICAS	28
2.4.2. VARIABLES CLIMÁTICAS	32
2.5. SIMULACIÓN DE FLUJO E IMPACTOS	35
3. RESULTADOS	38
3.1. GENERACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO 38	
3.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	38
3.1.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS	39
3.1.3. REDUCCIÓN DE ESCALA Y ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO	57
3.1.3.1. CORRECCIÓN DE SESGO ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN. 57	
3.1.3.2. BCSD PARA LA PRECIPITACIÓN	59
3.1.3.3. BCSD PARA LA TEMPERATURA MEDIA	61

3.1.3.4.	BCSD PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA	64
3.1.3.5.	BCSD PARA LA TEMPERATURA MÍNIMA	65
3.2.	ESTIMACIÓN DE LA RECARGA E IMPACTOS.....	67
3.3.	SIMULACIÓN DE FLUJO E IMPACTOS	72
4.	DISCUSIÓN	80
4.1.	SOBRE LOS ESCENARIOS LOCALES	80
4.2.	SOBRE LA RECARGA	81
4.3.	SOBRE EL MODELO DE FLUJO.....	82
5.	CONCLUSIONES	84
6.	AGRADECIMIENTOS	85
7.	REFERENCIAS	85

FIGURAS

Figura 1.	Localización del área de estudio	15
Figura 2.	Esquema metodológico de la Investigación.....	16
Figura 3.	Diagrama de Flujo para la reducción de escala de escenario de cambio clima ...	17
Figura 4.	Estaciones de precipitación y temperatura del IDEAM. Fuente: Propia.	18
Figura 5.	Esquema de representación del volumen de control Suelo –Planta, celda a celda en el dominio del modelo SWB y los elementos del balance de humedad en el suelo que intervienen para la estimación de la recarga potencial directa y la evapotranspiración real. Tomado de (Bastidas Osejo, 2019).	27
Figura 6.	Direcciones de flujo superficial D8 –Formato ARCGIS limitadas para la zona estudio. Tomado de (Bastidas, 2019)	29
Figura 7.	Distribución espacial de las coberturas terrestres en la zona de estudio. Tomado de (Bastidas, 2019).	30
Figura 8.	Distribución espacial de las texturas de los suelos en el nivel superficial en la zona de estudio. Tomado de (Bastidas, 2019).....	31
Figura 9.	Distribución espacial de la capacidad de campo de los suelos en el nivel más superficial. Tomado de (Bastidas, 2019).	32
Figura 10.	Regresión lineal para la temperatura media en la zona de estudio.	33
Figura 11.	Regresión lineal para la temperatura máxima en la zona de estudio.	34
Figura 12.	Regresión lineal para la temperatura mínima en la zona de estudio.....	34
Figura 13.	Condiciones de frontera y puntos de observación del modelo de flujo de aguas subterráneas. definidas por Duque & Betancur (2017).	36
Figura 14.	Distribución espacial de las conductividades hidráulicas en la capa 1. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas Tabla 7	37
Figura 15.	Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la capa 2. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas Tabla 7	37
Figura 16.	Distribución espacial de la conductividad hidráulica de la capa 3. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas Tabla 7	37
Figura 17.	Estaciones de precipitación utilizadas para la evaluación de los modelos.	39

Figura 18. Estaciones de temperatura utilizadas para la evaluación de los modelos.	39
Figura 19. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP5.	41
Figura 20. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP6.	42
Figura 21. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos Cordex.	43
Figura 22. Diagramas Taylor de temperatura para los modelos CMIP5.	44
Figura 23. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP6.	45
Figura 24. Diagramas Taylor de Temperatura para los modelos Cordex.	46
Figura 25. Ciclo anual modelos CMIP5.	50
Figura 26. Ciclo anual de la precipitación conjunto de modelos CMIP6.	51
Figura 27. Ciclo Anual Cordex Precipitación.	52
Figura 28. Ciclo Anual CMIP5 Temperatura.	55
Figura 29. Ciclo Anual CMIP6 Temperatura.	56
Figura 30. Ciclo Anual CORDEX Temperatura.	56
Figura 31. Quantile mapping para la serie diaria de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP8.5.	58
Figura 32. . Quantile mapping para la serie mensual de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP8.5.	58
Figura 33. Función de distribución empírica para las series diarias de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, del modelo antes y después del Downscaling.	59
Figura 34. Función de distribución empírica para las series mensuales de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, del modelo antes y después del Downscaling.	59
Figura 35. Escenarios RCP 2.6 para la precipitación modelo MIROC5.	60
Figura 36. Escenarios RCP 8.5 para la precipitación modelo MIROC5.	60
Figura 37. Escenarios RCP 2.6 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5.	60
Figura 38. Escenarios RCP 8.5 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5.	61
Figura 39. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5.	62
Figura 40. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5.	62
Figura 41. Función de distribución empírica para las series diarias de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, del modelo MIROC5 antes y después del Downscaling.	62
Figura 42. Función de distribución empírica para las series mensuales de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, del modelo MIROC5 antes y después del Downscaling.	63
Figura 43. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5.	63
Figura 44. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5.	63
Figura 45. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.	64
Figura 46. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.	64

Figura 47. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5	65
Figura 48. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5	65
Figura 49. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.....	66
Figura 50. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.....	66
Figura 51. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5	67
Figura 52. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5	67
Figura 53. Relación entre la precipitación y la Recarga Potencial Directa.	72
Figura 54. Relación entre la temperatura máxima y la Recarga Potencial Directa.	72
Figura 55. Relación entre la temperatura mínima y la Recarga Potencial Directa.....	72
Figura 56. Condiciones de frontera utilizadas para el modelo numérico.	73
Figura 57. Piezómetros utilizados para validar el modelo numérico construido.	73
Figura 58. Ajuste del modelo con un RMSE de 6,67 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.86	74
Figura 59. Superficie piezométrica modelada para la capa 1.	75
Figura 60. Superficie piezométrica modelada para la capa 2.....	75
Figura 61. Superficie piezométrica modelada para la capa 3.	75
Figura 62. Nivel piezométrico para la capa 1.....	76
Figura 63. Nivel piezométrico para la capa 2.....	77
Figura 64. Nivel piezométrico para la capa 3.....	78

TABLAS

Tabla 1. Estaciones de precipitación.	18
Tabla 2. Temperatura Media.	19
Tabla 3. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos CMIP5.	20
Tabla 4. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos CMIP6	21
Tabla 5. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos Cordex	22
Tabla 6. Configuración del modelo. modificado de (Bastidas Osejo, 2019).....	25
Tabla 7. Resumen de las conductividades hidráulica en m/día utilizadas en el modelo numérico. Modificadas de (J. Duque & Betancur, 2017).....	37
Tabla 8. Descripción de los datos e insumos utilizados para la modelación.....	37
Tabla 9. Estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas para para la evaluación de los modelos	38
Tabla 10. Métricas para la evaluación de precipitación los modelos del CMIP5.....	40
Tabla 11. Métricas para la evaluación de precipitación de los modelos CMIP6.....	41
Tabla 12. Métricas para la evaluación de precipitación de los modelos Cordex.....	42
Tabla 13. Métricas para la evaluación de la temperatura de los modelos del CMIP5.....	43
Tabla 14. Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos CMIP6	44
Tabla 15. Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos Cordex	45
Tabla 16. Resumen de los cambios porcentuales en la precipitación anual con respecto al periodo base.....	61

Tabla 17. Resumen de los cambios en °C de la temperatura con respecto al periodo base.	63
Tabla 18. Resumen de los cambios en la temperatura máxima con respecto al periodo base.	65
Tabla 19. Resumen de los cambios en la temperatura mínima con respecto al periodo base.	67
Tabla 21. Resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial directa RPD en el escenario RCP 2.6.	68
Tabla 22. Resumen de los cambios en las variables analizadas en el escenario RCP 2.6...	69
Tabla 23. Resumen de los cambios porcentuales en las variables analizadas en el escenario RCP 2.6.	70
Tabla 24. Resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial directa RPD en el escenario RCP 8.5.	70
Tabla 25. Resumen de los cambios en las variables analizadas en el escenario RCP 8.5...	71
Tabla 26. Resumen de los cambios porcentuales en las variables analizadas en el escenario RCP 8.5.	71
Tabla 27. Valores observados y simulados en metros	73
Tabla 27. cambios en la superficie piezométricas con relación al periodo base (2015-2018) en el escenario 2.6	79
Tabla 29. cambios en la superficie piezométricas con relación al periodo base (2015- 2018) en el escenario 8.5	79

1. INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Pasini et al., 2012; Van Dijk et al., 2006; Pachauri et al., 2014) definió así el Cambio climático: *“Variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo”*.

“La variabilidad climática por su parte, se refiere a las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones de los forzamientos externos, sean por causa natural o antropogénica (variabilidad externa)” (IPCC, 2013a).

Los impactos del cambio climático y las medidas de adaptación se perciben como una importante preocupación global contemporánea. Los aspectos que más se destacan, en ese sentido, tienen que ver con el aumento en la temperatura a nivel global, la evapotranspiración y la variabilidad de los patrones de lluvia tanto espaciales como temporales (Alexander et al., 2006; Kharin et al., 2007; Trenberth et al., 2003).

Estos cambios en los componentes atmosféricos y superficiales del ciclo hidrológico global, probablemente, darán lugar a cambios en el ciclo hidrológico subsuperficial dentro del suelo, la zona vadosa y los acuíferos (Pasini et al., 2012; Van Dijk et al., 2006). Sin embargo, los efectos potenciales del cambio climático sobre la sostenibilidad de las aguas subterráneas son poco conocidos (T. Green, 2016; Kumar, 2012).

Debido a que los acuíferos se recargan principalmente por la precipitación o mediante la interacción con cuerpos de agua de superficie, la influencia directa del cambio climático sobre la precipitación y el agua de superficie finalmente afecta a los sistemas de agua subterránea, representados en cambios de magnitudes en la recarga y en las extracciones (T. Green, 2016; T. R. Green et al., 2011; Kumar, 2012). Estos factores condicionan el almacenamiento (Bolaños Chavarría & Betancur Vargas, 2018; Kløve et al., 2014; Pernia Llera & Fornés Azcoiti, 2009) e igualmente la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales (Hanson et al., 2012). Estas circunstancias son de especial interés si se tiene en cuenta que una de las características más importantes de los acuíferos es su gran capacidad de almacenamiento de agua y, por tanto, el papel estratégico en el ciclo hidrológico, especialmente en los periodos de escasez (Havril et al., 2018; Pernia Llera & Fornés Azcoiti, 2009).

De acuerdo con Surinder K. (Jalota et al., 2018) el almacenamiento de agua subterránea se ve afectado por las propiedades intrínsecas del acuífero: capacidad de almacenamiento, capacidad de transmisión y geometría del acuífero; ello también depende del tipo de acuífero. Un acuífero que recibe recarga de áreas extensas es insensible a la variabilidad climática a corto plazo, mientras que los acuíferos libres poco profundos son más sensibles a la

variabilidad climática (López-Geta et al., 2007). Por otra parte, los acuíferos más profundos, generalmente, reaccionan con retraso al cambio climático a gran escala, no a la variabilidad climática (Chavarría & Vargas, 2018).

Los acuíferos detríticos son muy sensibles a las variaciones del nivel del agua de los ríos y, por tanto, cualquier afección que se produzca en ellos repercutirá en la cantidad y calidad de sus aguas subterráneas; algo similar ocurrirá en los acuíferos costeros con el aumento del nivel del mar (Kumar, 2012; Pernia Llera & Fornés Azcoiti, 2009). La demanda hídrica en zonas próximas a los ríos y a la costa aumentará con el cambio climático y, por tanto, también las extracciones de agua subterránea.

Como lo expone (Kumar, 2012) un cambio en la cantidad de lluvia efectiva alterará la recarga, pero también lo hará un cambio en la duración de la temporada de lluvia. El aumento de las precipitaciones invernales, como se proyecta en la mayoría de los escenarios para latitudes medias, generalmente resulta en una mayor recarga de agua subterránea. Sin embargo, una mayor evaporación puede significar que los déficits del suelo persisten por más tiempo y comienzan antes, compensando un aumento en la precipitación total efectiva. Varios tipos de acuíferos se recargarán de manera diferente (Jalota et al., 2018).

La evaluación de recarga de acuíferos es una tarea compleja sujeta a incertidumbres significativas inferidas por las variables físicas y climáticas, así como la elección de técnicas apropiadas para cubrir diferentes procesos físicos que determinan la recarga (Clark et al., 2011). La mayoría de los métodos utilizados para estimar la recarga de agua subterránea son estimaciones puntuales. Sin embargo, la cuantificación de aguas subterráneas necesita un método que no solo sea flexible sino también confiable para cuantificar con menor incertidumbre su variabilidad espacial y temporal (Rwanga, 2013).

El modelo de balance de agua en el suelo - Soil Water Balance-SWB estima la recarga potencial de agua subterránea por infiltración directa al calcular los componentes del balance de agua en los pasos diarios de cada celda del modelo usando una versión modificada de Thornthwaite-Mather (C W Thornthwaite, 1948; Charles Warren Thornthwaite & Mather, 1957). Las bases teóricas de este modelo se remiten (W.R. Dripps & Bradbury, 2007; Weston R Dripps, 2004). Las fuentes de agua en el modelo incluyen la lluvia, la nieve y el flujo de entrada de otras celdas modelo. Los sumideros de agua en el modelo incluyen la interceptación, el flujo de salida a otras celdas del modelo y la evapotranspiración (ET). La recarga de agua subterránea se calcula diariamente como la diferencia entre las fuentes y los sumideros de agua y el cambio en la humedad del suelo (Tillman et al., 2016).

Ahora bien, los modelos climáticos comprenden simples modelos de equilibrio de energía, modelos de sistemas de la Tierra de complejidad intermedia, modelos climáticos globales tridimensionales de circulación general de la atmósfera y los océanos, entre otros (IPCC, 2013b)

Los Modelos de Circulación General -MCG- son las herramientas más sofisticadas disponibles para la simulación del clima global actual y las proyecciones de escenarios climáticos futuros (T. Green, 2016).

Los MCG están constituidos por un sistema de ecuaciones que expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático, esto es: la conservación del momento, la conservación de la masa, la ecuación de estado de los gases, la conservación de la energía y la conservación de

vapor de agua (Sordo, 2006). En la actualidad, los MCG incorporan modelos de funcionamiento de los océanos, a estos modelos se les denomina modelos de circulación general acoplados océano atmósfera. (MCGAO-A) (Jaimes Borda, 2015).

A mediados de la década de 1990 el comité World Climate Research Programme (WCRP) organizó el primer ejercicio de intercomparación de modelos globales acoplados con recolección y almacenamiento de datos por parte del Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) (Meehl et al., 2007). Estos programas han tenido varias fases, con mejoras e implementación de estrategias para hacer una mejor representación de la física de circulación global con respecto a fases previas. Los resultados recopilados por la PCMDI durante el 2005 y 2006 se consideran como la fase 3 del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3) y fue insumo del Fourth Assessment Report (AR4) de la IPCC (Gregory et al., 2007). Análogamente para el 2014 se publicó el Fifth Assessment Report (AR5) de la IPCC como producto de la quinta fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) (Cadavid Valencia, 2015; Stocker et al., 2014). Actualmente se está realizando el sixth assessment Report (AR6) con el cual se presentan los resultados de la sexta fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) (Eyring et al., 2016).

El IPCC en 2013, definió cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Describen diferentes futuros climáticos, se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5W/m² (IPCC, 2013b).

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases efecto invernadero GEI (RCP8.5). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los escenarios de emisión utilizados en el IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) (denominados SRES, por sus siglas en inglés) que no incluía los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales enfocadas en mitigar las emisiones (IPCC, 2013b; Pachauri et al., 2014).

(Tillman et al., 2016) utiliza el Modelo SWB con datos climáticos a escala reducida de 97 proyecciones climáticas de los Modelos de Circulación General (MCG) del Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (CIMP5), para cuantificar los cambios proyectados en la recarga de agua subterránea de la cuenca alta del río Colorado (UCRB) desde los periodos históricos recientes (1950–2015) hasta los futuros (2016–2099), obteniendo como resultado unos posibles aumentos en la recarga del acuífero

Al pensar en la aplicabilidad regional de estos modelos hay que tener en cuenta que, en general, los MCG no pueden proporcionar en promedio información a escalas más finas que su cuadrícula computacional del orden de 200*200 km (Pachauri et al., 2014). Sin embargo, el proyecto Cordex (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), tiene como objetivo desarrollar y proporcionar información climática regional detallada necesaria para estudios de vulnerabilidad, impacto y adaptación a nivel local y regional, es importante evaluar su capacidad para describir la variabilidad de las variables climáticas en la zona de estudio, El proyecto CORDEX aporta un conjunto de modelos de reducción de escala dinámicos y estadísticos considerando varios GCM del proyecto CMIP5, con una cuadrícula computacional del orden de 50*50 km.

Las estimaciones regionales y locales de cambio climático se realizan mediante un procedimiento denominado reducción de escalas “DOWNSCALING”, el cual consiste en pasar modelos globales (de grande escala) a modelos regionales (de pequeña escala) (Jaimes Borda, 2015). Las técnicas de reducción de escala se agrupan en dos tipos principales: modelado dinámico del clima y reducción estadística empírica. La generación de escenarios, regionales y locales, se puede hacer utilizando esos modelos dinámicos que simulen el comportamiento de la atmosfera a través de las ecuaciones de la física o, bien, los modelos estadísticos que se basan en registros reales de las variables meteorológicas expresando en funciones de distribución de probabilidad del comportamiento histórico de las variables (Jaimes Borda, 2015).

Los modelos dinámicos más utilizados para mejorar la resolución espacial de los resultados de los modelos globales del clima son: Weather Research and Forecasting model – WRF- y Providing Regional Climates for Impacts Studies- PRECIS-, (IDEAM et al., 2010; Jaimes Borda, 2015)

El downscaling estadístico se basa en la correlación entre los predicandos, que son las variables medidas en el sitio, como la precipitación, y los predictores, que son variables a escala regional, como las variables de los modelos climáticos globales (MCG) (Jaimes Borda, 2015; Maraun et al., 2010). Esta metodología se vuelve especialmente valiosa cuando se busca realizar una evaluación rápida y económica de escenarios climáticos a nivel local. Los modelos estadísticos requieren conjuntos completos de datos climáticos, los cuales pueden obtenerse a partir de observaciones en tiempo real o de bases de datos derivadas de observaciones reales, como por ejemplo, E-OBS (proyecto EUFP6 ENSEMBLES), NCEP/NCAR reanalysis (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), ERA40 reanalysis (Centro Europeo para Predicciones Meteorológicas a Plazo Medio) y CRU (Universidad de East Anglia) (IDEAM et al., 2010)

Respecto a las aguas subterráneas los modelos matemáticos de flujo pueden usarse tanto para interpretar e integrar datos como para generar una visión general de la respuesta de los sistemas de aguas subterráneas al forzamientos en múltiples escalas espaciales y temporales, así como al cambio climático (Jakeman et al., 2016). Si bien las observaciones son esenciales para explorar y documentar el cambio global en las aguas subterráneas, los modelos numéricos proporcionan herramientas claves, no sólo para ayudar a desarrollar una comprensión basada en procesos de los cambios observados, sino también para predecir la respuesta futura de las variables subsuperficiales al clima, cambios en el uso de la tierra y escenarios de manejo del agua.

En el Noroccidente de Colombia el agua subterránea está asociada a una zona de costa y estuario, definida por la desembocadura de importantes ríos en el Golfo de Urabá, es un recurso estratégico, tanto desde el punto de vista de la conexión que tiene con las aguas superficiales y el sostenimiento de los ecosistemas asociados a los humedales de la región, asimismo como fuente de abastecimiento para varias poblaciones y soporte a las principales actividades económicas de la región (Villegas et al., 2018).

En el Eje Bananero de Urabá el agua subterránea constituye la base fundamental del suministro de agua para el sector productivo y el abastecimiento público de 30 comunidades rurales y cabeceras urbanas de los municipios de Chigorodó, Turbo y Apartadó (Villegas et al., 2018). En los últimos tres años se han tramitado ante la Corporación para el Desarrollo

Sostenible de Urabá –CORPOURABA- 83 nuevos permisos de prospección, de los cuales más del 60% son pozos con caudales superiores a 15 l/s para riego y abasteciendo público (CORPOURABA, 2019). Esto implica que la extracción del agua subterránea en la región de Urabá sigue en aumento.

Según el modelo hidrogeológico conceptual, que se tiene para la región, se ha identificado la ocurrencia de un acuífero libre y otro confinado; este último de carácter multicapa conformado por intercalaciones de forma aleatoria de materiales permeables, semipermeables e impermeables (J. Duque et al., 2016). Los niveles piezométricos de este acuífero responden rápido a los cambios en el régimen de explotación el cual está condicionado por las consecuencias de las variaciones climáticas; de esta forma se registran mayores descensos en el nivel del agua en épocas secas, época en la que a la vez se da mayor explotación del agua subterránea para el riego de cultivos y para diferentes procesos industriales y domésticos (CORPOURABA & Universidad de Antioquia, 2016)

Los resultados del ensamble multiescenario de cambio climático proyectados (obtenidos a partir de modelos Globales a una escala regional) por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia -IDEAM en 2015 (IDEAM, 2015), indican que en la región de Urabá la temperatura aumentaría cerca 1.9 °C en el período 2011-2040, y entre un 2.7°C y 3°C para el período 2041-2100; siendo las zonas costeras y planicies de la región las más impactadas. Igualmente, se prevé que la precipitación oscile entre +10% (aumento) y -10% (disminución) al 2100 según las épocas y zonas de la región. Este cambio tendría un efecto poco predecible, por lo que en época seca se verán intervalos de lluvias e inundaciones y en periodos húmedos habrá sequías y posiblemente aumento en la evapotranspiración (Martínez-Valderrama et al., 2016) estos cambios en la temperatura y las precipitaciones seguramente podrían afectar la recarga del acuífero, más aún si se tiene en cuenta que también podría incrementar la demanda de agua subterránea para abastecer necesidades de riego y consumo humano, dadas las proyecciones de desarrollo y crecimiento que se prevén para la región.

Usando MODFLOW (J. Duque & Betancur, 2017), realizaron la modelación numérica del flujo de aguas subterráneas del sistema acuífero del Golfo de Urabá a escalas regional, intermedia y local de los niveles piezométricos para tres periodos climáticos (Seco-transición-Húmedo). Este modelo permitió comprender la variación espacio temporal de los niveles piezométricos del acuífero.

Además, (Bastidas Osejo, 2019) analizó la magnitud y la variabilidad espacio – temporal de la recarga de aguas subterráneas al nivel somero del sistema hidrogeológico Golfo de Urabá, a partir de la aplicación y comparación de modelos de balance de humedad en el suelo (SWB) y el método de fluctuaciones del nivel freático (WTF). Los resultados obtenidos mediante el SWB se consideran satisfactorios, dado que, al comparar los datos obtenidos en dicho modelo con las fluctuaciones de niveles medidos a escala horaria en 14 puntos de monitoreo, se logra una buena representación de la estacionalidad y de la magnitud de la recarga.

Reuniendo estos factores de conocimiento e incertidumbre frente a los efectos que el cambio climático podría tener sobre el acuífero de Urabá se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo los efectos del cambio climático, según escenarios locales, pueden afectar la recarga y con ello alterar el flujo de agua subterránea en el sistema multicapa del Golfo de Urabá?

Para obtener una respuesta será necesario incrementar la resolución de los modelos que permitan reducir la escala a nivel local y generar escenarios de cambio climático con menor incertidumbre. A partir de este punto se puede realizar: 1) estimación de la recarga a partir de los escenarios de temperatura (T) y precipitación (P) (utilizando el modelo SWB y 2) utilizando la recarga previamente calculada, modelar numéricamente el flujo de agua subterráneas, para obtener posibles modelos de flujo y cambios en la superficie piezométricas, tomando como punto de partida el modelo calibrado realizado por (J. Duque & Betancur, 2017).

Las ideas hasta aquí expuestas se resumen en la siguiente hipótesis de trabajo: es posible definir diferentes escenarios de cambio climático en Urabá y evaluar a partir de ellos los posibles efectos que puedan tener sobre las aguas subterráneas, a fin de contar con elementos que permitan realizar posteriores estudios de vulnerabilidad, impacto y adaptación a nivel local y regional.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos de distintos escenarios locales de cambio climático en la dinámica de flujo del acuífero del Golfo de Urabá.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer para el área del acuífero del golfo de Urabá, escenarios locales de cambio climático
- Identificar impactos del cambio climático sobre la recarga y almacenamiento del agua subterránea.
- Simular el flujo de agua subterránea considerando los escenarios locales de cambio climático.

2. METODOLOGIA

Se presenta inicialmente una breve descripción de la zona de estudio y se procede luego a describir los materiales y métodos seguidos para lograr el cumplimiento de los objetivos de esta investigación. Descripciones detalladas del modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio pueden consultarse en (Bastidas Osejo, 2019; Campillo et al., 2020; Villegas et al., 2018)

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al nor-occidente del departamento de Antioquia, cubre un área aproximada de 1030 km² (103.000 Ha); limitada al oriente por las Serranías de Abibe, al norte el litoral del mar Caribe; al nor-occidente el Golfo de Urabá y al sur-occidente el río León (*Figura 1*).

La región corresponde a un sistema de drenajes que bajan de la serranía de Abibe y desembocan al río León (Chigorodó, Carepa, Zungo, Apartadó y Grande) o directamente al Golfo de Urabá (Currulao y Guadualito) (Bastidas Osejo, 2019). Todas las cuencas hidrográficas en el área de estudio poseen tres tramos con variación de relieve marcado. La primera corresponde al sistema de drenajes rectos intramontanos en las serranías con alturas entre 1600 y 100 m.s.n.m. definida por relieves escarpados y cuencas estrechas. La segunda corresponde a la zona de transición de los drenajes entre el sistema montañoso y las llanuras, en estas áreas los drenajes pierden energía por el cambio de pendiente y disminuyen la capacidad de transporte de sedimentos, generando masivas depositaciones de materiales. Los drenajes de tipo anastomosado y trenzado en este tramo forman abanicos aluviales que se interdigitan formando la zona de piedemonte. En el tramo final los drenajes pierden gran parte de la carga y la energía, encontrándose cercano al nivel del río León o el Golfo de Urabá. Las planicies corresponden a las llanuras de inundación del río León y de todos estos drenajes aportantes. En las zonas en donde sucede confluencia de los principales afluentes hacia el río León existen complejos de humedales. Según la (Universidad de Medellín et al., 2012) y (Flórez et al., 2016) se han delimitado 313 km² de humedales permanentes en un 17% y temporales en un 73%.

El río León es el principal cuerpo de agua de la zona. Inicialmente fluye con tendencia al noroeste, se defleca posteriormente para seguir al norte. El río se restringe al oeste por cerros remanentes generados por lineamiento estructural que divide la cuenca sedimentaria de Urabá con la cuenca sedimentaria del Atrato. Hacia el norte el drenaje se defleca para seguir un curso al noreste hasta llegar a su desembocadura en el Golfo de Urabá. Este cuerpo de agua representa la frontera suroeste de la zona de estudio y el principal receptor en conjunto con el Golfo de Urabá de los flujos de descarga superficial y subterránea en esta zona.

En la región el sistema hidrológico de humedales (cuerpos lénticos), ríos (cuerpos lóticos) y acuíferos es un sistema que se encuentra potencialmente interconectado (Betancur-Vargas et al., 2017). El sistema de sedimentación que se ha dado por los actuales y anteriores cuerpos de agua, su distribución y evolución dentro de la cuenca hacen que haya una heterogeneidad grande en las unidades que conforman los acuíferos. Debido a la distribución de intercalaciones de arcillas-limos, arenas y gravas se considera un modelo multicapa, en donde la parte somera se comporta como acuífero libre, y los niveles más profundos, como acuífero confinado (CORPOURABA & Universidad de Antioquia, 2016).

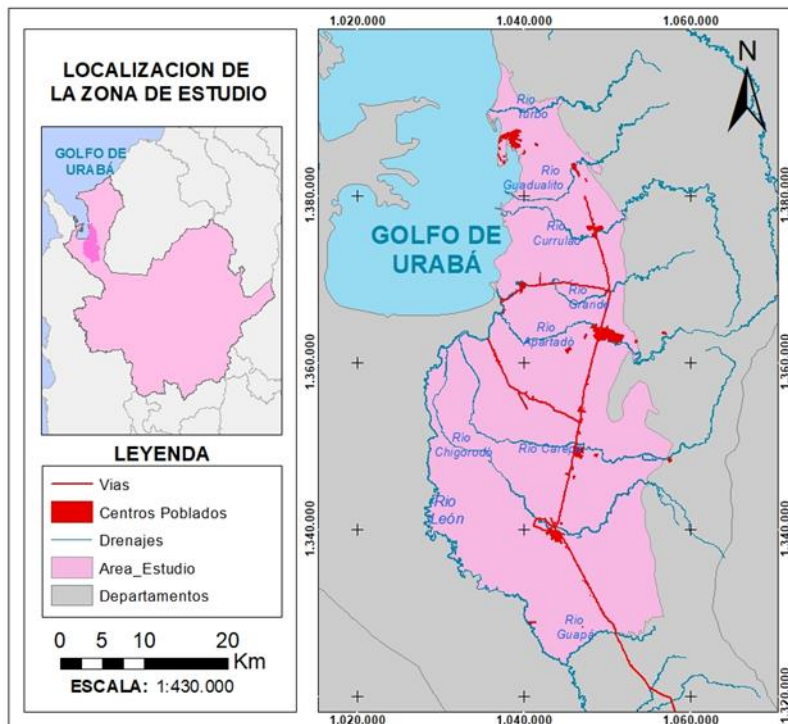


Figura 1. Localización del área de estudio

En términos climáticos, el clima es cálido húmedo tropical, con precipitaciones promedio anuales entre 4000 mm/año (cuenca del río Guapá) y 1600 mm/año (extremo norte y parte alta del río Turbo), así como temperaturas del aire cerca de la superficie entre 25.7 y 28.1 °C y humedades relativas promedio alrededor del 86%, característico de regiones de bosque húmedo tropical (Ossa-Valencia & Betancur-Vargas, 2018). El clima de la zona está controlado por la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cercanía al mar Caribe, la corriente de chorro del Chocó (sistema de bajo nivel) y los accidentes orográficos. La lluvia muestra un ciclo unimodal con una temporada seca muy marcada entre enero y marzo (Bastidas Osejo, 2019; Ossa-Valencia & Betancur-Vargas, 2018).

En los cuatro municipios que conforman el Eje Bananero de Urabá (Chigorodó, Carepa, Apartadó y Turbo) habitan 368.914 personas (DANE, 2019), 70% en la zona urbana y el resto en áreas rurales. La economía de Urabá se caracteriza por su vínculo con la producción a gran escala de cultivos permanentes herbáceos, es el caso del banano y el plátano, también

la ganadería bovina hace parte de este tipo de sistemas productivos, con mayor ocupación de la tierra en este territorio casi 35.000 ha están cultivadas en banano, más de 10.000 ha en plátano, 5.362 ha en cacao, 1950 ha, 950 ha en piña y 395 ha en maracuyá; el ganado ocupa 241.892 ha. Estas actividades demandan anualmente cerca de 30 millones de metros cúbicos de agua subterránea del sistema hidrogeológico (Universidad de Antioquia & CORPOURABA, 2019).

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr los objetivos propuestos en esta investigación, el desarrollo metodológico consto de tres pasos principales: el primero, la generación de escenarios de cambio climático a escala local, mediante la reducción de escala de los modelos de circulación global (MCG) de los proyectos CMIP5, CMIP6 y el conjunto de múltiples modelos de reducción de escala del proyecto CORDEX, bajo dos escenarios 2.6 y 8.5 RCP en los últimos cuatro años, para los periodos 2018-2040, 240-2070 y 2070-2100, esto con el fin de que la información generada pueda ser de mayor utilidad en la planificación y gestión de los recursos hídricos subterráneos, a mediano y largo plazo; en segundo lugar con el modelo distribuido SWB (Soil Water Balance), utilizando las configuraciones del realizado por (Bastidas Osejo, 2019); se calculan las condiciones de recarga en función de los escenarios locales generados; finalmente, con las salidas de recarga del modelo SWB se simulan las condiciones de flujo del sistema de agua subterránea, ajustando los resultados del modelo calibrado con MODFLOW por Duque en 2017 para los años futuros (*Figura 2*).

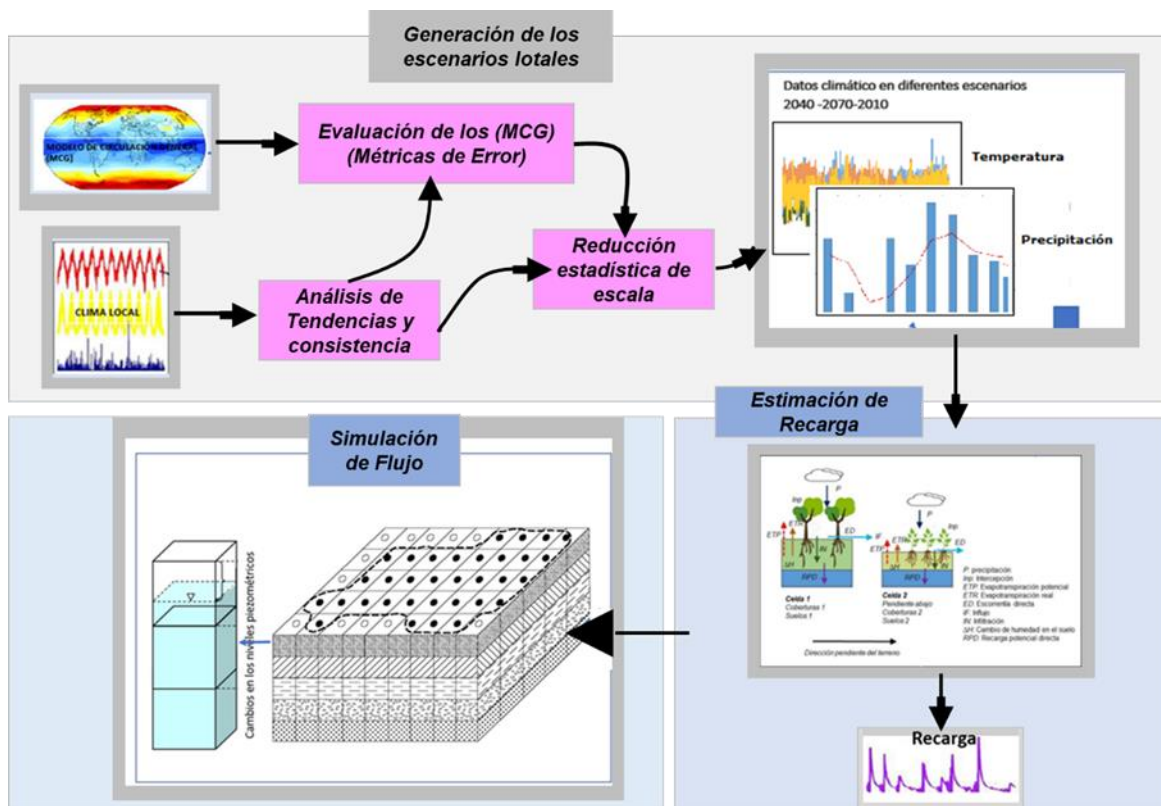


Figura 2. Esquema metodológico de la Investigación.

2.3. GENERACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la generación de los escenarios locales de cambio climático, a los datos registrados, por el IDEAM, de temperatura y precipitación se les realizó un análisis exploratorio, a partir de este se determinaron valores outliers; los datos de los modelos climáticos globales de los proyectos CMIP5, CMIP6 y Cordex fueron evaluados, buscando el modelo que mejor representara la climatología local, este sería tomado como referencia para la reducción de escala y la consecuente generación de escenarios locales de cambio climático para el golfo de Urabá (**Figura 3**).

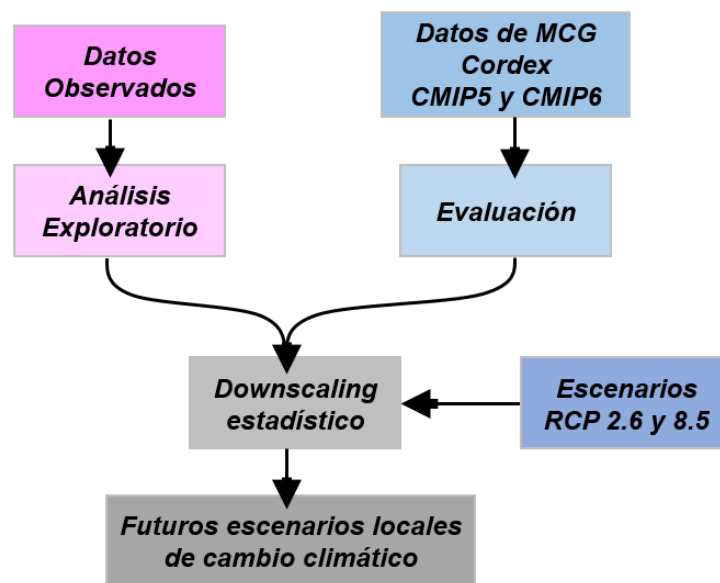


Figura 3. Diagrama de Flujo para la reducción de escala de escenario de cambio clima

2.3.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Con el fin de describir el comportamiento de las variables, encontrar valores outliers, se realizó un análisis exploratorio de datos. Para el análisis de las variables climáticas de la zona de estudio se utilizaron 41 estaciones de precipitación y 15 de temperatura del IDEAM, las estaciones utilizadas se muestran en la **Figura 4** y se describen en la **Tabla 1**. En este análisis se consideraron valores promedio, máximos, mínimos, desviación estándar y número de datos.

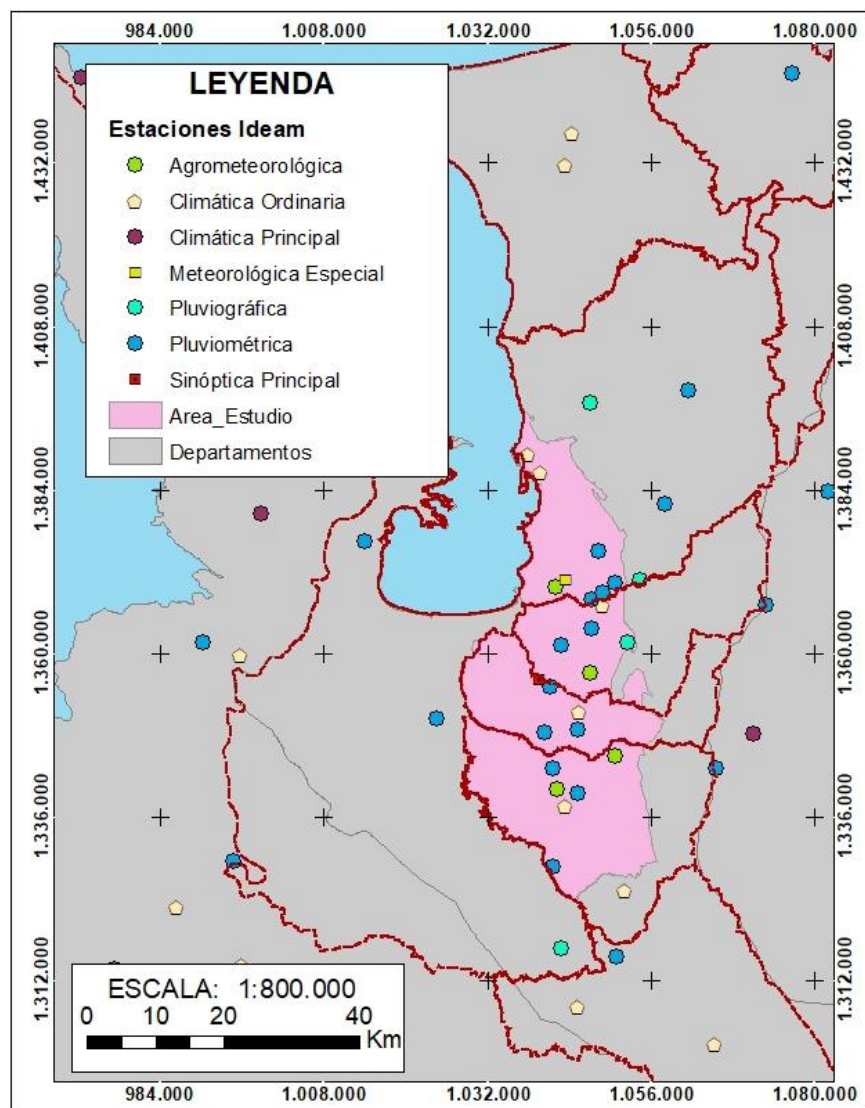


Figura 4. Estaciones de precipitación y temperatura del IDEAM. Fuente: Propia.

Tabla 1. Estaciones de precipitación.

Código	Nombre	Periodo de registro	Faltantes
12025010	APTO GONZALO	1931 - 1984	12.7%
13010020	TUCURA	1961 - 1995	73.4%
13035010	PTO NUEVO	1965 - 1991	36.0%
12010140	RIOGRANDE	1972 - 1976	33.2%
12015030	IDEMA-MONTECRISTO	1972 - 1981	27.0%
12025020	CARIBIA	1972 - 1982	39.6%
11135010	SAUTATA	1972 - 2005	20.0%
12010020	PALMERA LA	1972 - abr 1991	5.7%
12020010	PUEBLO BELLO	1972 - dic 2018	1.7%
12010150	VILLA ARTEAGA	1972 - jul 2018	36.6%
12010010	TORMENTO EL	1972 - nov 2018	2.3%
12030020	CARMELO EL	1972 -jun 2018	9.4%

Código	Nombre	Periodo de registro	Faltantes
13020020	CIELO EL	1973 - 2002	28.0%
13040010	QUIMARI	1973 - mar 2003	19.3%
12010040	TULENAPA	1974 - 2000	11.1%
11150020	TANELA	1974 - 2016	5.8%
11150010	TITUMATE	1974 - abr 2017	4.5%
11130010	UNGUIA	1974 - oct 2018	4.1%
12010030	BARRANQUILLITA	1974 - sept 2018	4.8%
11120040	RIOSUCIO	1975 - dic 2018	12.0%
12010080	STA ISABEL	1977 - 1994	12.0%
12010070	CASCO EL	1977 - dic 2018	3.6%
12010120	STA MARTHA	1977 - dic 2018	3.3%
12015020	UNIBAN	1977 - dic 2018	4.6%
12010100	EUPOL	1977 - nov 2018	10.7%
12010060	LORENA LA	1977 - nov 2018	5.8%
12010050	TOSCANA LA	1977 - sept 2018	12.4%
12010090	TRIGANA	1977 - sept 2018	4.6%
12010110	PRADO MAR	1977 - sept 2018	3.5%
12025030	MELLITO EL	1983 - abr 2018	13.9%
12015070	APTO LOS CEDROS	1983 - dic 2018	3.0%
13030030	URRA 1	1984 - 1995	21.8%
12010180	CHOROMANDO HDA	1984 - 1996	7.1%
12010160	SAN JOSE APARTADO	1984 - 1997	11.6%
11145010	BAJIRA	1985 - 1996	36.0%
12015080	CERRAZON LA	1986 - 1992	15.9%
13020010	DESPENSA LA	1990 - 1995	16.5%
13020040	SAIZA	1990 - 2000	23.2%
12010170	NUEVO ORIENTE	1991 - sept 2018	32.8%
13015030	CAMPO BELLO	1996 - 2004	19.9%

Tabla 2. Temperatura Media.

Código	Nombre	Periodo de registro	Faltantes temperaturas medias
12025010	APTO GONZALO	1931 - 1984	39.4%
13015020	TUCURA	1961 - 1995	19.2%
13035010	PTO NUEVO	1965 - 1991	57.3%
13025030	DESPENSA LA	1966 - 1995	69.3%
12015050	RIOGRANDE	1972 - 1992	33.2%
11135010	SAUTATA	1972 - 2005	38.2%
12015010	VILLARTEAGA	1972 - oct 2017	48.0%
12015020	UNIBAN	1977 - dic 2018	13.4%
12025030	MELLITO EL	1983 - abr 2018	25.7%
12015070	APTO LOS CEDROS	1983 - dic 2018	10.3%
12025040	TURBO	1984 - 2011	27.9%
11145010	BAJIRA	1985 - 1996	49.3%

Código	Nombre	Periodo de registro	Faltantes temperaturas medias
12015080	CERRAZON LA	1986 - 1992	36.7%
13015030	CAMPO BELLO	1996 - 2004	29.8%

2.3.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

Cumpliendo con el procedimiento antes mencionados fueron evaluados 31 modelos de lo proyecto CMIP5, 15 del CMIP6 y 9 del CORDEX tal como se referencian en la **Tabla 3**, **Tabla 4** y **Tabla 5**.

Tabla 3. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos CMIP5.

Nombre del Modelo	Resolución atmosférica horizontal (lon × lat)	Centro de Modelación
ACCESS1.0	1.88×2.48	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia
ACCESS1.3	1.88×2.48	
CMCC-CESM	3.75×3.75	Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici
CMCC-CM	0.75×0.75	
CMCC-CMS	1.88×1.88	
CNRM-CM5	1.41 ×1.41	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique
CNRM-CM5-2	1.41×1.41	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique
CSIRO-MK3-6-0	1.88×1.88	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)
CanCM4	2.8 × 2.8	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
FGOALS-s2 +	1.7 × 2.8	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
GFDL-CM2.1 + *	2.0 × 2.5	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-CM3	2.0 × 2.5	
GFDL-ESM2G	2.0 × 2.5	
GFDL-ESM2M + *	2.0 × 2.5	
GISS-E2-H *	2.0 × 2.5	NASA Goddard Institute for Space Studies
GISS-E2-H-CC *	2.0 × 2.5	
GISS-E2-R +	2.0 × 2.5	

Nombre del Modelo	Resolución atmosférica horizontal (lon × lat)	Centro de Modelación
GISS-E2-R-CC+	2.0 × 2.5	
HadCM3	2.5 × 3.8	Met Office Hadley Centre
HADGEM2-AO+	1.25 × 1.88	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration
HADGEM2-CC	1.25 × 1.88	Met Office Hadley Centre
HADGEM2-ES	1.25 × 1.88	
INM-CM4.0 **	1.5 × 2.0	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-LR	1.88 × 3.75	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	1.25 × 2.5	
IPSL-CM5B-LR*	1.88 × 3.75	
MIROC-ESM*	2.8 × 2.8	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-CHEM*	2.8 × 2.8	
MIROC4h	0.56 × 0.56	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MIROC5	1.4 × 1.4	
MPI-ESM-LR	1.88 × 1.88	Max Planck Institute for Meteorology
MPI-ESM-MR	1.88 × 1.88	
MPI-ESM-P *	1.88 × 1.88	
MRI-CGCM3	1.125 × 1.125	Meteorological Research Institute
MRI-ESM1	1.125 × 1.125	
NorESM1-M	1.88 × 2.5	Norwegian Climate Centre
NorESM1-ME	1.88 × 2.5	

Tabla 4. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos CMIP6

Nombre del Modelo	Resolución atmosférica horizontal (lon × lat)	Centro de Modelación
BCC-CSM2-MR	1.125° x 1.125°	Beijing Climate Center, Beijing
BCC-ESM1	2.81° x 2.81°	
CESM2	0.9° x 1.25°	National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder
CESM2-WACCM	0.9° x 1.25°	
CanESM5	2.81° x 2.81°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria
E3SM-1-0	0.5° x 0.5°	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore
FGOALS-g3	1.7 × 2.8	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences

Nombre del Modelo	Resolución atmosférica horizontal (lon × lat)	Centro de Modelación
GFDL-ESM4	2.0 × 2.5	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
IPSL-CM6A-LR	2.5° x 2.5°	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Paris
MCM-UA-1-0	3.75° X 2.5°	University of Arizona
MIROC6	1.4° x 1.4°	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Kanagawa
MRI-ESM2-0	1.125° x 1.125	Meteorological Research Institute, Ibaraki
NESM3	1.9 X 1.9	The Nanjing University of Information Science and Technology
NorCPM1	1.88 × 2.5	Norwegian Climate Centre
NorESM2-LM	1.88 × 2.5	

Tabla 5. Lista de modelos considerados en el estudio; proyectos Cordex

Nombre del Modelo	Resolución atmosférica horizontal (lon × lat)	Centro de Modelación
CNRM-CM5	0,44, 0,44	National Center for Meteorological Research, Météo-France and CNRS laboratory
CSIRO-Mk3-6-0,	0,44, 0,44	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO, Australia) and Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE)
CanESM2,	0,44, 0,44	The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)
GFDL-ESM2M,	0,44, 0,44	The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) - NOAA
HadGEM2-ES,	0,44, 0,44	Met Office Hadley Centre
IPSL-CM5A-MR,	0,44, 0,44	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC5,	0,44, 0,44	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR,	0,44, 0,44	Max Planck Institute for Meteorology
NorESM1-M	0,44, 0,44	Norwegian Climate Centre

La información de los modelos de los proyectos CMIP6, CMIP5 y del proyecto Cordex se obtuvieron del Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos (PCDMI, por sus siglas en inglés) a través de la siguiente dirección online: <https://esgf-node.llnl.gov/>. Earth System Grid Federation (ESGF) los criterios de búsqueda fueron los siguientes:

Tipo y temporalidad de la variable: Amon, Campos atmosféricos medios mensuales y algunos campos de superficie

Escenario: historical, Campos atmosféricos medios mensuales y algunos campos de superficie

Ensamble y parametrización utilizada en la simulación: r1i1p1, donde **r** representa las condiciones iniciales, **i** periodo de inicialización y estabilización, **p** esquemas de parametrización.

Con el fin de cuantificar la capacidad de los modelos climáticos de representar el clima presente se utilizaron diagramas de Taylor (Taylor, 2001). Estos diagramas se basan en diferentes métricas estadísticas como el error cuadrático medio, el coeficiente de correlación espacial y la relación de la varianza espacial entre modelos y observaciones. Los diagramas de Taylor son ampliamente utilizados por resumir información acerca de diferentes aspectos de la representación de campos modelados como el patrón espacial, la magnitud del campo y su variabilidad (J. Sierra et al., 2016). Igualmente, se evaluó la representación del ciclo anual de la precipitación y la temperatura en la región.

La evaluación de los modelos se hizo a partir de datos de estaciones en tierra de precipitación y la temperatura, las métricas evaluadas fueron el coeficiente de correlación de Pearsons, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), y el sesgo (BIAS). estas métricas han sido utilizadas para evaluar modelos con éxito en diversos estudios (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Sreelatha & Anand Raj, 2019). Sin embargo, dada la diferencia de escala entre los modelos y los datos observados. inicialmente se ajustó la resolución de los datos observados a escala mensual a la resolución de cada modelo, para lo cual se promediaron tantos pixeles de los datos observados como la resolución de los modelos, siguiendo el procedimiento realizado por (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017).

El modelo que tuvo menor sesgo, menor error cuadrático medio (RMSE), mayor correlación y represento mejor el ciclo anual de la temperatura y la precipitación, fue tomado para realizar la reducción estadista de escala y posteriormente tener los diferentes escenarios futuros de cambio climático.

2.3.3. REDUCCIÓN DE ESCALA Y ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se decidió realizar un downscaling estadístico, dado que los recursos técnicos y humanos necesarios para reducir dinámicamente el conjunto completo de los modelos son significativos, y no son necesarios si el objetivo es desarrollar escenarios que cubran un rango representativo de condiciones climáticas futuras relevantes, para una evaluación de riesgos de cambio climático (McSweeney et al., 2015), como es el caso de la presente investigación.

Para realizar el downscaling estadístico se seleccionó la técnica de BCSD (BIAS Correction and Spatial Dissagregation), la técnica de corrección de sesgo seleccionada fue la de nonparametric quantile mapping (Lee & Singh, 2018), ya que puede reducir los sesgos en todo el rango de la distribución, además, tienen la ventaja de que se pueden aplicar sin suposiciones específicas sobre la distribución de los datos y se recomiendan para la mayoría de las aplicaciones de corrección de sesgo estadístico (Gudmundsson, Bremnes, Haugen, & Skaugen, 2012).

Para la desagregación espacial se automatizó la interpolación de varios métodos mediante el uso de Arcpy, los métodos de interpolación fueron: interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW), Spline de Placa Delgada (SPD) y kriging bayesiana empírica (en inglés, Empirical Bayesian Kriging (EBK). Mediante validación cruzada se pudo identificar el EBK como el método de interpolación que menor RMSE presenta, sin embargo, por capacidad operativa y de cómputo se usó IDW.

2.3.4. CORRECCIÓN DE SESGO

Los resultados de los modelos climáticos globales (MCG) y los modelos climáticos regionales (MCR) muestran sesgos sistemáticos en relación con las observaciones de diferentes fuentes, como errores en la parametrización de convección y orografía a gran escala, variabilidad irreal a gran escala y variabilidad interna impredecible diferente a la de las observaciones (Cannon et al., 2015; Lee & Singh, 2018).

Para realizar una reducción de escala estadística, este sesgo debe corregirse. Se han desarrollado varios métodos de corrección de sesgo para ajustar la media, la varianza, así como todos los cuantiles. Para ajustar los momentos de los resultados del modelo a los de las observaciones, se ha aplicado el método delta, mientras que el mapeo de cuantiles (QM) se ha utilizado para todos los cuantiles (Lee & Singh, 2018). Varios autores han tenido buenos resultados con las correcciones de sesgo mediante el mapeo de cuantiles, especialmente el no paramétrico (Bong et al., 2018; Jakob Themeßl et al., 2011; Ngai et al., 2017; Wuthiwongyothin et al., 2019; Yang et al., 2018).

Antes de la aplicación de las transformaciones estadísticas y de los métodos de procesamiento de datos relacionados, es importante recordar que estas técnicas están diseñadas con un alcance limitado: para ajustar la variable climática simulada de modo que su distribución (o algunos aspectos de esta) coincida con la distribución de los valores observados. Aplicado en la evaluación del impacto climático, se supone posteriormente que la diferencia entre el resultado del modelo y las observaciones es estacionaria, es decir, que las mismas correcciones son aplicables en climas futuros. La validez de este supuesto no puede evaluarse completamente, ya que la variable de interés puede exceder el rango observado en un clima cambiante (Gudmundsson, Bremnes, Haugen, & Skaugen, 2012; Jakob Themeßl et al., 2011).

2.3.5. QUANTILE MAPPING (QM)

El QM permite que la distribución de probabilidad de los resultados del modelo de GCM y RCM (x) se ajuste a la distribución de probabilidad de los datos observados (y) haciendo coincidir la función de distribución de probabilidad acumulada CDF, $F(x;\theta)$, (donde θ representa el conjunto de parámetros). A través de QM, el CDF de los datos de salida RCM se transfiere a los datos observados (Lee & Singh, 2018). El QM tradicional se puede definir por la *Ecuación 1*.

$$\hat{y} = F_0^{-1}(F_{m,base}(x))$$

Ecuación 1. Función de distribución de probabilidad acumulada

Donde F_0^{-1} representa una función inversa de CDF para los datos observados y $F_{m,base}$ es la CDF de la salida del modelo de RCM o GCM ajustado a las salidas de GCM para el periodo

base. La función de distribución empírica (ECDF por sus siglas en inglés) es estimada con la ecuación 2, donde $\mathbf{X}_{(i)}$ es i-ésimo valor ordenado de forma creciente y \mathbf{N} el número de datos. El mapeo no paramétrico puede ser realizado con la ecuación 2 sin ninguna suposición sobre los datos observados o modelados (Lee & Singh, 2018)., definida por la *Ecuación 2*.

$$\hat{F}(x_{(i)}) = \frac{i}{N + y}$$

Ecuación 2. Función de distribución empírica

Si los nuevos valores del modelo (por ejemplo, de las proyecciones climáticas) son mayores que los valores de entrenamiento utilizados para estimar el CDF empírica se utiliza la corrección encontrada para el cuantil más alto del período de entrenamiento (Jakob Themeßl et al., 2011).

2.3.6. REDUCCIÓN DE ESCALA (DOWNSCALING) EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

El downscaling se realizó para los modelos CMCC-CMS del CMIP5 y el MIROC5 del proyecto Cordex, tanto para valores diarios como para mensuales, la corrección de sesgo se realizó por Non-parametric Quantile Mapping para la temperatura media y precipitación de ambos modelos, y para la temperatura máxima y mínima del modelo MIROC5, la corrección de sesgo se realizó para las mismas estaciones de la evaluación. La desagregación espacial de la precipitación se realizó con el método de interpolación EBK y Spline de Placa Delgada (SPD); para la temperatura se usó la ecuación de regionalización de Cenicafé para la región atlántica que se relaciona directamente con la topografía del terreno (Chaves & Jaramillo, 1998).

2.4. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA E IMPACTOS

Para el cálculo de la recarga se utilizó el modelo distribuido SWB (Soil Water Balance) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Este es un modelo de humedad en el suelo distribuido en los parámetros, en las entradas y salidas. El modelo calcula la recarga en una escala temporal diaria permitiendo observar fenómenos que se dan en escala interdiaria.

La parametrización de modelo se realizó a partir del trabajo realizado por Bastidas Osejo (2019) en el que se realiza un modelo conceptual de recarga para las aguas subterráneas en el sistema hidrogeológico del Golfo de Urabá ver Tabla 6.

Tabla 6. Configuración del modelo. modificado de (Bastidas Osejo, 2019)

Parametros	Configuración	Parametros	Configuración
Sistema de coordenadas	MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone - EPSG:3115	Unidades de operación del modelo:	

			pulgadas (") y grados Fahrenheit (°F)
Dominio del modelo	Xmin: 1028200	Unidades dominio del modelo:	metros
	Ymin: 1323739.74	Número de filas:	812
	Xmax: 1068800	Número de columnas:	415
	Ymax: 1402739.74	Tamaño de celda	100 m
Temporalidad húmea	Abril a Noviembre	Precipitación (puntual o distribuida)	Distribuidas
Temperatura (Puntual o distribuida)	Distribuida	Parámetro de abstracción inicial	0,05
Método de evapotranspiración	Hargreaves & Samani, 1985 (distribuido)	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo	profundidad de raíces
Humedad Inicial en el suelo	A capacidad de campo (100% de CC)		
Periodo de simulación	Periodo Base: Enero a diciembre 2018 En escenario RCP 2.6 y 8.5 Enero - Diciembre para los periodos 2039-2043, 2069-2073 y 2096-2100	Paso de tiempo	Diario
Variables de salida	Recarga potencial directa, evapotranspiración real y humedad en el suelo	Escala temporal de salidas	Mensuales y anuales

Los datos dinámicos del modelo son superficies diarias de temperatura máxima, mínima y precipitación, las superficies de precipitación se crearon con el método de interpolación de Spline de Placa Delgada (SPD) definido y programado en el paquete Field de R e incorporado a un código recurrente diseñado en R y RStudio.

La técnica de interpolación SPD ha sido ampliamente usada para obtener la distribución espacial de las variables hidrometeorológicas requeridas para el modelo SWB. Para las superficies de temperatura se utilizó la ecuación de Cenicafé para la región atlántica corregida para la zona mediante los datos del IDEAM, se desarrolló un código recurrente en Python para automatizar el proceso. Como periodo base de modelación se tomó del año 2014 a 2018 teniendo como año de calentamiento del modelo el año 2014 para perder sensibilidad de las condiciones iniciales de humedad del suelo y 4 años de resultados con menor incertidumbre, para los escenarios de cambio climático se modelaron tanto en RCP 2.6 y 8.5 los años 2039-2043, 2069-2073 y 2096-2100, de igual forma el primer año es de calentamiento del modelo, en total para los datos de las variables de entrada (precipitación, temperatura máxima y mínima) se generaron 38.325 superficies en archivo ASCII, se aclara que se utilizó los datos del modelo MIROC5 de proyecto Cordex con el downscaling realizado con Quantile Mapping.

El modelo SWB es determinístico, espacialmente distribuido, cuasi tridimensional y físicamente basado en la aplicación de un balance de masas en el volumen de control Suelo-Planta (Mair et al., 2013; Westenbroek et al., 2010) el cual se esquematiza en la **Figura 5**,

junto con los flujos que intervienen en el balance, dicho balance se aplica en pasos de tiempo diario. Según la clasificación dada por Xie et al. (2018) el modelo SWB es de tipo tanque, dado que no acopla el balance de agua y energía y no resuelve la ecuación de Richard en la zona no saturada, sino que estima la recarga potencial de aguas subterráneas como el remanente del balance en el volumen de control definido, donde la zona vadosa es conceptualizada como un conjunto de tanques en la horizontal celda a celda con espesor variable, dependiendo de la profundidad de las raíces. Para la resolución de la ecuación de balance se utiliza una versión modificada del método de C W Thornthwaite (1948; Charles Warren Thornthwaite & Mather (1957), para determinar la humedad en el suelo y la evapotranspiración real en cada paso de tiempo y en cada celda del dominio del modelo. Las bases teóricas detalladas de este modelo se remiten a (W.R. Dripps & Bradbury, 2007; Weston R Dripps, 2004).

La **Ecuación 3** y **Ecuación 4** corresponde a la Ecuación de balance de humedad en el suelo utilizada en el modelo SWB y que es común para la mayoría de los modelos de este tipo:

$$RPD = Entrada - Salida - Variación en el Almacenamiento \quad \text{Ecuación 3}$$

$$RPD = (P + IF) - (I_{np} + ETP + ED) - \Delta H \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde: *RPD*: Recarga potencial directa, *P*: Precipitación, *IF*: Influjo desde otras celdas, *I_{np}*: Intercepción en el follaje, *ETP*: Evapotranspiración potencial, *ED*: Escorrentía superficial directa, ΔH Variación de humedad en el suelo.

En la **Figura 5** se representa gráficamente como es el balance de humedad en el suelo para el volumen de control.

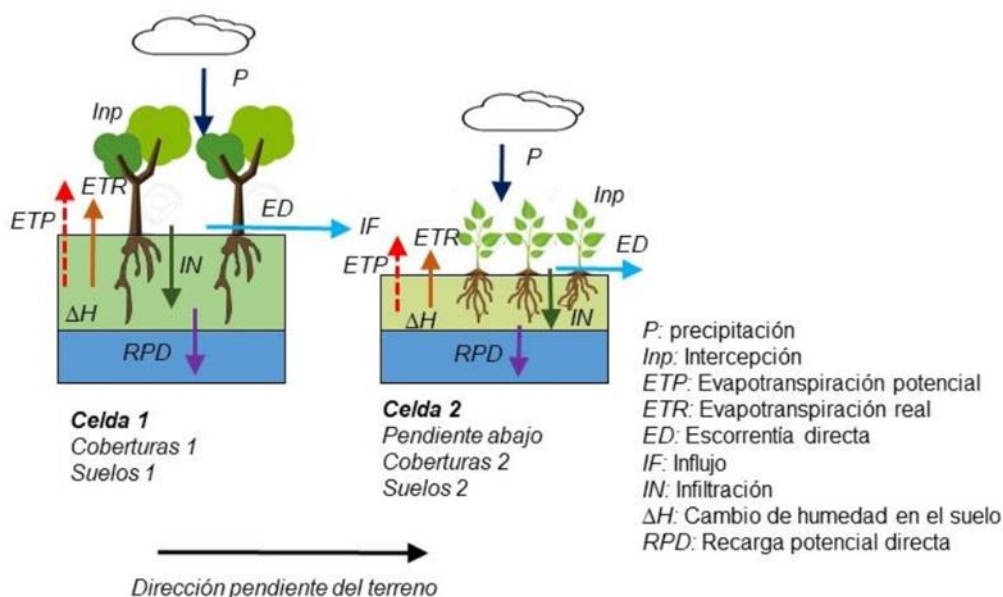


Figura 5. Esquema de representación del volumen de control Suelo –Planta, celda a celda en el dominio del modelo SWB y los elementos del balance de humedad en el suelo que intervienen para

la estimación de la recarga potencial directa y la evapotranspiración real. Tomado de (Bastidas Osejo, 2019).

2.4.1. VARIABLES ESTÁTICAS

Las variables estáticas del modelo se obtuvieron a partir del trabajo de Bastidas (2019). Para generar estas variables se necesita información de suelos, coberturas y un modelo digital de elevación a partir de estos se generan los mapas de direcciones de flujo (Figura 6), de coberturas (Figura 7), de textura de los suelos (Figura 8), de capacidad de campo (Figura 9).

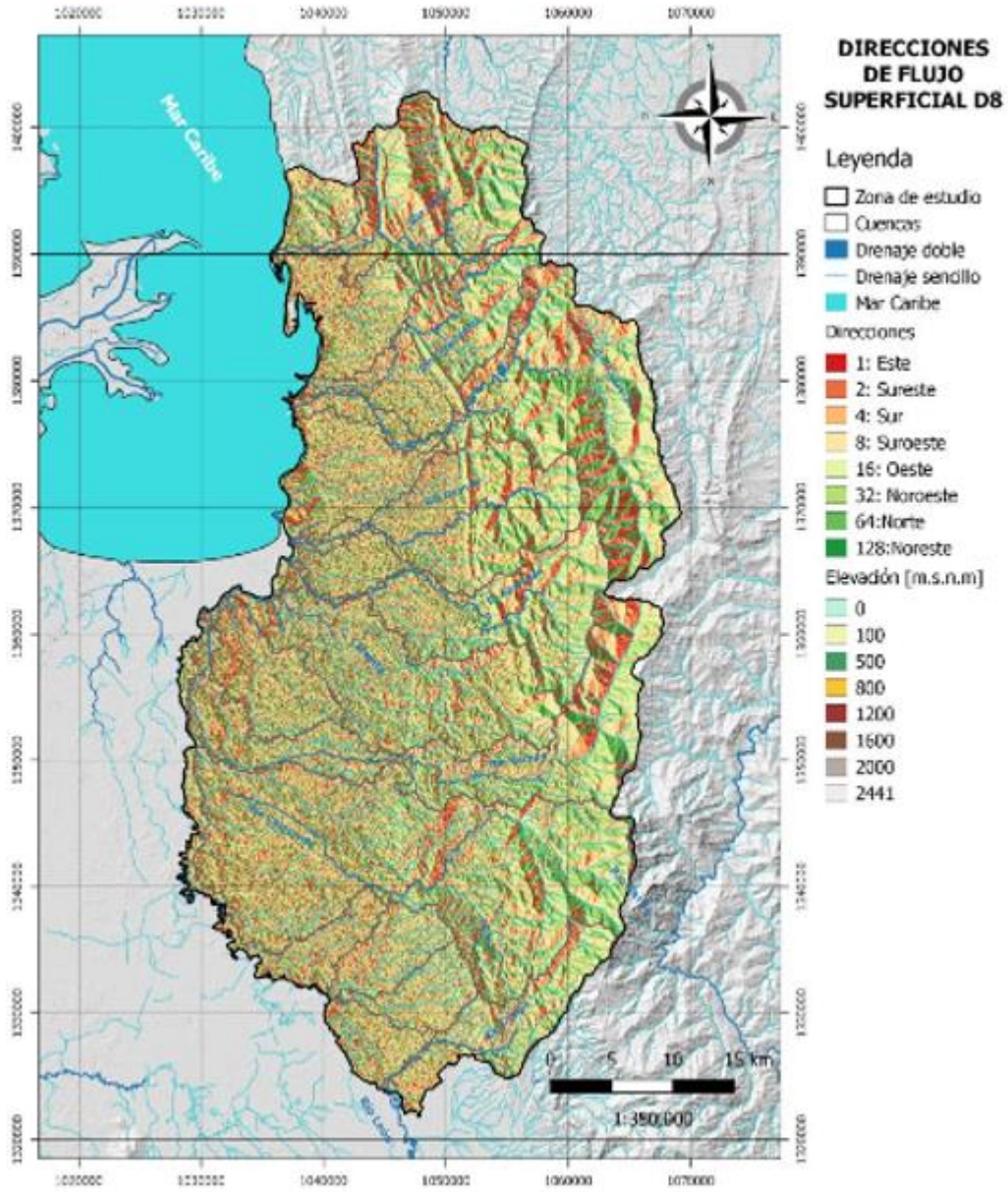


Figura 6. Direcciones de flujo superficial D8 –Formato ARCGIS limitadas para la zona estudio. Tomado de (Bastidas, 2019)

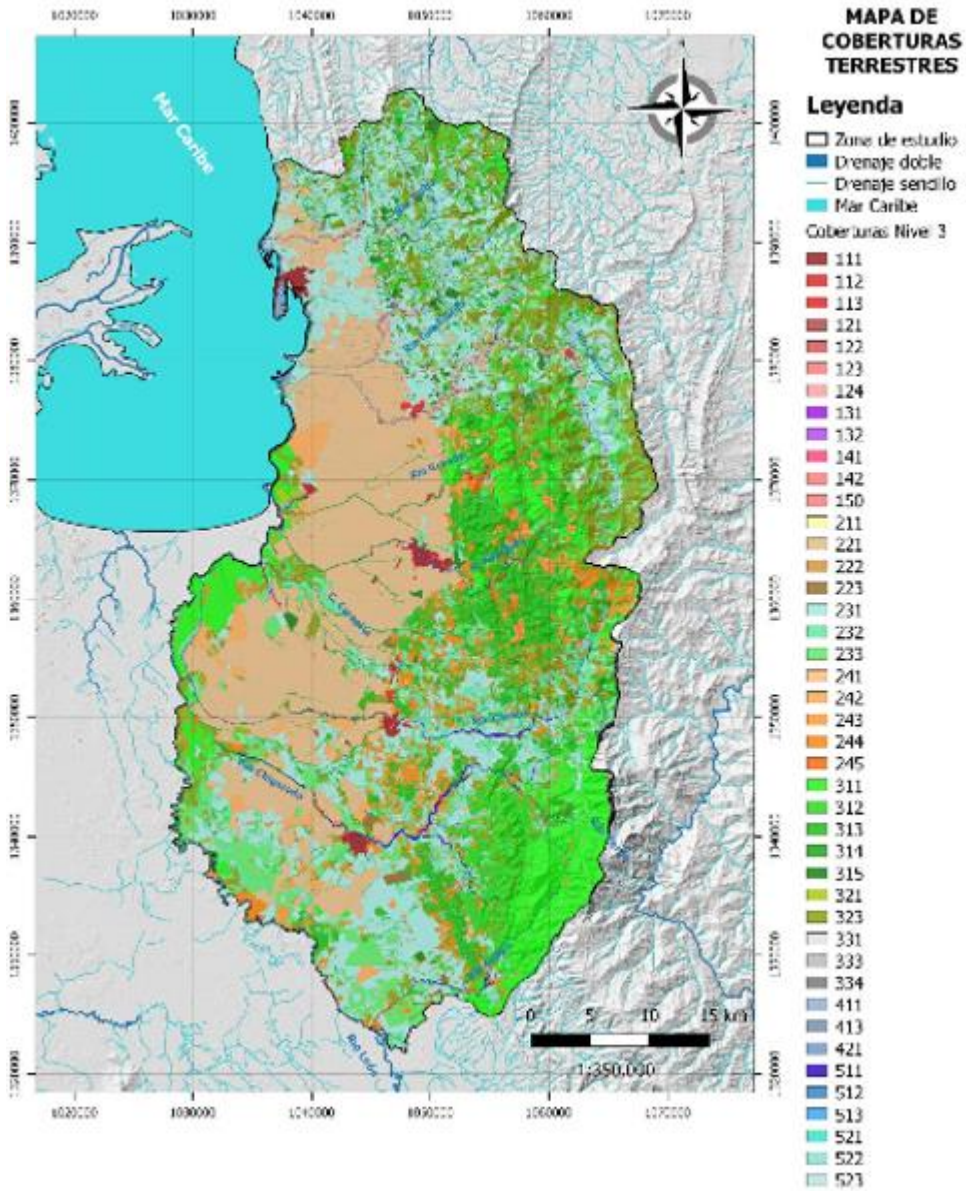


Figura 7. Distribución espacial de las coberturas terrestres en la zona de estudio. Tomado de (Bastidas, 2019).

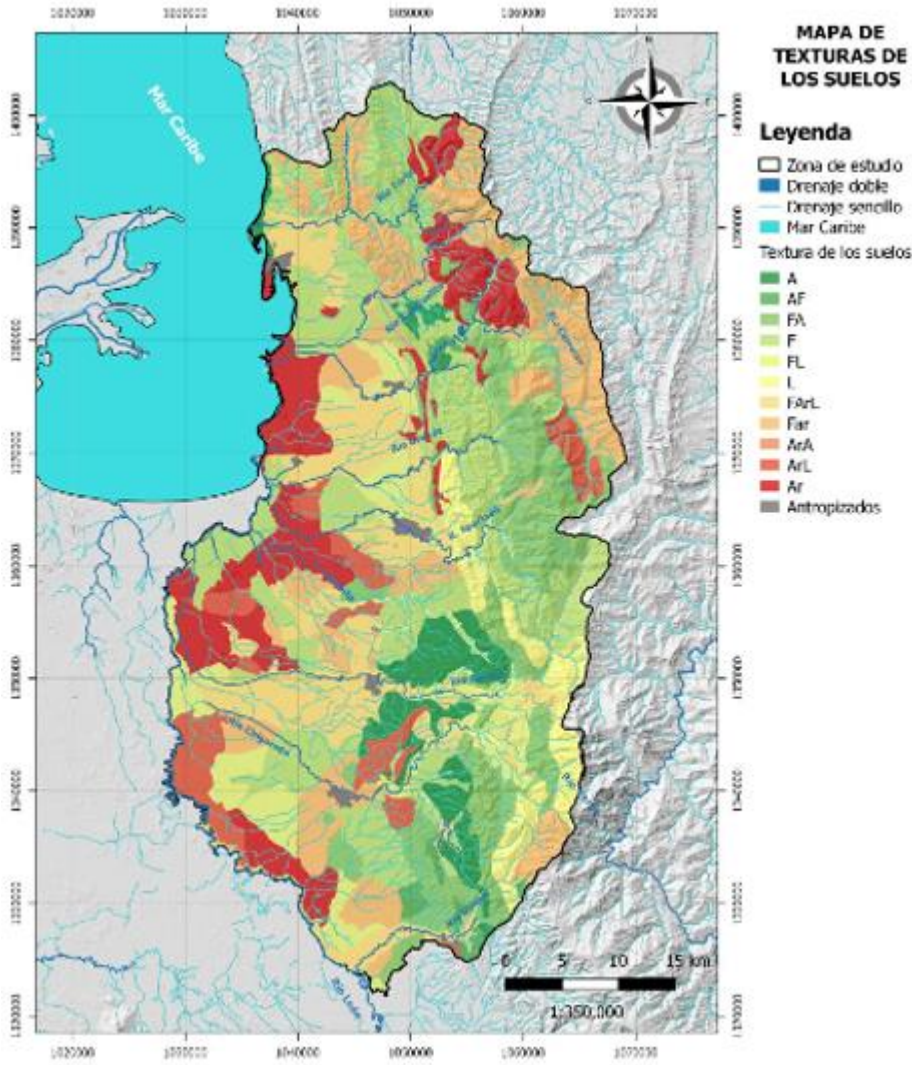


Figura 8. Distribución espacial de las texturas de los suelos en el nivel superficial en la zona de estudio. Tomado de (Bastidas, 2019)

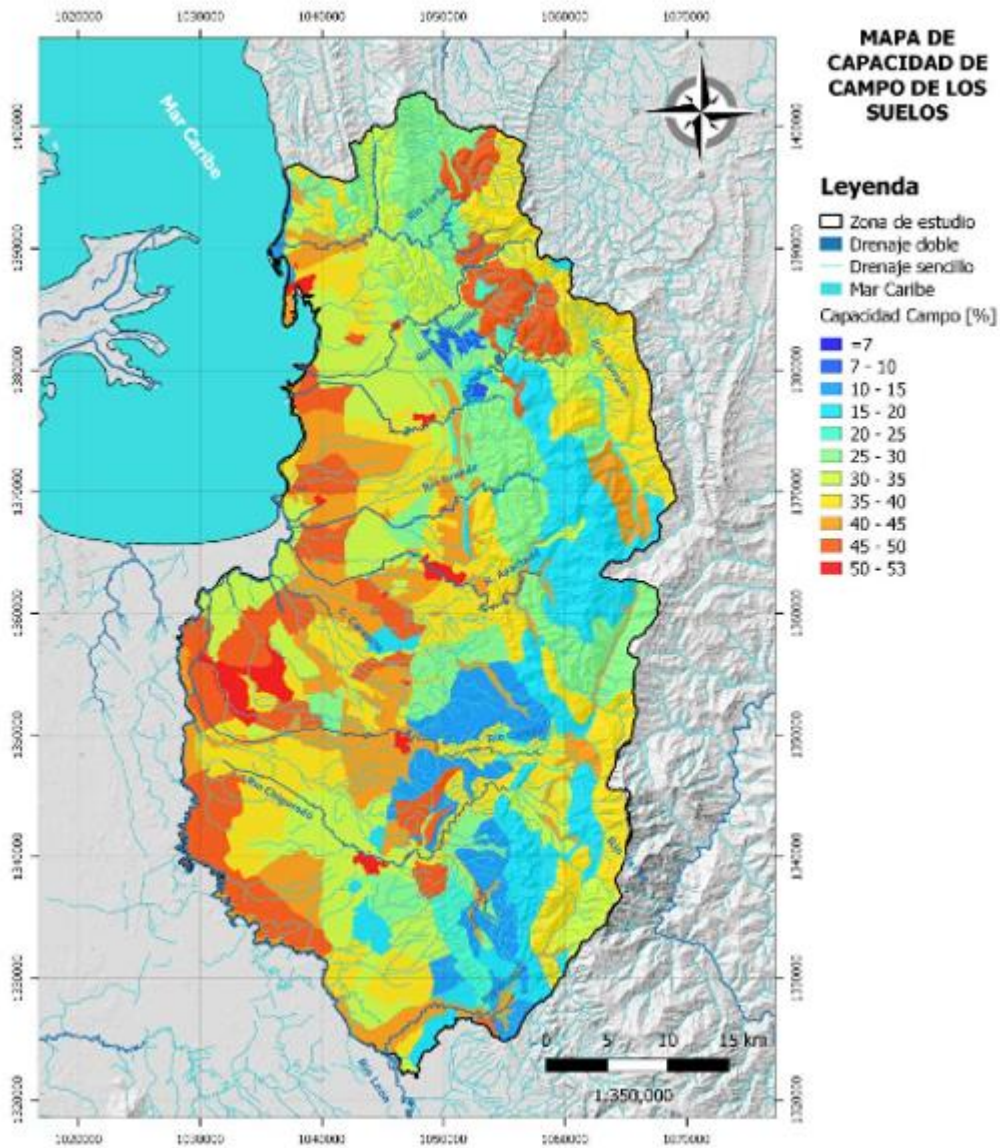


Figura 9. Distribución espacial de la capacidad de campo de los suelos en el nivel más superficial. Tomado de (Bastidas, 2019).

2.4.2. VARIABLES CLIMÁTICAS

Como se explicó anteriormente las superficies diarias de precipitación, temperatura máxima y mínima, se construyeron a partir de los datos del IDEAM para el periodo base, y con los datos del modelo MIROC5 del proyecto Cordex con corrección de sesgo con la técnica de Quantile mapping no paramétrico. Para las superficies de precipitación se utilizó el método de interpolación de base radial Spline de Placa Delgada (SPD) definido y programado en el paquete Field de R (Nychka et al., 2016) e incorporado a un código recurrente diseñado en R y RStudio (Team, 2017)

Para las superficies de temperatura máxima y mínima se utilizó una regresión lineal univariante entre la temperatura y la altura, se utilizó la medias multianuales de la temperatura media, máxima y mínima de las estaciones de IDEAM disponibles en la zona, la representación gráfica de las regresiones se presentan en la *Figura 10*, *Figura 11* y *Figura 12* para la temperatura media, máxima y mínima respectivamente, los resultados se comparan con las regresiones propuestas por Chaves y Jaramillo (1998), se evidenció que las ecuaciones de cenifcafé propuestas para la región Atlántica tienen pendientes muy similares a la halladas con las estaciones de temperatura de la zona de estudio, pero se encuentran sesgadas sobreestimando la temperatura media y mínima y subestimando la temperatura máxima de la zona, por tal motivo, se decidió trabajar con las regresiones encontradas a partir de las estaciones locales.

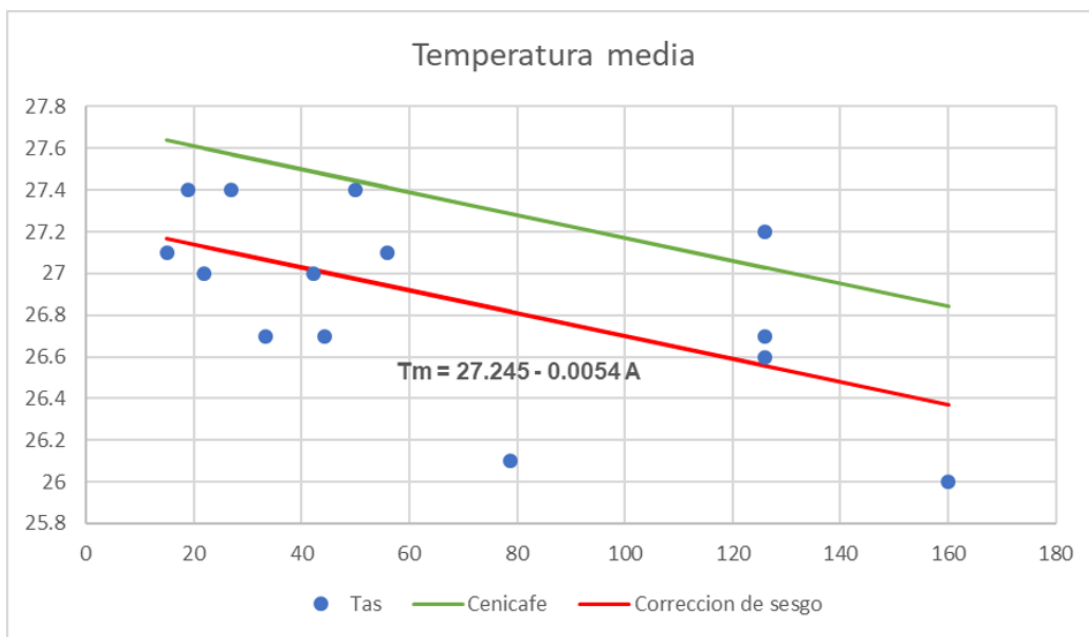


Figura 10. Regresión lineal para la temperatura media en la zona de estudio.

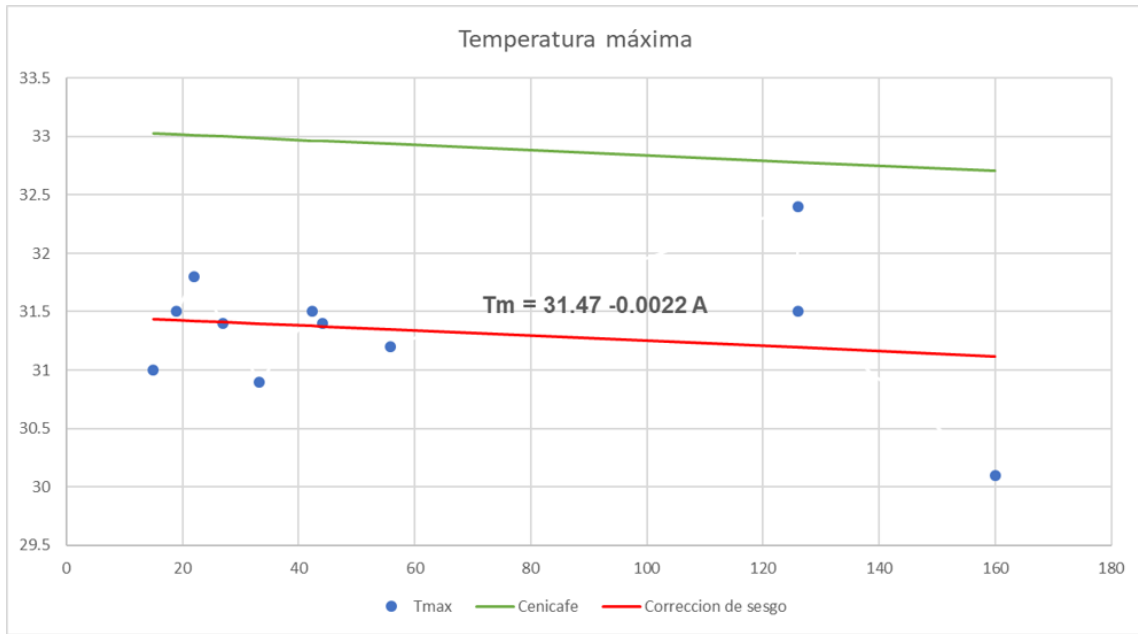


Figura 11. Regresión lineal para la temperatura máxima en la zona de estudio.

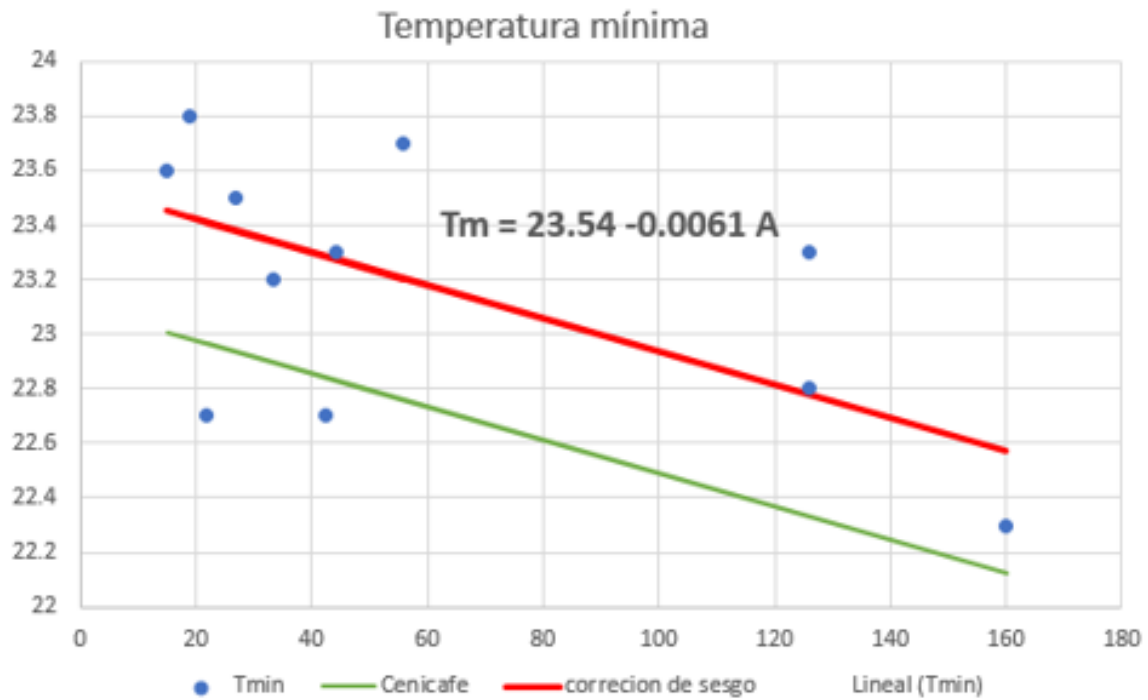


Figura 12. Regresión lineal para la temperatura mínima en la zona de estudio.

Para poder generar las superficies de temperatura diaria se calcula la anomalía o residual de la temperatura diaria con respecto a la media multianual, esta se suma a la regresión lineal encontrada para los promedio multianuales como se muestra en la **Ecuación 5**, **Ecuación 6** y **Ecuación 7**. Cómo la estación del aeropuerto de los Cedros ubicado en el municipio Carepa

es la única que cuenta con un periodo significativo de datos, las anomalías para los periodos históricos y las proyecciones con corrección de sesgo son calculadas para esta estación, con las series de anomalías diarias calculadas y el modelo digital de elevación se crean las superficies de temperatura diarias.

$$T_{as} = 27.25 - 0.0055(\text{Altura}) + \text{Anomalía} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$T_{asmax} = 31.47 - 0.0022(\text{Altura}) + \text{Anomalía} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$T_{asmin} = 23.54 - 0.0061(\text{Altura}) + \text{Anomalía} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.5. SIMULACIÓN DE FLUJO E IMPACTOS

En el presente estudio se utilizó como datos de entrada los resultados de recarga potencial obtenidos con el modelo SWB bajo dos escenarios 2.6 y 8.5 RCP en los últimos cuatro años para los periodos 2040, 2070 y 2100, se modelan en estado estacionario estos periodos utilizando como modelo base, el modelo numérico de flujo realizado por Duque & Betancur (2017). El modelo tiene un dominio de modelación con tamaño de celda 100m X100m, con 331 columnas, 741 filas y 3 capas correspondientes a un acuífero libre, un acuífero semiconfinado, y un acuífero confinado. Las condiciones de frontera utilizadas en el modelo se representan en la **Figura 13**, las condiciones utilizados son GHB (General Head Boundary), River, Drain, CH (Constant Head), Well, también se presentan los piezómetros utilizados como puntos de observaciones para validar y calibrar el modelo. En las **Figura 14**, **Figura 15** y **Figura 16**, se presentan las conductividades hidráulicas para las tres capas del modelo. Igualmente, en la

Tabla 7 se resumen de las conductividades hidráulica en m/día utilizadas en el modelo numérico.

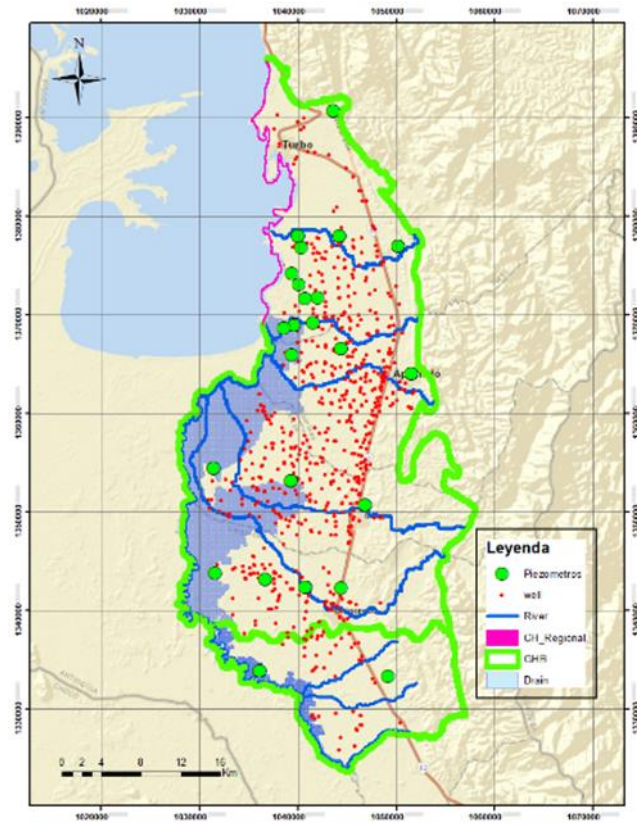


Figura 13. Condiciones de frontera y puntos de observación del modelo de flujo de aguas subterráneas. definidas por Duque & Betancur (2017).

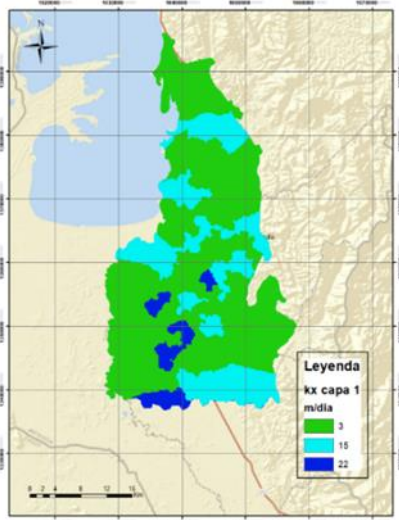


Figura 14. Distribución espacial de las conductividades hidráulicas en la capa 1. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas

Tabla 7.

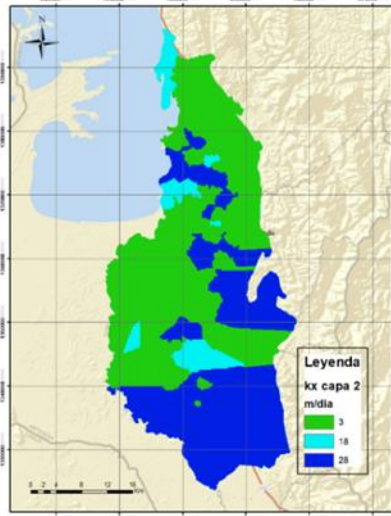


Figura 15. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en la capa 2. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas

Tabla 7.

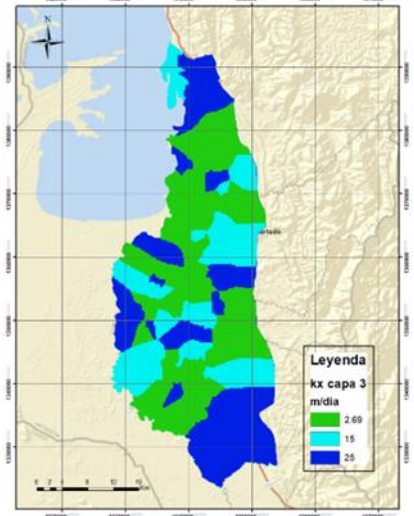


Figura 16. Distribución espacial de la conductividad hidráulica de la capa 3. definidas por Duque & Betancur (2017) y modificadas

Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de las conductividades hidráulica en m/día utilizadas en el modelo numérico. Modificadas de (J. Duque & Betancur, 2017)

	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
ARCILLAS	3	3	1,69
ARENAS	15	18	15
GRAVAS	22	28	25

En la **Tabla 8** se realiza una descripción de los datos e insumos utilizados para la modelación de aguas subterráneas en el presente trabajo. Se modelan los 6 escenarios representados por los años 2040-2043, 2070-2073 y 2097-2100 en escenarios RCP 2,6 (optimista) y 8,5 (pesimista), así como el año 2043 en escenario RCP 2.6 como el año más lluvioso y el 2097 en escenario RCP 8,5 como el año menos lluvioso.

Tabla 8. Descripción de los datos e insumos utilizados para la modelación

Insumos	Descripción
Número de curva	Estático obtenido de (Bastidas Osejo, 2019)
Capacidad máxima de almacenamiento	
Textura de los suelos	
Granulometría	
Grupo hidrológico	
Capacidad de campo	
Cobertura	

Topografía (direcciones de flujo)	
Modelo geométrico	Estático obtenido de (J. Duque & Betancur, 2017)
Conductividades hidráulicas	
(GHB (Flujos regionales), Ríos, Drenajes (humedales), CH (Mar), pozos (extracción))	Estático obtenido de (J. Duque & Betancur, 2017) y calibradas para el presente trabajo
Temperatura máxima	Obtenidas en la generación de los escenarios
Temperatura mínima	
Precipitación	

3. RESULTADOS

3.1. GENERACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO

3.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

De acuerdo con el análisis exploratorio de datos climáticos para la zona de estudios, para los periodos comprendidos entre 1974 y 2018, realizado por Bastidas en 2019. Se observa que, en cuanto a la precipitación el mayor porcentaje de datos faltantes es del 73% en una sola estación, la mayoría de estaciones presentan datos faltantes menores al 30%, solo en seis (6) se presentan faltantes entre el 30 y el 40%, por lo que se puede concluir que en la mayoría de estaciones con registros de precipitación el porcentaje de datos faltantes es bajo en el periodo de registro de cada estación. En cuanto a la temperatura media, máxima y mínima, se observa que el porcentaje de datos faltantes es alto, siendo mayor al 30% en la mayoría de estaciones.

Una vez evaluada la información de las 41 estaciones de precipitación y las 15 de temperatura monitoreada por el IDEAM, se determinó que el periodo para el cual se tiene mayor cantidad de datos es el periodo 1979 a 2018 para precipitación y de 1984 a 2018 para los datos de temperatura.

Igualmente, y considerando la exigencia en cuanto al número de datos necesarios para la evaluación de los modelos climáticos globales y regionales, se tomaron solo las series para el periodo seleccionado con menos del 10 % de datos faltantes, de esta forma se conservan las estaciones referencias en la **Tabla 9**. Correspondientes a 13 estaciones de precipitación (**Figura 17**) y solo una de temperatura (**Figura 18**).

Tabla 9. Estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas para para la evaluación de los modelos

CODIGO	TIPO	LATITUD	LONGITUD	INICIO	FINAL	FALTANTES
12010030	Precipitación	7,571111	-76,6975	1974	2018	4%
12030020	Precipitación	8,616944	-76,381389	1972	2018	9%
12010070	Precipitación	7,884444	-76,647778	1977	2018	3%
12010060	Precipitación	7,863056	-76,689167	1977	2018	4%
12010110	Precipitación	7,987417	-76,638528	1977	2018	2%
12020010	Precipitación	8,204167	-76,524722	1972	2018	0%

12010120	Precipitación	7,923833	-76,649083	1977	2018	0%
11150020	Precipitación	8,162917	-77,040417	1974	2018	3%
11150010	Precipitación	8,308056	-77,075833	1978	2018	1%
12010010	Precipitación	7,766389	-76,855278	1972	2018	3%
12010090	Precipitación	7,747667	-76,711889	1977	2018	3%
11130010	Precipitación	8,036722	-77,087861	1974	2018	1%
12015020	Precipitación	7,825917	-76,651333	1977	2018	5%
12015070	Temperatura	7,816389	-76,717889	1983	2018	10%

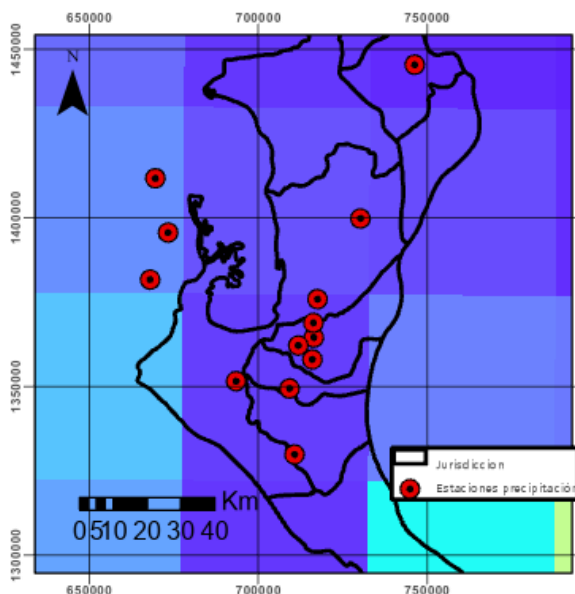


Figura 17. Estaciones de precipitación utilizadas para la evaluación de los modelos.

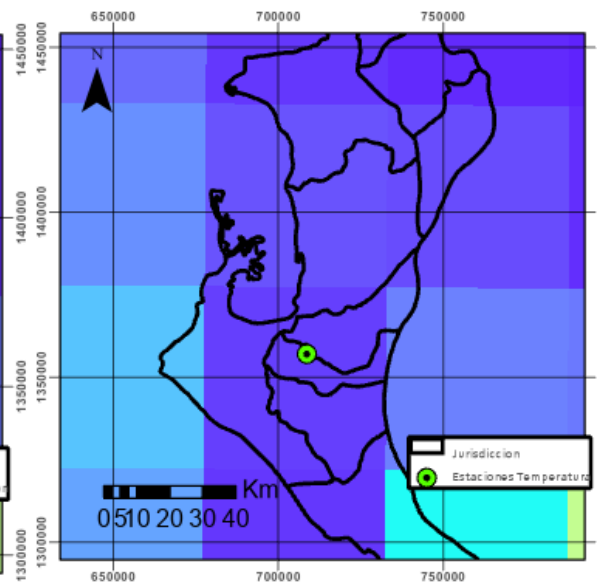


Figura 18. Estaciones de temperatura utilizadas para la evaluación de los modelos.

3.1.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

La evaluación de los modelos de circulación global y regional se realizó a partir de datos de estaciones en tierra de precipitación y temperatura, mediante el uso de diferentes métricas como el coeficiente de correlación de Pearsons, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), y el sesgo (BIAS). Igualmente se realizaron diagramas de Taylor y se verificó la representación del ciclo anual de la precipitación y temperatura. Los resultados de la evaluación se evidencian desde la

Tabla 10 a la **Tabla 15**. métricas de error, desde la **Figura 19** a la **Figura 24**.

La evaluación permitió identificar los modelos con menor error y mejor representación del ciclo anual en cuanto a la temperatura y la precipitación. Sin embargo, debido al gran tamaño de la escala de los modelos del CMIP5, se muestra una pobre capacidad de los modelos para

representar la precipitación en la zona de estudio y aún más debilidad para representar la temperatura. Tal como se observa en la

Tabla 10, lo modelos del CMIP5 que mejor correlacionan con la precipitación de la zona son el CMCC-CMS, MIROC5 y MPI-ESM-P con una correlación de 0,51, y el modelo con el menor RMSE es el MIROC-ESM-CHEM, el diagrama Taylor en la **Figura 19**, muestra que de los mejores modelos para representar la precipitación se encuentra el CMCC-CMS, resaltando que su capacidad de representar la precipitación de la zona de estudio no es muy superior a la de los demás modelos. En general lo modelos del CMIP5 tienen una pobre capacidad para representar la temperatura de la zona, siendo el modelo CMCC-CMS el que mejor la representa aclarando que su representación sigue siendo muy limitada.

En la **Tabla 11** y **Tabla 14**, se observa que el modelos MIRC6 es el modelo del CMIP6 que mejor correlaciona con la precipitación y en general todos los modelos de este conjunto se ajustan mal a la temperatura.

En la **Tabla 12** y **Tabla 15**, Se puede ver que los modelos del Cordex presentan una menor desviación estándar que la de los datos observados, siendo muy evidente en los diagramas Taylor **Figura 21**. Para este conjunto de modelos el MIROC5 y CMCC-CMS son los que mejor representan la precipitación, el MIROC5 es el que mejor correlaciona la temperatura, resaltando que el valor de correlación sigue siendo bajo.

Tabla 10. Métricas para la evaluación de precipitación los modelos del CMIP5

Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)	Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
ACCESS1-3	0,50	134,92	236,39	HadCM3	0,49	-4,69	167,02
CMCC-CESM	0,40	-26,96	157,55	HadGEM2-AO	0,48	77,42	198,96
CMCC-CM	0,46	16,14	150,42	IPSL-CM5A-LR	0,46	-63,19	184,88
CMCC-CMS	0,51	-24,47	148,37	IPSL-CM5B-LR	0,37	-83,93	221,87
CNRM-CM5	0,48	54,66	170,67	MIROC-ESM	0,46	-35,33	129,62
CNRM-CM5-2	0,45	41,26	160,58	MIROC-ESM-CHEM	0,48	-40,13	127,24
CSIRO-Mk3-6-0	0,48	90,19	264,74	MIROC4h	0,45	27,03	178,68
CanCM4	0,44	22,31	214,21	MIROC5	0,51	65,46	181,45
FGOALS-s2	0,37	-149,49	201,06	MPI-ESM-LR	0,50	67,74	191,10
GFDL-CM2-1	0,36	-61,98	179,60	MPI-ESM-MR	0,45	29,36	178,95
GFDL-CM3	0,48	-50,14	151,83	MPI-ESM-P	0,51	64,70	191,40
GFDL-ESM2G	0,39	-44,95	187,59	MRI-CGCM3	0,44	-48,85	183,68
GFDL-ESM2M	0,40	-41,18	189,04	MRI-ESM1	0,41	-50,76	191,86
GISS-E2-H	0,41	14,64	169,74	NorESM1-ME	0,48	-79,07	179,99
GISS-E2-H-CC	0,42	39,19	180,45	inmcm4	0,49	-20,02	146,27

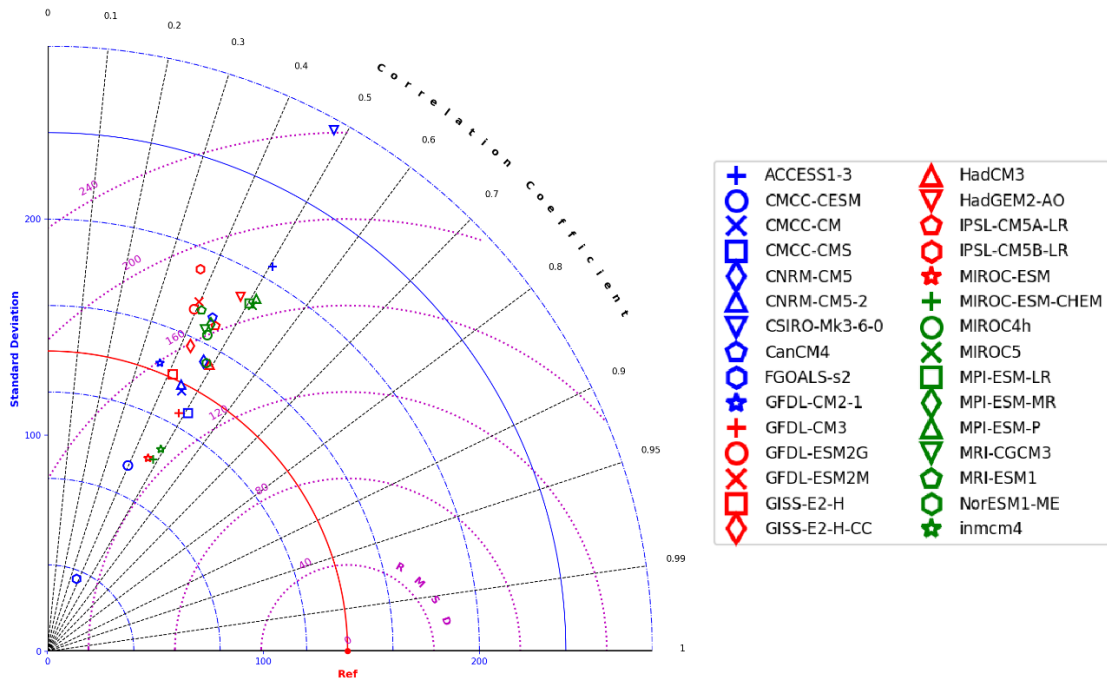


Figura 19. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP5.

Tabla 11. Métricas para la evaluación de precipitación de los modelos CMIP6

Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
BCC-CSM2-MR	0,37	86,11	292,26
BCC-ESM1	0,44	95,74	246,80
CESM2	0,45	136,05	290,75
CESM2-WACCM	0,49	160,68	307,11
CanESM5	0,40	134,19	316,79
E3SM-1-0	0,43	43,32	213,77
FGOALS-g3	0,41	44,88	239,93
GFDL-ESM4	0,46	-23,31	169,35
IPSL-CM6A-LR	0,42	-53,11	157,15
MIROC6	0,51	75,46	191,22
MRI-ESM2-0	0,50	64,40	230,45
NESM3	0,40	-123,68	186,09
NorCPM1	0,47	-121,25	196,28
NorESM2-LM	0,51	33,23	230,18

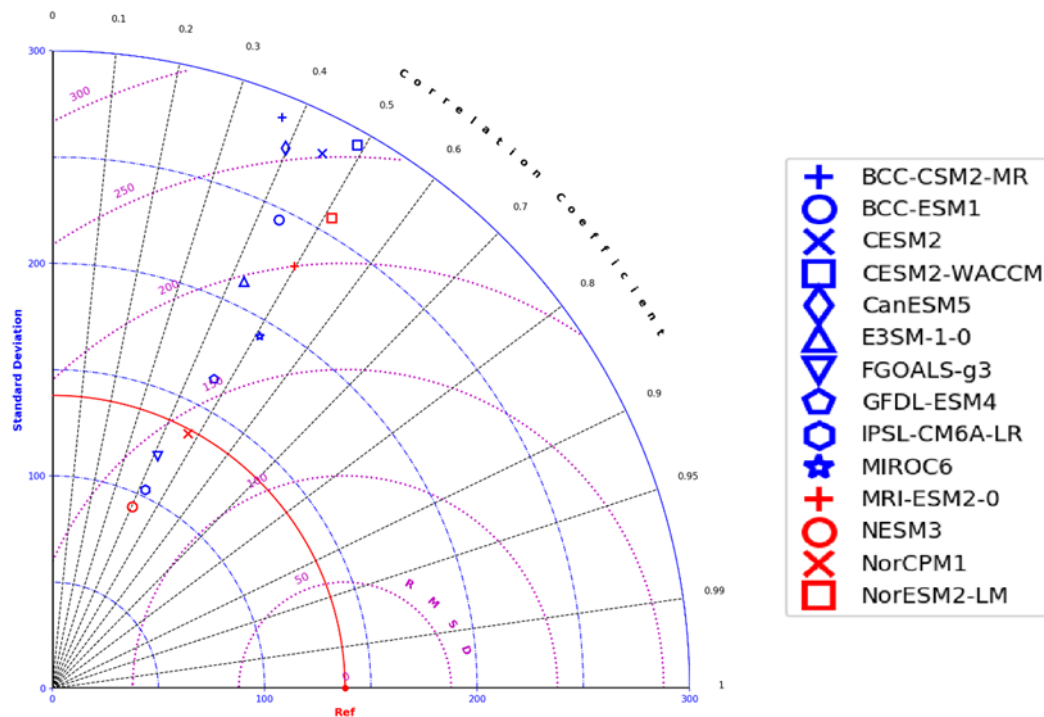


Figura 20. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP6.

Tabla 12. Métricas para la evaluación de precipitación de los modelos Cordex

Modelo	Correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
CNRM-CM5	0,48	-110,68	190,58
CSIRO-Mk3-6-0	0,40	-137,72	197,72
CanESM2	0,37	-166,16	212,78
GFDL-ESM2M	0,40	-113,01	191,90
HadGEM2-ES	0,44	-64,97	188,83
IPSL-CM5A-MR	0,41	-139,82	199,59
MIROC5	0,49	-113,12	182,93
MPI-ESM-LR	0,40	-85,14	183,50
NorESM1-M	0,37	-163,85	211,09

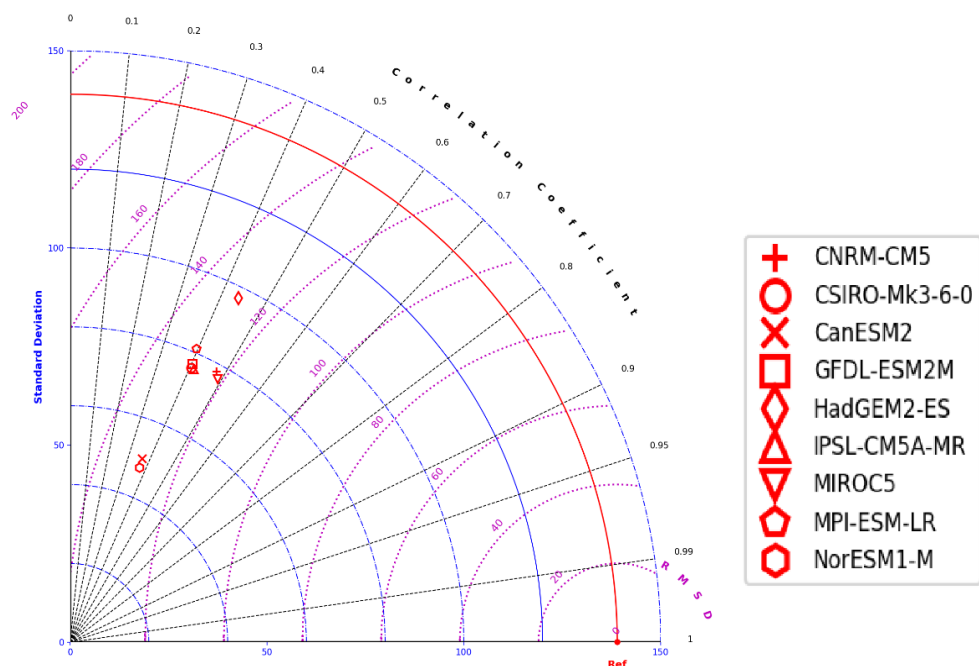


Figura 21. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos Cordex.

Tabla 13. Métricas para la evaluación de la temperatura de los modelos del CMIP5

Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)	Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
ACCESS1-0	0,24	-2,51	2,58	HadCM3	0,05	-3,09	3,33
ACCESS1-3	0,11	-1,66	1,77	HadGEM2-AO	0,38	-2,05	2,11
CMCC-CESM	0,04	1,24	1,7	inmcm4	0,1	-4,05	4,14
CMCC-CM	0,12	-1,59	1,85	IPSL-CM5A-LR	0,23	-0,64	1,26
CMCC-CMS	0,19	0,14	1,03	IPSL-CM5A-MR	0,15	-0,8	1,04
CNRM-CM5	0,34	-2,29	2,42	IPSL-CM5B-LR	0,2	-0,89	1,33
CNRM-CM5-2	0,28	-2,45	2,61	MIROC-ESM	0,01	-2,52	2,73
CSIRO-Mk3-6-0	-0,03	-0,22	1	MIROC-ESM-CHEM	0,08	-3,19	3,31
CanCM4	0,07	-5,14	5,22	MIROC4h	0,2	-4,11	4,18
FGOALS-s2	-0,12	-1,08	1,58	MIROC5	0,36	-2,34	2,43
GFDL-CM2-1	0,06	-1,37	2,63	MPI-ESM-LR	0,21	-0,49	0,88
GFDL-CM3	0,1	-3,73	3,88	MPI-ESM-MR	0,04	-0,66	1,24
GFDL-ESM2G	0	-1,65	2,66	MPI-ESM-P	0,25	-0,54	0,85
GFDL-ESM2M	0,05	-1,24	2,53	MRI-CGCM3	-0,12	-3,57	3,77
GISS-E2-H-CC	0,07	-4,53	4,67	MRI-ESM1	-0,03	-3,19	3,42
NorESM1-ME	0,02	-1,21	1,65				

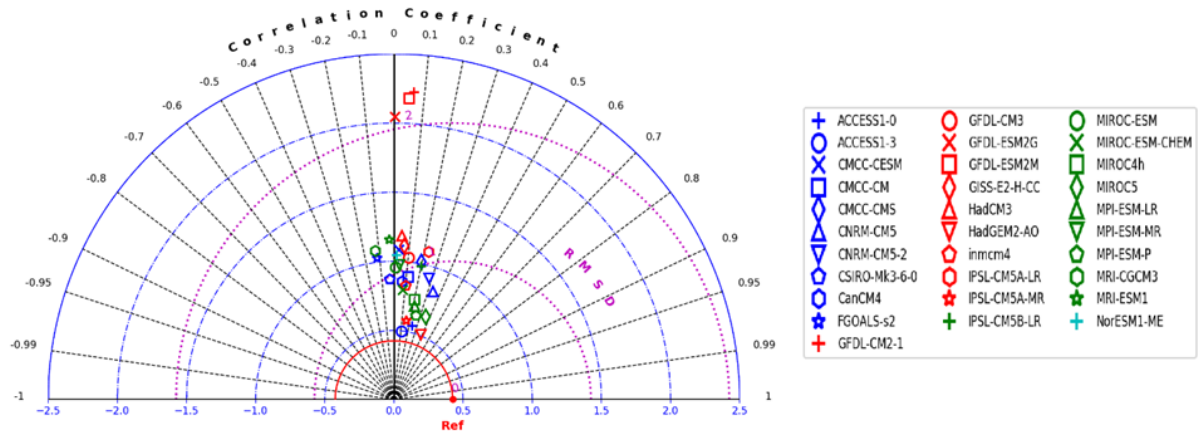


Figura 22. Diagramas Taylor de temperatura para los modelos CMIP5.

Tabla 14. Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos CMIP6

Modelo	Correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
BCC-CSM2-MR	0,22	-2,69	2,79
BCC-ESM1	0,13	-3,16	3,24
CanESM5	-0,02	-4,76	4,90
CESM2	0,10	-1,06	1,61
CESM2-WACCM	-0,12	-1,40	1,93
E3SM-1-0	0,04	-2,89	3,07
FGOALS-g3	0,00	-5,38	5,47
GFDL-ESM4	0,08	-2,73	2,99
IPSL-CM6A-LR	0,04	-1,20	1,45
MCM-UA-1-0	-0,13	-0,23	1,66
MIROC6	0,00	-2,48	2,65
MRI-ESM2-0	0,03	-3,13	3,27
NESM3	0,26	-1,21	1,42
NorCPM1	0,12	-0,59	1,05
NorESM2-LM	0,01	-0,24	1,28

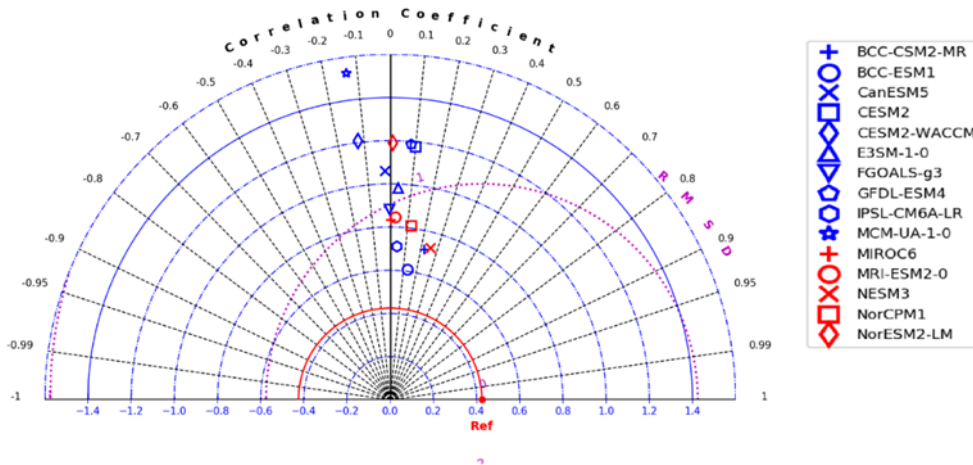


Figura 23. Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP6.

Tabla 15. Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos Cordex

Modelo	correlación	BIAS (mm)	RMSE (mm)
CanESM2	0,17	-0,38	1,10
CNRM-CM5	0,24	-1,29	1,74
CSIRO-Mk3-6-0	0,04	-0,74	1,22
GFDL-ESM2M	0,10	-1,24	1,86
HadGEM2-ES	0,16	-1,59	2,01
IPSL-CM5A-MR	0,27	0,15	0,98
MIROC5	0,34	-1,33	1,82
MPI-ESM-LR	0,26	-2,04	2,40
NorESM1-M	0,23	-0,36	0,99

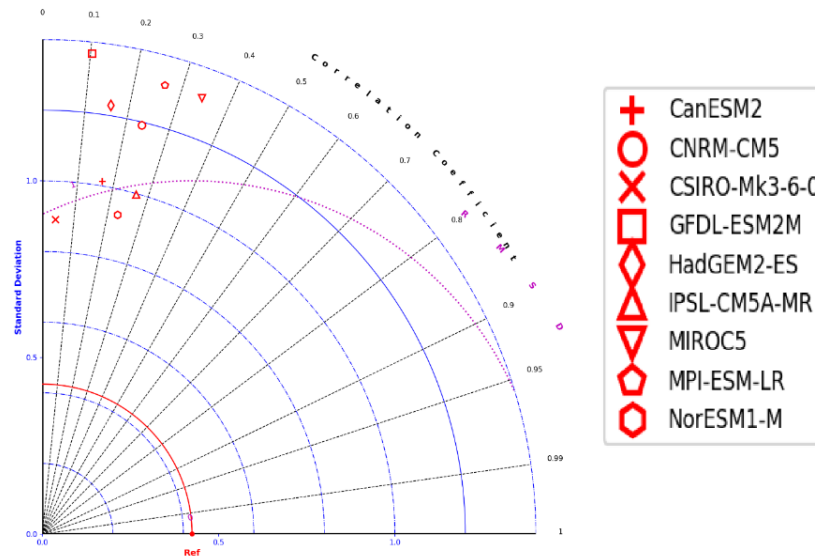
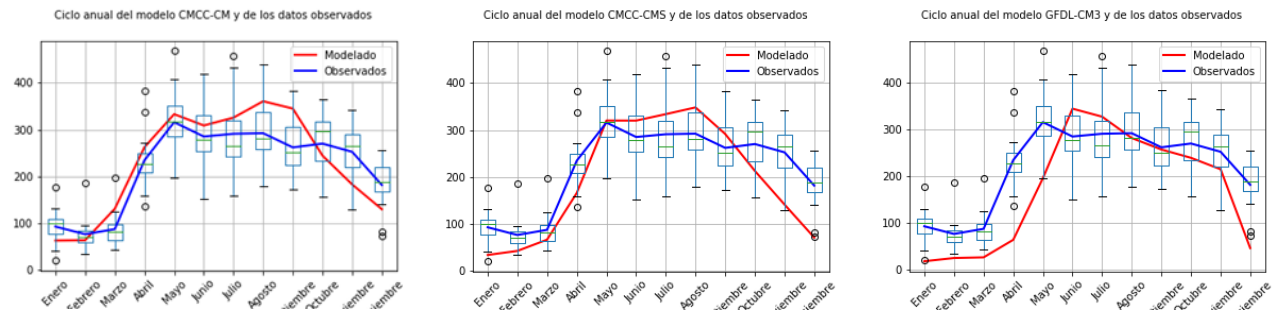


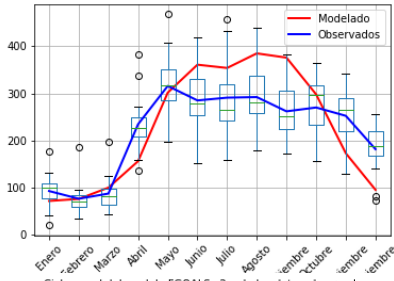
Figura 24. Diagramas Taylor de Temperatura para los modelos Cordex.

Representación del ciclo anual del conjunto de modelos CMIP6, CMIP5 y Cordex.

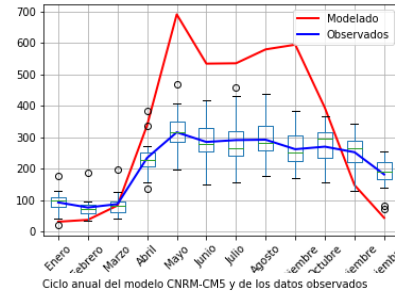
Otra forma de evaluar la calidad de los modelos climáticos es mediante una propiedad llamada “coherencia” entendiendo esta como la capacidad del modelo para representar la climatología de la zona, la coherencia es un requisito previo para que los modelos sean válidos para los tomadores de decisiones (Krzysztofowicz, 1999; Zhao et al., 2017). En este sentido se compararon los ciclos anuales de precipitación observados en la zona por medio de las estaciones del IDEAM y los ciclos anuales de los GCM y RCM, los resultados muestran una buena representación de los ciclos anuales de precipitación para los modelos CMCS-CM, CMCS-CMS, INMCM4 y HadCM3 del proyecto CMIP5 (**Figura 25**) y CMIP6 (**Figura 26**), los modelos del proyecto Cordex (**Figura 27**) representan mejor el ciclo anual de la zona de estudio, pero con mayor sesgo, es decir son precisos pero inexactos.



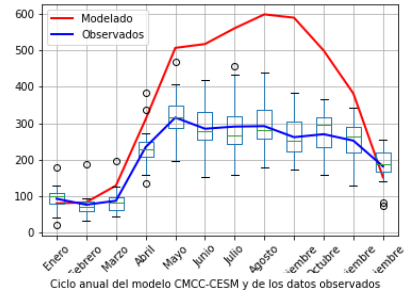
Ciclo anual del modelo CNRM-CM5-2 y de los datos observados



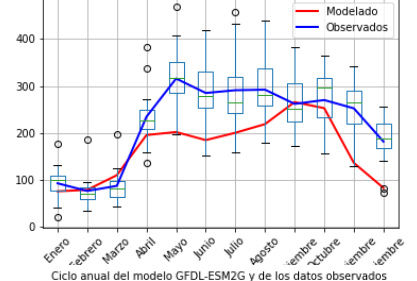
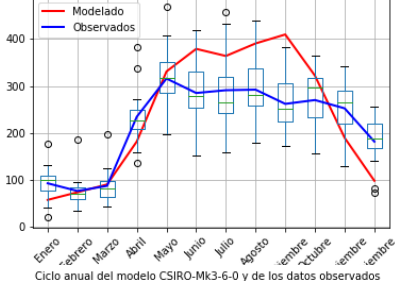
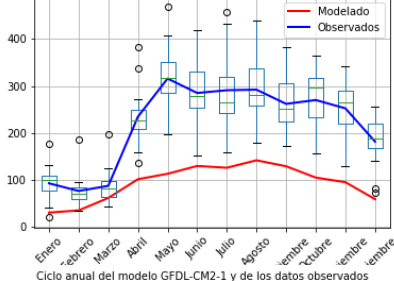
Ciclo anual del modelo CanCM4 y de los datos observados



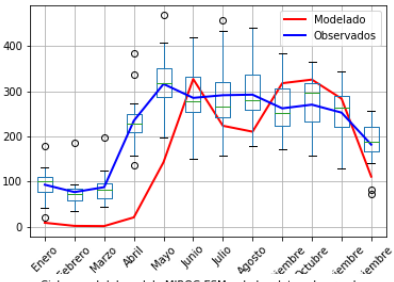
Ciclo anual del modelo ACCESS1-3 y de los datos observados



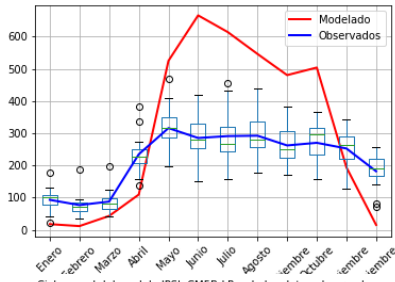
Ciclo anual del modelo FGOALS-S2 y de los datos observados



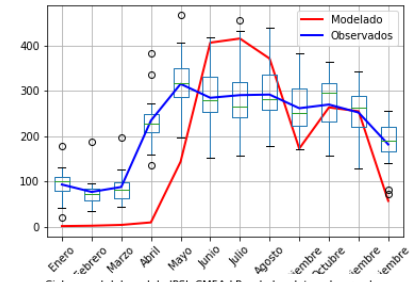
Ciclo anual del modelo GFDL-CM2.1 y de los datos observados



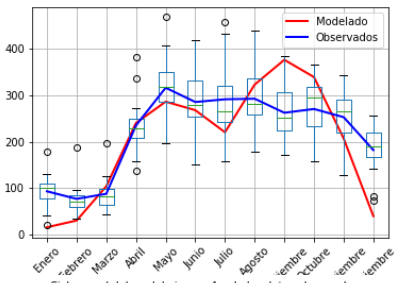
Ciclo anual del modelo CSIRO-Mk3-6-0 y de los datos observados



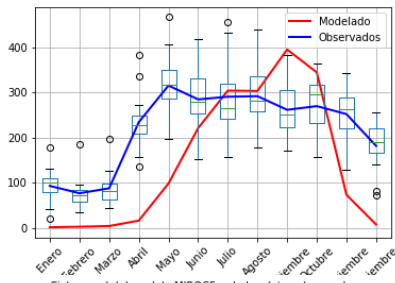
Ciclo anual del modelo GFDL-ESM2G y de los datos observados



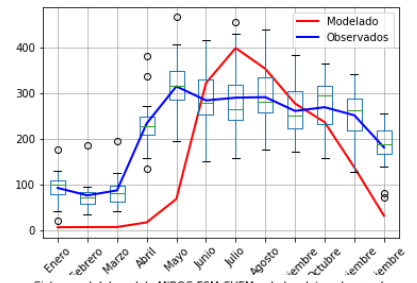
Ciclo anual del modelo MIROC-ESM y de los datos observados



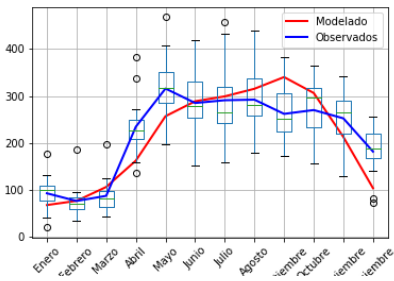
Ciclo anual del modelo IPSL-CM5B-LR y de los datos observados



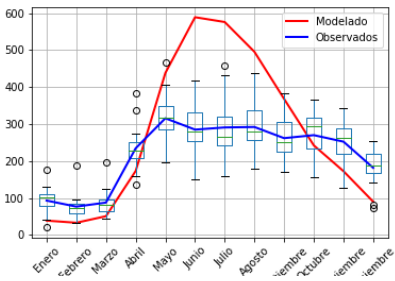
Ciclo anual del modelo IPSL-CM5A-LR y de los datos observados



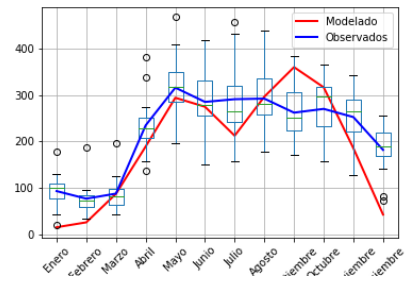
Ciclo anual del modelo Inmcm4 y de los datos observados



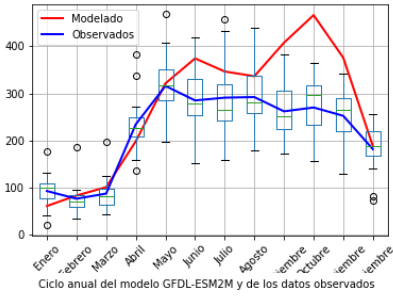
Ciclo anual del modelo MIROC5 y de los datos observados



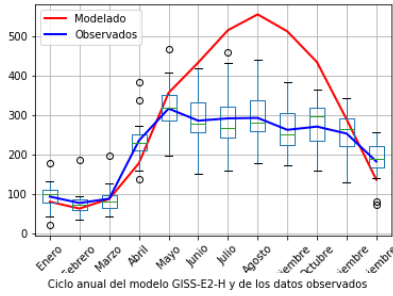
Ciclo anual del modelo MIROC-ESM-CHEM y de los datos observados



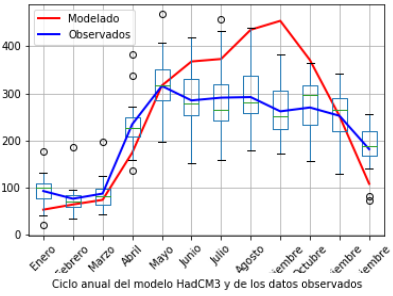
Ciclo anual del modelo GISS-E2-H-CC y de los datos observados



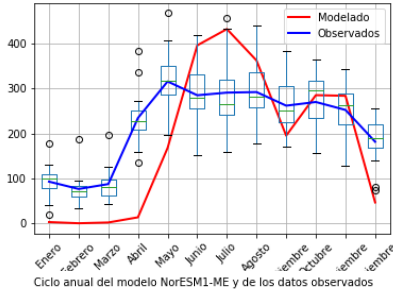
Ciclo anual del modelo HadGEM2-AO y de los datos observados



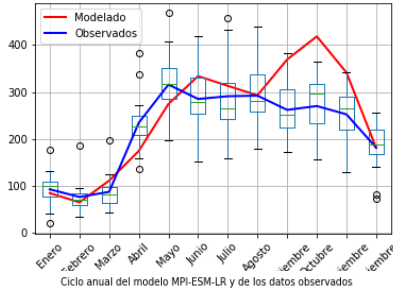
Ciclo anual del modelo MIROC4h y de los datos observados



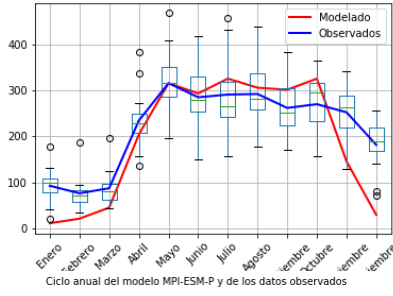
Ciclo anual del modelo GFDL-ESM2-H y de los datos observados



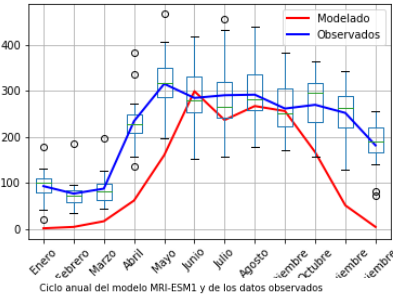
Ciclo anual del modelo GISS-E2-H y de los datos observados



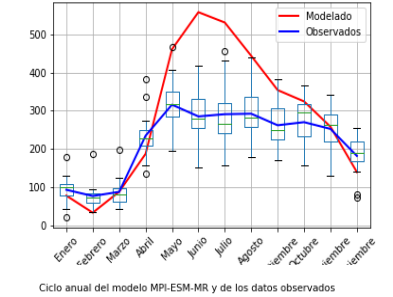
Ciclo anual del modelo HadCM3 y de los datos observados



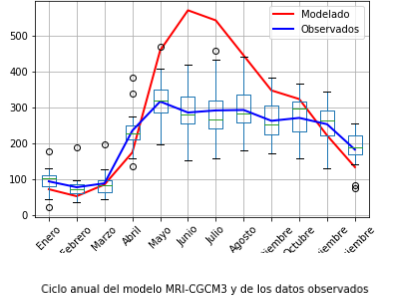
Ciclo anual del modelo NorESM1-ME y de los datos observados



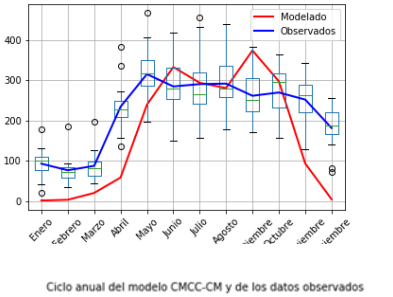
Ciclo anual del modelo MPI-ESM-LR y de los datos observados



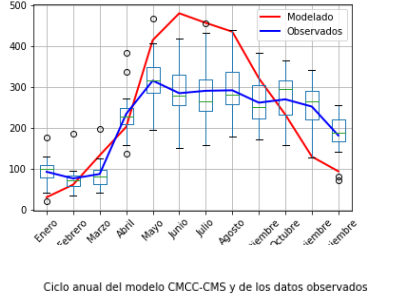
Ciclo anual del modelo MPI-ESM-P y de los datos observados



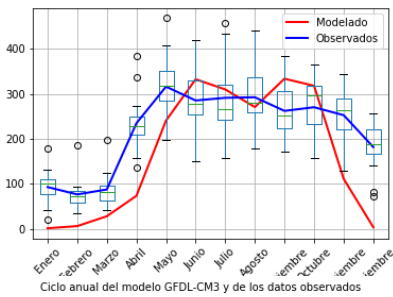
Ciclo anual del modelo MRI-ESM1 y de los datos observados



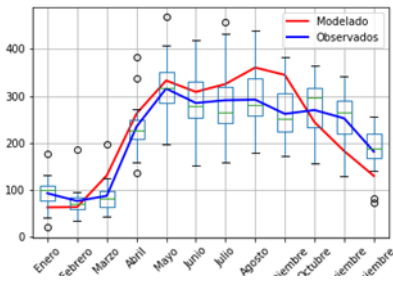
Ciclo anual del modelo MPI-ESM-MR y de los datos observados



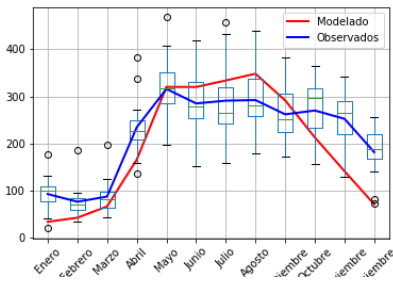
Ciclo anual del modelo MRI-CGCM3 y de los datos observados



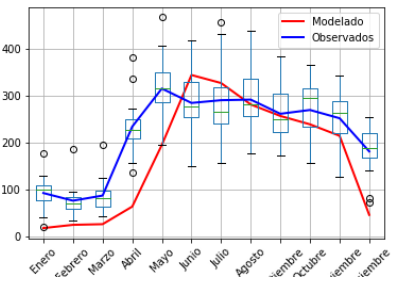
Ciclo anual del modelo CMCC-CM y de los datos observados



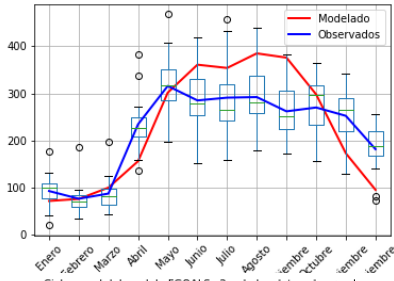
Ciclo anual del modelo CMCC-CMS y de los datos observados



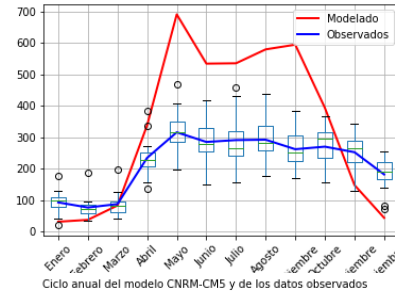
Ciclo anual del modelo GFDL-CM3 y de los datos observados



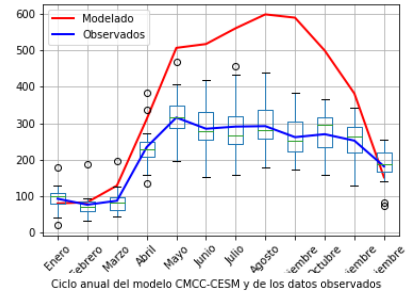
Ciclo anual del modelo CNRM-CM5-2 y de los datos observados



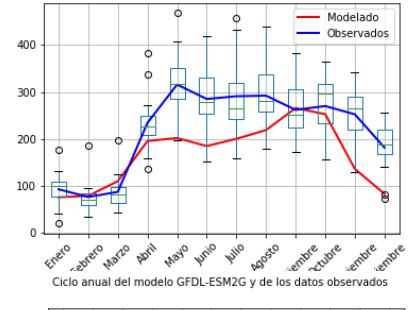
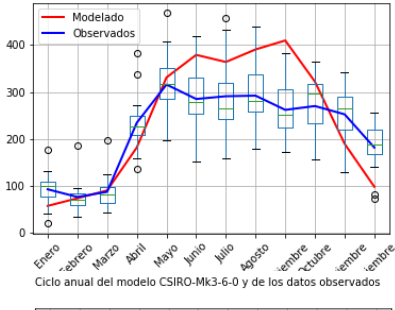
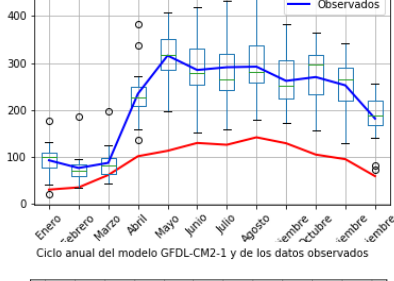
Ciclo anual del modelo CanCM4 y de los datos observados



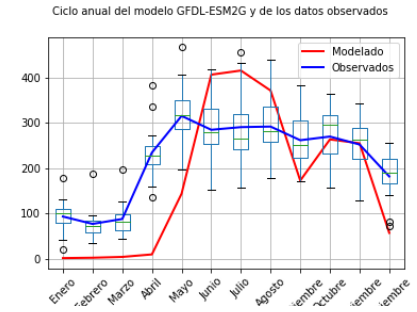
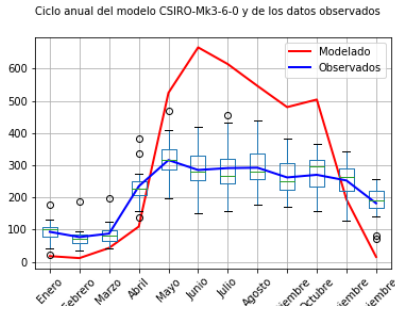
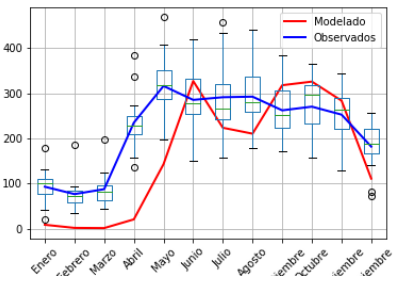
Ciclo anual del modelo ACCESS1-3 y de los datos observados



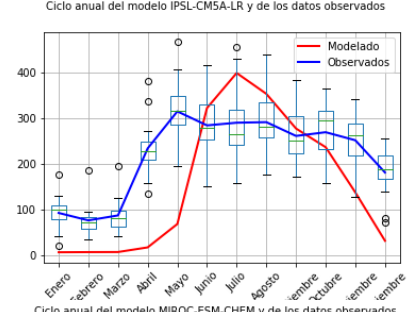
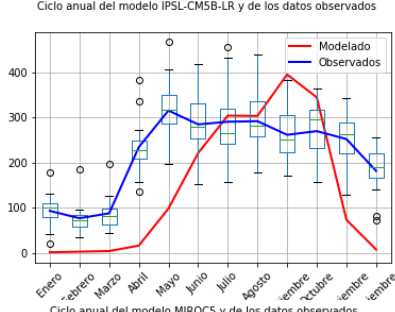
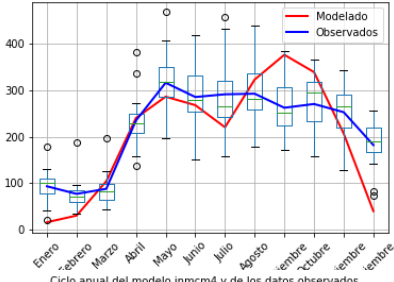
Ciclo anual del modelo FGOALS-S2 y de los datos observados



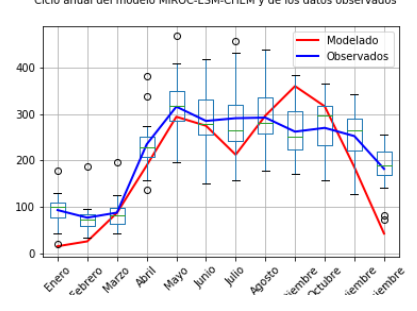
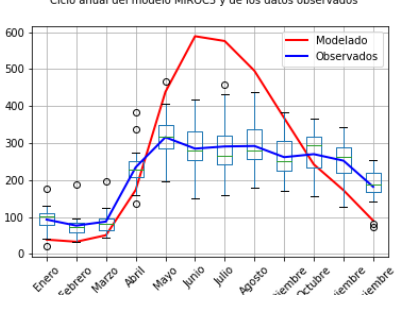
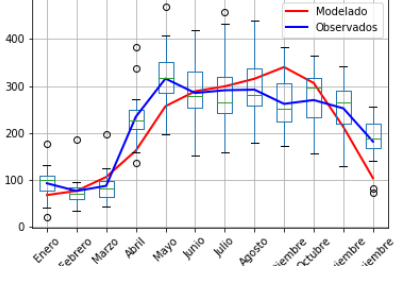
Ciclo anual del modelo GFDL-CM2.1 y de los datos observados



Ciclo anual del modelo MIROC-ESM y de los datos observados



Ciclo anual del modelo Inmcm4 y de los datos observados



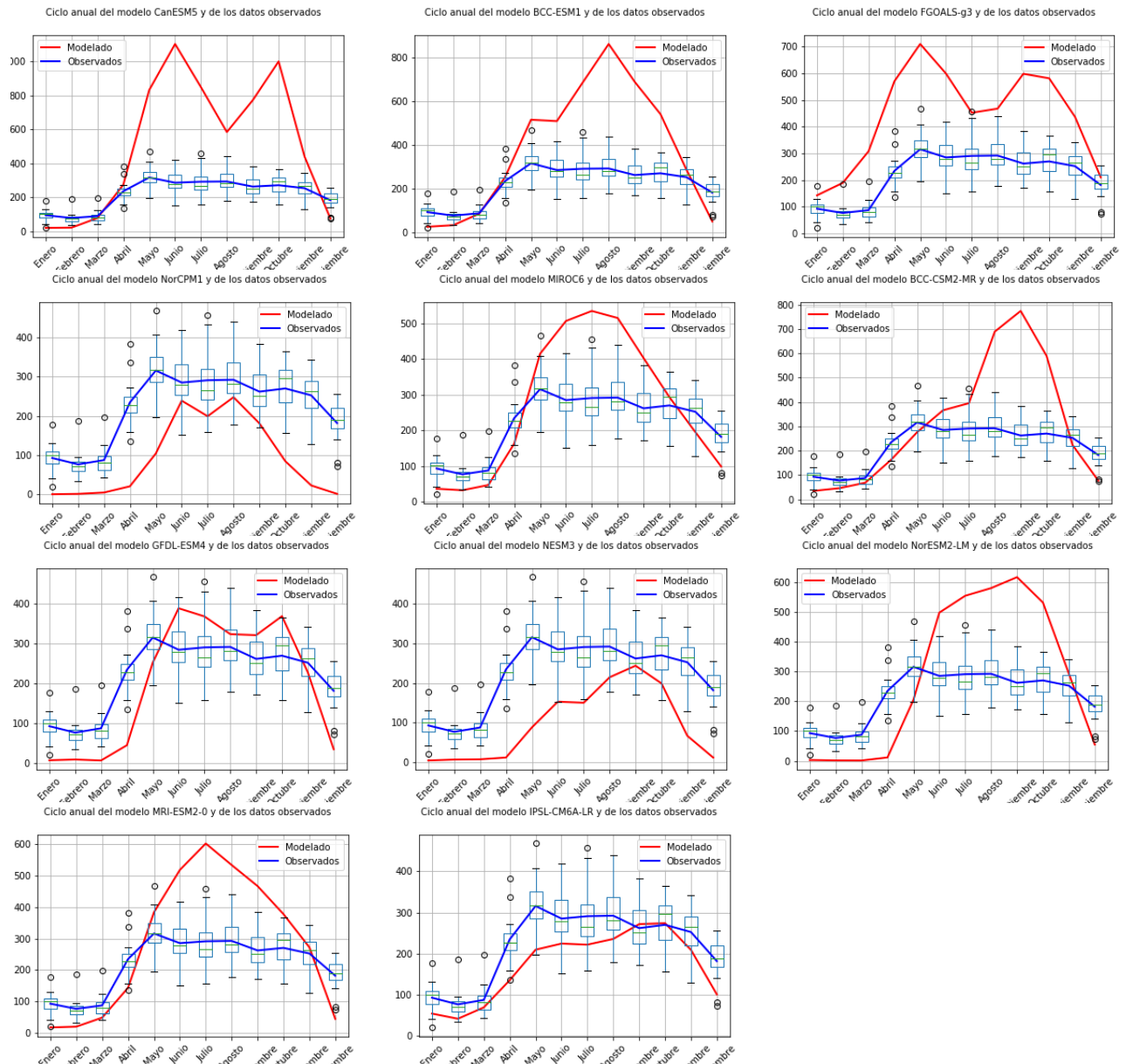
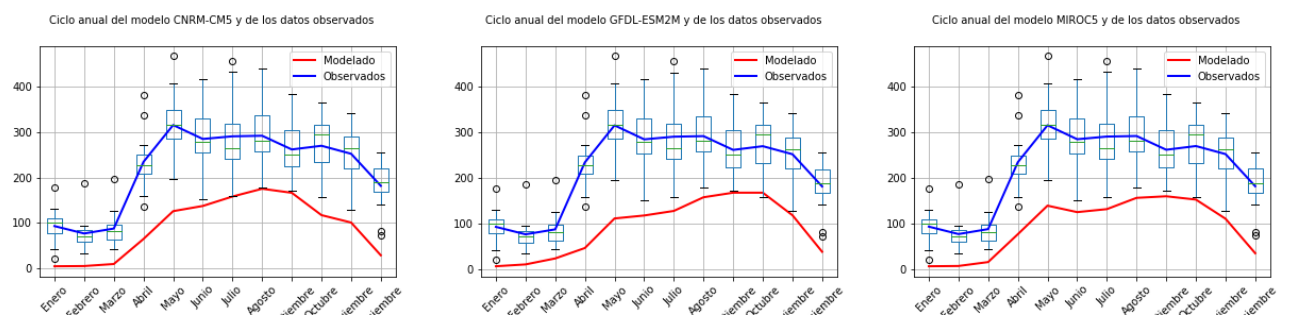


Figura 26. Ciclo anual de la precipitación conjunto de modelos CMIP6



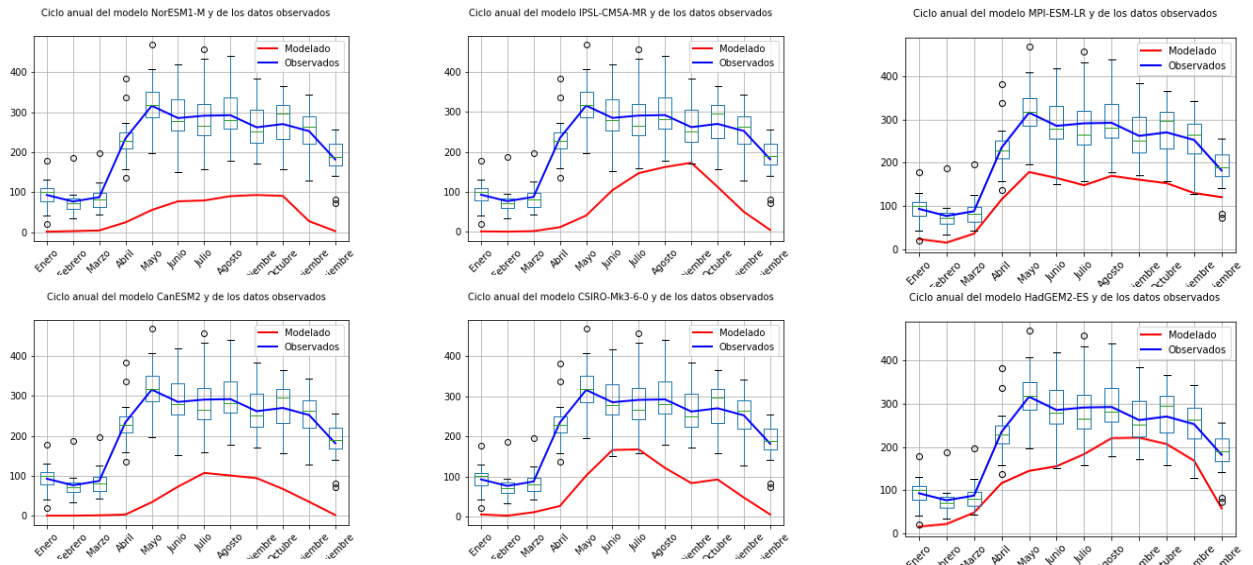
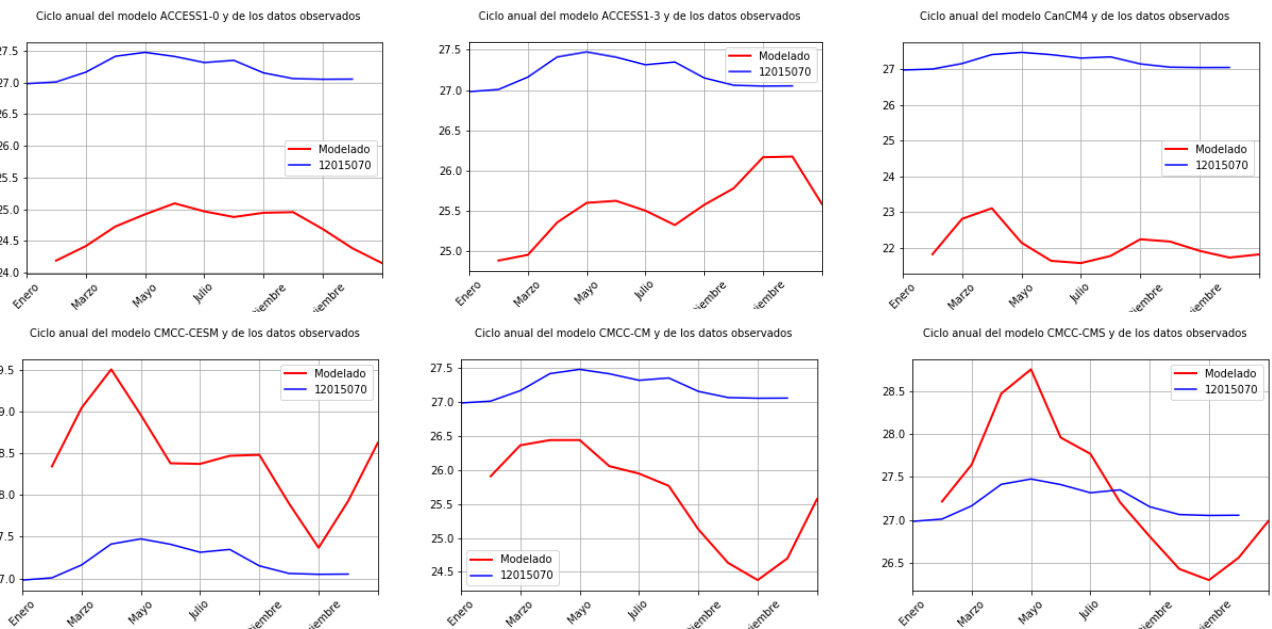
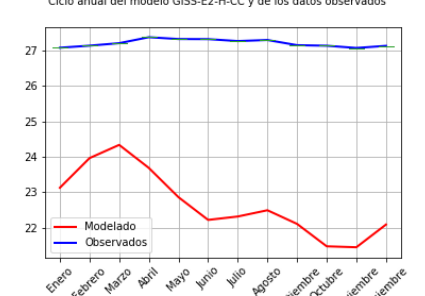
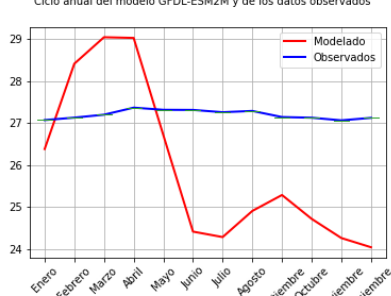
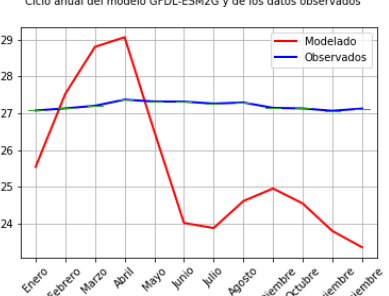
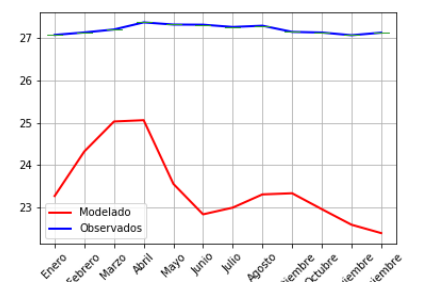
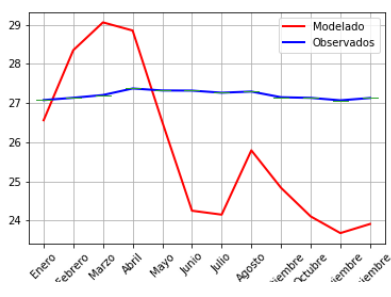
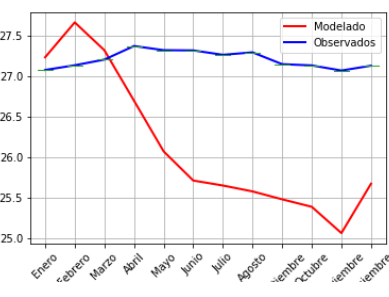
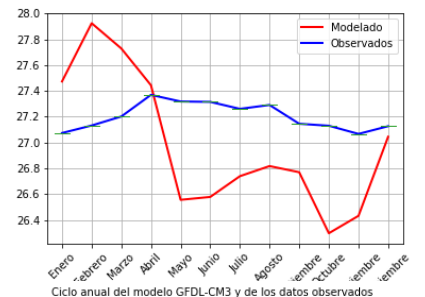
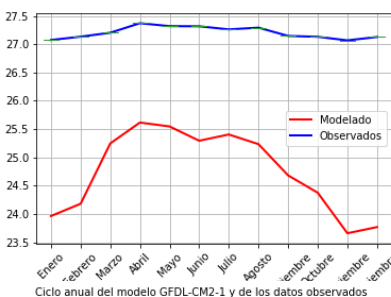
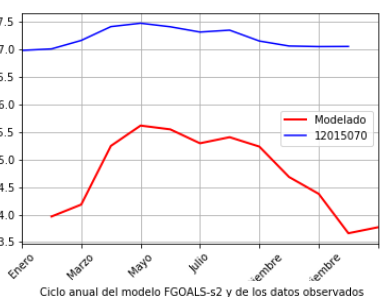
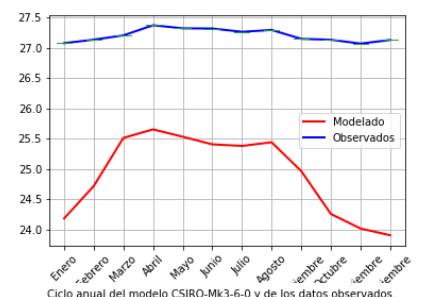
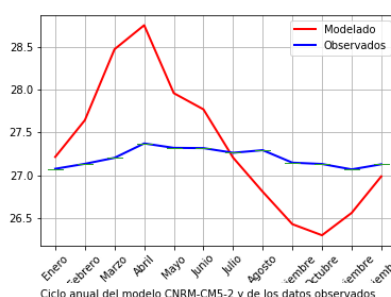
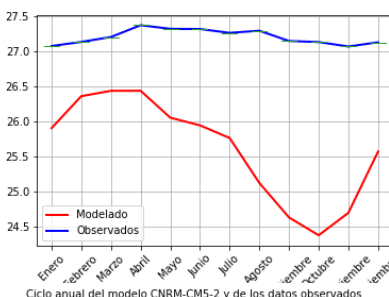
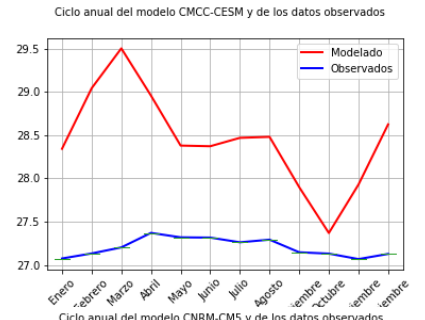
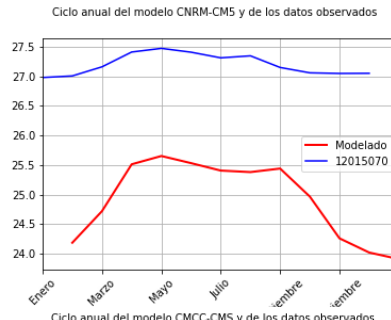
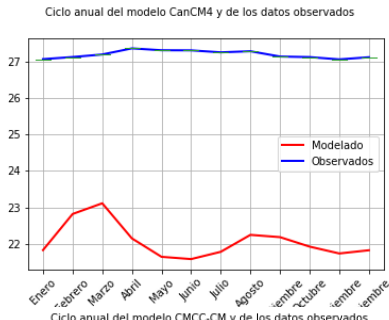
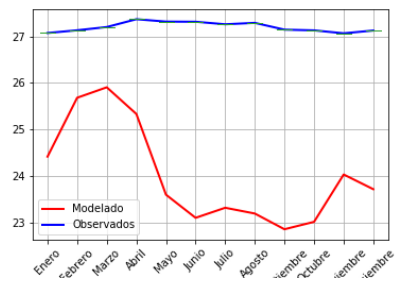
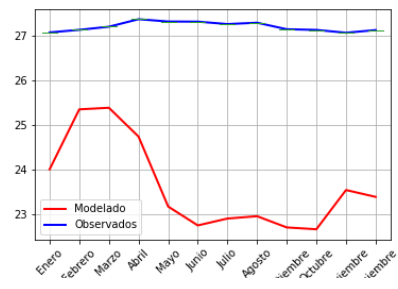
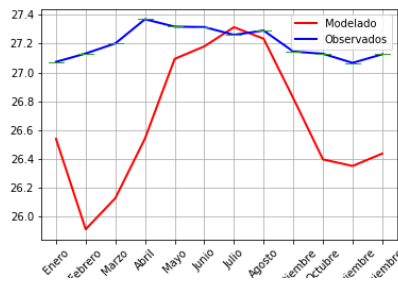
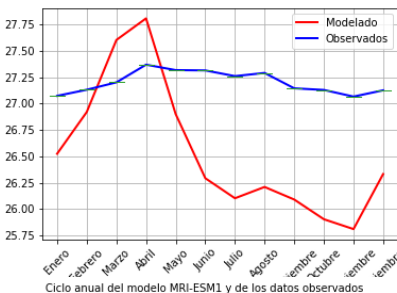
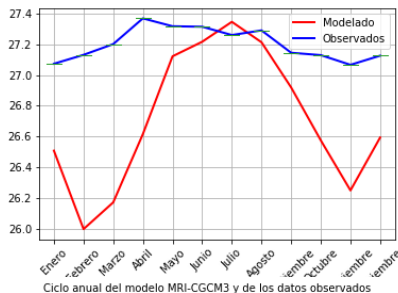
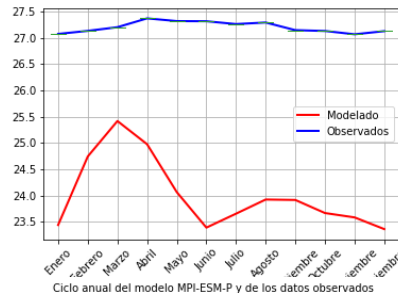
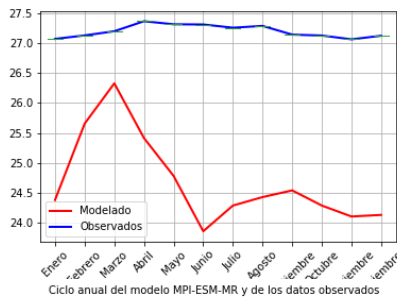
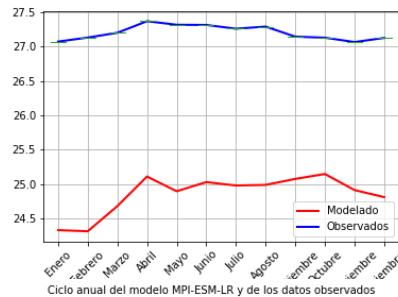
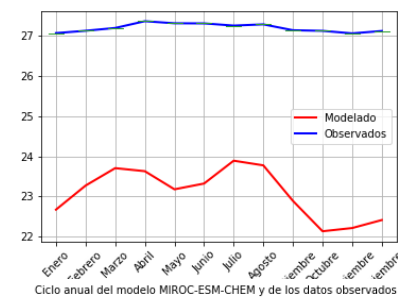
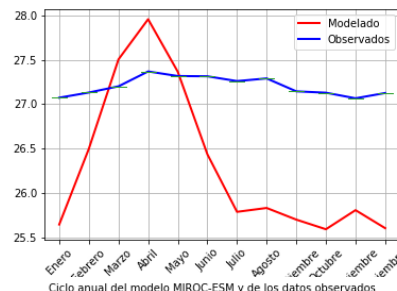
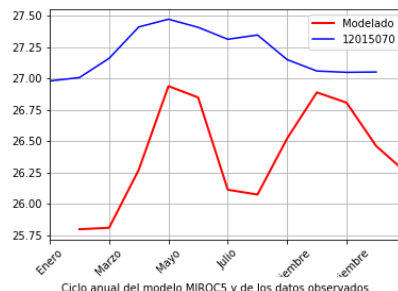
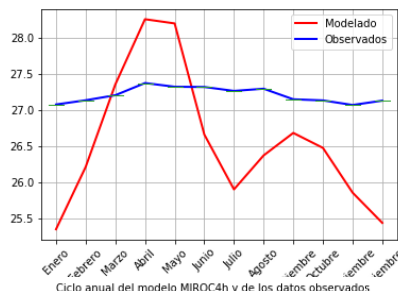
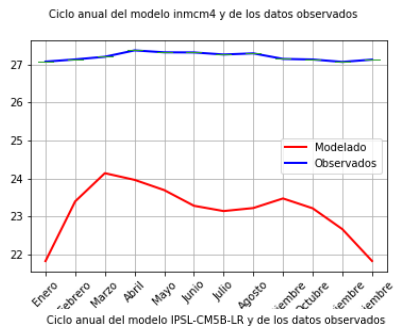
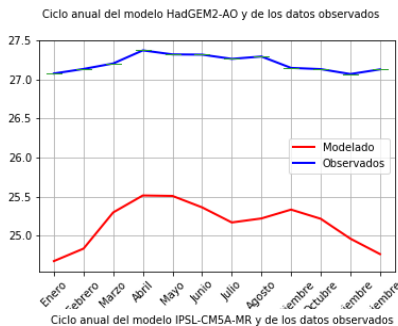
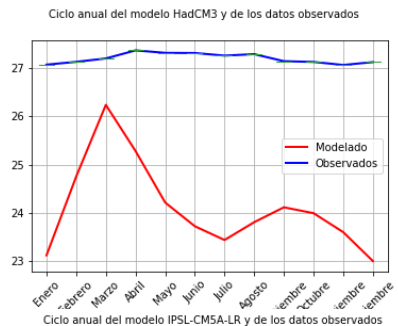


Figura 27. Ciclo Anual Cordex Precipitación.

Si siguiendo el procedimiento anterior, para evaluar la capacidad de los modelos para representar la temperatura de la zona, se compararon los ciclos anuales de los datos observado en la zona por medio de las estaciones del IDEAM y los ciclos anuales de los GCM y RCM. Los resultados muestran de manera general poca coherencia en la representación de los ciclos anuales de temperatura, sin embargo, los modelos que mejor representaron la temperatura fueron por el proyecto CMIP5 el modelo CMCC-CMS y por el proyecto Cordex MIROC-5. En las **Figura 28**, **Figura 29**, **Figura 30**, se observan la representación de los datos observados y los modelos de los proyectos CMIP5, CMIP6 y Cordex..







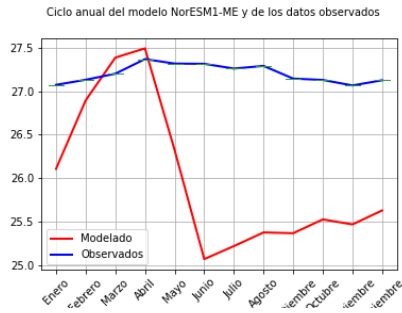
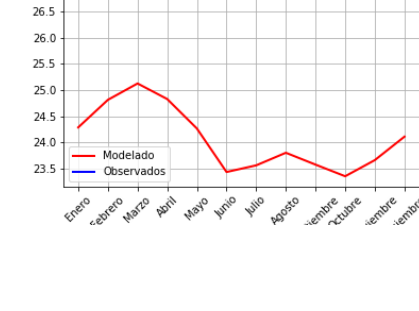
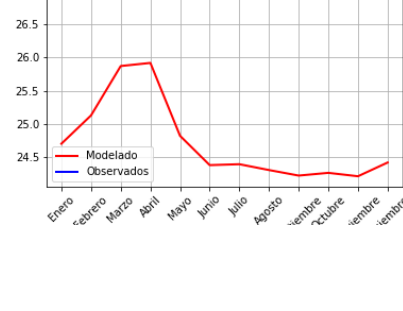
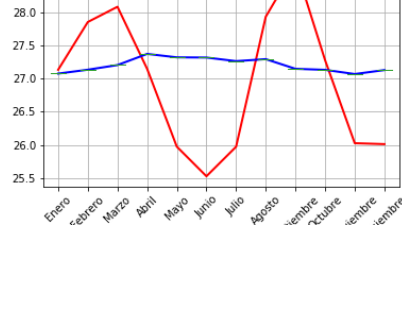
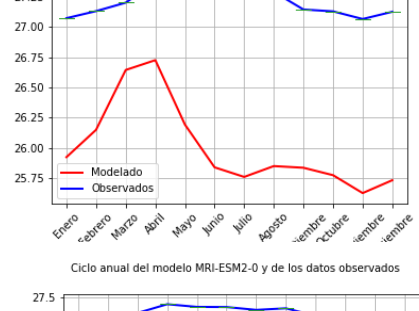
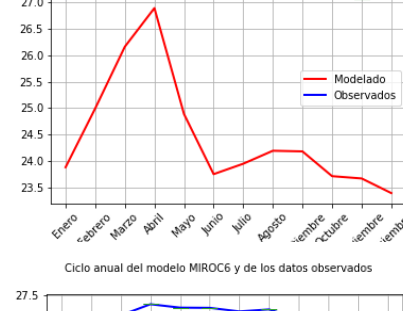
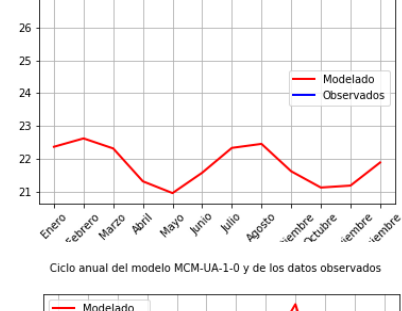
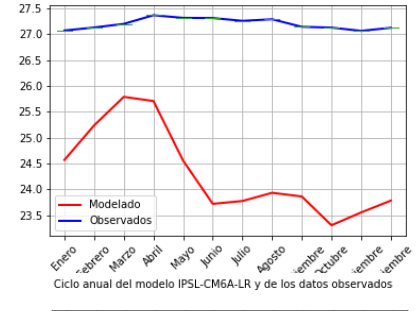
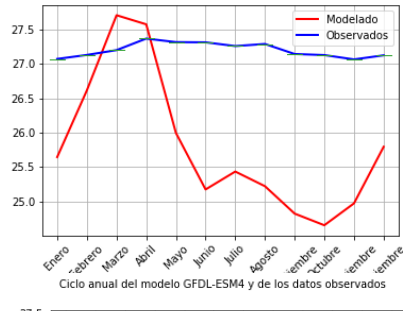
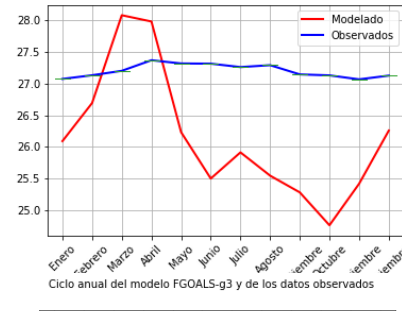
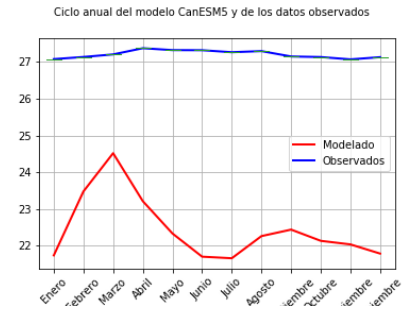
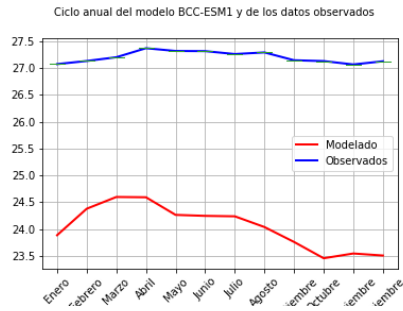
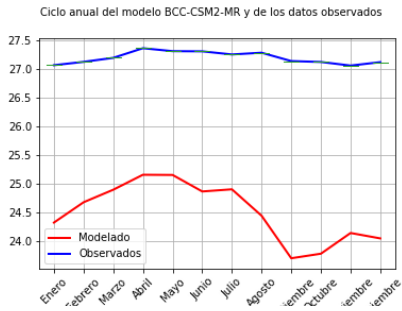


Figura 28. Ciclo Anual CMIP5 Temperatura.



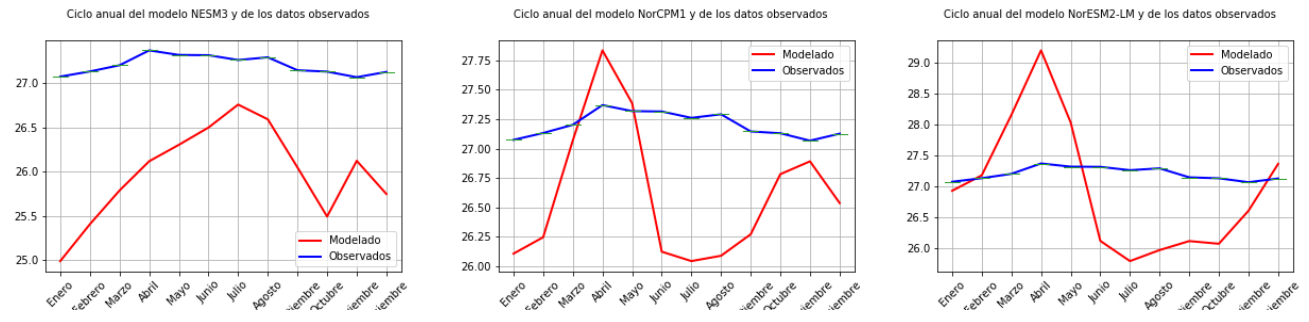


Figura 29. Ciclo Anual CMIP6 Temperatura

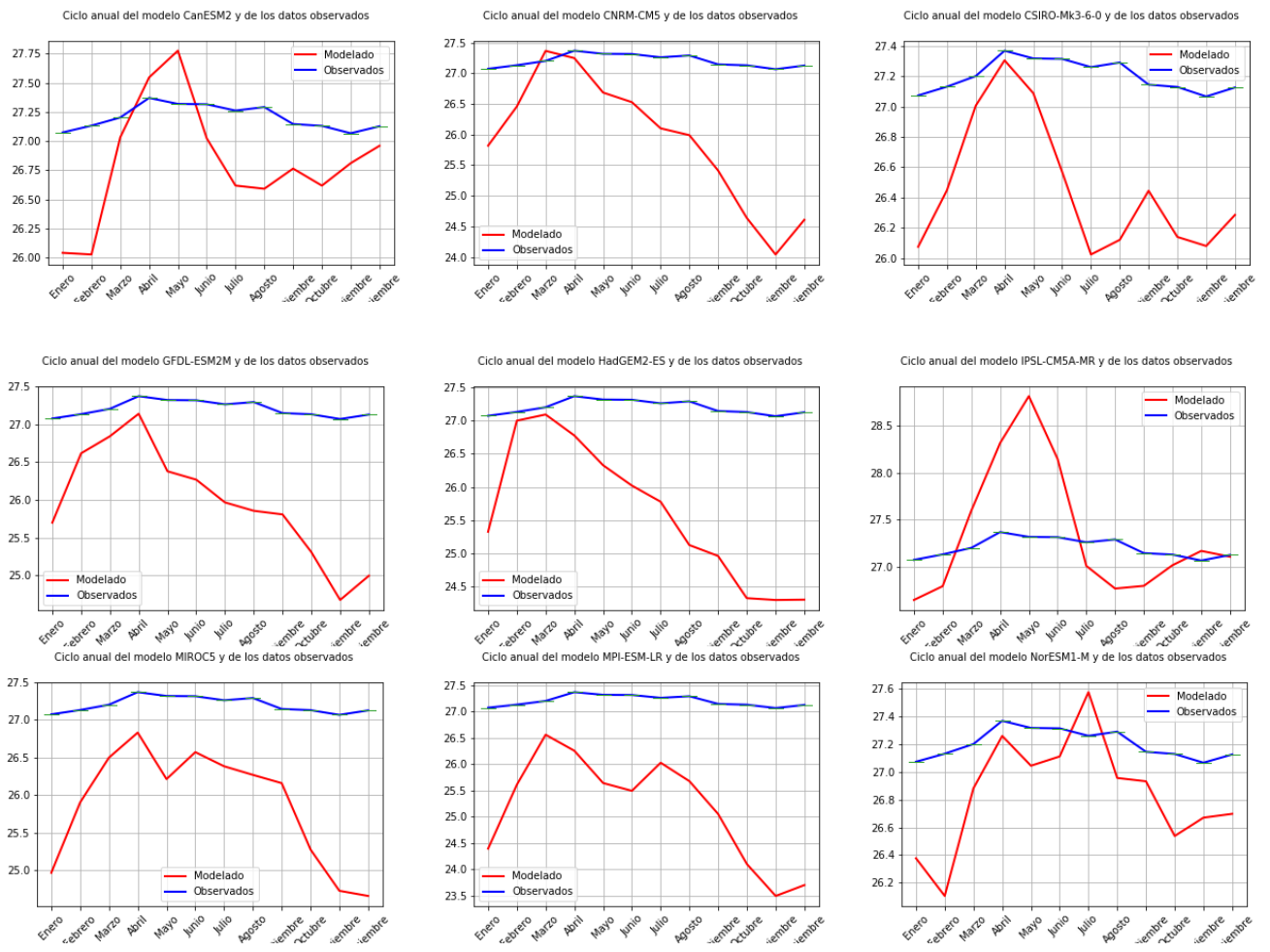


Figura 30. Ciclo Anual CORDEX Temperatura

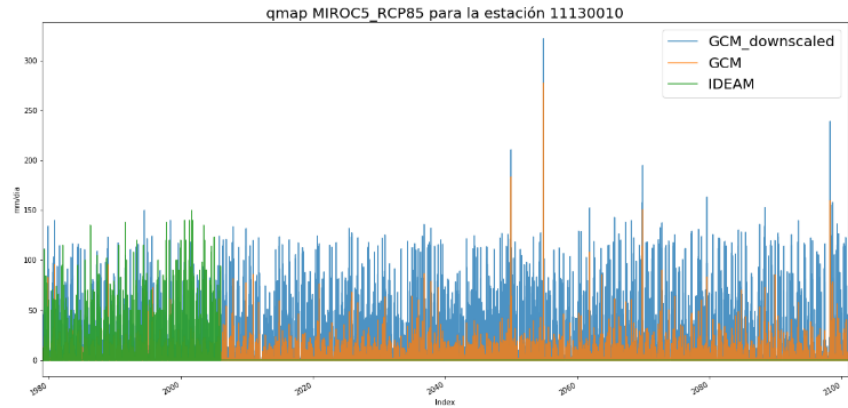
3.1.3. REDUCCIÓN DE ESCALA Y ESCENARIOS LOCALES DE CAMBIO CLIMÁTICO

3.1.3.1. CORRECCIÓN DE SESGO ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN.

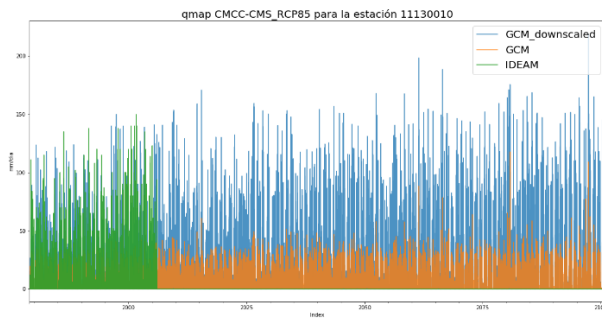
Es importante tener en cuenta que aunque el modelo CMCC-CMS es uno de los modelos que mejor representa la climatología local, para efectos de la presente investigación, por no aportar datos para el escenario RCP 2.6 solo fue tenido en cuenta el modelo MIROC5 del proyecto cordex.

En la **Figura 31** y **Figura 32** se presentan las series para la estación de 11130010 con la corrección de sesgo por Quantile Mapping para una frecuencia diaria y mensual respectivamente, para del modelo MIRO5 en las figuras **Figura 33** y **Figura 34** se muestran las funciones de distribución de probabilidad acumuladas empíricas para los datos diarios y mensuales respectivamente y el modelos. En las gráficas se presentan tres conjuntos de datos, los datos de la estación es decir los datos observados, los datos históricos del modelo que son utilizados como datos de entrenamiento y los proyecciones futuras de los modelo, tanto los datos históricos como los futuros se les realiza la corrección de sesgo, en las funciones de distribución de probabilidad se observa como la transformación lleva los datos del modelo a una función de distribución muy similar a la de los datos observados. Para los datos diarios aproximadamente el 60 % de los días no presentan lluvia, el modelo de quantile mapping permite realizar una corrección por días húmedos trabajando de forma adecuada datos con esta frecuencia. Tanto las series como las funciones de distribución de probabilidad acumulada permiten identificar como los órdenes de magnitud de los datos modelados son similares a los datos observados, además, la corrección de sesgo se hizo por trimestres (DEF,MAM,JJA,SON) para trabajar de forma adecuada el ciclo anual de las variables. El paquete de R utilizado para realizar este procedimiento fue el desarrollado por Gudmundsson, Bremnes, Haugen, & Engen-Skaugen en 2012, el mismo procedimiento se realiza para todas las estaciones.

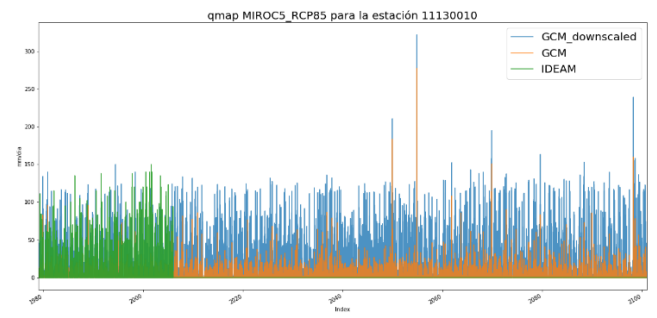
En la **Figura 31**. se presentan las series diarias para la estación 11130010 con la corrección de sesgo, la serie de datos observados del IDEAM y los datos modelados del MIROC5, de igual forma en la **Figura 32**. se presentan las series mensuales para la misma estación. Las funciones de distribución empíricas para las series diarias para la estación 1130010 con la corrección de sesgo, la serie de datos observados del IDEAM y los datos modelados del MIROC5, en esta se observa que aproximadamente el 60 % de los días no presentan lluvia, el modelo de quantile mapping permite realizar una corrección por días húmedos y en la **Figura 33**. se puede observar la correlación, la **Figura 34**. muestra las funciones de distribución empíricas para los datos mensuales, mostrando un buen ajuste entre la serie corregida y la observada. El mismo procedimiento, con resultados similares, se aplicó a las 12 estaciones restantes.



QM serie diaria de precipitación (mm) modelo MIROC5

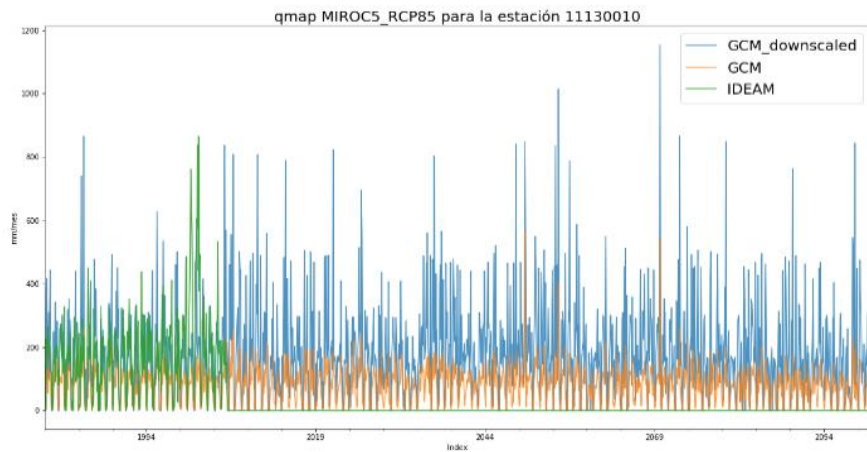


(a) QM serie diaria de precipitación modelo CMCC-CMS



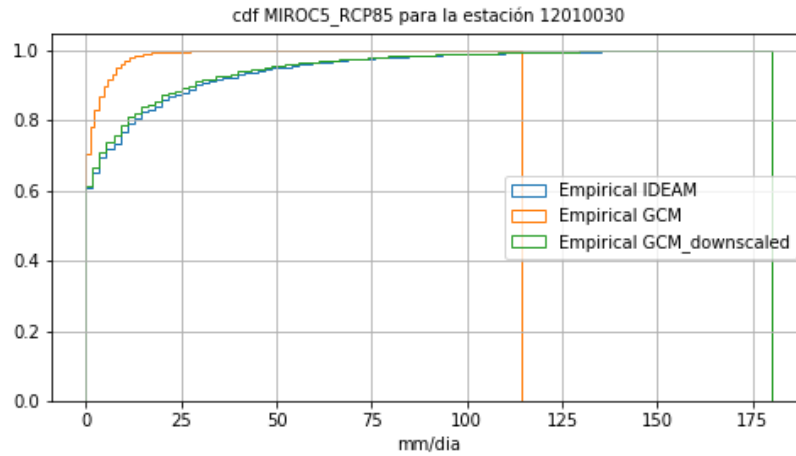
(b) QM serie diaria de precipitación modelo MIROC5

Figura 31.. Quantile mapping para la serie diaria de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP8.5



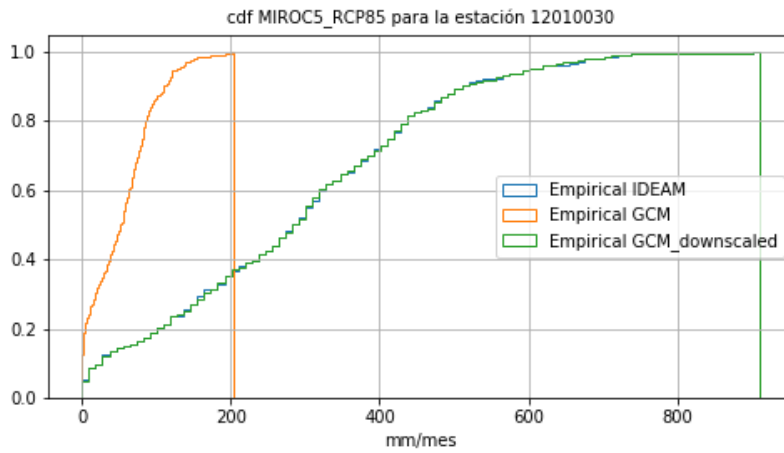
QM serie diaria de precipitación (mm) para el modelo MIROC5

Figura 32. . Quantile mapping para la serie mensual de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP8.5.



Función de distribución empírica (mm/día) para el modelo MIROC5

Figura 33. Función de distribución empírica para las series diarias de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, del modelo antes y después del Downscaling



(b) Función de distribución empírica para el modelo MIROC5

Figura 34. Función de distribución empírica para las series mensuales de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, del modelo antes y después del Downscaling.

3.1.3.2. BCSD PARA LA PRECIPITACIÓN

Como se expuso anteriormente la desagregación espacial de los datos después de realizar la corrección de sesgo se realizó con el método de EBK, en las **Figura 35**,

Escenarios RCP 8.5 precipitación modelo MIROC5 proyecto Cordex

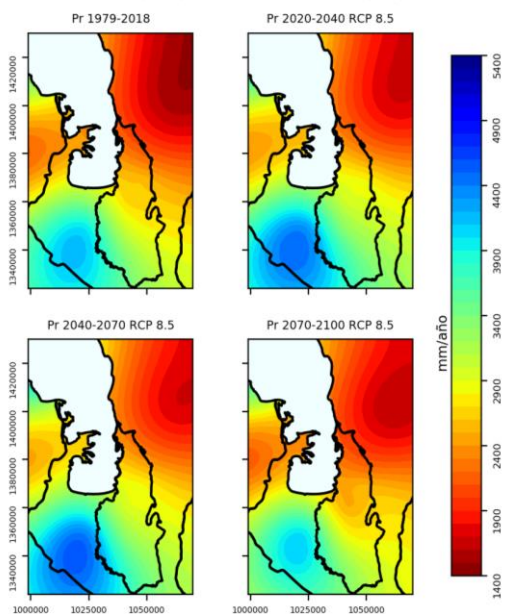


Figura 36 se representa la precipitación en el periodo base y los periodos de modelación para el modelo MIROC5. Los resultados muestran en general un aumento de la precipitación en toda el área de estudio, teniendo coherencia con los resultados obtenidos con el análisis estadístico de las estaciones del IDEAM y los resultados obtenidos por el tercer comunicado de cambio climático del IDEAM (Armenta et al., 2014).

En las **Figura 37** y **Figura 38**, se representa el cambio en la precipitación, en la **Figura 37** se muestran el resúmenes de estos escenarios. Se aclara que el periodo base para precipitación es de 1979 a 2018 y los resultados se presentan para un promedio de la precipitación anual para los distintos periodos. Porcentualmente se muestra un mayor aumento de la precipitación para la zona norte del área de estudio, obteniendo disminución de la precipitación para el periodo 2070 - 2100 en el escenario RCP 8.5 del modelo MIROC5.

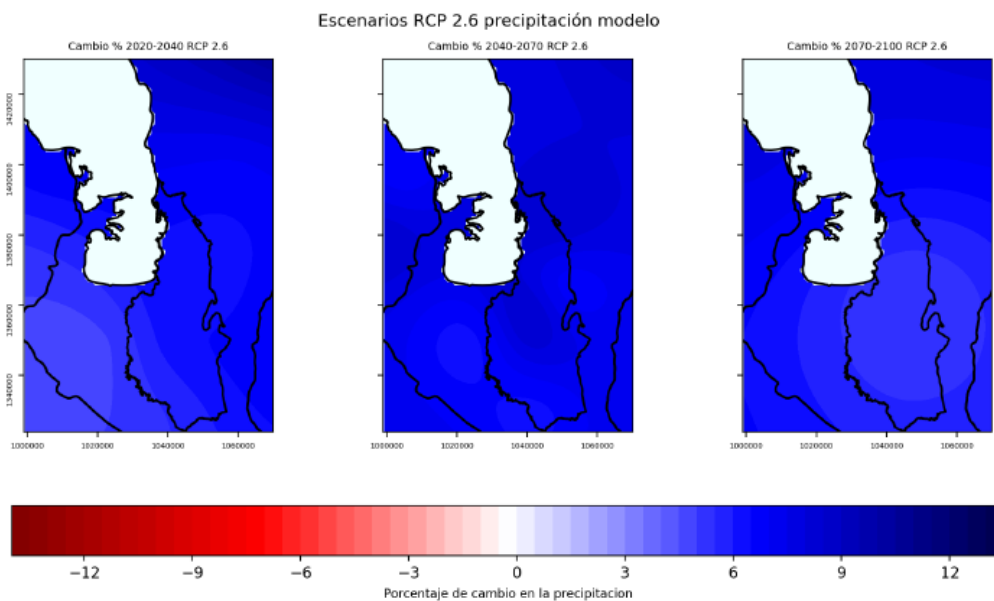
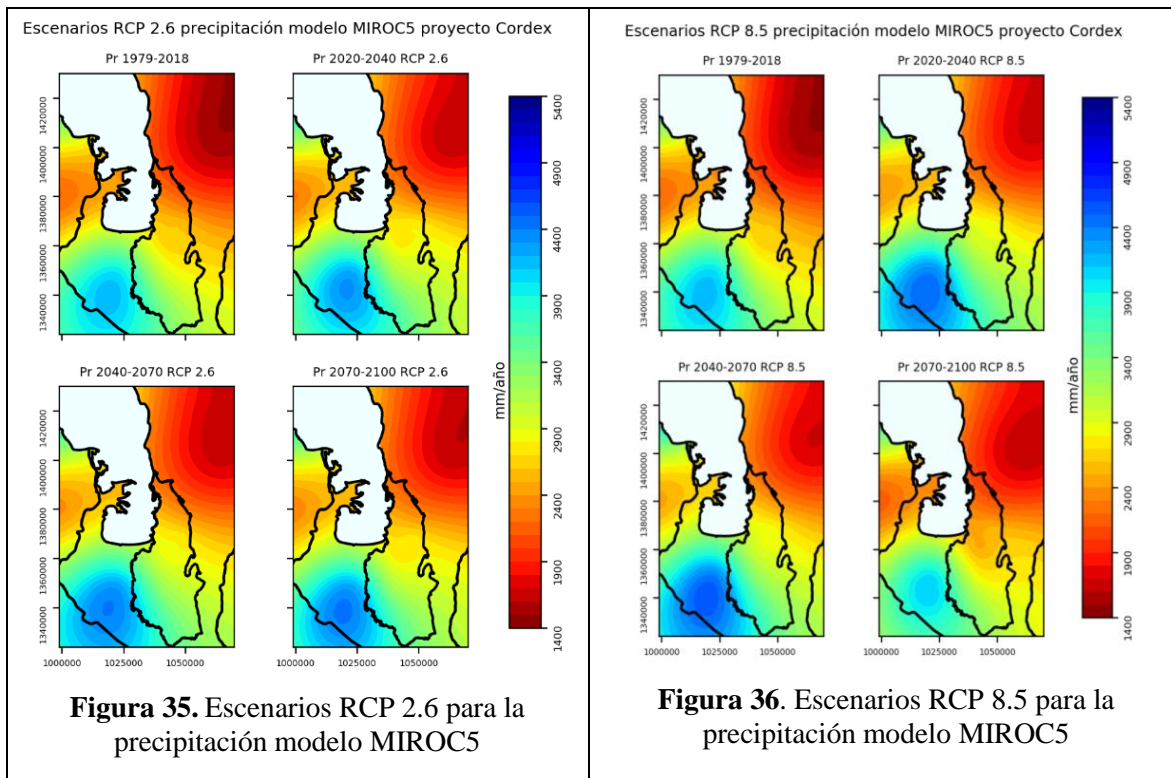


Figura 37. Escenarios RCP 2.6 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5.

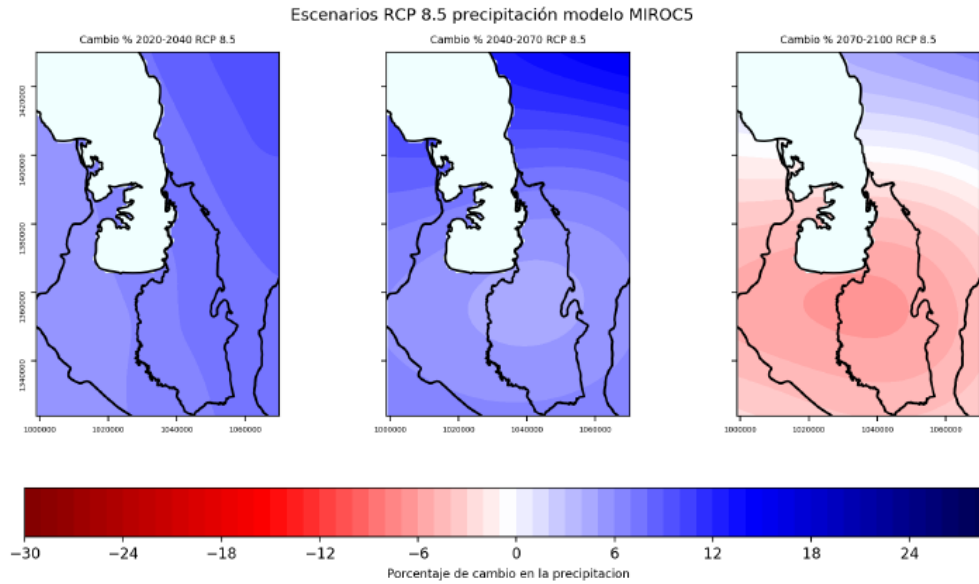


Figura 38. Escenarios RCP 8.5 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5.

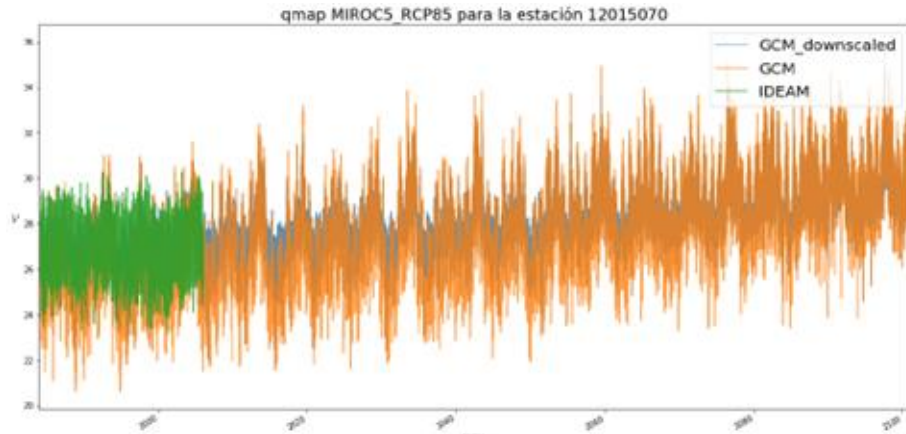
Tabla 16. Resumen de los cambios porcentuales en la precipitación anual con respecto al periodo base

Modelo Escenario	Escenario	2018-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2.6	0%	17%	-14%
	RCP 8.5	0%	-3%	-24%

3.1.3.3. BCSD PARA LA TEMPERATURA MEDIA

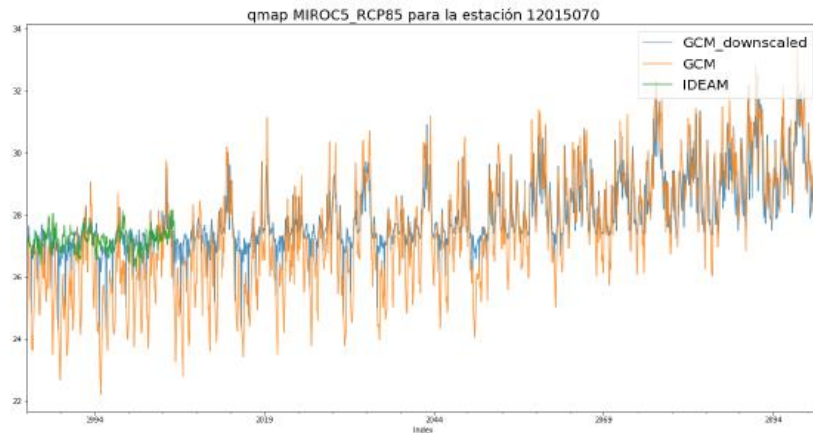
En la **Figura 39** se presentan las series diarias y en la **Figura 40** las series mensuales de la temperatura medidas en la estación 12015070. La corrección de sesgo para la temperatura solo se realizó para la estación 12015070 ya que es la única estación que tiene menos de 10% de datos faltantes. En la **Figura 41**, se representa la función de distribución empírica para las series diarias y en la **Figura 42** la función de distribución empírica para las series mensuales de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, de los modelo MIROC5 antes y después del Downscaling .

Para la desagregación espacial se utilizó la ecuación de Cenicafé como se mencionó anteriormente en la metodología. Los resultados muestran aumentos de temperatura media para todos los escenarios, el modelo MIROC5 muestra un aumento de temperatura de 4.55% para el periodo 2070-2100 en el escenario RCP 8.5. En la **Figura 43** y **Figura 44** se representan espacialmente los cambios de la temperatura respecto al periodo base para el modelo MIROC5, en los escenarios 2.6 y 8.5. Igualmente, en la **Tabla 17** resumen de los cambios en °C de la temperatura con respecto al periodo base.



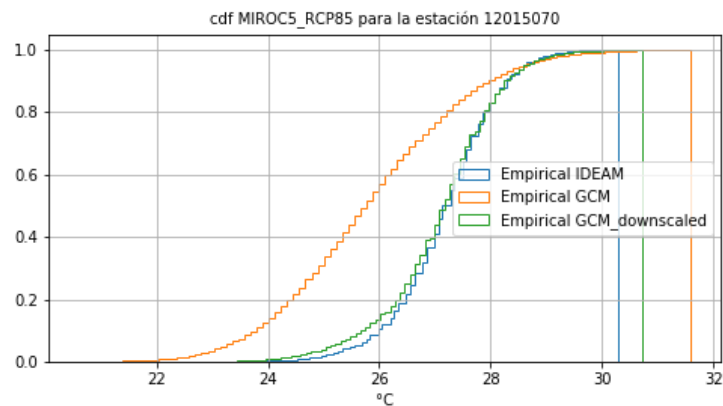
QM serie diaria de temperatura modelo MIROC5

Figura 39. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5.



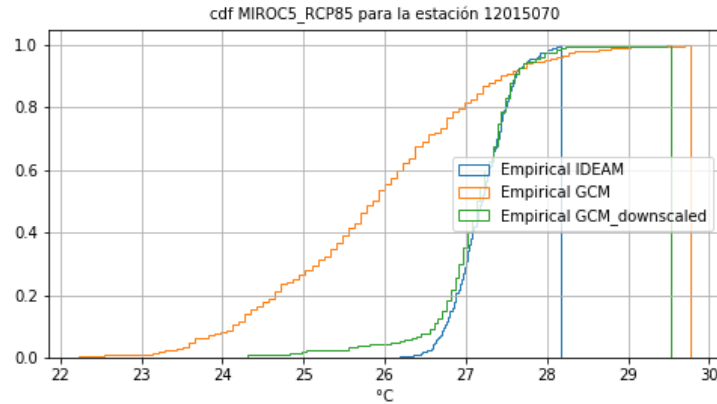
QM serie mensual de temperatura modelo MIROC5

Figura 40. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5.



Función de distribución empírica para el modelo MIROC5

Figura 41. Función de distribución empírica para las series diarias de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, del modelo MIROC5 antes y después del Downscaling.



Función de distribución empírica para el modelo MIROC5

Figura 42. Función de distribución empírica para las series mensuales de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, del modelo MIROC5 antes y después del Downscaling.

Escenarios RCP 2.6 temperatura modelo MIROC5 proyecto Cordex

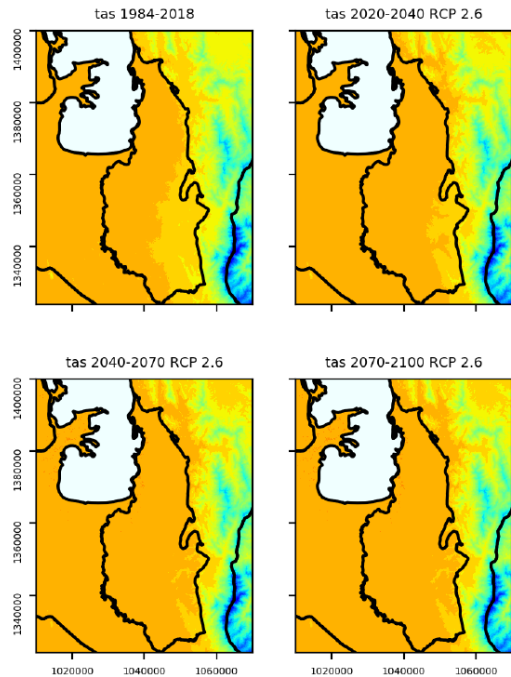


Figura 43. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5.

Escenarios RCP 8.5 temperatura modelo MIROC5 proyecto Cordex

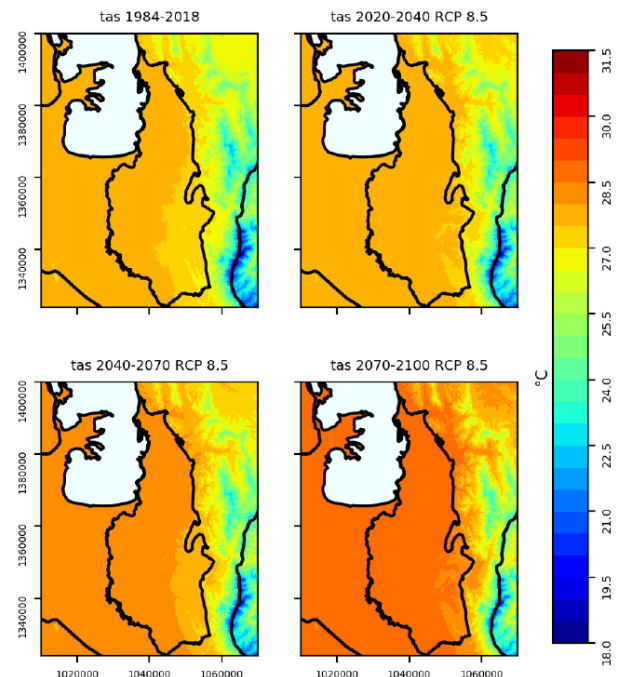


Figura 44. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5

Tabla 17. Resumen de los cambios en °C de la temperatura con respecto al periodo base.

Modelo Escenario	Escenario	2018-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2.6	0,19	0,33	0,33
	RCP 8.5	0,26	0,57	1,24
MIROC5	RCP 2.6	0,69%	1,22%	1,23%
	RCP 8.5	1,08%	2,11%	4,55%

3.1.3.4. BCSD PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA

Los escenarios de temperatura máxima se realizaron de la misma forma que los de temperatura media. En la **Figura 45** se representa la serie diaria y la **Figura 46** la serie mensual de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5. Con relación a los cambios, para esta variable se espera un aumento de 1.25% para el periodo 2070-2100 en un escenario RCP2.6, esto corresponde a un aumento de 0.39°C , para el escenario RCP 8.5 se espera un aumento de 3.98% correspondiente a 1.24°C para el mismo periodo. En la **Figura 47** cambio de la temperatura máxima para el escenario RCP 2.6 y en **Figura 48** cambio de la temperatura máxima para el escenario RCP 8.5 de los periodos analizados modelo MIROC5. Igualmente, en la **Tabla 18** *Tabla 18. Resumen de los cambios en $^{\circ}\text{C}$ de la temperatura con respecto al periodo base.*

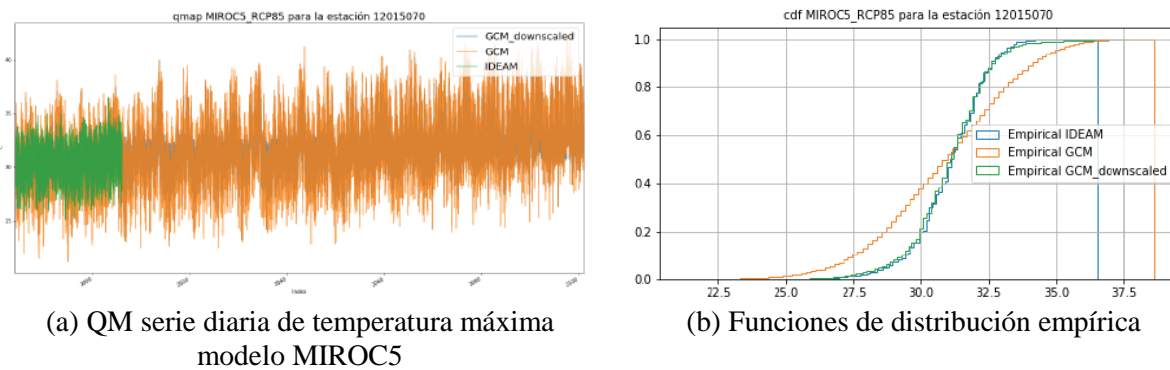


Figura 45. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.

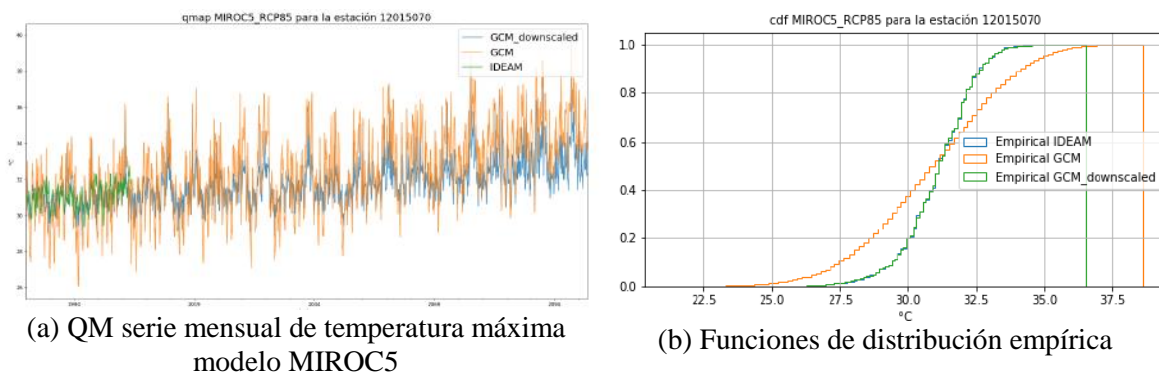


Figura 46. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.

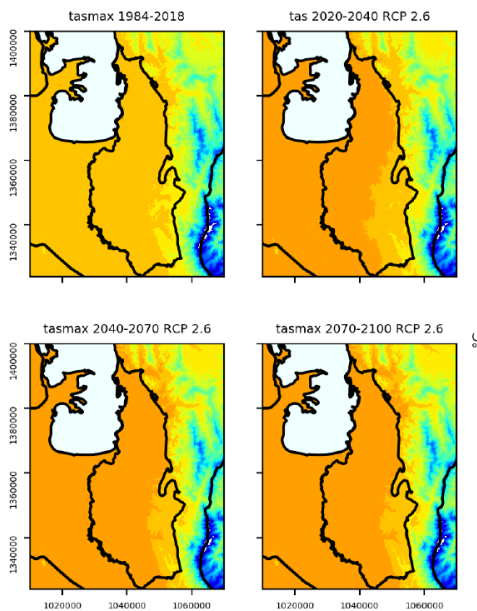


Figura 47. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5

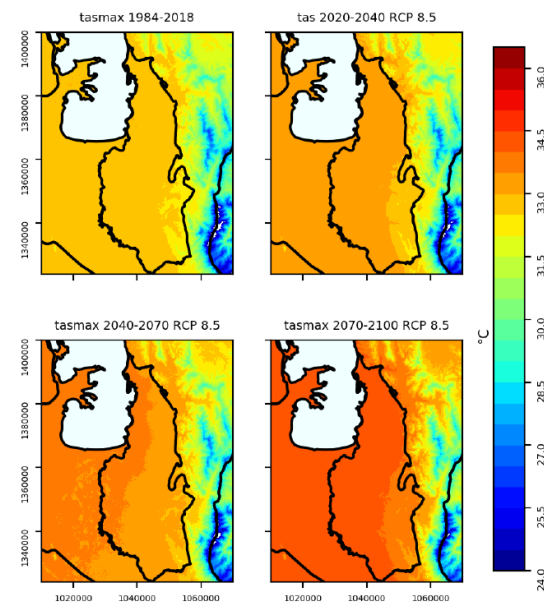


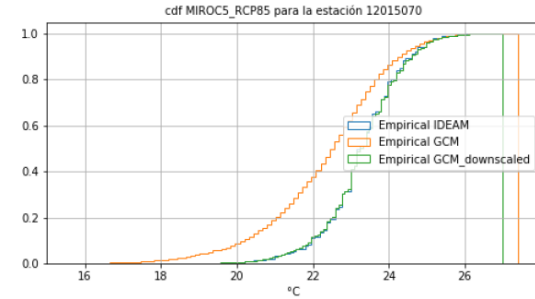
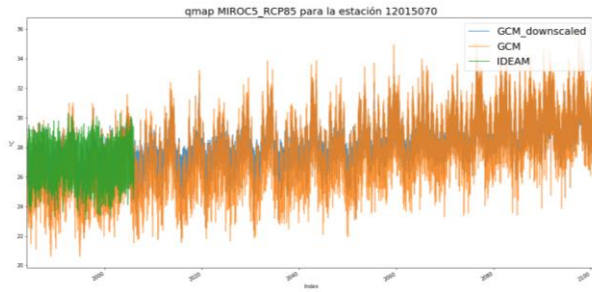
Figura 48. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5

Tabla 18. Resumen de los cambios en la temperatura máxima con respecto al periodo base.

Modelo Escenario	Escenario	2018-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2.6	0,2 °C	0,37 °C	0,39 °C
	RCP 8.5	0,32 °C	0,59 °C	1,24 °C
	RCP 2.6	0,65%	1,19%	1,25%
	RCP 8.5	1,02%	1,90%	3,98%

3.1.3.5. BCSD PARA LA TEMPERATURA MÍNIMA

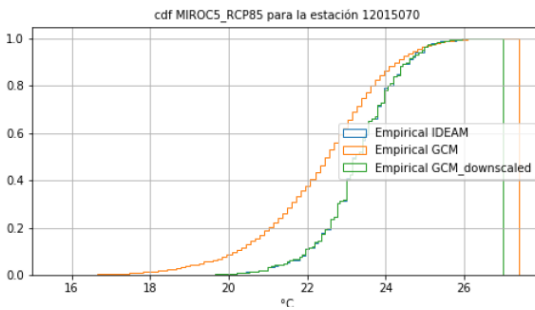
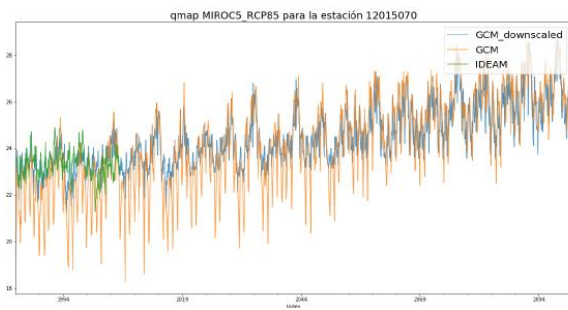
En la **Figura 49** se representan serie diaria de temperatura mínima y en **Figura 50** la serie mensual de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5. Para la temperatura mínima se espera un mayor aumento que para la temperatura máxima y media según el modelo MIROC5. para el escenario RCP 2.6 y el periodo 2070-2100 se prevé un aumento de 3.04% correspondiente a 0.71°C y para el escenario RCP 8.5 se muestra aumento un 10.20% y 2.38°C para el mismo periodo. Se representa en las **Figura 51** cambio de la temperatura mínima para el escenario RCP 2.6 y en **Figura 52** cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5 respectivamente. Igualmente, en la **Tabla 19** el resumen de los cambios en la temperatura mínima con respecto al periodo base.



(a) QM serie diaria de temperatura mínima modelo MIROC5

(b) Funciones de distribución empírica

Figura 49. Quantile mapping para la serie diaria de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.



(a) QM serie mensual de temperatura mínima modelo MIROC5

(b) Funciones de distribución empírica

Figura 50. Quantile mapping para la serie mensual de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5.

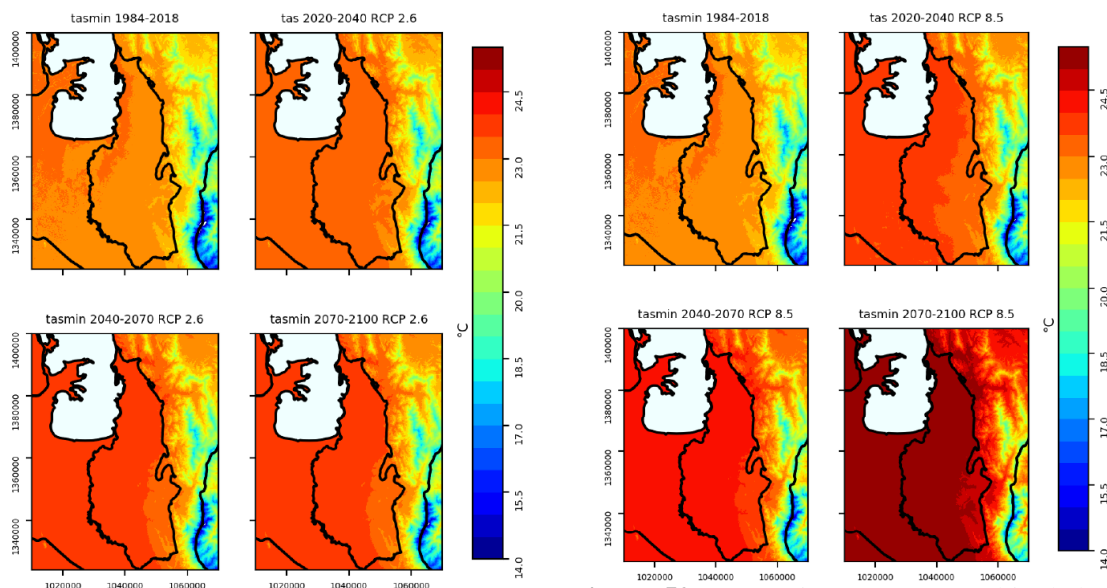


Figura 51. Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5

Figura 52. Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5

Tabla 19. Resumen de los cambios en la temperatura mínima con respecto al periodo base.

Modelo Escenario	Escenario	2018-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2.6	0,42 °C	0,73 °C	0,71 °C
	RCP 8.5	0,61 °C	1,26 °C	2,38 °C
	RCP 2.6	1,80%	3,13%	3,04%
	RCP 8.5	2,62%	5,39%	10,20%

3.2. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA E IMPACTOS

Los resultados del modelo SWB aplicado para la estimación para la zona de estudio muestran para el periodo base 2015-2018 un promedio de precipitación de 2917 mm/año y una recarga potencial directa de 716,9 mm/año representando un 24 % de la precipitación, los resultados son similares a los obtenidos por (Bastidas Osejo, 2019) con una precipitación de 2816.6 mm/año y una recarga potencial directa (RPD) 756.5 mm/año representando un 27 % de la precipitación para el periodo 2015-2018. Ver **Tabla 20**.

En las **Tabla 20**, **Tabla 21**, **Tabla 22** se presenta el resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial para el escenario RCP 2.6. El modelo MIROC5 para dicho escenario muestra una disminución en la recarga 6 % para el periodo 2018-2040, un aumento del 17% para el periodo 2040-2070 y una disminución 18% para el periodo 2070-2100.

En las **Tabla 23**, **Tabla 24**, **Tabla 21**, **Tabla 25**, se presenta resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial para el escenario RCP 8.5. El modelo MIROC5 para dicho escenario muestra una disminución en la recarga de un 11% para el periodo 2018-2040,

de 15% para el periodo 2040-2070 y de 57% para el periodo 2070-2100, Siendo el año más crítico de los modelados es el año 2097 con una reducción de la precipitación (67%) en comparación del promedio del periodo base y aumento de la temperatura máxima y mínima 11 % y 20 % respectivamente, estos cambios se ven reflejados con una reducción del 96 % en la recarga para dicho año.

Para todo los escenarios RCP y para todos los años se evidencia una disminución en la evapotranspiración potencial y real, esto se debe a que la evapotranspiración se calculó con el método propuesto por Hargreaves y Samani (1985) el cual depende de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima, en la **Tabla 22** y **Tabla 25** se evidencia que para este modelo la temperatura mínima tiene mayor aumento porcentual que la temperatura máxima, por lo que la diferencia entre las dos disminuye haciendo que la evapotranspiración disminuya. Lo anterior hace que el resultado final no sea tan sensible a los cambios en temperatura y sí a los cambios en precipitación como se evidencia en la **Figura 53**, **Figura 54**, **Figura 55**. la gráfica de P vs RDP muestra una gran relación entre las dos variables teniendo un coeficiente de determinación de 0.93. resultado coherente con lo obtenido por (Li et al., 2020).

Anexos a este trabajo se entrega, como material complementario, los documentos con las gráficas del ciclo anual y los mapas anuales para todas las variables analizadas, también se agregan las series y tablas con los resúmenes de las variables analizadas para todos los escenarios. En las gráficas de los anexos se evidencia la presencia de la variabilidad entre meses y años (variabilidad estacional –intranual e interanual), en general la recarga presenta el mismo ciclo anual de la precipitación con valores casi nulos de recarga en los meses de enero, febrero y marzo.

Como se mencionó anteriormente la variabilidad interanual se evidencia con los distintos valores que toma la precipitación y la recarga en los distintos años. Las tendencias en la distribución espacial muestran en general mayor recarga en la zona sur y cerca de la Serranía de Abibe, coincidiendo con los suelos con mayor capacidad de infiltración, con zonas de cobertura boscosa y con mayores precipitaciones. Otro aspecto importante de la distribución espacial de la RPD, es la influencia de los drenajes superficiales, mostrando que en las áreas que representan los principales cauces, la RPD tiende a ser cero, dado que en dichas zonas se favorecen los procesos de escorrentía directa por encima de los procesos de infiltración, mientras que en las zonas próximas a los drenajes, la RPD tiende a ser alta, debido al tránsito de la escorrentía directa pendiente abajo hacia las celdas vecinas, donde dicha escorrentía se convierte en “precipitación” adicional para ser infiltrada (Bastidas Osejo, 2019).

Tabla 20. Resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial directa RPD en el escenario RCP 2.6

Resumen estadístico de la recarga potencial directa (RPD) total anual, promedio espacial para la zona de estudio. En el escenario RCP 2.6				
Año	Recarga potencial directa (mm/año)	Precipitación (mm/año)	RPD/P	RPD respecto al periodo base
2015	567,6	2570,9	22%	
2016	773,7	3025,1	26%	
2017	837,2	3199,0	26%	

2018	689,3	2873,2	24%	
Promedio	716,9	2917,0	25%	
2040	225,4	1791,1	13%	-69%
2041	534,9	2556,9	21%	-25%
2042	919,6	3728,6	25%	28%
2043	1018,3	3624,7	28%	42%
Promedio	674,6	2925,3	23%	-6%
2070	561,1	2812,0	20%	-22%
2071	952,3	3552,8	27%	33%
2072	963,8	3777,8	26%	34%
2073	888,3	3561,6	25%	24%
Promedio	841,4	3426,1	25%	17%
2097	685,1	3203,6	21%	-4%
2098	309,0	2007,9	15%	-57%
2099	1008,2	3779,2	27%	41%
2100	358,5	2100,2	17%	-50%
Promedio	590,2	2772,7	21%	-18%
Promedio escenarios RCP	702,1	3041,4	23%	-2%

Tabla 21. Resumen de los cambios en las variables analizadas en el escenario RCP 2.6

Año	RPD (mm/año)	P (mm/año)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	ETP (mm/año)	ETR (mm/año)
2015	567,6	2570,9	31,9	24,3	1572,3	1319,9
2016	773,7	3025,1	32,4	24,2	1617,9	1332,9
2017	837,2	3199,0	32,0	23,6	1607,6	1459,2
2018	689,3	2873,2	31,8	23,7	1585,0	1409,9
promedio	716,9	2917,0	32,0	24,0	1595,7	1380,5
2040	225,4	1791,1	32,3	24,3	1588,0	1126,3
2041	534,9	2556,9	32,5	25,2	1532,0	1177,2
2042	919,6	3728,6	31,2	23,7	1506,6	1158,4
2043	1018,3	3624,7	30,8	23,2	1511,0	1286,8
promedio	674,6	2925,3	31,7	24,1	1534,4	1187,2
2070	561,1	2812,0	32,1	24,6	1535,1	1181,8
2071	952,3	3552,8	31,7	24,2	1530,6	1242,4
2072	963,8	3777,8	31,1	23,5	1515,0	1227,8
2073	888,3	3561,6	31,1	23,5	1515,3	1267,0
promedio	841,4	3426,1	31,5	24,0	1524,0	1229,8
2097	685,1	3203,6	31,4	23,8	1518,2	1170,6
2098	309,0	2007,9	31,9	24,0	1562,2	1090,6
2099	1008,2	3779,2	31,4	23,8	1530,3	1124,5
2100	358,5	2100,2	32,0	24,0	1575,1	1174,1
promedio	590,2	2507,8	31,7	23,9	1546,5	1140,0
Promedio total	702,0	2953,1	31,6	24,0	1535,0	1185,7

Tabla 22. Resumen de los cambios porcentuales en las variables analizadas en el escenario RCP 2.6

Año	cambio % RPD	cambio % P	cambio % Tmax	cambio % Tmin	cambio % ETP	cambio % ETR
2040	-69%	-39%	1%	2%	0%	-18%
2041	-25%	-12%	1%	5%	-4%	-15%
2042	28%	28%	-3%	-1%	-6%	-16%
2043	42%	24%	-4%	-3%	-5%	-7%
Promedio	-6%	0%	-1%	1%	-4%	-14%
2070	-22%	-4%	0%	3%	-4%	-14%
2071	33%	22%	-1%	1%	-4%	-10%
2072	34%	30%	-3%	-2%	-5%	-11%
2073	24%	22%	-3%	-2%	-5%	-8%
Promedio	17%	17%	-2%	0%	-4%	-11%
2097	-4%	10%	-2%	-1%	-5%	-15%
2098	-57%	-31%	0%	0%	-2%	-21%
2099	41%	30%	-2%	-1%	-4%	-19%
2100	-50%	-28%	0%	0%	-1%	-15%
Promedio	-18%	-14%	-1%	0%	-3%	-17%
Promedio total	-2%	1%	-1%	0%	-4%	-14%

Tabla 23. Resumen de los cambios en la precipitación y la recarga potencial directa RPD en el escenario RCP 8.5

Resumen estadístico de la recarga potencial directa (RPD) total anual, promedio espacial para la zona de estudio. En el escenario RCP 8.5				
Año	Recarga potencial directa (mm/año)	Precipitación (mm/año)	RPD/P	RPD respecto al periodo base
2015	567,6	2570,9	22%	
2016	773,7	3025,1	26%	
2017	837,2	3199,0	26%	
2018	689,3	2873,2	24%	
Promedio	716,9	2917,0	25%	
2040	874,2	3296,8	27%	22%
2041	685,4	3155,4	22%	-4%
2042	109,5	1423,5	8%	-85%
2043	896,9	3754,7	24%	25%
Promedio	641,5	2907,6	22%	-11%
2070	525,9	2546,1	21%	-27%
2071	454,0	2545,1	18%	-37%
2072	750,4	3323,3	23%	5%
2073	714,7	2916,4	25%	0%
Promedio	611,2	2832,7	22%	-15%
2097	27,1	955,1	3%	-96%
2098	415,9	2903,7	14%	-42%
2099	528,3	2806,5	19%	-26%
2100	266,7	2224,4	12%	-63%
Promedio	309,5	2222,4	14%	-57%

Resumen estadístico de la recarga potencial directa (RPD) total anual, promedio espacial para la zona de estudio. En el escenario RCP 8.5				
Año	Recarga potencial directa (mm/año)	Precipitación (mm/año)	RPD/P	RPD respecto al periodo base
Promedio escenarios RCP	520,7	2654,2	19%	-27%

Tabla 24. Resumen de los cambios en las variables analizadas en el escenario RCP 8.5

Año	RPD (mm/año)	P (mm/año)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	ETP (mm/año)	ETR (mm/año)
2015	567,6	2570,9	31,9	24,3	1572,3	1319,9
2016	773,7	3025,1	32,4	24,2	1617,9	1332,9
2017	837,2	3199,0	32,0	23,6	1607,6	1459,2
2018	689,3	2873,2	31,8	23,7	1585,0	1409,9
Promedio	716,9	2917,0	32,0	24,0	1595,7	1380,5
2040	874,2	3296,8	31,3	23,7	1524,4	1304,2
2041	685,4	3155,4	31,6	24,0	1525,6	1321,3
2042	109,5	1423,5	33,0	25,0	1617,0	1097,5
2043	896,9	3754,7	32,5	25,3	1524,9	1182,8
Promedio	641,5	2907,6	32,1	24,5	1548,0	1226,4
2070	525,9	2546,1	32,2	25,2	1491,9	1197,4
2071	454,0	2545,1	33,2	26,0	1552,1	1241,6
2072	750,4	3323,3	32,6	25,5	1522,5	1179,2
2073	714,7	2916,4	32,2	24,9	1519,5	1175,4
Promedio	611,2	2832,7	32,5	25,4	1521,5	1198,4
2097	27,1	955,1	34,7	27,0	1651,4	854,7
2098	415,9	2903,7	33,7	27,0	1521,1	1078,1
2099	528,3	2806,5	32,8	25,7	1526,5	1199,8
2100	266,7	2224,4	33,2	25,9	1553,5	1183,0
Promedio	309,5	2222,4	33,6	26,4	1563,1	1078,9
Promedio total	520,7	2654,2	32,7	25,4	1544,2	1167,9

Tabla 25. Resumen de los cambios porcentuales en las variables analizadas en el escenario RCP 8.5

Año	cambio % RPD	cambio % P	cambio % Tmax	cambio % Tmin	cambio % ETP	cambio % ETR
2040	22%	13%	-2%	-1%	-4%	-6%
2041	-4%	8%	-1%	0%	-4%	-4%
2042	-85%	-51%	3%	4%	1%	-20%
2043	25%	29%	2%	6%	-4%	-14%
promedio	-11%	0%	0%	2%	-3%	-11%
2070	-27%	-13%	1%	5%	-7%	-13%
2071	-37%	-13%	4%	8%	-3%	-10%
2072	5%	14%	2%	6%	-5%	-15%
2073	0%	0%	1%	4%	-5%	-15%
promedio	-15%	-3%	2%	6%	-5%	-13%
2097	-96%	-67%	8%	13%	3%	-38%
2098	-42%	0%	5%	13%	-5%	-22%
2099	-26%	-4%	2%	7%	-4%	-13%

2100	-63%	-24%	4%	8%	-3%	-14%
promedio	-57%	-24%	5%	10%	-2%	-22%
Promedio total	-27%	-9%	2%	6%	-3%	-15%

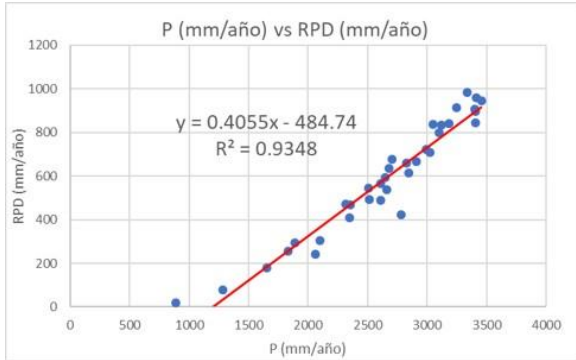


Figura 53. Relación entre la precipitación y la Recarga Potencial Directa.

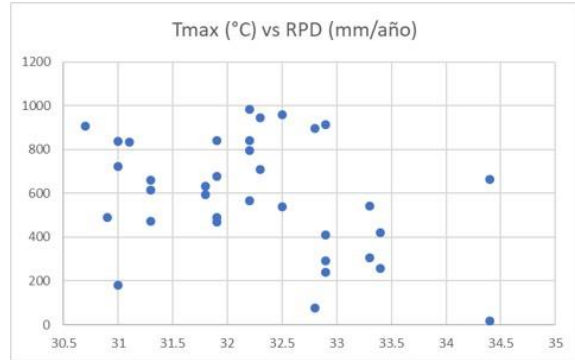


Figura 54. Relación entre la temperatura máxima y la Recarga Potencial Directa.

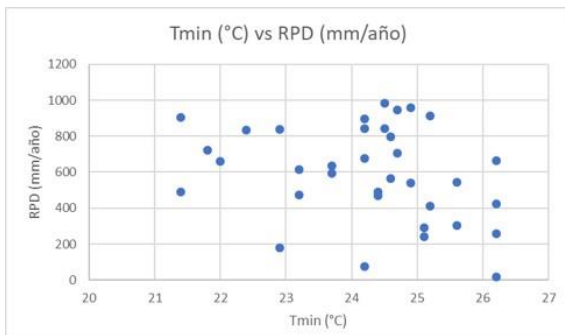


Figura 55. Relación entre la temperatura mínima y la Recarga Potencial Directa.

3.3. SIMULACIÓN DE FLUJO E IMPACTOS

Las condiciones de frontera del modelo numérico se muestran en la **Figura 56**, Los drenajes son utilizados para representar la relación del acuífero con los humedales cercanos al río León y se agregan dos ríos con respecto al modelo de (J. Duque & Betancur, 2017), Los datos de los caudales de extracción de los pozos fueron actualizados con la información de las concesiones vigentes de la corporación. La validación y calibración del modelo se realizó utilizando los datos de niveles piezométricos obtenidos con los piezómetros de la red de monitoreo de la corporación con los valores promedios para el periodo base estos se presentan en la **Figura 57**. En la **Tabla 26** se presentan los valores observados como un promedio de las mediciones de los años 2015 a 2018 y los valores simulados como resultado del modelo estacionario corrido en Modflow 2005. Y en la **Figura 58** se presenta el ajuste del modelo con un RMSE de 6,67 m y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.86, valores aceptables para un modelo regional y para la resolución de celda propuesta. También

se resalta que los puntos de la red de monitoreo se encuentran distribuidos en todas las zonas del acuífero, por lo que los resultados son representativos del modelo

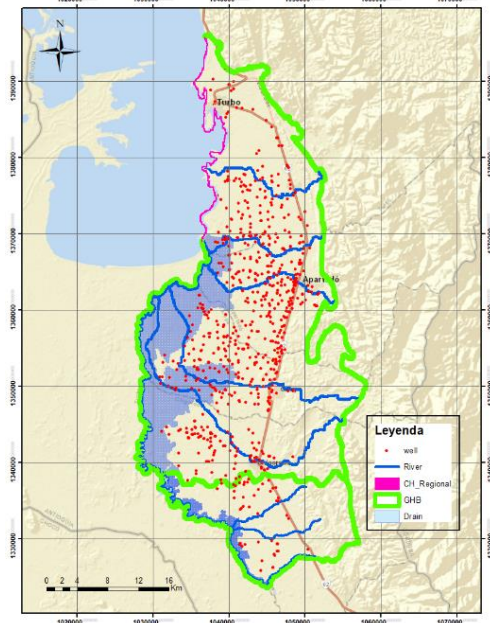


Figura 56. Condiciones de frontera utilizadas para el modelo numérico.

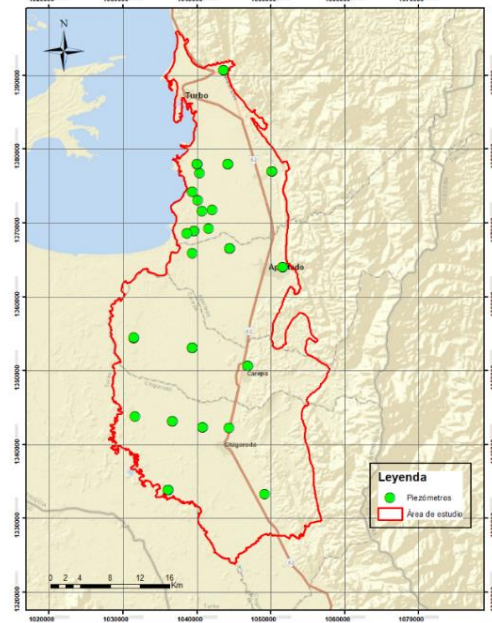


Figura 57. Piezómetros utilizados para validar el modelo numérico construido.

Tabla 26. Valores observados y simulados en metros

Código	Valor simulado	Valor observado	Diferencia	Código	Valor simulado	Valor observado	Diferencia
PzC-01	2,20	5,35	-3,15	PzC-22	33,32	28,97	4,36
PzC-02	3,77	4,48	-0,72	PzC-23	20,10	9,86	10,24
PzC-03	2,02	2,02	0,00	PzC-24	20,18	9,59	10,59
PzC-04	2,02	3,11	-1,09	PzC-25	20,27	11,63	8,64
PzC-05	2,23	3,98	-1,75	PzC-26	2,46	5,35	-2,89
PzC-06	8,92	6,34	2,58	PzC-27	2,46	4,01	-1,55
PzC-07	5,92	2,97	2,95	PzC-29	34,19	32,24	1,95
PzC-08	4,94	4,30	0,64	PzC-30	34,27	32,79	1,48
PzC-09	2,99	5,73	-2,74	PzC-31	16,06	6,51	9,55
PzC-10	4,78	5,29	-0,51	PzC-32	15,99	5,81	10,18
PzC-11	36,02	25,67	10,35	PzC-33	16,11	10,08	6,03
PzC-12	25,98	12,97	13,01	PzC-34	26,60	34,92	-8,32
PzC-13	26,03	12,90	13,12	PzC-35	26,57	27,71	-1,14
PzC-14	25,34	19,75	5,59	PzC-36	26,68	28,84	-2,16
PzC-15	25,30	20,28	5,02	PzC-37	14,71	7,69	7,02
PzC-16	6,56	6,77	-0,21	PzC-38	14,69	8,39	6,31
PzC-17	52,13	44,11	8,02	PzC-39	14,83	9,40	5,43
PzC-18	10,24	22,66	-12,42	PzC-40	19,64	20,37	-0,73
PzC-19	10,24	21,81	-11,57	PzC-41	19,95	18,50	1,45

Código	Valor simulado	Valor observado	Diferencia	Código	Valor simulado	Valor observado	Diferencia
PzC-20	10,23	19,46	-9,22	PzC-42	3,70	-0,20	3,90
PzC-21	33,31	21,72	11,60	PzC-43	3,69	-1,24	4,92
				PzC-44	3,72	1,67	2,05

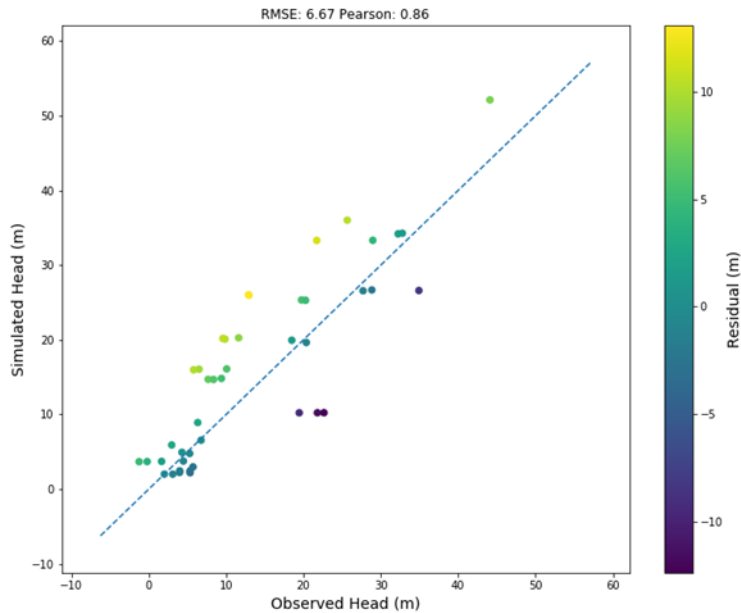


Figura 58. Ajuste del modelo con un RMSE de 6,67 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.86

En la **Figura 59** se presenta la superficie piezométrica obtenida para la capa 1, en el tramo donde ella fue definida. En la **Figura 60** se presenta la piezometría modelada para la capa 2, y en la **Figura 61** se presenta la piezometría modelada para la capa 3.

Los resultados de la modelación del periodo base demuestra para la zona costera y la franja contigua al río León, superficies piezométricas con valores entre 0 y 8 metros, resultado validados por la existencia de pozos de surgente (Paredes Zúñiga et al., 2010) los niveles más altos se encuentran en zonas cercanas a la serranía de Abibe.

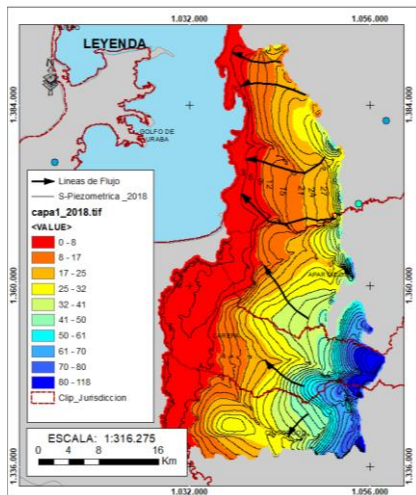


Figura 59. Superficie piezométrica modelada para la capa 1.

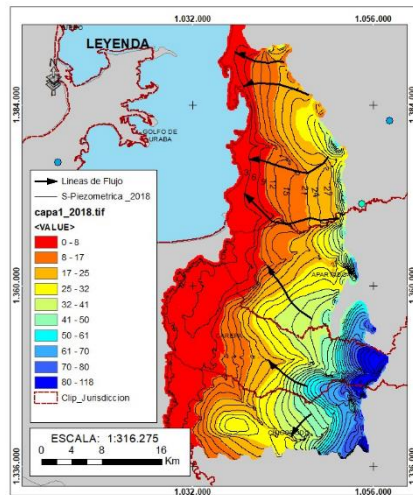


Figura 60. Superficie piezométrica modelada para la capa 2

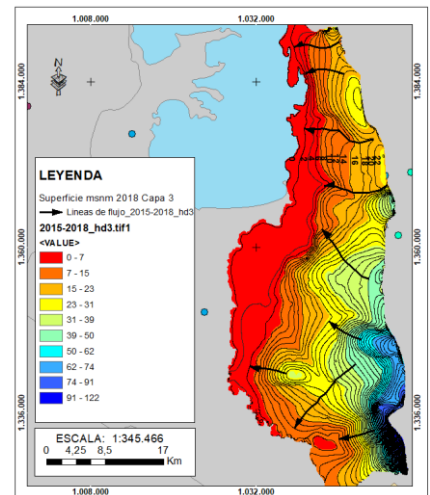


Figura 61. Superficie piezométrica modelada para la capa 3.

En la **Figura 62**, **Figura 63**, **Figura 64**, se representan los resultados de la modelación de las superficies piezométricas en los escenarios RCP 2.6 y 8.5. Igualmente en las **Tabla 27**, **Tabla 28** se presenta el cambios en la superficie piezométricas con relación al periodo base. Los resultados de los niveles se presentan en metros sobre el nivel del mar (msnm) para las tres capas modeladas.

En el escenario RCP 2.6 para el periodo de modelación 2020-2040 en las capas 1, 2 y 3, se generaron en la zona sur de área de estudio descensos entre 1 y 3.5 metros, con tan solo la reducción en un 8% en la recarga para este periodo.

En el escenario RCP 2.6 para el periodo 2040-2070 en las capas 2 y 3, un aumento en la recarga de 17% representaría un ascenso de 7 metros en la zona centro y de 5 en la zona sur en los niveles piezométricos. Los niveles de la capa 3 son los más afectados negativamente, con una reducción de 0.5 msnm en la zona costera y la franja contigua al río León.

En el escenario RCP 2.6 para el periodo 2070-2100 en las tres capas de modelo, se presenta una disminución de la superficie piezométrica entre 1 y 3.5 metros, esto generado por una reducción en la recarga del 19%.

En el escenario RCP 8.5 para los periodos de modelación periodo 2018-2040 y 2040-2070 en las tres capas de modelo numérico, se generaron en la zona sur de área de estudio disminución entre 1 y 3.5 metros, respondiendo a la reducción en la recarga en un 12% en el cambio de la recarga en el primero periodo y de un 16% para el último periodo.

En el escenario RCP 8.5 para el periodo de modelación periodo 2070-2100, a causa de una reducción en la recarga del 58% en comparación con el periodo base, se presentarán las mayores disminuciones en las tres capas de modelo numérico de flujo entre los cinco metros la zona norte y de 11 metros en la zona sur del área de estudio.

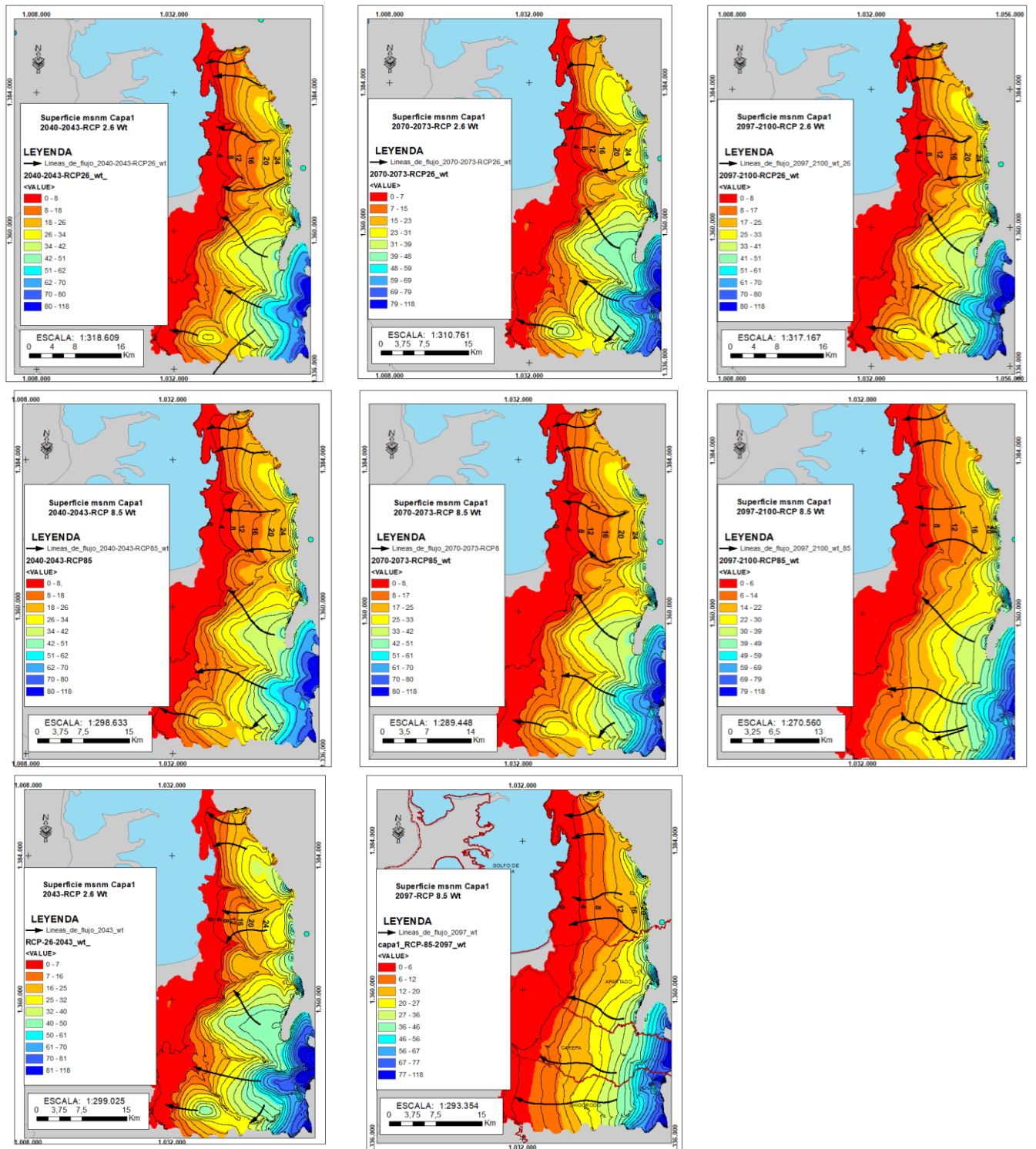


Figura 62. Nivel piezométrico para la capa 1.

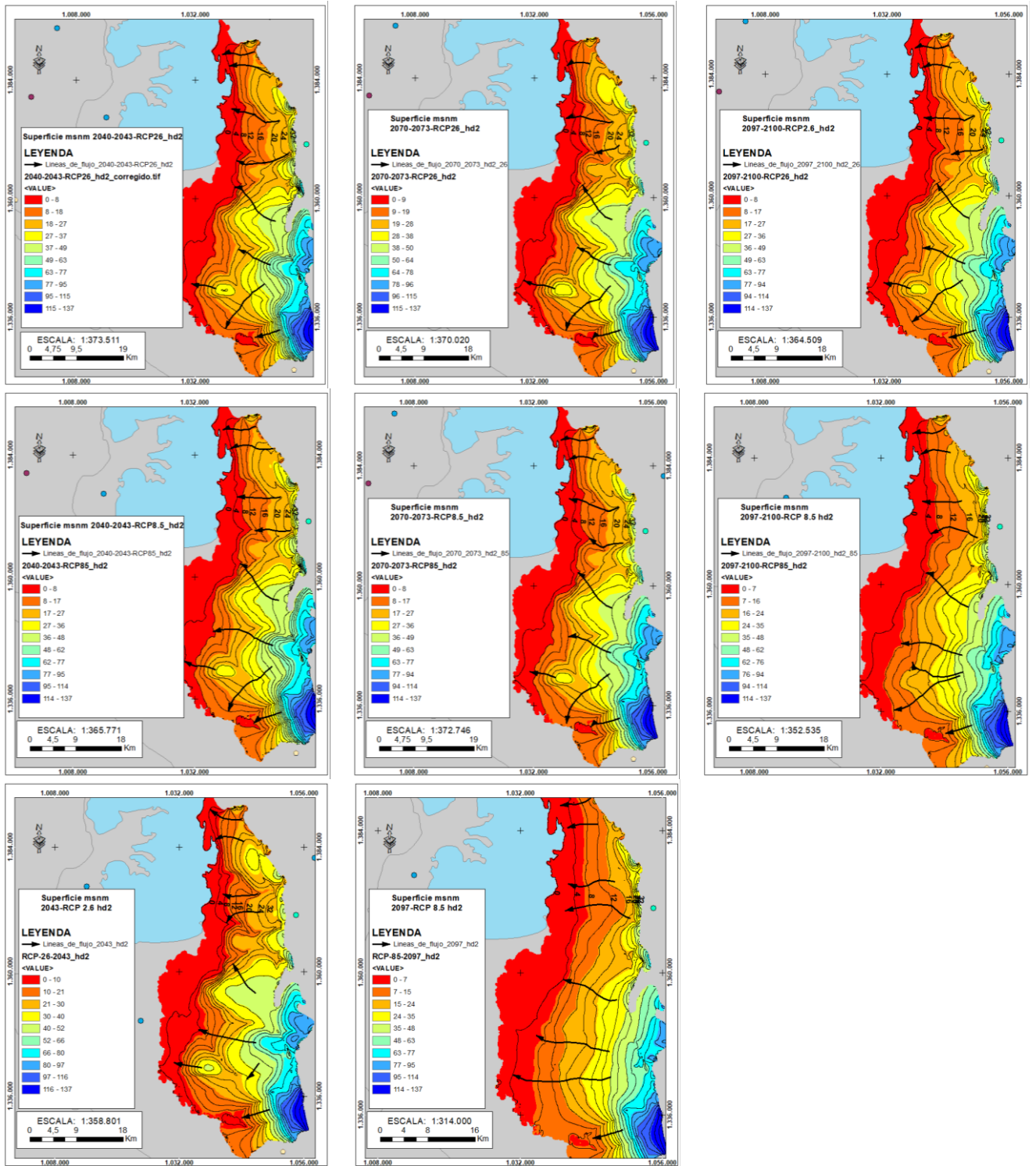


Figura 63. Nivel piezométrico para la capa 2.

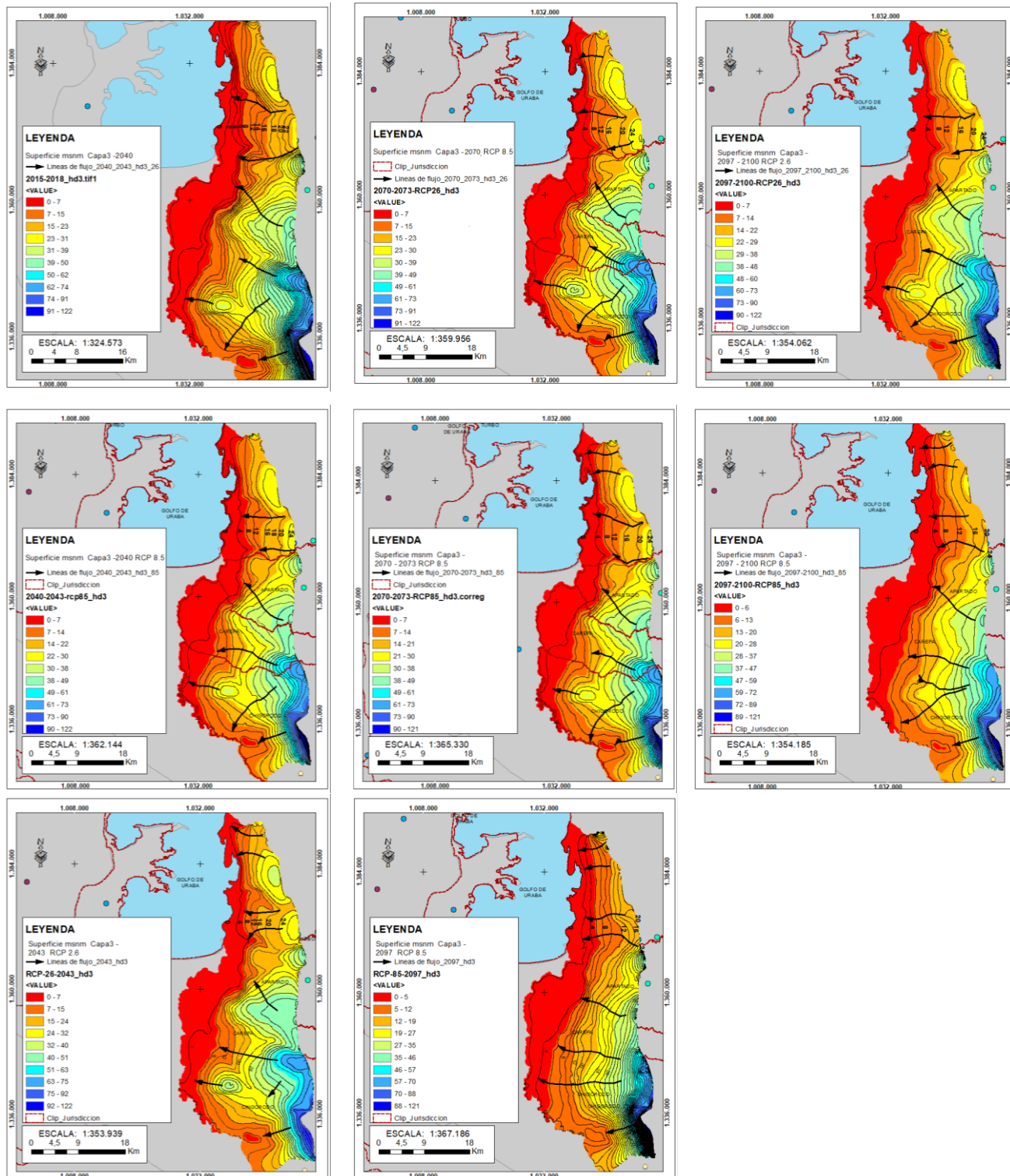


Figura 64. Nivel piezométrico para la capa 3

Tabla 27. cambios en la superficie piezométricas con relación al periodo base (2015-2018) en el escenario 2.6

Periodo	Escenario	PZ 1	PZ 2	PZ 3	ETP	ETR	P	Recarga	Tmax	Tmin
2040-2043	RCP 2,6 (optimista)	1%	1%	1%	-4%	-15%	0%	-8%	-1%	1%
2070-2073		8%	6%	7%	-4%	-12%	17%	15%	-2%	0%
2097-2100		-2%	-2%	-2%	-3%	-18%	-5%	-19%	-1%	0%

Tabla 28. cambios en la superficie piezométricas con relación al periodo base (2015- 2018) en el escenario 8.5

Periodo	Escenario	PZ 1	PZ 2	PZ 3	ETP	ETR	P	Recarga	Tmax	Tmin
2040-2043	RCP 8,5 (Pesimista)	1%	0%	0%	-3%	-12%	0%	-12%	0%	2%
2070-2073		0%	-1%	0%	-5%	-14%	-3%	-16%	2%	6%
2097-2100		-15%	-12%	-13%	-2%	-23%	-24%	-58%	5%	10%

*PZ1=Nivel piezométrico en la capa 1

*PZ2=Nivel piezométrico en la capa 2

*PZ3=Nivel piezométrico en la capa 3

*ETP=Evapotranspiración

*ETR=Evapotranspiración real

*P= Precipitación

4. DISCUSIÓN

4.1. SOBRE LOS ESCENARIOS LOCALES

La física de los fenómenos meteorológicos a escala local no es reflejada de manera evidente en los modelos de predicción de cambio Climático. La escala espacial y temporal a las que convencionalmente se procesa la información de insumo para los modelos, se vuelve insuficiente respecto a la variabilidad climática y al número de fenómenos locales que suceden en esta zona de Colombia, en donde las dinámicas climatológicas andinas y del caribe interactúan. En la actualidad se han concentrado esfuerzos en la aplicación de métodos estadísticos que apuntan a detallar la información o el uso de supercomputadoras que procesan mayor cantidad de información en pro de generar predicciones con mayor certidumbre. Estos esfuerzos aun no representan una evidente mejora en la predicción de variables como precipitación y temperatura a escala local (Acevedo Aristizábal, 2009).

En concordancia con lo anterior y como resultado de la investigación, ningún modelo de circulación global del proyecto CMIP5 evaluados representa adecuadamente el ciclo anual de precipitación y temperatura en la región, sin embargo, el modelo que más cercano está de hacerlo es el modelo CMCC-CMS, siendo esto coherente con la evaluación de los modelos globales del CMIP5 evaluados por Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez (2017)

(J. P. Sierra et al., 2015, 2018) con la implementación de múltiples modelos de variabilidad estacional de la precipitación - CMIP5, evidencia como cada uno de los modelos muestra el paso de la zona de convergencia intertropical ZCIT por el norte de los Andes Colombianos y cómo cuesta a los modelos representar de manera realista la predicción durante los meses de DJF (diciembre, enero y febrero) y MAM (marzo, abril y mayo), asociados a la magnitud de los fenómenos locales climáticos como el Chorro del Chocó y el Chorro del Caribe.

También indica que en los modelos el aumento de las precipitaciones promedios mensuales incrementa considerablemente las desviaciones estándares, y habla sobre la posible importancia del rol de la vegetación local en las rutas preferenciales en la advección de humedad en la atmosfera.

Igualmente, para tener mejor representación de la variabilidad climática local se incluyeron los modelos del proyecto Cordex, de los cuales el modelo MIROC5 fue el que mostró mejores resultados, dado que representa mejor el efecto de la topografía en la precipitación.

El análisis de tendencias de los datos históricos pudo evidenciar un aumento en la temperatura media para la zona de estudio de cerca de 0.5 °C entre 1984 y 2018; por parte de la precipitación se ha presentado un aumento cercano al 18% en algunas zonas del área de estudio, esto es coherente con los resultado presentado por (Mayorga et al., 2011). Lo anterior muestra que los cambios en las variables modeladas en escenarios de cambio climático se encuentran dentro del orden de magnitud de los cambios evidenciados con análisis estadístico de los datos observados.

Los resultados de los modelos climáticos globales (MCG) y los modelos climáticos regionales (MCR) muestran sesgos sistemáticos en relación con las observaciones de

diferentes fuentes, como errores en la parametrización de convección y orografía a gran escala, variabilidad irreal a gran escala y variabilidad interna impredecible, diferente, a la de las observaciones (Cannon et al., 2015; Lee & Singh, 2018). Por lo que fue necesario realizar la corrección de sesgos.

Los escenarios locales de cambio climático generados en la investigación, muestran en general un aumento de la precipitación y la temperatura según el modelo MIROC5 del proyecto Cordex y el modelo CMCC-CMS del CMIP5. Estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos con el análisis estadístico de los datos históricos de las estaciones del IDEAM (Mayorga et al., 2011) y los resultados obtenidos por el tercer comunicado de cambio climático del IDEAM (Armenta et al., 2014) y (Mayorga et al., 2011). Igualmente concuerdan con los estudios realizados preliminarmente, en los que se indica un aumento de la precipitación para la zona de 18mm/año (Mayorga et al., 2011).

Se recomienda utilizar los datos corregidos con la técnica de Quantile Mapping y la desagregación espacial con Kriging Bayesiano empírico, ya que mostró mejor desempeño que los otros métodos. Por último se recomienda el uso del Modelo MIROC5 del proyecto Cordex, ya que este es un modelo climático regional y representa mejor el efecto de la topografía en la precipitación, además para este modelo se tienen los escenarios RCP 2.6 y 8.5 los cuales representan los dos casos extremos de la proyecciones de cambio climático. Para el caso de la precipitación y el escenario RCP 8.5 se ve una disminución de la precipitación para el periodo 2070-2100, escenario que no muestra el modelo CMCC-CMS, se considera relevante evaluar este escenario con disminución de la precipitación para abarcar un mayor rango de posibilidades de escenarios de cambio climático.

Los resultados presentados en este documento permiten conocer los impactos que en algunos componentes del recurso hídrico se podrían generar producto de cambios climáticos; situación que repercutiría sobre la funcionalidad de los ecosistemas y el abastecimiento de agua para 368.914 personas que viven en la región

4.2. SOBRE LA RECARGA

Los cambios en la recarga directa de las aguas subterráneas están determinados por los cambios en la temperatura, evaporación y la precipitación (T. Green, 2016; T. R. Green et al., 2011; Kumar, 2012). En los escenarios evaluados la recarga potencial directa muestra una variación espacio- temporal entre 19 y 987 mm/año, siendo la precipitación la variable que más influye en la recarga. Condición también obtenida por parte de Li et al. (2020).

Las temperaturas máxima y mínima, requeridas para la evaluación de la evapotranspiración por el método de (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985) desembocan en escenarios según los cuales esta variable siempre disminuye.

La variación de los rangos de recarga depende de los escenarios seleccionado; sin embargo, en el escenario RCP 8.5 se reporta los cambios más extremos, del 58% para el periodo 2070-2100, siendo el año con más impacto el 2097 con una reducción en la recarga de un 97%. Debido a que los escenarios RCP 8.5 son los más desfavorable según los cuales las emisiones antrópicas de gases efecto invernadero continúan aumentando.

Se estimó un porcentaje de recarga con relación a precipitación en promedio de 23% para todos años del escenario RCP 2.6 y del 19% el escenario RCP 8.5. En ninguno de los años recarga potencial sobrepasa al 30% de precipitación. Se determinó que las zonas mayormente impactadas por la reducción de la recarga serían la zona norte en el municipio de Turbo y la zona sur entre el municipio de Carepa y Chigorodó.

Se debe—realizar un análisis de sensibilidad con distintos métodos para calcular la evapotranspiración, debido a la gran dependencia de la recarga con la precipitación. Por otra parte, es recomendable evaluar otros métodos de interpolación para obtener más exactitud en las superficies calculadas. De igual forma (Bastidas Osejo, 2019) recomienda realizar análisis de sensibilidad para la capacidad de campo, el número de curva, la tasa máxima de recarga. Un resultado importante de este trabajo es la **Figura 53** con la cual se puede estimar los efectos que tiene los cambios en precipitación en la recarga potencial directa.

A pesar de las incertidumbres que tienen los modelos utilizados, los resultados también son útiles para identificar áreas donde el impacto del cambio climático sería más fuerte. En estas zonas, es necesario realizar investigaciones específicas para proporcionar una evaluación más detallada de los valores e incertidumbres futuros y proponer medidas de adaptación frente a los impactos identificados.

Teóricamente la precipitación y la radiación neta son las variables que determinan la recarga, y su variabilidad espacio-temporal determina los impactos de futuros escenarios climáticos potenciales sobre los recursos renovables de agua subterránea. No fueron considerados los cambios en otras variables que afectan la recarga, como son las propiedades del suelo, los patrones de vegetación y el uso de la tierra. Estos fueron considerados estáticos, a pesar de que se espera que cambien de acuerdo con las fuerzas impulsoras del clima global y las nuevas acciones humanas a escala local que serán inducidas por todas las actividades socioeconómicas que se desarrollan en el territorio (Martínez-Valderrama et al., 2016; Pulido-Velazquez et al., 2018).

Por lo anterior y de acuerdo con (Mensah et al., 2022). se deberán incluir en los nuevos escenarios de cambio climático, una estrategia de modelado que integre los cambios en el uso de la tierra, crecimiento poblacional, demanda del recurso, junto con un modelo hidrológico como una herramienta útil para evaluar la influencia del cambio de uso de la tierra y el cambio climático en la recarga de agua subterránea.

4.3. SOBRE EL MODELO DE FLUJO

Con la creciente preocupación por el cambio climático global, ha aumentado el interés en predecir cambios en la precipitación y la temperatura que alteran los climas y el sistema hidrológico (Patil et al., 2020). Existen varios modelos climáticos globales (GCM) y regionales disponibles para comprender el clima y proyectar el cambio climático. El resultado de estos modelos acoplados ayuda a cuantificar la recarga de agua subterránea y ayudará a

tomar estrategias de adaptación adecuadas debido al impacto del cambio climático (Kumar, 2016).

Utilizando y ajustando un modelo de flujo (J. C. Duque & Betancur, 2017) para el sistema acuífero del golfo de Urabá se identificaron las zonas que podrían tener mayor impacto al cambio climático bajo los escenarios RCP 2.6 y 8.5 para los periodos 2018-2040, 2040-2070, 2070-2100.

Con la modelación numérica de flujo en los diferentes escenarios, se observa en todas las superficies piezométricas una dirección de flujo con tendencia sureste-noreste, Es decir en la zona norte de la serrana del Abibe hacia el Golfo de Urabá y la zona norte hacia el río León. Se pudieron identificar dos zonas principales que serán impactadas. La primera, hacia el norte en el municipio de Turbo cerca al casco urbano, es un sitio estratégico en donde se ubican la mayoría de los pozos de abastecimiento del casco urbano. Esta zona podría tener disminución en los niveles freático y piezométricos, cercanos a los 3.5 metros según los escenarios RCP 2.6 para en los periodos de modelación 2018-2040 y 2070-2100. Igualmente, bajo el escenario RCP 8.5 la zona podría tener descensos entre 3.5 y 11 metros en los niveles freáticos y piezométricos. Sumado a esto, los descensos generados por la explotación de la captación, podrían generar cambios en la dirección de flujo en el acuífero provocados por los grandes conos de abatimiento de se generarían. Igualmente, al tener niveles más profundos de lo habitual, la disponibilidad de agua para abastecimiento se reduce, el costo energético para la operación de los pozos aumentaría y la vida útil de las captaciones se vería afectada.

La segunda zona de afectación se encuentra hacia el sur entre el casco urbano del municipio de Carepa y Chigorodó. Esta es un área actualmente dedicada a la producción agrícola mediante el cultivo de banano. De acuerdo con los escenarios RCP 2.6 y 8.5 para los periodos de modelación 2018-2040 y 2070-2100, esta zona también podría experimentar descensos entre 3.5 y 11 metros en los niveles freáticos y piezométricos. Dado este impacto sobre los niveles freáticos, la extracción de agua de los acuíferos confinados aumentaría por las necesidades de agua para suplir el déficit hídrico de los cultivos. Al igual que la zona norte, los descensos generados por la explotación de la captación, provocaría cambios en la dirección de flujo en el agua de los acuíferos generado por grandes conos de abatimiento. Igualmente, la disponibilidad de agua para el riego se reduce, al tener lo niveles más profundo de lo habitual. El costo de la operación de los sistemas de riego aumentaría considerablemente y la vida útil de las captaciones se vería afectada.

De acuerdo con (Klaas et al., 2020) para ayudar a la comunidad a manejar el déficit hídrico durante los períodos secos esperados, se deberán proponer estrategias adaptativas principales, medidas socioculturales, técnicas y ecológicas. Teniendo en cuenta la escala de prioridad y urgencia temporal de cada medida, todas las partes interesadas, incluidos los tomadores de decisiones, el planificador regional y la comunidad, podrían implementar las estrategias de gestión para adaptarse al cambio climático esperado y mitigar los impactos adversos en términos de déficit hídrico durante los períodos secos (Mourot et al., 2022)

Dado que la zona costera podría verse afectada por los cambios en los niveles freáticos y piezométricos, se deberá ampliar el modelo de flujo utilizado hasta la zona costera y evaluar los impactos en la calidad química del agua subterránea.

El presente estudio recomienda la implementación de las mejores prácticas de manejo de cuencas para mejorar la reserva de agua subterránea. Igualmente se deberá evaluar la capacidad adaptativa para cada sector y plantear medidas de adaptación en las zonas mal vulnerables.

5. CONCLUSIONES

A partir de la exploración de modelos climáticos globales y regionales y su correlación con información procedente de series históricas de precipitación y temperatura, se encontró una buena coherencia en relación a la precipitación siendo los mejores modelo el CMCC-CMS de CMIP5 con un coeficiente de correlación de 0.51 un sesgo de -24 mm y un RMSE de 148 mmy el modelo MIROC5 del proyecto cordex con un coeficiente de correlación de 0,49 un sesgo de -113,12 mm y un RMSE de 182mm; no ocurre lo mismo con la temperatura en cuyo caso ningún modelo logró una correlación mayor a 0.38.

Teniendo en cuenta los modelos que registran un mejor desempeño se aplicó downscaling estadístico con corrección y desagregación espacial, para obtener los escenarios locales.

Para la zona de recarga directa los resultado de los escenarios para el modelo MIRCO5 del proyecto Cordex al ser comparado con el periodo base (2015-2018) muestran en escenario RCP 8.5 para el periodo 2097-2100 una disminución de la precipitación del 24% y un aumento de la temperatura máxima y mínima del 5 y 10% respectivamente, en escenario RCP 2.6 para el periodo 2070-2073 muestra un aumento de la precipitación del 17% y una disminución de la temperatura máxima del 2% la temperatura mínima permanece en promedio igual al periodo base. Estos dos periodos muestran el rango de variación de precipitación y temperatura que se obtiene en los escenarios locales de cambio climático modelados.

Los cálculos de balance hídrico, bajo el escenarios más desfavorable RCP 8.5 del modelo MIROC5 considerados de interés y utilizando el método Soil Water Balance-SWB muestran, en relación con la recarga que: para dicho escenario hay una disminución en la recarga de un 11% para el periodo 2040-2043, de 15% para el periodo 2070-2073 y de 57% para el periodo 2097-2100, Siendo el año más crítico de los modelados es el año 2097 con una reducción de la precipitación (70%) y aumento de la temperatura máxima y mínima 11 % y 20 % respectivamente, estos cambios se ven reflejados con una reducción del 96 % en la recarga.

La modelación numérica de flujo de aguas subterráneas, considerando las condiciones de cambios en variables hidrológicas por efectos del cambio climático muestran que las zonas más afectadas por descenso en niveles freáticos y piezométrico se darían en dos zonas principales. La primera hacia el norte en el municipio de Turbo cerca al casco urbano, zona donde se encuentran ubicados los pozos de abastecimiento del casco urbano y la segunda zona al sur del acuífero, entre el casco urbano del municipio de Carepa y Chigorodó. Esta es un área actualmente dedicada a la producción agrícola mediante el cultivo de banano que podría generar grandes abatimientos en el acuífero.

Este es el primer ejercicio que se realiza en el país que involucra downscaling para obtener escenarios locales y predecir efectos del cambio climático sobre el agua subterránea. Pese a la incertidumbre asociada a la modelación los resultados constituyen un aporte a ser tenido en cuenta en términos de gestión a mediano y largo plazo, puesto que se permiten conocer los posibles impactos sobre el recurso hídrico subterráneo, para posteriormente plantear medidas de mitigación y adaptación frente al cambio climático, buscando mantener la funcionalidad de los ecosistemas y el abastecimiento de agua para consumo humano.

6. AGRADECIMIENTOS

Enormemente agradecido con CORPOURABA por brindarme la oportunidad de integrar el conocimiento e información a esta investigación. Especialmente a la directora Vanessa Paredes por la confianza y creer en este proyecto, y a Teresita Betancur por darle rumbo a esta tesis. A Brayan, David, Pedro, Juliana Ossa, Juan Manuel por ayudarme.

7. REFERENCIAS

- Acevedo Aristizábal, L. A. (2009). Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., ... Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *111*(5), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Armenta, G., Dorado, J., Rodríguez, A., & Ruiz, J. (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM*.
- Bastidas Osejo, B. D. (2019). *MODELO CONCEPTUAL DE LA RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL NIVEL SOMERO DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO GOLFO DE URABÁ, EVALUANDO SU MAGNITUD Y VARIABILIDAD ESPACIO – TEMPORAL* Breiner Dan Bastidas Osejo Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería , *Escuel*. Universidad de Antioquia.
- Betancur-Vargas, T., García-Giraldo, D. A., Vélez-Duque, A. J., Gómez, A. M., Flórez-Ayala, C., Patiño, J., & Ortiz-Tamayo, J. Á. (2017). 1) Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *Biota Colombiana*, *18*(1), 1–28. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n01a1>
- Bolaños Chavarría, S., & Betancur Vargas, T. (2018). Estado del Arte sobre el Cambio Climático y las Aguas Subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*,

14(26), 52–64. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a5>

- Bong, T., Son, Y.-H., Yoo, S.-H., & Hwang, S.-W. (2018). Nonparametric quantile mapping using the response surface method–bias correction of daily precipitation. *Journal of Water and Climate Change*, 9(3), 525–539.
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Cadavid Valencia, S. (2015). *Metodología para estimar caudales medios y extremos en escenarios de cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Campillo, A. K., Taupin, J. D., Betancur, T., Patris, T., Vergnaud, N., Paredes, V., & Villegas, P. (2020). A multi-tracer approach for understanding the functioning of heterogeneous phreatic coastal aquifers in humid tropical zones. *Hydrological Sciences Journal*.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959.
- Chavarría, S. B., & Vargas, T. B. (2018). Estado del Arte sobre el Cambio Climático y las Aguas Subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52–64.
- Chaves, B., & Jaramillo, A. (1998). *Regionalización de la temperatura del aire en Colombia*.
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 47(9), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010WR009827>
- CORPOURABA. (2019). *R-PG-06: INFORME DE GESTIÓN AÑO 2018 Versión 06*. http://www.corpoamazonia.gov.co/region/Putumayo/Municipios/Ptyo_Mocoa.html
- CORPOURABA, & Universidad de Antioquia. (2016). *Plan de Manejo Ambiental de Acuífero Sistema Hidrogeológico Golfo de Urabá*.
- DANE. (2019). *Censo nacional de población y vivienda 2018—Colombia*.
- Dripps, W.R., & Bradbury, K. R. (2007). *A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas* (p. 15). Springer-Verlag, P.O. Box 2485 Secaucus NJ 07096-2485 USA, [mailto:orders@springer-ny.com], [URL: <http://www.springer-ny.com/>].
- Dripps, Weston R. (2004). *The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the Trout Lake Basin of northern Wisconsin*.
- Duque, J., & Betancur, T. (2017). *MODELACIÓN MULTI-ESCALA DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MEDIOS HIDROGEOLÓGICOS COMPLEJOS*. Universidad de Antioquia.
- Duque, J., Betancur, T., Garcia, T., Palacio, P., & V, P. (2016). *Modelación Numérica multi-*

escala para la identificación de sistemas de flujo. caso de estudio: acuífero multicapa, eje bananero del Urabá antioqueño-Colombia.

- Duque, J. C., & Betancur, T. (2017). MODELACIÓN MULTI-ESCALA DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MEDIOS HIDROGEOLÓGICOS COMPLEJOS. *Universidad de Antioquia*.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.
- Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Rojas, S., Aponte, C., Quiñones, M., Acevedo, Ó., Vilardy, S., & Jaramillo, Ú. (2016). Identificación espacial de los sistemas de humedales continentales de Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 44–62.
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Green, T. (2016). *Linking Climate Change and Groundwater BT - Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges* (A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo, & A. Ross (eds.); pp. 97–141). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_5
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H., & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3–4), 532–560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- Gregory, J., Stouffer, R. J., Molina, M., Chidthaisong, A., Solomon, S., Raga, G., Friedlingstein, P., Bindoff, N. L., Le Treut, H., & Rusticucci, M. (2007). *R4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Skaugen, T. E. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping—a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9(5), 6185–6201.
- Hanson, R. T., Flint, L. E., Flint, A. L., Dettinger, M. D., Faunt, C. C., Cayan, D., & Schmid, W. (2012). A method for physically based model analysis of conjunctive use in response to potential climate changes. *Water Resources Research*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2011WR010774>
- Havril, T., Tóth, Á., Molson, J. W., Galsa, A., & Mádl-Szónyi, J. (2018). Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? *Journal of Hydrology*, 563, 1169–1180.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>

IDEAM. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisione- Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicacion Nacional de Cambio Climatico. In *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climatico*.

IDEAM, Oviedo Torres, B. E., & Aristizábal León, G. (2010). Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. *Instituto de Hidrología , Meterología y Estudios Ambientales*, 89. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Guía+Escenarios+Cambio+Climati+co.pdf/72eae24f-04ea-4ce2-9a4b-e551559c48fc>

IPCC. (2013a). *Glosario*.

IPCC. (2013b). Preguntas frecuentes Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Jaimes Borda, M. (2015). *Modelación avanzada de los efectos del cambio climático en el acuífero litoral de La Plana de Oropesa–Torreblanca*.

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D., & Ross, A. (2016). Integrated groundwater management: An overview of concepts and challenges. In A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo, & A. Ross (Eds.), *Integrated groundwater management* (pp. 3–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_1

Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530–1544.

Jalota, S. K., Vashisht, B. B., Sharma, S., & Kaur, S. (2018). Climate Change and Groundwater. In *Understanding Climate Change Impacts on Crop Productivity and Water Balance*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809520-1.00004-5>

Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Hegerl, G. C. (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, 20(8), 1419–1444. <https://doi.org/10.1175/JCLI4066.1>

Klaas, D. K. S. Y., Imteaz, M. A., Sudiayem, I., Klaas, E. M. E., & Klaas, E. C. M. (2020). Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. *Journal of Hydrology*, 582(April 2019), 124426. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124426>

Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C. B., Velasco, E., & Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 250–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>

Krzysztofowicz, R. (1999). Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic

- hydrologic model. *Water Resources Research*, 35(9), 2739–2750.
- Kumar, C. P. (2012). *Assessing the impact of climate change on groundwater resources*.
- Kumar, C. P. (2016). Impact of climate change on groundwater resources. *Natural Resources Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 3–2(April), 1094–1120. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0803-8.ch052>
- Lee, T., & Singh, V. P. (2018). *Statistical downscaling for hydrological and environmental applications*. CRC Press.
- Li, B., Biswas, A., Wang, Y., & Li, Z. (2020). Identifying the dominant effects of climate and land use change on soil water balance in deep loessial vadose zone. *Agricultural Water Management*, November, 106637. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106637>
- López-Geta, J. A., María, F. A. J., González, R., & Villarroja, F. (2007). Las aguas subterráneas Un recurso natural del subsuelo. In *Instituto Geológico y Minero de España*.
- Mair, A., Hagedorn, B., Tillery, S., El-Kadi, A. I., Westenbroek, S., Ha, K., & Koh, G.-W. (2013). Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, 501, 213–226.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienens, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themel, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Alcalá, F. J., Martínez-Vicente, S., Ruiz, A., & Puigdefábregas, J. (2016). Present and future of desertification in Spain: Implementation of a surveillance system to prevent land degradation. *Science of the Total Environment*, 563–564, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.065>
- Mayorga, R., Hurtado, G., Benavides, H., & Hurtado, G. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.(Colombia)*.
- McSweeney, C. F., Jones, R. G., Lee, R. W., & Rowell, D. P. (2015). Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics*, 44(11), 3237–3260.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383–1394.
- Mensah, J. K., Ofosu, E. A., Yidana, S. M., Akpoti, K., & Kabo-bah, A. T. (2022). Integrated modeling of hydrological processes and groundwater recharge based on land use land cover, and climate changes: A systematic review. *Environmental Advances*, 8, 100224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100224>

- Mourot, F. M., Westerhoff, R. S., White, P. A., & Cameron, S. G. (2022). Climate change and New Zealand's groundwater resources: A methodology to support adaptation. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *40*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101053>
- Ngai, S. T., Tangang, F., & Juneng, L. (2017). Bias correction of global and regional simulated daily precipitation and surface mean temperature over Southeast Asia using quantile mapping method. *Global and Planetary Change*, *149*, 79–90.
- Nychka, D., Furrer, R., Paige, J., & Sain, S. (2016). *Tools for Spatial Data*.
- Ossa-Valencia, J., & Betancur-Vargas, T. (2018). Hydrogeochemical characterization and identification of a system of regional flow. Case study: the aquifer on the Gulf of Urabá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, *86*, 9–18.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (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*. Ipcc.
- Paredes Zúñiga, V., Vargas Azofeifa, I., Vargas Quintero, M. C., & Arellano Hartig, F. (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *9*(17), 51–61.
- Pasini, S., Torresan, S., Rizzi, J., Zabeo, A., Critto, A., & Marcomini, A. (2012). Climate change impact assessment in Veneto and Friuli Plain groundwater. Part II: A spatially resolved regional risk assessment. *Science of the Total Environment*, *440*, 219–235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.096>
- Patil, N. S., Chetan, N. L., Nataraja, M., & Suthar, S. (2020). Climate change scenarios and its effect on groundwater level in the Hiranyakeshi watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, *10*(December 2018), 100323. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100323>
- Pernia Llera, J. M., & Fornés Azcoiti, J. M. (2009). Cambio Climático y Agua Subterránea. *Environmental and Engineering Geoscience*, *15*(3), 211–212. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.15.3.211>
- Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Alcalá, F. J. (2018). Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *Journal of Hydrology*, *567*, 803–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.077>
- Rwanga, S. S. (2013). A Review on Groundwater Recharge Estimation Using Wetpass Model. *International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 156–160.
- Sierra, J., Arias, P., & Vieira, S. (2016). Sobre la representación de la precipitación en el norte de Suramérica por los modelos Del CMIP5. *XXII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología - Sociedad Colombiana de Ingenieros*, November, 1–12.
- Sierra, J. P., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2015). Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015.

- Sierra, J. P., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Agudelo, J. (2018). How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia? *Climate Dynamics*, 51(5–6), 2247–2265.
- Sordo, C. (2006). *Técnicas Estadísticas Para La Proyección Local de la Predicción Meteorológica Estacional Método, Validación y Estudios de Sensibilidad*. Universidad de Cantabria.
- Sreelatha, K., & Anand Raj, P. (2019). Ranking of CMIP5-based global climate models using standard performance metrics for Telangana region in the southern part of India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–10.
- Stocker, Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2014). Climate change 2013: the physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds TF Stocker et Al.)*, 5–14.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192.
- Team, R. C. (2017). R: A Language and Environment for Statistical Computing. 887 R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.r-project.org/>, 888.
- Thornthwaite, C W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Thornthwaite, Charles Warren, & Mather, J. R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Centerton.
- Tillman, F. D., Gangopadhyay, S., & Pruitt, T. (2016). Changes in groundwater recharge under projected climate in the upper Colorado River basin. *Geophysical Research Letters*, 43(13), 6968–6974.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1218.
- Universidad de Antioquia, & CORPOURABA. (2019). *Manual de buenas prácticas en actividades del sector agropecuario para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas en el golfo de Urabá*.
- Universidad de Medellín, CORPOURABA, & Ministerio de Medio Ambiente. (2012). *Consultoría para Delimitar los Humedales Asociados al Río León en el Área de Influencia de los Municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo, a Través de Técnicas que Permitan Modelar la Función, Estructura y Composición de los Humedales y Evaluar la*.
- Van Dijck, S. J. E., Laouina, A., Carvalho, A. V., Loos, S., Schipper, A. M., Van der Kwast, H., Nafaa, R., Antari, M., Rocha, A., & Borrego, C. (2006). Desertification in northern Morocco due to effects of climate change on groundwater recharge. In *Desertification in the Mediterranean region. A Security Issue* (pp. 549–577). Springer.

- Villegas, P., Paredes, V., Betancur, T., Taupin, J. D., & Toro, L. E. (2018). Groundwater evolution and mean water age inferred from hydrochemical and isotopic tracers in a tropical confined aquifer. *Hydrological Processes*, 32(14), 2158–2175.
- Westenbroek, S. M., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J., & Bradbury, K. R. (2010). *SWB--a modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for estimating groundwater recharge*. US Department of the Interior, US Geological Survey, Ground Resources
- Wuthiwongyothin, S., Mili, S., & Phadungkarnlert, N. (2019). A Study of Correcting Climate Model Daily Rainfall Product Using Quantile Mapping in Upper Ping River Basin, Thailand. *International Conference on Asian and Pacific Coasts*, 1213–1219.
- Xie, Y., Cook, P. G., Simmons, C. T., Partington, D., Crosbie, R., & Batelaan, O. (2018). Uncertainty of groundwater recharge estimated from a water and energy balance model. *Journal of Hydrology*, 561, 1081–1093.
- Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M., & Wang, Y. (2018). Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), 609–623.
- Zhao, T., Bennett, J. C., Wang, Q. J., Schepen, A., Wood, A. W., Robertson, D. E., & Ramos, M.-H. (2017). How suitable is quantile mapping for postprocessing GCM precipitation forecasts? *Journal of Climate*, 30(9), 3185–3196.