



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Impacto del cambio climático sobre el balance hídrico en una zona de bosque húmedo tropical**

**Jonathan Alexander Romero Coca**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Área curricular de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C, Colombia  
2023

# **Impacto del cambio climático sobre el balance hídrico en una zona de bosque húmedo tropical**

**Jonathan Alexander Romero Coca**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:

Leonardo David Donado Garzón

Profesor titular

Codirector:

Luis Alejandro Morales Marín

Profesor asistente

Línea de Investigación:

Procesos sostenibles

Grupo de Investigación:

HYDS-Hidrodinámica del Medio Natural

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área curricular de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá D.C, Colombia

2023

# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Jonathan Alexander Romero Coca

Fecha 26/07/2023

# Resumen

## **Impacto del cambio climático sobre el balance hídrico en una zona de bosque húmedo tropical**

La disponibilidad de agua puede verse afectada por el cambio climático y procesos macroclimáticos. En Colombia los principales consumos de agua se localizan en las zonas de menor disponibilidad, lo cual puede empeorar en un escenario de cambio climático; se estima que en el año 2100 aumentará la temperatura 3.2°C reduciendo la precipitación entre un 15% a un 36%, lo cual, tendrá efectos significativos sobre la oferta del recurso hídrico.

La cuenca media del río Magdalena desde el municipio de Yondó, Antioquia hasta Aguachica, Cesar se caracteriza por tener ecosistemas estratégicos como lo son los bosques húmedos tropicales y zonas bajas de inundación. Gracias a esto diferentes especies se desarrollan; adicionalmente; proporciona las características necesarias para dar paso a la producción agroindustrial de la palma africana, producción petrolera y, en menor medida, el desarrollo de otras actividades agrícolas relacionadas con la subsistencia alimenticia de la población de la zona. Así pues, esta región posee una alta demanda de agua producto de las actividades económicas, en la que se destaca la intervención a la cuenca del río Sogamoso para el desarrollo del proyecto energético Hidrosogamoso, ocasionando importantes cambios en la oferta hídrica, especialmente cuando se presenta El Niño y La Niña. Esto ha generado diferentes conflictos por el uso del agua entre los diferentes actores de la región.

La presente investigación analizó los cambios en la oferta de agua, producto a la entrada en operación de Hidrosogamoso, el fenómeno de El Niño y La Niña y escenarios de cambio climático bajo las trayectorias socioeconómicas SSP3-7.0, y SSP5-8.5 en esta región. Esto se desarrolló mediante la formulación de un modelo hidrológico elaborado en SWAT en la zona de estudio, el cual fue validado y calibrado con información histórica con el propósito de establecer los valores regulares de la oferta de agua bajo los escenarios anteriormente.

**Palabras clave: Modelación hidrológica, cambio climático, ENOS, SWAT**

# Abstract

## **Impact of climate change on the water balance in an area of tropical humid forest**

Water availability can be affected by climate change and macroclimatic processes. In Colombia, the main water consumption is located in the areas of least availability, which can worsen in a climate change scenario; It is estimated that in the year 2100 the temperature will increase by 3.2°C, reducing precipitation by between 15% and 36%, which will have important effects on the supply of water resources. The middle basin of the Magdalena River from the municipality of Yondó, Antioquia to Aguachica, Cesar, which is characterized by having strategic ecosystems such as tropical humid forests and low flood zones where different species develop, on the other hand; It has an important agroindustrial production of African palm, oil production and, to a lesser extent, the development of other agricultural activities related to the food subsistence of the population of the area; This region has a high demand for water as a result of economic activities; intervention in the Sogamoso River basin with the Hidrosogamoso energy project; important changes in the supply of water when El Niño and La Niña occur, situations that have generated different conflicts over the use of this resource between the different actors in the region.

The present research analyzed the changes in the supply of product water upon the entry into operation of Hidrosogamoso, the El Niño and La Niña phenomena and climate change scenarios under the socioeconomic trajectories SSP3-7.0 and SSP5-8.5 in this region, by formulating a hydrological model developed in SWAT in the study area, which was validated and calibrated with historical information with the purpose of establishing the regular values of the water supply under the previous scenarios.

**Keywords: Hydrological modeling, climate change, ENSO, SWAT**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IV</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>IX</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Contexto.....</b>	<b>16</b>
1.1 Modelación hidrológica .....	16
1.2 Cambio climático .....	17
1.3 Oscilación del Sur-ENOS .....	21
1.4 Modelación con SWAT .....	23
1.5 Descripción de la zona de estudio .....	26
1.5.1 Localización.....	26
1.5.2 Caracterización de las cuencas hidrografía e información climática .....	28
1.5.3 Cobertura y uso del suelo .....	31
<b>2. Metodología .....</b>	<b>37</b>
<b>3. Análisis de la precipitación y caudales .....</b>	<b>38</b>
3.1 Datos históricos.....	38
3.1.1 Precipitación.....	38
3.1.2 Caudales .....	50
3.2 Caso de estudio Hidrosogamoso .....	53
3.3 Caso de estudio ENOS .....	59
3.4 Escenarios de cambio climático desde 2020 hasta 2100 .....	66
<b>4. Modelación hidrológica .....</b>	<b>75</b>
4.1 Calibración y validación del modelo.....	75
4.2 Datos históricos.....	79
4.3 Caso de estudio Hidrosogamoso .....	84
4.4 Caso de estudio ENOS .....	88
4.5 Escenarios de cambio climático desde 2020 hasta 2100 .....	94
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>99</b>
5.1 Conclusiones.....	99
5.2 Recomendaciones.....	101
<b>A. Anexo: Análisis de calidad de la información.....</b>	<b>103</b>
<b>B. Anexo: Proceso de downscaling de las estaciones del área de estudio .....</b>	<b>120</b>
<b>C. Anexo: Balance hídrico .....</b>	<b>133</b>
<b>Estimaciones medias mensuales multianuales.....</b>	<b>133</b>
<b>Estimaciones medias anuales .....</b>	<b>135</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>141</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Emisiones de CO2 bajo los escenarios evaluados en el CMIP6.....	21
Figura 2. Fenómeno ENOS.....	22
Figura 3. Diagrama metodológico funcionamiento del SWAT .....	25
Figura 4. Área de estudio .....	27
Figura 5. Distribución del tipo de suelo en el área de estudio .....	32
Figura 6. Clasificación climática Caldas-Lang .....	34
Figura 7. Distribución del uso del suelo en el área de estudio .....	35
Figura 8. Metodología de trabajo de grado .....	37
Figura 9. Curva de doble masa precipitación .....	42
Figura 10. Estimación de precipitación media mensual multianual .....	47
Figura 11. Precipitación media anual multianual del área de estudio e histogramas de precipitación media mensual multianual de cada estación del IDEAM periodo 1980 a 2020.....	48
Figura 12. Precipitación media mensual multianual en el área de estudio.....	49
Figura 13. Hidrógrafas de caudales de las estaciones del área de estudio .....	53
Figura 14. Histogramas de precipitación media multianual periodo 1980 a 2014 y de 2015 a 2020 .....	55
Figura 15. a) Precipitación media anual multianual periodo 1980 a 2014 (izquierda) vs b) Precipitación media anual multianual después de Hidrosogamoso 2015 a 2022 (derecha) .....	56
Figura 16. Variación porcentual de la precipitación media mensual multianual periodo 1980 a 2014 y de 2015 a 2020.....	57
Figura 17. a) Curva de duración de caudales antes y después de Hidrosogamoso .....	58
Figura 18. Cambio en el histograma mensual multianual de caudales antes y después de Hidrosogamoso .....	59
Figura 19. Medición del ONI .....	60
Figura 20. Histograma de precipitación media multianual en los periodos Neutro, El Niño y La Niña .....	63
Figura 21. a) Precipitación media anual multianual periodo Neutro (izquierda) b) Precipitación media anual multianual periodo El Niño c) Precipitación media anual multianual en el periodo La Niña .....	63
Figura 22. Variación porcentual de la precipitación media mensual periodo El Niño en comparación el periodo Neutro .....	64
Figura 23. Variación porcentual de la precipitación media mensual periodo La Niña en comparación el periodo Neutro .....	65
Figura 24. Comparación de bimodalidad del régimen hidrológico entre periodo 1980 a 2020 (histórico), 2021 a 2040, 2041 a 2060, 2061 a 2080 y 2081 a 2100 .....	67
Figura 25. Variación de la precipitación a 2100 de acuerdo con las estimaciones de cambio climático .....	69
Figura 26. Histograma de precipitación media multianual periodo 1980 a 2020 y 2021 a 2100.....	71

Figura 27. Variación de precipitación multianual 1980 a 2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100 .....	72
Figura 28. Variación porcentual de la precipitación media mensual multianual entre el periodo 2021 a 2100 con respecto a 1980 a 2020 .....	73
Figura 29. Estación utilizada para realizar la calibración del modelo SWAT .....	76
Figura 30. Comparación entre caudales medios mensuales observados (línea roja) y simulados por SWAT (línea roja) para el periodo enero de 2016 y enero de 2019.....	78
Figura 31. Estimación de escorrentía media mensual multianual .....	81
Figura 32. Escorrentía media anual multianual del área de estudio periodo 1980 a 2020 .....	82
Figura 33. Escorrentía media mensual en el área de estudio .....	83
Figura 34. Histograma de escorrentía media multianual antes y después de implementar Hidrosogamoso .....	85
Figura 35. A) Escorrentía media simulada multianual antes de Hidrosogamoso (izquierda) vs. B) Escorrentía media simulada multianual después de Hidrosogamoso (derecha). .....	86
Figura 36. Cambios porcentuales de la escorrentía media mensual para el periodo 2015-2020 después de la construcción Hidrosogamoso con respecto a la escorrentía media mensual antes del proyecto 1980-2014. ....	87
Figura 37. Histograma de escorrentía media multianual en los periodos Neutro, El Niño y La Niña .....	91
Figura 38. A) Escorrentía media anual multianual de años Neutro (izquierda) b) Escorrentía media anual multianual en los años considerados El Niño c) Escorrentía media anual multianual en los años considerados La Niña.....	91
Figura 39. Variación de la escorrentía media mensual ENOS-El Niño con respecto a la condición Neutra.....	92
Figura 40. Variación de la escorrentía media mensual ENOS-La Niña con respecto a la condición Neutra.....	93
Figura 41. Histograma de escorrentía media multianual en los periodos 1980 a 2021 y 2020 a 2100 .....	95
Figura 42. Variación de la escorrentía multianual histórico, periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100 .....	96
Figura 43. Variación de la escorrentía media mensual en el año 2100 .....	98

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características subcuenca río Cimitarra .....	28
Tabla 2. Características subcuenca río Opón.....	28
Tabla 3. Características subcuenca río Sogamoso .....	29
Tabla 4. Características subcuenca río Lebrija.....	29
Tabla 5. Ubicación geográfica estaciones pluviométricas IDEAM área de estudio.....	30
Tabla 6. Ubicación geográfica estaciones limnimétricas IDEAM área de estudio.....	30
Tabla 7. Datos atípicos de precipitación en las estaciones del área de estudio .....	39
Tabla 8. Coeficiente R2 curva de doble masa .....	42
Tabla 9. Resultado de la prueba de homogeneidad precipitación desde 1980 a 2020.....	43
Tabla 10. Tendencia de Mann Kendal para precipitación desde 1980 a 2020 .....	44
Tabla 11. Datos atípicos de caudal en las estaciones del área de estudio .....	50
Tabla 12. Resultados de prueba de homogeneidad para caudal .....	51
Tabla 13. Tendencia de Mann Kendal para caudales históricos .....	52
Tabla 14. Prueba de tendencia Mann-Kendall precipitación Hidrosogamoso.....	54
Tabla 15. Cambio porcentual en los tipos de caudales que se presentaron antes y después de implementar el proyecto .....	58
Tabla 16. Prueba de tendencia Mann-Kendall precipitación ENOS .....	60
Tabla 17. Parámetros calibrados y análisis de sensibilidad .....	77
Tabla 18. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía periodo 1980 a 2020 .....	80
Tabla 19. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía Hidrosogamoso .....	84
Tabla 20. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía condición Neutra, El Niño y La Niña ...	88
Tabla 21. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía periodo 2020 a 2100 .....	94



## Introducción

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de la sociedad debido a que se utiliza y aprovecha en la producción de alimentos, usos industriales, sanidad y generación de energía entre otros; por esta razón, su disponibilidad impulsa el desarrollo económico de las sociedades y contribuye a la reducción de la pobreza (OMS, 2020). Sin embargo, este elemento se encuentra en diversas formas; por ejemplo, en la superficie terrestre puede observarse en estado sólido o líquido, como en los acuíferos del subsuelo o como vapor en el aire (USGS, 1984).

Si bien la cantidad de agua disponible puede percibirse como ilimitada, el panorama real es muy diferente ya que tan solo el 2.5% de este del agua es identificada como dulce y no se encuentra distribuida homogéneamente en el planeta dificultando su acceso (WWF, 2022). Adicionalmente, esto puede empeorar como consecuencia de efectos naturales como el cambio climático que puede reducir las cantidades de precipitación (Banco Republica, 2022) o contaminación de los cuerpos de agua por actividades antrópicas (OMS, 2021).

De esta forma, es esencial estudiar el comportamiento espacial y temporal de las variables climatológicas con el fin de entender las dinámicas de los regímenes hidrológicos que posee el agua. Asimismo, se hace necesario incluir en este análisis otros factores como la geografía, las características geológicas, los tipos del suelo y sus usos, con el objetivo de reconocer la oferta hídrica o también llamada escorrentía superficial (IDEAM, 2018b). El objetivo de estos estudios es crear herramientas para que la sociedad pueda administrar adecuadamente este recurso limitado y poder preparar a las sociedades ante los escenarios de cambio climático que pueden traer consigo disminuciones en su oferta.

Colombia, al tener una ubicación geográfica cercana al Ecuador y una variada topografía, posee una oferta hídrica que le permite tener redes fluviales, precipitaciones, humedales,

y otros cuerpos de agua (IDEAM, 2001); estas condiciones causan que existan una gran variedad de ecosistemas. No obstante, su disponibilidad en el país no es homogénea en términos espaciales ni temporales en todo el territorio, por lo tanto, existen regiones con escasez hídrica (IDEAM, 2017a).

En el caso de la oferta nacional hídrica en el país, se ha establecido que está concentrada en las regiones del Amazonas, Orinoco y Pacífico, con aproximadamente el 77% del recurso disponible y el restante 23% en la región del Magdalena-Cauca y Caribe; en cuanto, a los regímenes de precipitación, se observa ciclos bimodales en la región del Magdalena-Cauca y unimodales en las regiones Amazonas, Orinoco y Pacífico (IDEAM, 2018b). Adicionalmente, el país es fuertemente afectado por de El Niño y La Niña, causando extensas temporadas de sequias con altas temperaturas o largos periodos de lluvia generando inundaciones que afectan negativamente infraestructura, cultivos, alteración del nivel freático, inestabilidad de taludes y erosión entre otros (Banco Republica, 2022).

En contraste a la oferta, la demanda de agua o consumo nacional se concentra en las regiones de Magdalena-Cauca y Caribe principalmente por el uso que se le da en la agricultura y la producción energética (IDEAM, 2018b). En contraste, estas zonas son las que menor oferta poseen, originando un déficit del recurso hídrico y limitando del desarrollo de las actividades económicas que se realizan en estas regiones.

En cuanto a la oferta futura de agua, se afirma que el planeta está atravesando por un periodo de cambio climático y Colombia no es la excepción a sus efectos. Se estima que para el año 2100 el país podría tener un aumento de temperatura de 3.2°C, generando disminuciones en la precipitación desde el 15% al 36% en las regiones de Magdalena - Cauca y Caribe y aumento en la región Pacífica (IDEAM, 2022b). Esto afectaría directamente en la oferta de agua a las regiones con mayor demanda, por lo que es necesario que tanto los diferentes actores que consumen este recurso, así como las autoridades ambientales que regulan su uso, realicen análisis regionales en la oferta o estimaciones de la escorrentía superficial teniendo en cuenta los cambios que puede traer el cambio climático o el ENOS Niño-Oscilación del Sur/La Niña entre otros; así como establecer las demandas de agua actuales o futuras en los territorios con el fin de crear planes de adaptación para prevenir y mitigar de estos los efectos negativos que se puedan

---

generar y tener mejores herramientas para la toma de decisiones. Adicionalmente, este tipo de estudios generan información ambiental fortaleciendo la gobernanza de los territorios permitiendo generar políticas alineadas a los objetivos del Acuerdo de Escazú (CEPAL, 2022).

Un caso de estudio interesante para analizar la oferta de agua disponible bajo los escenarios descritos anteriormente es la zona desde Yondó, Antioquia hasta Aguachica Cesar, en el cual, confluyen ecosistemas de bosques húmedos tropicales<sup>1</sup> del Magdalena-Caribe, caracterizados por poseer arboles altos que permiten la concentración de biodiversidad y endemismos donde se pueden encontrar aproximadamente el 50% de las especies de flora y fauna registradas en el planeta (PNN, 2023), zonas bajas de inundación (CAS y CDMB, 2018), desarrollo de actividades petroleras, así como una creciente producción agropecuaria en la que sobresale el cultivo de palma africana en los municipios de Puerto Wilches, Barrancabermeja Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí y una población de aprox 31,698 habitantes (DANE, 2018), la cual, es abastecida por grandes fuentes de agua como el río Sogamoso ubicado al sur, el río Magdalena al occidente y al este-norte el río Lebrija (UNAL, 2021b).

Diferentes estudios de nivel meso climático en esta zona del país han establecido el estado de la oferta de agua en las cuencas hidrográficas de los ríos Sogamoso, Lebrija y afluentes del Magdalena a partir de modelación y balances hidrológicos (UNAL, 2021b). Estos estudios indican que existe un régimen de lluvias bimodal con picos en abril a mayo y de septiembre a noviembre, y periodos secos en diciembre a marzo y de junio a agosto con una precipitación media anual multianual de 2492mm. La temperatura, parámetro importante para evaluar la evaporación y evapotranspiración variables de la demanda, muestra la existencia de picos en los meses de febrero y marzo y menores valores en los meses de octubre a diciembre, con una temperatura promedio anual promedio de 27.5°C (ANLA, 2021). A partir de estos estudios se ha podido determinar el Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento hídrico-IVH, el cual se ha establecido como medio y alto, evidenciando un déficit de agua en esta región que tiende a empeorar,

---

<sup>1</sup> Se ha observado que este ecosistema se ha disminuido en el país un 13% y en los próximos 50 años podría llegar a ser de 30 (RLE Colombia, 2015)

---

especialmente, en eventos cálidos como los generados por El Niño (ANLA, 2021). Sin embargo, a nivel microclimático en la región no se observan estudios hidrológicos que tengan en cuenta efectos del cambio climático o El Niño/La Niña, por lo que en las herramientas planificación del territorio; por ejemplo; POT, PBOT o EOT que poseen los municipios no existen medidas que atiendan de manera integral cambios en la disponibilidad del recurso hídrico (Alcaldía de Puerto Wilches, 2005), (Alcaldía de Sabana de Torres, 1999), (Alcaldía de Barrancabermeja, 2023). Asimismo, es importante mencionar que la Central Hidroeléctrica Sogamoso-Hidrosogamoso ha intervenido la cuenca de río Sogamoso una de las principales fuentes hídricas de la región lo que puede estar ejerciendo cambios en la oferta hídrica del área de estudio (UNAL, 2021b).

El presente estudio evaluó los efectos en la oferta de agua en un área que posee ecosistemas estratégicos amenazados, una intensiva industria agroindustrial, producción de hidrocarburos, entre otros bajo los escenarios de El Niño/La Niña, cambio climático e intervención de megaproyectos hídricos como la Central Hidroeléctrica Hidrosogamoso, mediante el desarrollo de los siguientes objetivos:

### **Objetivo general**

Evaluar los efectos del cambio climático global en la oferta del agua en un área de bosque húmedo tropical de tierras bajas en Colombia.

### **Objetivos específicos**

1. Evaluar la oferta actual de agua analizando la precipitación y el caudal de las fuentes hídricas dentro del área de estudio
2. Analizar los efectos del ENOS e Hidrosogamoso en la oferta de agua en el área de estudio
3. Realizar el proceso de escalamiento de la precipitación (downscaling) basado en los pronósticos de cambio climático dentro del área de estudio
4. Establecer la oferta futura de agua superficial para los diferentes sectores productivos en la zona de estudio.

Para dar cumplimiento a los objetivos establecidos, en el presente trabajo de grado se presenta una estructura de 5 capítulos, como se describen a continuación. En el capítulo 1 se presenta un el marco teórico y contexto de socio económico del área de estudio. En el capítulo 2 se presenta la metodología aplicada. En el capítulo 3 se realiza un análisis de

los datos históricos de las variables de precipitación y caudal con el fin de verificar su estado actual, así como los cambios estas variables bajo la influencia del proyecto Hidrosogamoso, El Niño/La Niña y cambios futuros bajo los escenarios de cambio climático a 2100 de acuerdo con el CMIP 6 del IPCC disponibles para la región del repositorio de información climática WorlClim V2. En el capítulo 4 se presentan las estimaciones de oferta de agua histórica, la cual se obtuvo a partir de la modelación hidrológica por medio del software SWAT (TAMU, 2022), así mismo se analizaron los cambios en la oferta del agua bajo los efectos del proyecto Hidrosogamoso, ENSO y cambio climático a 2100 y finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

# 1.Contexto

En el presente capítulo se hace un recorrido por la teoría detrás de los tipos modelos hidrológicos, modelos de cambio climático, efectos del El Niño/La Niña- ENOS, selección del modelo hidrológico a utilizar y línea base del área de estudio.

## 1.1 Modelación hidrológica

La modelación es utilizada como herramienta para representar el ciclo hidrológico, el cual, si bien es simple, este fenómeno posee una importante complejidad determinada por la disponibilidad de agua en los continentes, factores topográficos, geológicos y vegetación (Chow, 1988). Teniendo en cuenta esta condición y, ante la ausencia de un conocimiento perfecto de este ciclo, se han creado modelos hidrológicos, los cuales son aproximaciones físicas o matemáticas que simulan procesos naturales mediante la implementación de la ley de conservación de masa y energía. Adicionalmente, están compuestos por fronteras definidas donde se ingresa agua al sistema y esta se distribuye internamente produciendo salidas (Chow, 1988).

Existen dos tipos de modelos hidrológicos (i) Los físicos, en los que se hacen modelos a escala del área de estudio y (ii) Los abstractos, basados en ecuaciones matemáticas que buscan representar la realidad. Estos últimos se clasifican teniendo en cuenta la variación espacial (agradados o distribuidos) y temporal (flujos continuos o estáticos) de las variables, así como su aleatoriedad (determinístico o estocástico) (Chow, 1988).

En general los modelos poseen cuatro elementos: (i) variables de entrada (ej. series de precipitación, temperatura), (ii) parámetros (ej. conductividad, tipo de suelo), (iii) variables de estado (ej. condiciones iniciales del modelo) y (iv) variables de salida. Una vez se obtienen los resultados del modelo es necesario realizar un proceso de calibración y validación con el fin de evaluar la capacidad a representar los fenómenos analizados (Cabrera, 2015).

Actualmente, se encuentra una gran variedad de modelos hidrológicos desarrollados por diferentes institutos de investigación, los cuales, se pueden dividir en tres grandes grupos (Devia et al., 2015):

- 
- Modelos empíricos: son modelos de caja negra, los cuales, se basan en ecuaciones matemáticas las cuales se derivan de series temporales de entradas y salidas y no de los procesos físicos de la cuenca, los cuales son válidos dentro de los límites establecidos, también conocidos como modelos basados en datos.
  - Modelos conceptuales: son modelos paramétricos o de caja gris, los cuales, describen todos los procesos hidrológicos del área de estudio, los cuales se representan como una serie de embalses interconectados los cuales suceden los procesos hidrológicos, como precipitación, infiltración, entre otros, adicionalmente estos modelos son calibrados con una gran cantidad de datos hidrometeorológicos. Entre los modelos más conocidos de este tipo se encuentra el SWM, HBV y el TOPMODEL entre otros.
  - Modelos físicamente basados: son modelos mecánicos o de caja blanca, los cuales, buscan representar matemáticamente el fenómeno real de manera idealizada los cuales se describen a partir del desarrollo de ecuaciones de diferencias finitas, estos modelos requieren gran cantidad de datos como contenido de agua características del terreno entre otros. Entre los modelos que se poseen se encuentra MIKESHE o el SWAT

Si existe una gran variedad de modelos hidrológicos, es necesario seleccionar aquel que se acomode a las necesidades del área de estudio; por ejemplo, es indispensable conocer la disponibilidad de información de la zona estudio, el costo computacional del modelo y el tiempo que puede tomar un modelo en producir resultados. De esta forma, se pueden comparar modelos y, bajo estas variables, seleccionar una opción sobre otra.

## 1.2 Cambio climático

El cambio climático se define como la variación del estado del clima en comparación con los valores medios, el cual, persiste durante largos periodos de tiempo. Este proceso se asocia a los efectos de la creciente industrialización que ha llevado a la humanidad desde el siglo XIX y cuya consecuencia ambiental ha sido un aumento en las emisiones de gases efecto invernadero derivado, principalmente, por el uso de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas, entre otros (UN, 2022a).

De hecho, se ha observado que el aumento en las temperaturas genera mayores evaporaciones y evapotranspiraciones que incrementan sequías; así mismo, este cambio amplía la capacidad de retención de vapor de agua en la atmosfera intensificando eventos de precipitación e inundaciones (Trenberth, 2011). Como consecuencia de lo anterior la sequía y humedad pueden intensificarse (IPCC, 2022b).

En cuanto a los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico, diferentes estudios concluyen que las variaciones climáticas en la temperatura y humedad, entre otras, han incrementado la velocidad de las dinámicas atmosféricas, dificultando la predicción de variables como la precipitación, escorrentía y humedad, así como el pronóstico de sus comportamientos en el futuro (Huntington, 2010). Por lo tanto, se ha observado esta condición ha generado reducciones en la disponibilidad de agua, afectando directamente a la producción agrícola y energética, especialmente a países en desarrollo (Melese, 2021).

De igual forma, los modelos climáticos son representaciones numéricas del sistema climático basados en las propiedades e interacciones físicas, químicas y biológicas de los fenómenos que suceden en la atmosfera y que a su vez han sido utilizados para para entender cómo ha cambiado el clima en el pasado y cómo puede ser su comportamiento en el futuro (Hausfather, CarbonBrief, 2019), asimismo, han sido utilizados para estudiar los cambios en los ciclos hidrológicos (IPCC, 2022a).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), es el órgano internacional establecido para evaluar los conocimientos científicos asociados al cambio climático (IPCC, 2013). En 1995 este organismo creó el Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) con el objetivo de coordinar y archivar simulaciones de modelos climáticos elaborados por los diferentes institutos de investigación en todo el mundo, para estandarizar los resultados y dar un conceso sobre cómo puede cambiar el clima en el futuro basado en los resultados simulados (IPCC, 2019). Desde su creación, el proyecto ha tenido mejoras importantes como una mayor capacidad de predicción de eventos pasados y futuros, mejor resolución de resultados espaciales e incluso se ha implementado el análisis de sustancias de corta vida en la atmosfera, entre otras (WCRP, 2020).

---

Una parte fundamental de los modelos de cambio climático son los escenarios de emisiones, ya que relacionan el comportamiento del clima futuro con las dinámicas socioeconómicas y han permitido desarrollar alternativas y potenciales respuestas a las políticas públicas que desarrollan los países. Dichos escenarios han ido evolucionando hasta llegar a las “Trayectorias Socioeconómicas Comparativas” (SSP por sus siglas en inglés) utilizadas en el CMIP 6, en las cuales, se han definido cinco escenarios-SSP a partir de los cambios socioeconómicos y demográficos que pueden suceder en el planeta en el próximo siglo (Castillo, Sanchez, & Gachuz, 2017), descritos a continuación (Hausfather, CarbonBrief, 2018):

- SSP1 (camino verde): en este escenario se tienen dos premisas. 1. El mundo cambia de manera gradual hacia un camino sostenible en el que se respetan los límites ambientales y 2. El crecimiento económico se centra en el bienestar humano, permitiendo la mejora de los bienes comunes como la educación y la salud, impulsada por lograr los objetivos de desarrollo sostenible mientras se reduce la inequidad. Así mismo se busca la reducción de los consumos de materiales como los recursos energéticos.
- SSP2 (camino medio): en este escenario los desarrollos sociales, económicos y tecnológicos siguen patrones históricos; el crecimiento económico y la protección del ambiente avanza de manera desigual mejorando en unos países que en otros; los países trabajan por el desarrollo de los ODS pero a un ritmo lento y en general se observa una reducción de los recursos de consumo como energéticos; la población se estanca a mitad del siglo y la desigualdad mejora lentamente sin embargo persistirán los desafíos sociales y ambientales
- SSP3 (rivalidad regional): en este modelo resurge el nacionalismo, aumentan las preocupaciones de seguridad y competitividad centrando a los países en temas locales; los países se enfocan en alcanzar objetivos de seguridad energética y alimentaria disminuyendo las inversiones en salud y educación aumentando las desigualdades y los consumos de recursos y energía; la población mundial aumenta principalmente en países en desarrollo y existe poco interés internacional en solucionar problemas ambientales conduciendo a grandes degradaciones del medio ambiente en algunas regiones.

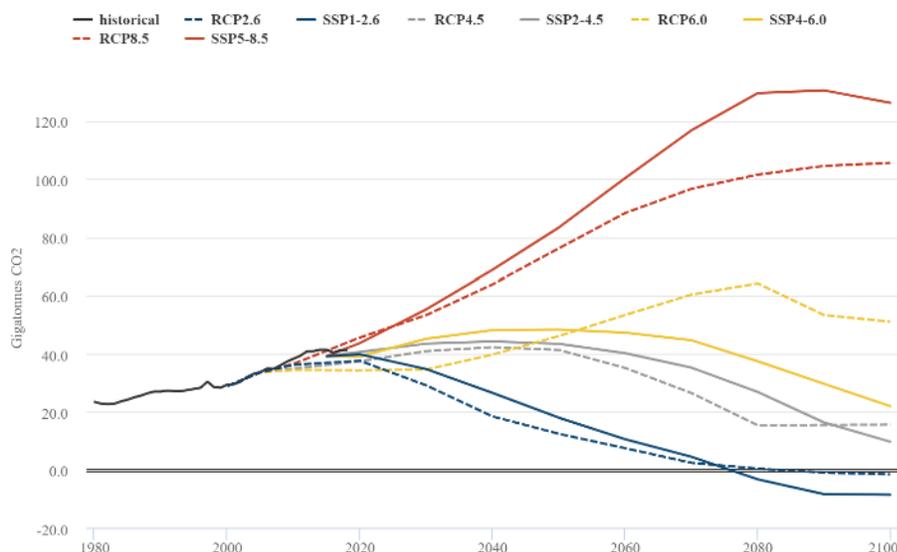
- SSP4 (desigualdad): se basa en inversiones altamente desiguales en la sociedad y disparidades económicas que generan estratificación en los países; se amplía la brecha entre sectores con capital y sociedades con bajos ingresos; hay poca educación con mucho trabajo y poca tecnología que genera descontento social. En cuanto a la energía, existe una diversidad de la matriz energética entre combustibles fósiles, carbón y yacimientos no convencionales, entre otros.
- SSP5 (desarrollo impulsado por combustibles fósiles): el mundo confía en que el desarrollo sostenible se logrará con mercados competitivos, innovación y tecnología; existen fuertes inversiones en salud, educación e instituciones para mejorar las sociedades impulsado por una fuerte explotación de combustibles fósiles y un estilo de vida de alta explotación de recursos y energía. La población alcanza su punto máximo y se estanca a mediados de siglo. Diferentes impactos ambientales son controlados como la calidad del aire y hay capacidad de gestión sistemas sociales y ecológicos.

Teniendo en cuenta los escenarios presentados anteriormente, el IPCC en el CMIP6 ha generado diferentes escenarios hasta el 2100 dependiendo del forzamiento radiactivo<sup>2</sup> teniendo en cuenta las “Vías de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés)” las cuales están definidas explícitamente para modelación climática, ver Figura 1 (Hausfather, CarbonBrief, 2019), entre las cuales sobresalen el SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5 (Hausfather, CarbonBrief, 2019). Teniendo en cuenta estas proyecciones de emisión de gases efecto invernadero, el CMIP6 recopiló las simulaciones de 40 modelos de cambio climático en los que se observan cambios en diferentes variables meteorológicas como: temperatura, precipitación, la radiación solar, la velocidad del viento y la presión de vapor de agua, entre otras (Hausfather, CarbonBrief, 2019).

---

<sup>2</sup> Diferencia entre la energía solar absorbida por la tierra y la irradiada (W/m<sup>2</sup>)

Figura 1. Emisiones de CO2 bajo los escenarios evaluados en el CMIP6



Fuente: tomado de (Hausfather, CarbonBrief, 2019)

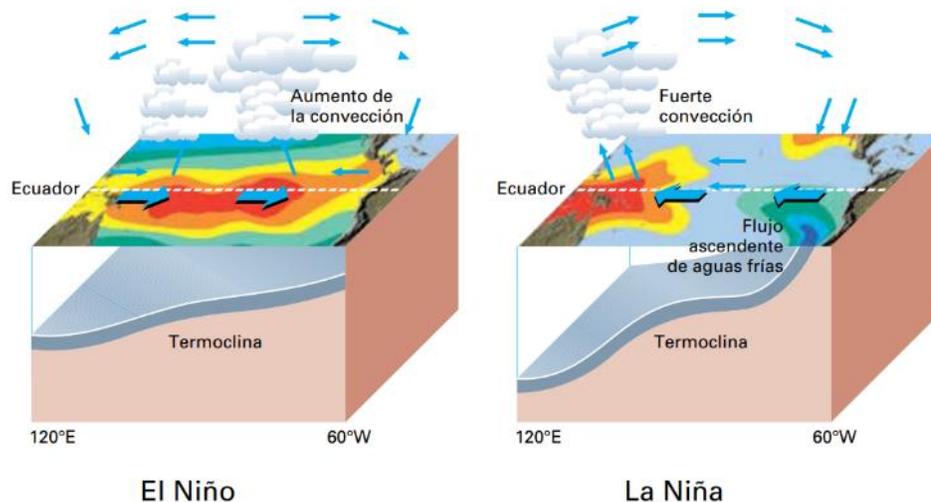
Dichas simulaciones han sido recopiladas en el repositorio WorldClim, siendo una biblioteca de información climática de libre acceso de las variables climáticas globales enunciadas anteriormente, las cuales poseen una resolución espacial de aproximadamente 900 metros y cuyos datos pueden ser empleados para el mapeo y el modelamiento temporal y espacial a cualquier zona de estudio; dicho proyecto en su versión 2.1 recopila la información mundial de cambio de precipitación, temperatura mínima, máxima, entre otros cada veinte años desde 2020 hasta el 2100 (WorldClim, 2022). Adicionalmente, esta información es calibrada y validada por más de 34,000 estaciones de precipitación y 15,000 de temperatura alrededor del mundo; teniendo en cuenta covariables como altitud, la distancia a la costa y variables derivadas de información satelital (Fergnani, 2022).

### 1.3 Oscilación del Sur-ENOS

La Oscilación del Sur-ENOS o El Niño/ La Niña es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de la temperatura del océano Pacífico en la parte central y oriental como consecuencia de cambios en la atmosfera afectando las condiciones climáticas en todo el mundo; este fenómeno se compone de tres fases comúnmente llamados El Niño, La Niña y Neutro (condición normal) (OMM, 2014). El Niño se caracteriza por presentar un

calentamiento a gran escala de las aguas superficiales del océano Pacífico produciendo cambios en la circulación atmosférica, tiene una duración aproximada de 18 meses y generalmente se presenta cada siete años aumentando las temperaturas, reduciendo las precipitaciones y aumentando las sequías en el país. Por otro lado, La Niña presenta características opuestas, en las que el enfriamiento de las aguas del Pacífico aumenta las lluvias en el país incrementando considerablemente las inundaciones y movimientos en masa este fenómeno se siente principalmente en países de América Latina y Oceanía, ver Figura 2 (OMM, 2014), sin embargo, estas condiciones generan diferentes efectos en los regímenes de lluvia que pueden variar dependiendo de la ubicación geográfica.

Figura 2. Fenómeno ENOS



Fuente: tomado de (OMM, 2014).

Dado que el cambio en las temperaturas en el mar afecta variables meteorológicas como la presión atmosférica y la velocidad del viento, se han creado desde hace más de veinte años indicadores como el Indicador El Niño (ONI) utilizado por el IDEAM para identificar la fase del ENOS que se está presentando; generalmente los datos para establecer estos indicadores se construyen con mediciones climatológicas en Darwin, Australia y Tahití, EEUU; por ejemplo se ha identificado que cuando la presión del aire es anormalmente alta en Indonesia y baja en la parte central y oriental del Pacífico tropical se genera un debilitamiento en los vientos alisios o, en algunos casos soplan en dirección opuesta en

---

estos casos se habla de una fase negativa o El Niño; cuando las condiciones nombradas anteriormente son opuestas, se considera como fenómenos de La Niña (OMM, 2014).

Si bien el ENOS aún se está entendiendo y no existen pruebas concluyentes sobre la frecuencia, intensidad e influencia de El Niño y La Niña (OMM, 2014) de hecho al analizar el comportamiento de esta variable en el futuro no existe un consenso en el comportamiento que pueda tener (Maher, 2023). Por lo tanto, se hace necesario analizar qué sucede con las variables hidroclimáticas en el país cuando se presenta estos fenómenos. Esto con el fin que países como Colombia, que son especialmente afectados por sus efectos, puedan implementar políticas adaptativas para reducir o mitigar los daños que se puedan generar.

Por lo tanto, efectos macroclimáticos como los expuestos anteriormente pueden tener afectaciones negativas sobre el ciclo hidrológico y finalmente sobre la oferta de agua principalmente en el sector agrícola al ser el principal consumidor a nivel nacional (IDEAM, 2018b). Dicho esto, se hace necesario que las entidades reguladoras del ambiente como los sectores productivos analicen los efectos del cambio climático a nivel regional, con el fin, de evaluar las demandas futuras de agua y así prevenir los efectos negativos en los ecosistemas, por medio de herramientas como la modelación hidrológica

## **1.4 Modelación con SWAT**

El Soil & Water Assesmet Tool (SWAT) es un modelo hidrológico a escala de cuenca espacialmente distribuido y semifísicamente basado, creado por el Servicio agrícola de Investigación (ARS por sus siglas en inglés) en conjunto con la universidad de Texas en Los Estados Unidos. Este modelo permite simular procesos de cuencas hidrológicas complejas como cambios del clima, coberturas del suelo y usos del suelo, entre otros (Bonilla & Et al., 2022). El modelo posee una interfaz gráfica compatible con Sistemas de Información Geográfica (ej. QGIS y ArcGis), facilitando el manejo de los datos de entrada, así como la interpretación de resultados (Ojeda, 2021).

Este programa hidrológico ha sido utilizado por diferentes autores para evaluar los cambios en las cuencas hidrológicas en diversos estudios; por ejemplo, Tewekel et al. En 2022 determinó los impactos del balance hídrico bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en la cuenca del río Guder en Etiopia, en la cual, encontró que la

---

escorrentía superficial presentó cambios entre el 22% hasta 159% entre los años 2030 a 2080 o Samavati et al en el mismo año, el cual utilizó el modelo SWAT para hacer un modelo de lluvia escorrentía en una zona montañosa de Irán, proyectando la simulación a 2040 y utilizando los datos climatológicos del modelo Miroc 5. En dicho estudio se determinó un decrecimiento de la escorrentía superficial de un 8.36% comparado con los datos históricos, adicionalmente se observó que en los meses de verano bajo el escenario SSP2-4.5 la escorrentía se redujo 75% y bajo el escenario SSP5-8.5 podía llegar a un 79%. Song, en cambio, comparó el SWAT con modelos de “memoria a corto plazo” (LSTM por sus siglas en inglés) para determinar los cambios en el ciclo hidrológico, en este trabajo se observa que los modelos LSTM son mejores para replicar eventos extremos, adicionalmente, observó el SWAT bajo escenarios de cambio climático aumento un 17.7% la escorrentía comparada con una reducción del -13.6% que arrojó el LSTM. En cuanto a estudios nacionales este modelo se ha utilizado cuencas como el río Hacha en el departamento de Caquetá (Pajarito, 2017), el río la Vieja en la cuenca del río Magdalena - Cauca (Bonilla & Et al., 2022) y en la cuenca del río Iguaque en Boyacá (Ojeda, 2021) arrojando como resultado altas aproximaciones entre los datos simulados y los datos observados para las cuencas del país. Por lo tanto, es un modelo que se alinea a los objetivos de la presente investigación y ha sido utilizado en casos de estudio con información hidrológica nacional.

El SWAT requiere el modelo digital de terreno, tipos de suelo, usos del suelo y la información climática como, precipitación, temperatura, velocidad del viento y radiación solar; en dado caso que no se tengan variables completas el modelo genera los datos faltantes por medio de interpolaciones completando las series temporales (ej. modelo de Nicks para precipitación diaria, distribución normal para temperaturas) (TAMU, 2022). A partir de esta información el modelo divide la zona de estudio en subáreas denominadas Unidades de Repuesta Hidrológica-HRU que se caracterizan por ser áreas con características homogéneas, permitiendo realizar el balance hidrológico a cada una de estas unidades para determinar las entradas, almacenamiento y salidas de la zona de estudio, los cuales, a su vez pueden conformar Grupos de Respuestas Unitarias-GRU (Castañeda, 2016), la Figura 3 presenta la metodología para crear modelos en SWAT.

Figura 3. Diagrama metodológico funcionamiento del SWAT



Fuente: adaptado de (Bonilla & Et al., 2022)

El modelo posee el complemento SWAT-CUP el cual utiliza el algoritmo de Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2 por sus siglas en inglés) para realizar la calibración y el análisis de sensibilidad, esta herramienta realiza un número de simulaciones definidas por el usuario variando los parámetros de entrada del modelo entre unos rangos establecidos previamente. Este ejercicio permite seleccionar aquellos parámetros que aumenten el coeficiente de determinación  $r^2$  entre los datos simulado y los observados (Khairi & et al, 2016). Adicionalmente, con el fin de establecer la validación del modelo implementado en el presente estudio se utilizó coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) el cual es usado comúnmente para la calibración de modelos hidrológicos y permite evaluar que tan bien el modelo es capaz de reproducir los valores observados ver Ecuación 1 (Pajarito, 2017):

Ecuación 1. Coeficiente NSE

$$NSE = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{i=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \right)$$

Donde,

$Q_0^t$ , es el caudal observado por el periodo de tiempo de calibración

$Q_m^t$ , es el caudal simulado por el periodo de tiempo de calibración

$\bar{Q}_0$ , es el promedio del caudal observado por el periodo de tiempo de calibración

Dicho coeficiente se interpreta de la siguiente manera: valores sobre 0.8 se considera un ajuste excelente; entre 0.6 a 0.8 ajuste muy bueno; entre 0.4 a 0.6 ajuste bueno; 0.2 a 0.4 ajuste satisfactorio y menor a 0.2 insuficiente.

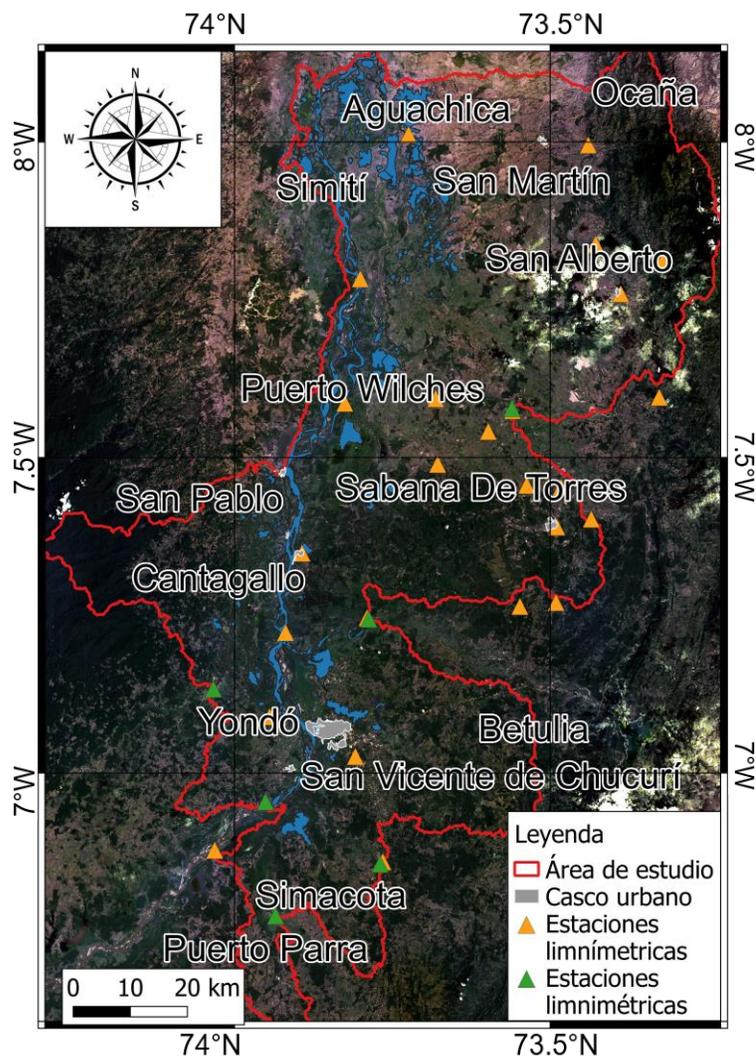
## **1.5 Descripción de la zona de estudio**

### **1.5.1 Localización**

Con el fin de definir las fronteras del modelo hidrológico y un área de estudio se realizó el trazado de la cuenca por medio del Sistema de Información Geográfica de software libre y de código abierto QGIS. Dicho procedimiento utilizó una imagen satelital tipo ráster de elevación con una resolución de noventa metros por noventa metros, la cual, se obtuvo del sitio web del proyecto HydroSHEDS, debido a que esta información puede ser comparable con modelos realizados en otros diferentes países.

Adicionalmente, con el fin de reducir la cuenca hidrológica a modelar, se acoto el área por medio de las seis estaciones limnimétricas del IDEAM sobre las corrientes de los ríos Cimitarra Lebrija, Magdalena, Sogamoso y Opón. Así las cosas, el área de modelación se encuentra ubicada en la vertiente de la cordillera central entre los departamentos de Antioquia, Bolívar, Cesar, Santander y Norte de Santander. Principalmente, en los municipios de Aguachica, Barrancabermeja, La Esperanza, Puerto Wilches, Sabana De Torres, San Alberto, San Martín, y Yondó y en pequeñas áreas de los municipios de Abrego Betulia, Cantagallo Morales, Ocaña, Puerto Parra Río De Oro, Ríonegro San Pablo, San Vicente De Chucurí, Simacota y Simití, ver Figura 4.

Figura 4. Área de estudio



Es importante mencionar que la principal actividad económica dentro del área seleccionada es el cultivo agroindustrial de la palma africana<sup>3</sup>, ganadería extensiva para la

<sup>3</sup> La producción de palma de aceite en Colombia es responsable del 20% del consumo de agua que todo el país utiliza para la agricultura (IDEAM, 2018b) y ha sido un producto que desde el inicio de su explotación en la década de los noventa ha tenido un aumento anual en su producción; convirtiendo a la zona desde Yondó, Antioquia hasta Aguachica, Cesar y especialmente a Puerto Wilches, Santander como el municipio en el país con más hectáreas de palma de aceite sembradas (Minagricultura, 2022).

cría, ceba y levante; pesca en las zonas inundables como ciénagas y, en menor medida, el desarrollo de otras actividades agrícolas relacionadas con la subsistencia alimenticia de la población (ej. Cultivos de maíz, porcicultura, entre otros), adicionalmente se reconoce que la producción de extracción petrolera representa recursos considerables en la dinámica socioeconómica de los municipios (CCBarrancabermeja, 2017), ya que en la zona existen 40 proyectos relacionados con hidrocarburos, en lo que 16 son de exploración de crudo, 11 de transporte y conducción 7 de explotación y 3 racionados con refinería, sísmica y terminal (ANLA, 2021). Las actividades mencionadas anteriormente han generado una creciente demanda hídrica en los ríos Magdalena, Sogamoso y Lebrija, condición que puede cambiar bajo las condiciones de El Niño y los escenarios cambio climático a 2100 (UNAL, 2021b).

### 1.5.2 Caracterización de las cuencas hidrografía e información climática

El área de estudio está contenida en la zona hidrográfica del Magdalena-Cauca específicamente en el Magdalena Medio y se encuentra compuesta por parte de las subzonas hidrográficas de los ríos Lebrija, Sogamoso Opón y Cimitarra. A continuación, se da una breve descripción de cada una de las subcuencas involucradas e en el área de estudio:

Tabla 1. Características subcuenca río Cimitarra

Departamentos	Bolívar y Antioquia
Área dentro del estudio	1262 km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración Kirpich de la cuenca en el área de estudio	215 minutos
Precipitación media anual multianual, régimen y picos de precipitación	2813.5 mm, bimodal, abril-mayo y septiembre-octubre
Temperatura media anual multianual	26.81°C
Evapotranspiración media anual multianual	1796.4 mm
Pendiente dentro del área de estudio	5.7°
Cota mínima y máxima dentro del área de estudio	25 y 1709 msnm
Torrencialidad	Baja susceptibilidad a la erosión

Tabla 2. Características subcuenca río Opón

Departamentos	Santander
Área dentro del estudio	914 km <sup>2</sup>

Tiempo de concentración Kirpich de la cuenca en el área de estudio	392 minutos
Precipitación media anual multianual, régimen y picos de precipitación	2819.0 mm, bimodal, abril-mayo y septiembre-noviembre
Temperatura media anual multianual	25.53°C
Evapotranspiración media anual multianual	1616.0 mm
Pendiente dentro del área de estudio	2.1°
Cota mínima y máxima dentro del área de estudio	4 y 327 msnm
Torrencialidad	Baja susceptibilidad a la erosión

Tabla 3. Características subcuenca río Sogamoso

Departamentos	Santander
Área dentro del estudio	1022 km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración Kirpich de la cuenca en el área de estudio	358 minutos
Precipitación media anual multianual, régimen y picos de precipitación	2719.8 mm, bimodal, abril-mayo y septiembre-noviembre
Temperatura media anual multianual	25.86°C
Evapotranspiración media anual multianual	1733.7 mm
Pendiente dentro del área de estudio	2.8°
Cota mínima y máxima dentro del área de estudio	42 y 931 msnm
Torrencialidad	Baja susceptibilidad a la erosión

Tabla 4. Características subcuenca río Lebrija

Departamentos	Santander y Norte de Santander
Área dentro del estudio	5255 km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración Kirpich de la cuenca en el área de estudio	447 minutos
Precipitación media anual multianual, régimen y picos de precipitación	2549.5 mm, bimodal, abril-mayo y octubre
Temperatura media anual multianual	24.70°C
Evapotranspiración media anual multianual	1718.2 mm
Pendiente dentro del área de estudio	4.2°
Cota mínima y máxima dentro del área de estudio	21 y 3374 msnm
Torrencialidad	Baja susceptibilidad a la erosión

En el área de estudio se identificaron 25 estaciones pluviométricas o pluviográficas que son propiedad del IDEAM y que brindan datos de precipitación a una escala temporal diaria.

Estos datos se obtienen desde 1931, como es el caso de la estación APTO YARIGUIES [23155030], hasta el 2022, las cuales, se presentan con sus ubicaciones geográficas a continuación:

Tabla 5. Ubicación geográfica estaciones pluviométricas IDEAM área de estudio

<b>Nombre de la estación</b>	<b>Latitud °</b>	<b>Longitud°</b>	<b>Elevación (metros)</b>	<b>Periodo</b>
Aguas Claras	7.26N	-73.55W	208.0	1973-2022
Apto Yariguies	7.03N	-73.81W	126.0	1931-2022
Barranca Lebrija	8.01N	-73.72W	50.0	1983-2022
Brisas las Hda	7.25N	-73.79W	138.0	1973-2022
Caobo el	7.60N	-73.33W	300.0	1973-2022
Centro el	6.86N	-73.77W	114.0	1935-2022
Chucuri	6.88N	-74.03W	100.0	1959-2021
Coquera la	7.22N	-73.92W	170.0	1974-2022
Dorada la	8.00N	-73.44W	271.0	1971-2022
Eloy Valenzuela	7.49N	-73.68W	90.0	1974-2022
Establo el	7.54N	-73.60W	100.0	1974-2022
Líbano el	7.84N	-73.43W	164.0	1977-2022
Mágara	7.59N	-73.68W	80.0	1989-2022
Paturia	7.59N	-73.83W	105.0	1974-2022
Payoa 5	7.27N	-73.49W	161.0	1984-2022
Planes Los	7.81N	-73.32W	650.0	1984-2022
Porvenir El	7.45N	-73.48W	110.0	1974-2022
Provincia	7.40N	-73.44W	109.0	1992-2022
Pto Wilches	7.35N	-73.89W	66.0	1958-2022
Sabana de Torres	7.39N	-73.49W	144.0	1968-2022
San Alberto	7.76N	-73.39W	134.0	1972-2022
San Rafael	7.57N	-73.56W	78.0	1977-2022
Sitio Nuevo	7.78N	-73.80W	98.0	1974-2022
Villa Leiva	7.46N	-73.54W	328.0	1966-2022
Yondó	7.09N	-73.94W	85.0	1974-2022

Asimismo, el área de estudio posee 6 estaciones limnimétricas propiedad del IDEAM, que brindan datos de caudal a una escala temporal diaria. Estos datos se obtienen desde 1965, como es el caso de la estación SAN RAFAEL [23197370], las cuales, se presentan con sus ubicaciones geográficas a continuación:

Tabla 6. Ubicación geográfica estaciones limnimétricas IDEAM área de estudio

<b>Nombre de la estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Elevación (metros)</b>	<b>Río</b>	<b>Periodo</b>
Ayacucho	6.85N	-73.76W	101	La Colorada	1992-2022

Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Elevación (metros)	Río	Periodo
El Bagre	7.61N	-74.80W	160	Cimitarra	1977-1990
Peñas blancas	3.25N	-73.89W	80	Magdalena	1977-2022
Pte. Sogamoso	7.24N	-73.79W	90	Sogamoso	1992-2022
Pte. Ferrocarril	6.77N	-73.93W	90	Opón	1974-2022
San Rafael	7.57N	-73.56W	78	Lebrija	1965-2022

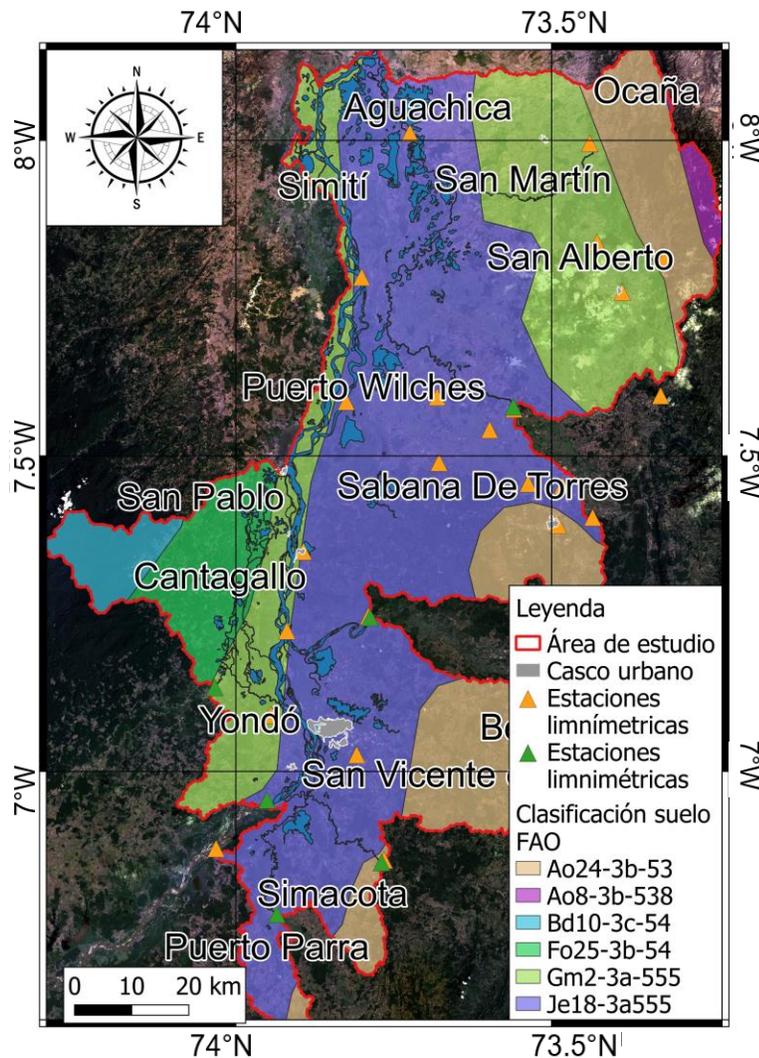
### 1.5.3 Cobertura y uso del suelo

Para reconocer la cobertura de los tipos de suelos presentes en la zona de estudio se tomaron los mapas creados por la FAO y la UNESCO, quienes proporcionan una clasificación taxonómica global recopilando más de veinte años de estudios globales en este campo (FAO, 1961). De acuerdo con esta clasificación se identificaron los siguientes suelos en el área de estudio Acrisoles, Cambrisoles, Ferralsoles, Fluvisoles y Gleysoles, ver Figura 5, cuyas características se presentan a continuación:

- **Acrisoles orticos (Ao):** son suelos lixiviados de color rojo o amarillos que se forman sobre rocas, se caracterizan por una baja capacidad de intercambio catiónico y de saturación de bases por lo que poseen un bajo rendimiento agropecuario. Adicionalmente, se ubican en trópicos húmedos y semihúmedos (Ibañez & Manriquez, 2012). En el área de interés se poseen dos subclasificaciones la Ao24-3b y Ao8-3b ocupando 1499 km<sup>2</sup> y 77 km<sup>2</sup> respectivamente siendo el 18% del área de estudio.
- **Cambrisoles districos (Bd):** son suelos de color intenso con acumulación de arcillas y óxidos de hierro en condiciones húmedas y aportes de materia orgánica, que proporcionan fertilidad (IGN, 2009). En el área de interés se poseen la subclasificación Bd10-3c ocupando 231 km<sup>2</sup> siendo el 3% del área de estudio.
- **Ferralsoles órticos (Fo):** son suelos con de color rojo y amarillos con altos contenidos de sesquióxidos y buenas propiedades físicas para el desarrollo de plantas, pero poseen limitaciones de fertilidad. Se encuentran principalmente en el trópico, son suelos con (UNEX, 2020a). En el área de interés se poseen la subclasificación Fo25-3b ocupando 500 km<sup>2</sup> siendo el 6% del área de estudio.

- **Fluvisoles éútricos (Je):** son suelos desarrollados sobre depósitos aluviales en zonas inundables y suelen utilizarse para cultivos con alto potencial agrícola (Ibañes & Mariquez, 2011). En el área de interés se poseen la subclasificación Je18-3a ocupando 4286 km<sup>2</sup> siendo el 49% del área de estudio.
- **Geosoles Mólicos (Gm):** son suelos fangosos debido al exceso de humedad característico de zonas deprimidas con mineralogía ácida o básica; sin embargo, una vez drenados se utilizan generalmente para la agricultura (UNEX, 2020b). En el área de interés se poseen la subclasificación Gm2-3a ocupando 2132 km<sup>2</sup> siendo el 24% del área de estudio.

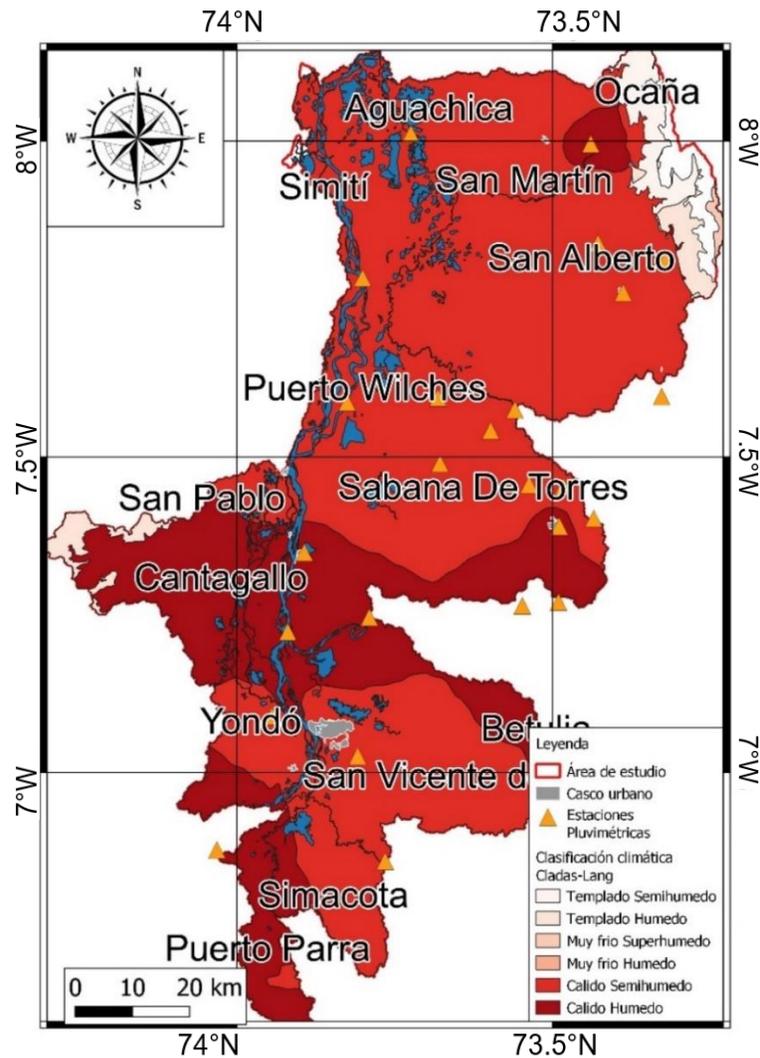
Figura 5. Distribución del tipo de suelo en el área de estudio



Teniendo en cuenta las actividades económicas que se desarrollan anteriormente en el área de estudio se identifican cinco usos que predominan en la región:

- 
- **Cultivos permanentes:** en el que se encuentra cultivo de palma de aceite predominantemente, así como, cultivos de, algodón, arroz, banano, tabaco, yuca y algunos frutales. En el área de interés se identificaron 1487 km<sup>2</sup> siendo el 17% del área de estudio.
  - **Pastizales:** donde se desarrollan actividades de ganadería es extensiva y tiene propósitos de cría, ceiba y levante, adicionalmente, se desarrollan las actividades de molienda de arroz, elaboración de panela y mieles, procesamiento y transformación de flora, fabricación de productos de caucho, sacrificio de animales, procesamiento de leche, producción de alimentos de consumo humano y animal, obtención de biocombustibles, elaboración de artesanías, producción de madera y muebles, fabricación de plásticos y químicos. También se pueden encontrar actividades comerciales en los centros urbanos y otras actividades inherentes a las dinámicas sociales como educación centros religiosos zonas con erosión, entre otros. En el área de interés se identificaron 1919 km<sup>2</sup> siendo el 58% del área de estudio.
  - **Cuerpos de agua:** en el cual se encuentran los cuerpos de agua como ríos lagunas o ciénagas. En el área de interés se identificaron 262 km<sup>2</sup> siendo el 3% del área de estudio.
  - **Bosques:** con características de árboles generalmente de más de 10 m, alcanzando algunos doseles 40 a 50 m y diámetros de 1 m con zonas de sotobosque está con numerosas especies de árboles pequeños, grandes arbustos y hierbas gigantes (PNN, 2023). En el área de interés se identificaron 5055 km<sup>2</sup> siendo el 22% del área de estudio. El bosque húmedo tropical es importante ya que acoge en el mundo a la mitad de las especies animales y vegetales conocida, debido a la cantidad de organismos vivos que pueda alojar en su interior, estos ecosistemas se caracterizan por poseer una elevada humedad y altas temperaturas como se puede ver en clasificación de Caldas Lang en el área de estudio, ver Figura 6, lo que genera procesos de descomposición rápidos acelerando la disponibilidad de materia orgánica e inorgánica para las diferentes especies (Lifeder, 2021), este ecosistema ha sido reemplazado históricamente por los cultivos agroindustriales y la industria petrolera que se han desarrollado en la región reduciendo la biodiversidad de la zona de estudio (Rojas, 2023).

Figura 6. Clasificación climática Caldas-Lang

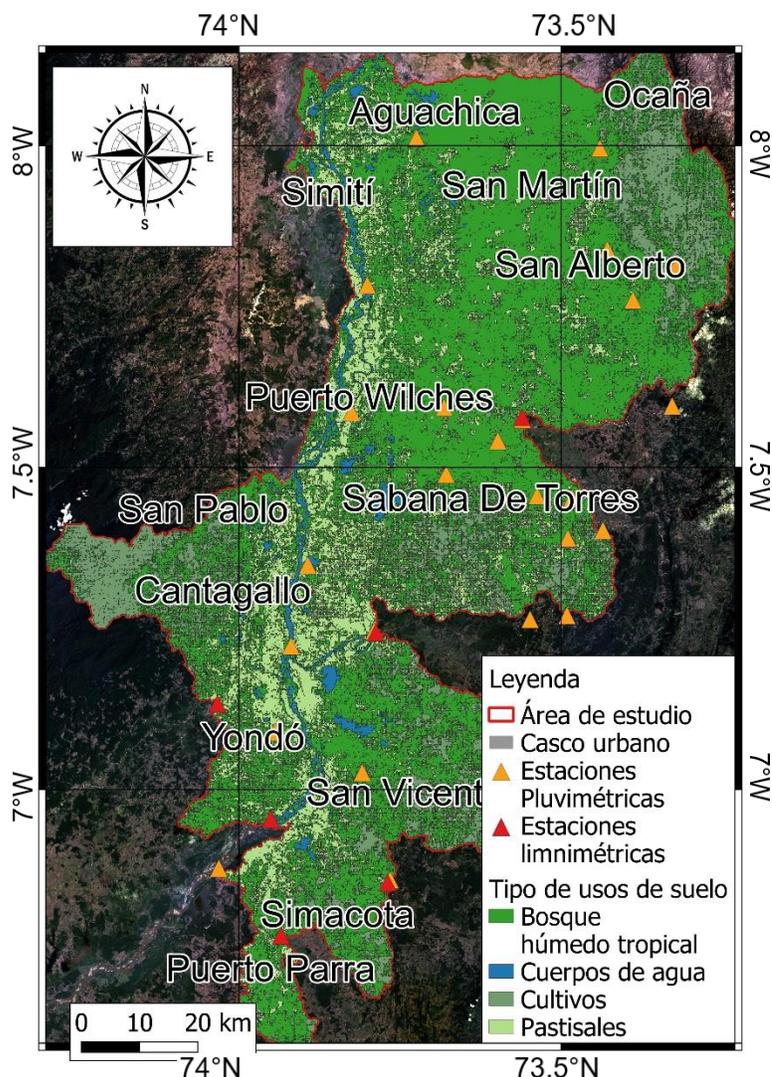


Con el fin de poder determinar las áreas destinadas a los usos enunciados anteriormente se utilizaron las imágenes satelitales del proyecto Landsat 8 del año 2020<sup>4</sup>. Una vez se seleccionó la imagen satelital con menor nubosidad se utilizó la herramienta de “Clasificación Supervisada de Imágenes de Satélite-Random Forest” por medio de la herramienta Google Engine. Dentro de este programa, la clasificación de las áreas de la zona de estudio se realiza por medio de una extrapolación de acuerdo con las características de cada píxel basado en una clasificación primaria que realiza el usuario a

<sup>4</sup> Para el área de estudio se observó que el cambio del índice de vegetación en los datos satelitales disponibles es menos al 10% (Sánchez, S, 2023)

una pequeña sección de la imagen; entre las limitaciones que tiene el método es el tamaño de pixel que en este caso fue de treinta metros por treinta metros donde tipos del suelo con resolución menor a esta no pudieron ser clasificados. El resultado del ejercicio descrito se presenta en la Figura 7.

Figura 7. Distribución del uso del suelo en el área de estudio



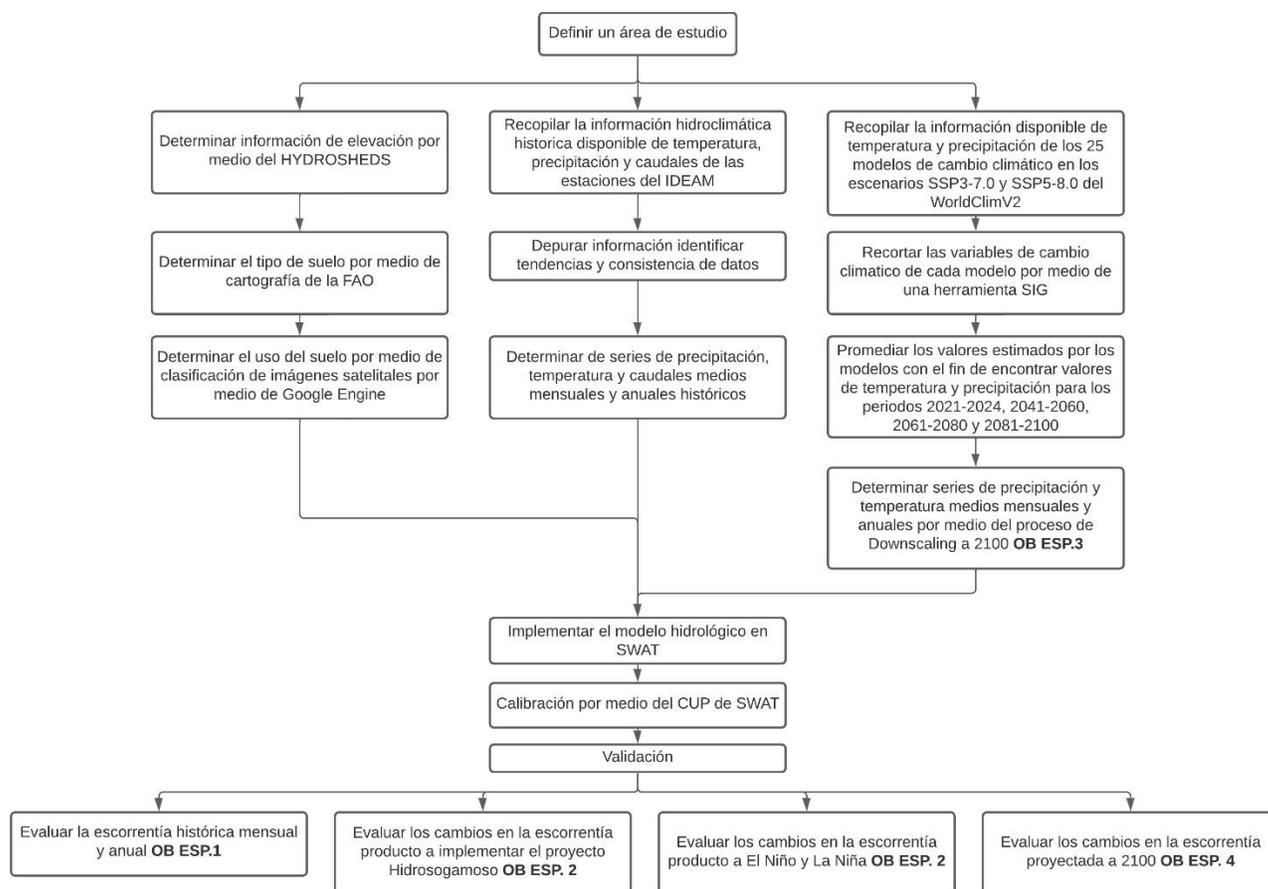
Una vez recopilado los datos presentados anteriormente, se implementó el modelo en SWAT, el cual sirvió para analizar los datos históricos de precipitación y, así como fenómenos climáticos como el ENOS, cambio y efectos climáticos del proyecto energético Hidrosogamoso en el área de estudio.

En esta sección se presentaron los principales los tipos de modelos hidrológicos existen en la actualidad, causas, efectos y estimaciones de procesos macroclimáticos como El Niño/La Niña y el cambio climático, y se describieron las características físicas y socioeconómicas que influyen en el área de estudio. Por lo tanto, se encontró que el modelo SWAT ha sido utilizado anteriormente para el desarrollo de estudios hidrológicos similares y es una herramienta que permite responder a los objetivos plantados en la investigación. En los capítulos siguiente, se presenta la metodología, la recopilación y análisis de la información hidrológica que existe en el área de estudio y servirá como insumo para estimar la oferta de agua bajo los escenarios planteados.

## 2. Metodología

Con el fin de poder cumplir el objetivo general planteado en el presente trabajo de grado, así como los específicos se desarrolló la siguiente metodología, ver Figura 8.

Figura 8. Metodología de trabajo de grado



En los capítulos siguiente, la recopilación y análisis de la información hidrológica que existe en el área de estudio y servirá como insumo para estimar la oferta de agua bajo los escenarios planteados.

---

## 3. Análisis de la precipitación y caudales

Con el fin de establecer el comportamiento de la precipitación y los caudales en el área de estudio, actuales, bajo la influencia de Hidrosogamoso, ENSO y futuros a 2100 por medio del downscaling. Este capítulo presenta la recopilación y análisis de la información hidrológica disponible tanto histórica como futura, con el fin de poder procesarla e ingresarla al modelo hidrológico seleccionado y así poder estimar la oferta hídrica.

### 3.1 Datos históricos

#### 3.1.1 Precipitación

Con el fin de analizar las dinámicas actuales de la precipitación en el área de estudio se recopiló la información histórica de precipitación diaria de las 25 estaciones del IDEAM del área de estudio, ver Figura 4, se realizó el análisis de identificación de datos anómalos, se completaron los datos faltantes y se realizaron análisis de homogeneidad y tendencia para después analizar la precipitación que se presenta en la región y determinar los cambios que se estiman bajo los escenarios planteados.

##### *Identificación de datos anómalos*

Los datos atípicos son observaciones numéricas que se encuentran significativamente distanciadas de la varianza, en este caso para una muestra de la precipitación. Las diferencias pueden originarse por diversas razones como; calibración incorrecta de equipos, desplazamiento espacial de la estación y errores humanos de medición, entre otros. La identificación precisa de estos datos posee una importancia crucial, ya que su presencia podría conllevar a errores durante el análisis de la muestra, generando una sobreestimación o subestimación de las variables que se analizan. Por otro lado, es importante señalar que no todo dato identificado por las pruebas puede considerarse un dato atípico a debido a que pueden asociarse a eventos reales con un periodo de retorno significativo, aportando de manera adecuada a la muestra y siendo esenciales para el análisis de eventos extremos.

En el presente estudio se realizó la identificación de estos datos por medio del conjunto de la herramienta "PYOD" de Python, la cual es, utilizada por su eficacia en la detección de

objetos atípicos en datos multivariados., Esta herramienta también brinda acceso a una amplia variedad de algoritmos diseñados para detectar valores atípicos, abarcando desde conjuntos de valores atípicos establecidos hasta enfoques basados en redes neuronales. (Zhao, Nasrullah, & Li, 2019).

La Tabla 7 presenta los registros de datos atípicos identificados de precipitación diaria de las estaciones presentes en el área estudio para el periodo 1980 a 2020, en la cual, se observa que el número de valores son pocos dando como resultado que la gran mayoría de las estaciones generan información válida. En el Anexo A se presentan las salidas gráficas donde visualmente se puede apreciar los datos atípicos por estación. Estos datos fueron eliminados de la serie de datos utilizada para los resultados presentados posteriormente.

Tabla 7. Datos atípicos de precipitación en las estaciones del área de estudio

Estación	Cantidad datos atípicos	Estación	Cantidad datos atípicos
AGUASCLARAS [24060040]	7	PATURIA [23180110]	8
APTOYARIGUIES [23155030]	7	PAYOA5[24060080]	4
BARRANCALEBRIJA [23190710]	7	PLANESLOS [23190810]	7
BRISASLASHDA [24065010]	7	PORVENIREL [23180040]	6
CAOBOEL [23190510]	7	PROVINCIA [23190320]	4
CENTROEL [23155040]	7	PTOWILCHES [23180020]	8
CHUCURI [23130010]	5	SABANADETORRES [23180070]	8
COQUERALA [23180120]	4	SANALBERTO [23190500]	7
DORADALA [23190520]	7	SANRAFAEL [23190560]	7
ELOYVALENZUELA [23180080]	6	SITIONUEVO [23180100]	7
ESTABLOEL [23180050]	7	VILLALEIVA [23185010]	6
LIBANOEL [23190110]	7	YONDO [23160010]	8
MAGARA [23190210]	6		

---

### ***Procesamiento de datos faltantes***

Este procedimiento busca completar una serie de datos incompleta por medio de establecer un valor lógico ya sea porque es un dato atípico o faltan datos en la serie. Estos métodos se pueden clasificar según su complejidad en simples, múltiples o por el origen de los datos bien sean determinísticos o estocásticos (aleatorios), para el presente estudio se utilizó el método de imputación múltiple. Este método crea  $m > 1$  conjuntos de datos completos (datos imputados), en el cual cada uno de estos conjuntos se analizó mediante el uso de la herramienta MICE de Python, los resultados se agrupan en una estimación puntual final más un error estándar basado en las “reglas de Rubin”. Esta imputación se realiza en tres pasos en la cual, bajo las condiciones apropiadas, las estimaciones agrupadas son insesgadas y tienen las propiedades estadísticas correctas:

- Primer paso: en el cual se analiza una serie de datos incompleta. La imputación múltiple crea varias versiones completas de los datos al reemplazar los valores faltantes por valores de datos plausibles. Estos valores plausibles se extraen de una distribución modelada específicamente para cada entrada faltante.
- Segundo paso: en el cual se estiman los parámetros de interés de cada conjunto de datos imputados.
- Tercer paso: en el cual se calcula la varianza combinada, la varianza de muestreo convencional (varianza dentro de la imputación) y la varianza adicional causada por la varianza extra de los datos faltantes causada por los datos faltantes (varianza entre la imputación).

Para el presente análisis se buscó que los datos que completaban la serie de precipitación diarios se encontraran dentro de la desviación estándar original de los datos registrados por el IDEAM, y sus estadísticos no cambiarán una vez los datos faltantes fueran llenados. En el Anexo A, se presentan las series de datos que se completaron de precipitación diaria para cada estación. Estos datos fueron generados de manera aleatoria y no representan valores atípicos. Se observó que los datos generados se encuentran dentro de la desviación estándar de las series originales. La desviación estándar de la precipitación en las estaciones varió en promedio  $\pm 0,1$  mm.

### ***Análisis de homogeneidad y tendencia***

---

Este procedimiento consistió en establecer por medio de gráficos y pruebas estadísticas la existencia o no de un cambio en la media o tendencia en los datos de precipitación, y comprobar con esto la homogeneidad de los datos y la fluctuación sobre una media constante en el tiempo, para ello es necesario establecer que si se encuentra algún cambio en la media o una tendencia en los datos se procede a solo usar una parte de la serie o remover esta tendencia o falta de homogeneidad. En general, la falta de homogeneidad de los datos es inducida por las actividades antrópicas como cambios de usos del suelo, construcción de embalses, cambio climático, entre otros, sin embargo, procesos naturales como deslizamientos, terremotos o, deslizamiento de laderas y erupciones volcánicas. Para el análisis de homogeneidad en el presente estudio fue utilizada el análisis de curva doble masa y la prueba de Pettitt, en cuanto a la tendencia se usó la prueba de tendencia de Mann-Kendall.

### ***Curva de doble masa***

La curva de doble masa es la forma más común para establecer periodos donde se han producido posibles errores, los cuales se pueden identificar en forma de quiebre o cambio de la pendiente de la curva doble de masa al graficarse con el fin de identificar la homogeneidad de los datos. Esta curva es construida llevando los valores anuales acumulados de precipitación en la estación de estudio al eje de las ordenadas, y los valores anuales acumulados de precipitación de la estación patrón en el eje de las abscisas (UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA, 2015).

Si los registros no han sufrido variaciones, los puntos se alinean en una recta de pendiente única y por lo tanto no será necesario efectuar correcciones. Pero si por el contrario hay variaciones en la pendiente de la recta, significa que la serie contiene valores erróneos y debe ser corregida a partir del punto en el que cambia la pendiente de la recta (UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA, 2015)

En la Figura 9 se presenta las curvas doble masa, las cuales fueron construidas tomando como base la precipitación total de cada una de las cuencas en las que se encuentran las estaciones, la estación AVG corresponde al promedio acumulado de la precipitación de todas las cuencas. Se evidencia que hay una alta correlación entre los datos de precipitación acumulada de las estaciones de análisis, ya que se obtuvieron coeficientes

(R2) de 0,999 como se ve en la Tabla 8. Eso indica que hay una buena consistencia de las series de tiempo de precipitación total diaria para todas las estaciones.

Figura 9. Curva de doble masa precipitación

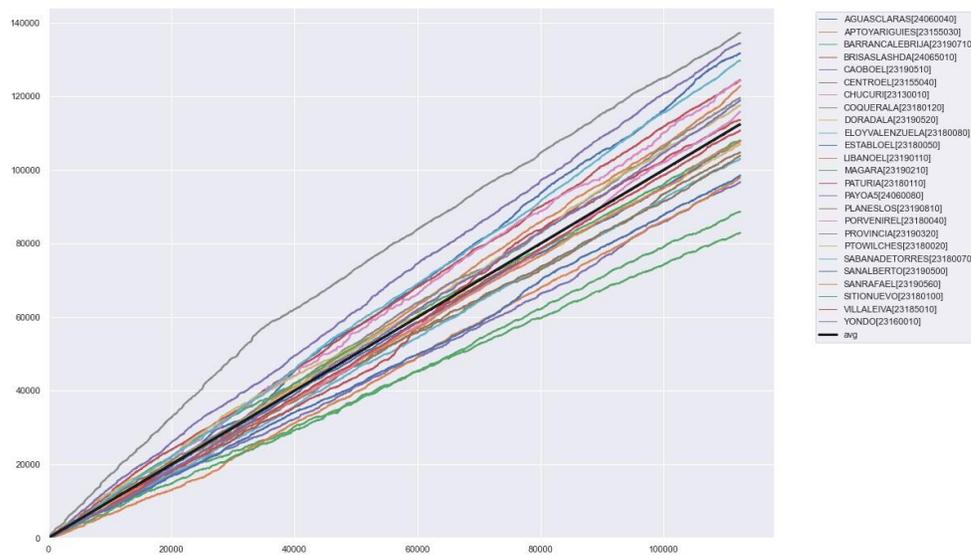


Tabla 8. Coeficiente R2 curva de doble masa

Estación	R2	Estación	R2
AGUASCLARAS [24060040]	0.99926974	PATURIA [23180110]	0.99396179
APTOYARIGUIES [23155030]	0.99968713	PAYOA5 [24060080]	0.99970112
BARRANCALEBRIJA [23190710]	0.99940765	PLANESLOS [23190810]	0.99979095
BRISASLASHDA [24065010]	0.99977706	PORVENIREL [23180040]	0.99807553
CAOBOEL [23190510]	0.99828316	PROVINCIA [23190320]	0.99046438
CENTROEL [23155040]	0.99946108	PTOWILCHES [23180020]	0.99980878
CHUCURI [23130010]	0.99930654	SABANADETORRES [23180070]	0.99983129
COQUERALA [23180120]	0.99961803	SANALBERTO [23190500]	0.99859666
DORADALA [23190520]	0.99704809	SANRAFAEL [23190560]	0.99987929
ELOYVALENZUELA [23180080]	0.99987007	SITIONUEVO [23180100]	0.99880578
ESTABLOEL [23180050]	0.99953911	VILLALEIVA [23185010]	0.9998673
LIBANOEL [23190110]	0.99877735	YONDO [23160010]	0.99966651
MAGARA [23190210]	0.99815405		

**Prueba de Pettit**

Es una prueba no paramétrica que se utiliza para encontrar el punto en el cual la media de una serie de datos cambia considerando una secuencia de variables aleatorias (Suriano et al., 2014); donde la hipótesis nula ( $H_0$ ) sostiene que no hay cambio estructural en la serie temporal; es decir, la distribución de los datos es constante a lo largo del tiempo, por otro lado cuando el resultado de la prueba indica que la hipótesis nula es falsa ( $h = \text{False}$ ), se interpreta como evidencia de que ha ocurrido un cambio significativo en la serie temporal (Pettitt, 1979). Para tal fin se utilizó la herramienta `pyHomogeneity` de Python para realizar la prueba de homogeneidad de Pettitt, la Tabla 9 presenta los resultados de esta prueba aplicada a la serie de datos de la precipitación diaria en cada estación, la cual proporciona estadísticas asociadas al cambio donde la significancia del cambio está respaldada por el valor  $p$  extremadamente bajo, adicionalmente se puede observar la diferencia entre los dos periodos establecidos ( $m_1$  y  $m_2$ ) en la prueba correspondiente a la columna `diff media`. Así mismo, se observan las fechas donde hubo un cambio de la media en las series de tiempo de cada estación. En el Anexo A se puede observar la prueba de homogeneidad por estación.

Tabla 9. Resultado de la prueba de homogeneidad precipitación desde 1980 a 2020

Precipitación						
Estación	$m_1$	$m_2$	Fecha	$p$	$h$	diff media
PAYOA5[24060080]	10.0	8.7	9/12/1988	0.00	True	-1.3
COQUERALA [23180120]	8.0	8.0	3/12/1989	0.00	True	0.0
DORADALA [23190520]	9.1	6.5	5/12/1989	0.00	True	-2.6
MAGARA [23190210]	8.5	6.8	7/12/1990	0.00	True	-1.7
PROVINCIA [23190320]	12.2	7.8	10/12/1992	0.00	True	-4.5
CENTROEL [23155040]	7.1	7.0	29/11/1993	0.00	True	-0.1
PTOWILCHES [23180020]	7.5	8.1	1/04/1995	0.00	True	0.6
ELOYVALENZUELA [23180080]	6.8	7.0	20/03/1998	0.00	True	0.2
LIBANOEL [23190110]	5.8	7.1	20/03/1998	0.00	True	1.3
SABANADETORRES [23180070]	8.6	8.7	20/03/1998	0.00	True	0.1
SANRAFAEL [23190560]	7.1	7.3	20/03/1998	0.00	True	0.2
PLANESLOS [23190810]	7.1	6.8	1/01/2000	0.00	True	-0.3
PATURIA [23180110]	6.6	8.6	14/04/2000	0.00	True	2.0
CHUCURI [23130010]	8.2	8.4	16/03/2004	0.00	True	0.2
CAOBOEL [23190510]	6.0	7.1	8/04/2004	0.00	True	1.1
VILLALEIVA [23185010]	7.2	7.7	14/04/2004	0.09	False	0.4
APTOYARIGUIES [23155030]	7.8	8.9	25/03/2005	0.00	True	1.0

Precipitación						
Estación	m1	m2	Fecha	p	h	diff media
SANALBERTO [23190500]	6.2	7.3	16/03/2007	0.00	True	1.1
YONDO [23160010]	7.7	8.5	13/03/2008	0.00	True	0.8
AGUASCLARAS [24060040]	8.8	8.9	22/11/2008	0.00	True	0.1
BRISASLASHDA [24065010]	8.6	7.2	19/12/2011	0.00	True	-1.4
ESTABLOEL [23180050]	7.3	6.8	19/12/2011	0.17	False	-0.6
SITIONUEVO [23180100]	6.1	5.5	19/12/2011	0.00	True	-0.6
PORVENIREL [23180040]	7.7	7.8	14/08/2012	0.01	True	0.1
BARRANCALEBRIJA [23190710]	5.7	4.7	16/11/2012	0.02	False	-1.0

### ***Prueba de Mann-Kendall***

Para el análisis de tendencia se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall la cual analiza las tendencias crecientes o decrecientes de series de datos; esta es una de las pruebas más empleadas en el análisis de series hidroclimatológicas (García Espinosa, 2013) Para el presente estudio se evaluó esta prueba por medio de la herramienta “pymannkendall1.4.1” de Python utilizando un nivel de significancia de 0.05.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la prueba de tendencia de Mann-Kendall aplicada a la serie de datos de la precipitación diaria en cada estación. Donde se muestran los valores de Tau, que corresponden a una medida de la fuerza y dirección de la tendencia en los datos. Un valor negativo indica una tendencia decreciente y un valor positivo indica una tendencia creciente, si por el contrario el valor varía entre -0.01 y 0.01 no hay una tendencia clara. Adicionalmente la H muestra la hipótesis nula, que puede tener dos resultados, donde si es True, significa que para la estación no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que no hay tendencia, caso contrario False, indica que se rechaza la hipótesis nula y se puede interpretar que no hay tendencia para esta estación.

Tabla 10. Tendencia de Mann Kendal para precipitación desde 1980 a 2020

Precipitación					
Tau	trend	h	Estación	p	slope
-0.02	decreasing	True	AGUASCLARAS [24060040]	0.00	0
0.02	increasing	True	APTOYARIGUIES [23155030]	0.00	0
-0.01	no trend	False	BARRANCALEBRIJA [23190710]	0.20	0
-0.02	decreasing	True	BRISASLASHDA [24065010]	0.00	0
0.01	increasing	True	CAOBOEL [23190510]	0.00	0

Precipitación					
Tau	trend	h	Estación	p	slope
-0.02	decreasing	True	CENTROEL [23155040]	0.00	0
0.06	increasing	True	CHUCURI [23130010]	0.00	0
-0.02	decreasing	True	COQUERALA [23180120]	0.00	0
-0.01	decreasing	True	DORADALA [23190520]	0.00	0
0.03	increasing	True	ELOYVALENZUELA [23180080]	0.00	0
0.00	no trend	False	ESTABLOEL [23180050]	0.56	0
0.05	increasing	True	LIBANOEL [23190110]	0.00	0
-0.02	decreasing	True	MAGARA [23190210]	0.00	0
0.02	increasing	True	PATURIA [23180110]	0.00	0
-0.02	decreasing	True	PAYOA5[24060080]	0.00	0
-0.03	decreasing	True	PLANESLOS [23190810]	0.00	0
-0.01	no trend	False	PORVENIREL [23180040]	0.16	0
-0.04	decreasing	True	PROVINCIA [23190320]	0.00	0
0.01	increasing	True	PTOWILCHES [23180020]	0.00	0
0.06	increasing	True	SABANADETORRES [23180070]	0.00	0
0.02	increasing	True	SANALBERTO [23190500]	0.00	0
0.02	increasing	True	SANRAFAEL [23190560]	0.00	0
-0.03	decreasing	True	SITIONUEVO [23180100]	0.00	0
0.00	no trend	False	VILLALEIVA [23185010]	0.73	0
0.02	increasing	True	YONDO [23160010]	0.00	0

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 10 se observa que en 11 estaciones poseen una tendencia decreciente en la serie de 1980 a 2020 correspondiente a las estaciones CENTROEL[23155040] ubicada en Barrancabermeja, Santander, BRISASLASHDA[24065010], COQUERALA[23180120] y SITIONUEVO[23180100] ubicadas en Puerto Wilches, Santander, AGUASCLARAS[24060040] MAGARA[23190210], PAYOA5[24060080] y PROVINCIA[23190320] ubicadas en Sabana de Torres, Santander, PLANESLOS[23190810], ubicada en San Alberto, Cesar y DORADALA[23190520] ubicada en San Martín, Cesar. Se observa que en 10 estaciones poseen una tendencia creciente correspondiente a las estaciones APTOYARIGUIES[23155030] y CHUCURI[23130010] ubicadas en Barrancabermeja, Santander, CAOBOEL[23190510] en La Esperanza, Norte De Santander PATURIA[23180110] y PTOWILCHES[23180020] ubicadas en Puerto Wilches, Santander, ELOYVALENZUELA[23180080], SABANADETORRES[23180070] y SANRAFAEL[23190560] ubicadas en Sabana de Torres, Santander, LIBANOEL[23190110] y SANALBERTO[23190500] ubicadas en San Alberto, Cesar y YONDO[23160010] ubicada en el municipio de Yondó, Antioquia. Se observa que 4

---

estaciones no poseen una tendencia clara BARRANCALEBRIJA [23190710] ubicada en Aguachica, Cesar, ESTABLOEL [23180050], PORVENIREL [23180040] y VILLALEIVA [23185010] ubicadas en Sabana de Torres, Santander. Finalmente debido al comportamiento descrito anteriormente no se puede establecer una tendencia en la precipitación en el área de estudio para este periodo evaluado.

### ***Distribución temporal y espacial de la precipitación***

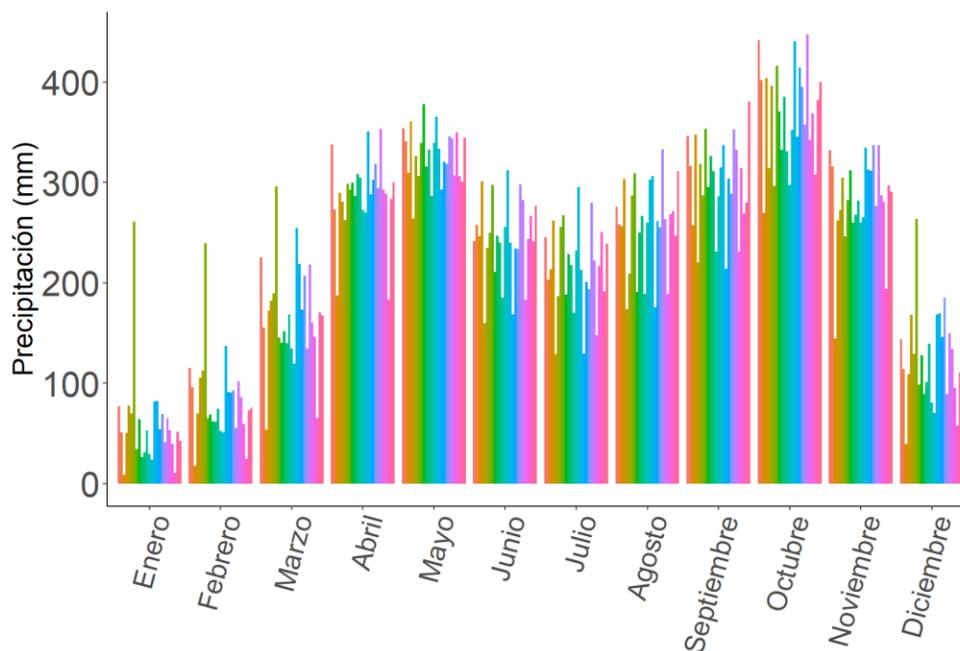
#### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de precipitaciones diarias se calculó la serie de precipitación mensual y se estimaron las precipitaciones medias mensuales multianuales por estación, en las cuales se observa que poseen un comportamiento bimodal propio de zonas montañosas, ver Figura 10. Adicionalmente, se establece que se presentan dos periodos de picos de lluvias en abril-junio y septiembre-noviembre. Al analizar los valores máximos medios mensuales multianuales se observa que en el mes de octubre en la estación SABANA DE TORRES [23180070] la precipitación puede llegar a 448mm perteneciente al municipio de Sabana de Torres, Santander en el centro del área de estudio; los valores mínimos medios mensuales se registraron en el mes de enero BARRANCALEBRIJA [23190710] con 9 mm de precipitación en el municipio de Agua Chica, Cesar. La Figura 12 presenta la distribución espacial de la precipitación media mensual multianual de cada mes en el área de estudio, la cual, se generó por medio de la interpolación IDW por medio de la herramienta QGIS<sup>5</sup>, en ella se puede apreciar los efectos de las reducciones de la precipitación durante las temporadas secas en los meses de diciembre, enero y febrero y aumentos en las precipitaciones las temporadas húmedas abril, mayo, octubre y noviembre.

---

<sup>5</sup> Para el presente estudio se estimó que la relación entre la altura y la precipitación media anual multianual. La cual posee un  $r^2$  de 0.0273 lo cual indica que la altura no afecta la precipitación en el área de estudio ver Anexo A y es válido utilizar la interpolación IDW para el presente trabajo

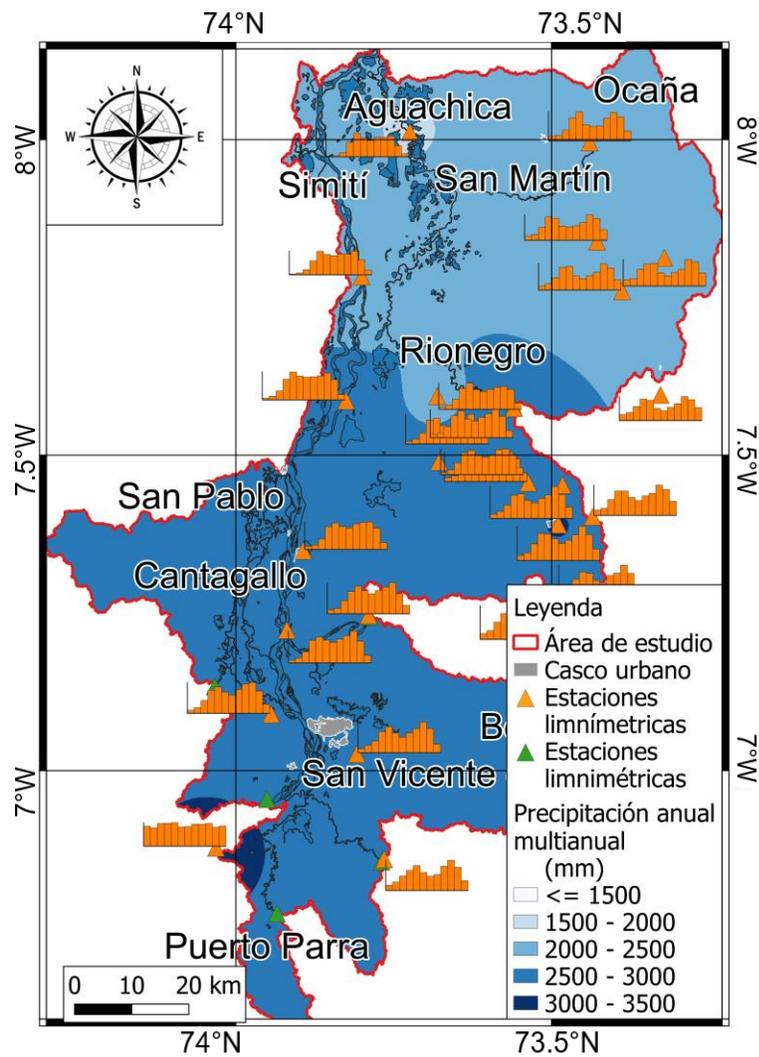
Figura 10. Estimación de precipitación media mensual multianual



### **Análisis anual**

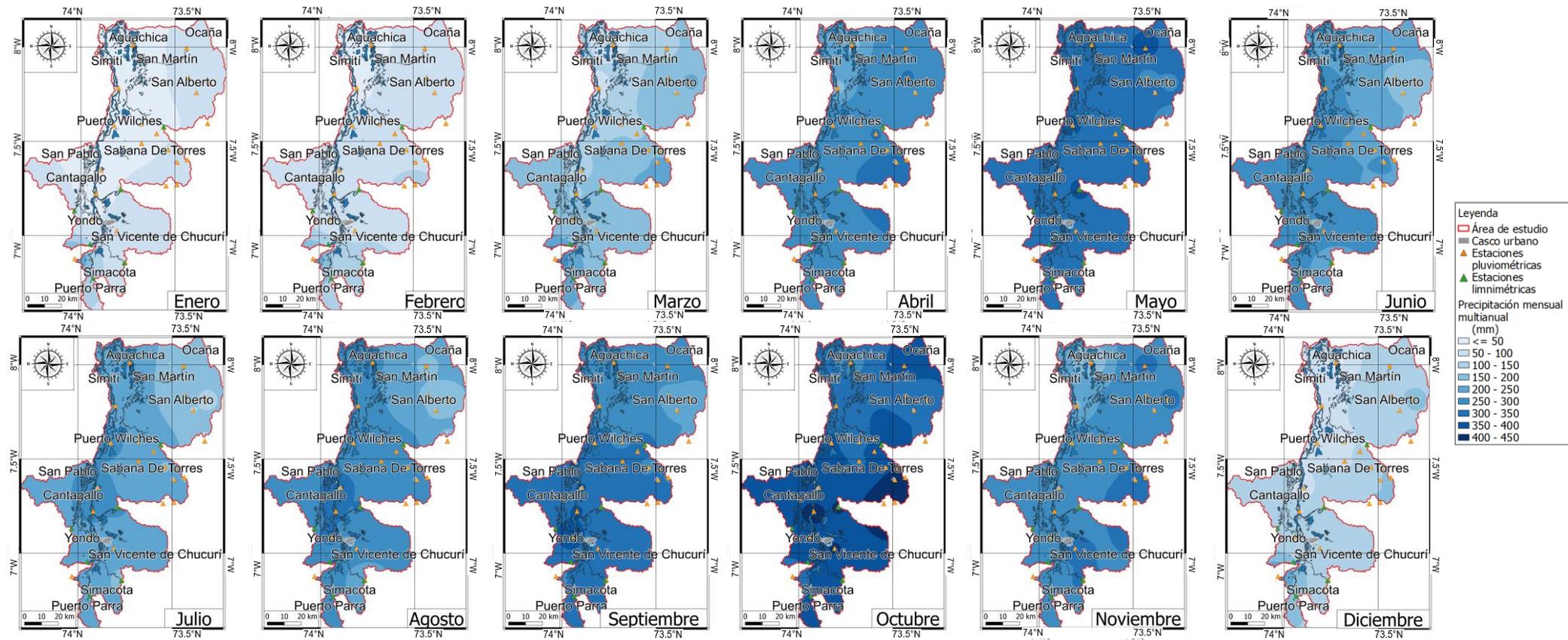
A partir de las series de precipitación mensual se estimó la serie de precipitación anual y se calcularon las precipitaciones medias anuales multianuales por estación. Con estos datos se logró establecer que en el área de estudio se presenta una precipitación media anual multianual de 2599 mm. Al analizar los valores máximos se observa que se presentan al Sur del área del estudio, precipitaciones registros que pueden llegar a los 3234 mm como en la estación CHUCURI [23130010] perteneciente en el municipio de Barrancabermeja, Santander; en los valores mínimos se observa que se presentan al Norte del área de estudio las precipitaciones que pueden alcanzar los 1925 mm anuales en la estación BARRANCALEBRIJA [23190710] perteneciente al municipio de Aguachica, Cesar, la Figura 11 presenta la distribución espacial de este parámetro, así como los histogramas mensuales registrados en cada estación.

Figura 11. Precipitación media anual multianual del área de estudio e histogramas de precipitación media mensual multianual de cada estación del IDEAM periodo 1980 a 2020



Fuente: adaptado de IDEAM

Figura 12. Precipitación media mensual multianual en el área de estudio



### 3.1.2 Caudales

Con el fin de analizar las dinámicas actuales de los caudales en el área de estudio se recopiló la información histórica de caudales diarios de las 6 estaciones del IDEAM del área de estudio, ver Figura 13, se realizó el análisis de identificación de datos anómalos, se completaron los datos faltantes y se realizaron análisis de homogeneidad y tendencia para después analizar los caudales que se presenta en la región y determinar los cambios que se estiman bajo los escenarios planteados.

#### **Identificación de datos anómalos**

Con la serie de caudales diarios por estación se utilizó la herramienta “PYOD” de Python con el fin de establecer los valores atípicos, la Tabla 11, presenta el registro de datos atípicos identificados en el área estudio calculados para el periodo 1980 a 2020. En el Anexo A se presentan las salidas gráficas donde visualmente se puede apreciar los datos atípicos por estación. Estos datos fueron eliminados de la serie de datos utilizada para los resultados presentados posteriormente.

Tabla 11. Datos atípicos de caudal en las estaciones del área de estudio

Estación	Cantidad datos atípicos
AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada	4
BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra	2
PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena	5
PTE SOGAMOSO [24067020] - Río Sogamoso	5
PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río Opón	8
SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija	7

#### **Procesamiento de datos faltantes**

Con la serie de caudales diarios por estación se utilizó la herramienta MICE de Python con el fin de completar los datos faltantes. En el Anexo A, se presentan las series de caudales diarios completas para cada estación, en la cual, se observa que los datos generados se encuentran dentro de la desviación estándar de las series originales, donde los caudales variaron  $\pm 3.1$  m<sup>3</sup>/s.

## **Análisis de homogeneidad y tendencia**

### **Prueba de Pettit**

Con la serie de caudales diarios completa se realizó el análisis de homogeneidad por medio de la prueba de Pettitt utilizando la herramienta pyHomogeneityl de Python cuyos resultados se presentan en la Tabla 12, adicionalmente, el Anexo A se puede observar gráficamente la prueba de homogeneidad aplicada por estación.

Tabla 12. Resultados de prueba de homogeneidad para caudal

<b>Caudal</b>							
<b>Estación</b>	<b>m1</b>	<b>m2</b>	<b>Fecha</b>	<b>p</b>	<b>h</b>	<b>diff media</b>	<b>cp</b>
BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra	74.8	97.1	15/07/19 88	0.0 0	True	22.3	3118
PTE SOGAMOSO [24067020] - Río Sogamoso	708.1	441.4	30/07/19 92	0.0 0	True	-266.8	4594
PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena	3334. 3	3023. 8	26/05/19 99	0.0 0	True	-310.5	7085
AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada	78.1	66.8	1/01/200 0	0.0 0	True	-11.3	7305
SITIO NUEVO [23187280] - Río Magdalena	4484. 1	4219. 2	11/07/20 00	0.0 0	True	-264.9	7497
PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río Opón	94.4	78.6	24/12/20 11	0.0 0	True	-15.8	1168 0
SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija	96.6	83.9	21/12/20 13	0.0 0	True	-12.7	1240 8

Bajo este análisis se identifica que todas las series de caudal diario en el área de estudio son homogéneas.

### **Prueba de Mann-Kendall**

Con la serie de caudales diarios completa se realizó el análisis de tendencia por medio de la prueba de Mann-Kendall utilizando la herramienta “pymannkendall1.4.1” de Python, en la Tabla 13 se presentan los resultados por estación. En la cual se observa que 4 estaciones poseen una tendencia decreciente en las estaciones SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija, PTE SOGAMOSO [24067020] - Río Sogamoso, PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena y AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada. Se

observa una tendencia creciente en la estación BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra y no existe tendencia en la estación de PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río Opón.

Tabla 13. Tendencia de Mann Kendal para caudales históricos

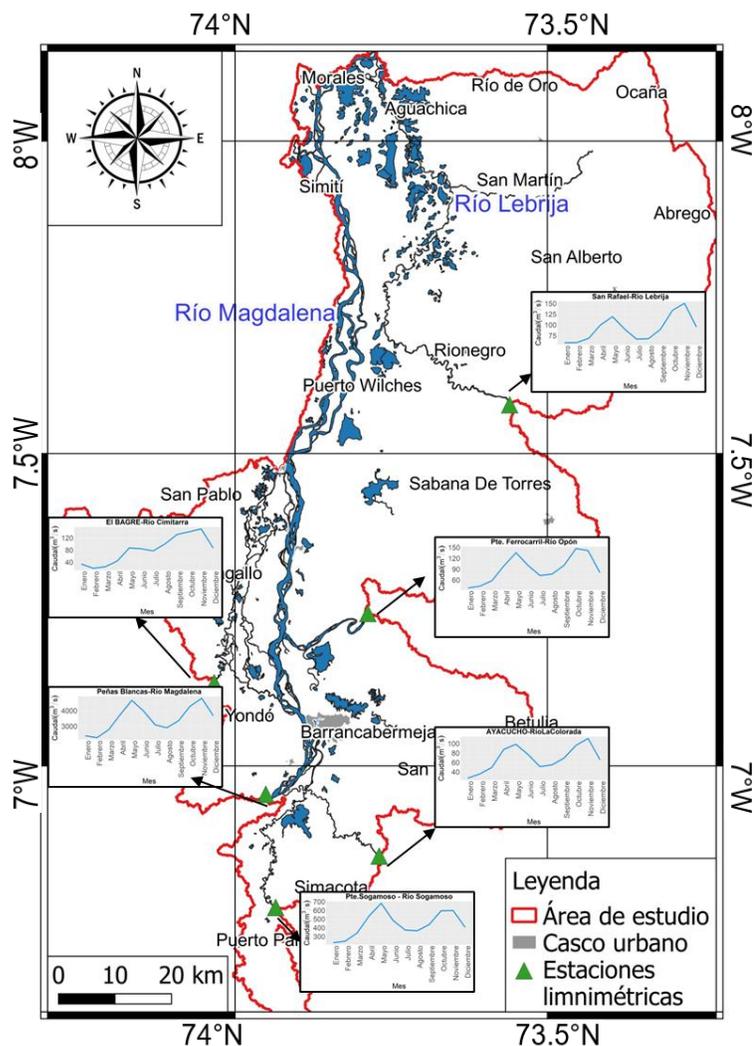
Caudal					
Tau	trend	h	Estación	p	slope
-0.03	decreasing	True	SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija	0.00	0
-0.25	decreasing	True	PTE SOGAMOSO [24067020] - Río Sogamoso	0.00	0
-0.08	decreasing	True	PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena	0.00	0
-0.01	no trend	False	PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río Opón	0.32	0
0.07	increasing	True	BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra	0.00	0
-0.08	decreasing	True	AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada	0.00	0

### ***Distribución temporal de los caudales***

Por medio del análisis de la serie de caudales diarios se identificó que la corriente con mayor caudal es el río Magdalena con valores de 2906 m<sup>3</sup>/s en la estación PENASBLANCAS [23167010] en el municipio de Yondó, Antioquia con Q95% de 1516m<sup>3</sup>/s y Q5% de 4755 m<sup>3</sup>/s; seguido por el río Sogamoso con valores promedio diarios de 439 m<sup>3</sup>/s en la estación PTE SOGAMOSO [24067020] en el municipio de Puerto Wilches, Santander con Q95% de 122 m<sup>3</sup>/s y Q5% de 975 m<sup>3</sup>/s. En relación con las corrientes restantes, están el río Lebrija con caudales medio diarios de 92 m<sup>3</sup>/s en la estación SAN RAFAEL [23197370] en el municipio de Sabana de Torres, Santander con Q95% de 30 m<sup>3</sup>/s y Q5% de 243 m<sup>3</sup>/s, el río Opón con caudales medios diarios de 91 m<sup>3</sup>/s en la estación PUENTE FERROCARRIL [23147020] en el municipio de Simacota, Santander con Q95% de 16 m<sup>3</sup>/s y Q5% de 245 m<sup>3</sup>/s; el río Cimitarra con caudales medios diarios de 82 m<sup>3</sup>/s en la estación BAGRE EL [23177010] en el municipio de Yondó, Antioquia con Santander con Q95% de 5 m<sup>3</sup>/s y Q5% de 180 m<sup>3</sup>/s y el río La Colorada con caudales medios diarios de 70 m<sup>3</sup>/s en la estación AYACUCHO - AUT [23147040] en el municipio de Barrancabermeja, Santander con Q95% de 7.6 m<sup>3</sup>/s y Q5% de 235 m<sup>3</sup>/s.

A partir de la serie de caudales diarios se calculó la serie de caudales mensuales y se estimaron los caudales medios multianuales por estación, en los cuales, se observa que presentan un comportamiento bimodal propio de ríos entre valles ver Figura 13.

Figura 13. Hidrógrafas de caudales de las estaciones del área de estudio



Fuente: adaptado de IDEAM

Con la información de precipitación y caudal completa en el periodo 1980 a 2020 se procedió a realizar el análisis de los efectos precipitación del proyecto Hidrosogamoso en la región y los efectos del El Niño y La Niña, para su posterior análisis a 2100.

### 3.2 Caso de estudio Hidrosogamoso

El proyecto hidroeléctrico Hidrosogamoso se empezó a concebir desde 1968, pero su construcción se inició hasta el 2009 y con posterior entrada a producción de energía eléctrica en el 2014; este es el cuarto proyecto energético de mayor capacidad instalada

en el país con 820 MW compuesto por tres unidades de generación de energía ubicado en La Playa corregimiento del municipio de Betulia, Santander ubicado en el río Sogamoso fuera del área de estudio. Este produce el 10% de la energía que requiere el país (CCB, 2014), el embalse posee un área de 7,000 hectáreas, un almacenamiento de 4,800 millones de metros cúbicos, una altura de 190 metros y 345 metros de ancho en su parte más ancha (ISAGEN, 2014) el cual se ubica aproximadamente a 52 kilómetros aguas arriba del área de estudios sobre el río Sogamoso.

Los efectos del proyecto en el río Sogamoso se han observado principalmente en la regulación de caudales debido a la capacidad de almacenamiento del embalse amortigua las crecientes generadas en temporadas lluviosas y funciona como un regulador del recurso en las temporadas secas (UNAL, 2021b), sin embargo, en este trabajo se quiere analizar si la entrada en operación del proyecto ha influido en los regímenes de lluvia que se experimentan en la zona. A continuación, se presenta un análisis sobre los cambios en la precipitación que pudo haber generado el proyecto en el área de estudio analizando dos periodos antes del inicio de operación del proyecto 1980 a 2014 y posterior a su inauguración 2015 a 2020.

### **Análisis de tendencia**

#### **Prueba de Mann-Kendall**

A partir de la serie mensual de precipitación por estación se le aplicó la prueba de Mann-Kendall para los periodos 1980-2014 y 2015-2022, con el fin de establecer si la entrada en operación de la Hidroeléctrica genera un cambio significativo en la tendencia de precipitación mensual. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 14 se establece que, si bien en el periodo entre 1980 a 2015 no existe tendencia, al analizar el siguiente periodo donde inicia la operación el proyecto hidroeléctrico esta condición se mantiene. Adicionalmente, al analizar la prueba de homogeneidad de la precipitación diaria por estación de la Tabla 9 se observa que ninguna estación posee un cambio considerable en la media después del año 2012.

Tabla 14. Prueba de tendencia Mann-Kendall precipitación Hidrosogamoso

Variable	1980-2014	2015-2020
<b>Tau</b>	0.025	0.000
<b>trend</b>	no trend	no trend

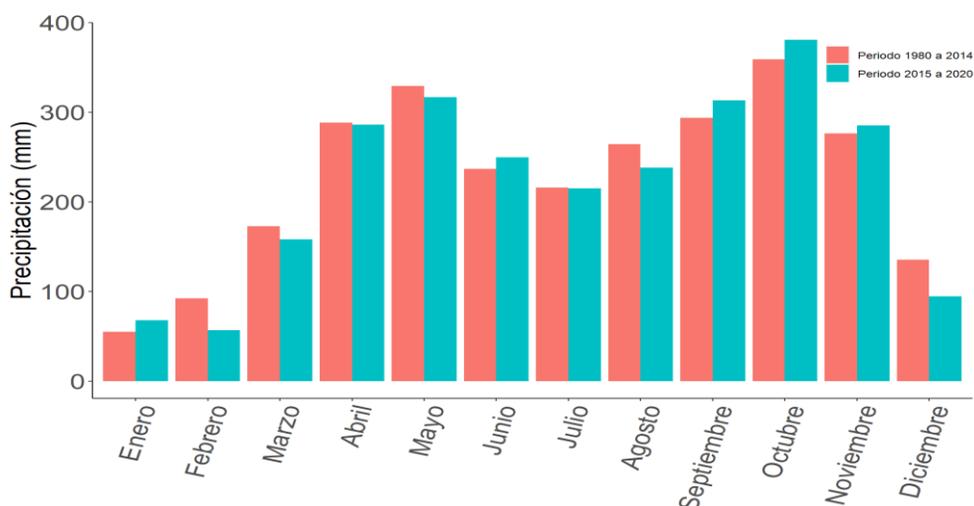
Variable	1980-2014	2015-2020
<b>h</b>	False	False
<b>p</b>	0.130	0.310
<b>slope</b>	0.010	-0.089

## ***Distribución temporal y espacial de la precipitación***

### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de precipitación mensual por estación se promediaron los valores y se estimaron las precipitaciones medias mensuales multianuales en el área de estudio para el periodo comprendido entre 1980 a 2014 y 2015 a 2020, los cuales se presentan en la Figura 14, adicionalmente, en la Figura 16 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones mensuales después de haber implementado el proyecto se observan un aumento en la precipitación en los meses de enero 23% principalmente en el municipio de Yondó, Antioquia, junio 5% principalmente en el municipio de Barranca bermeja, Santander, septiembre 6% principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander; disminuciones en los meses de febrero 38% principalmente en el municipio de Puerto Wilches, marzo 9% principalmente en el municipio de Puerto Wilches, agosto 10% principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar y diciembre 30% principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar; los meses de abril, mayo, julio y noviembre se observan cambios menores al 5%.

Figura 14. Histogramas de precipitación media multianual periodo 1980 a 2014 y de 2015 a 2020



### Análisis anual

A partir de la serie de precipitación mensual se estimó la serie de precipitación anual y se calcularon las precipitaciones medias anuales multianuales por estación. Con estos datos se logró establecer la precipitación media anual multianual en el área de estudio para los periodos 1980 a 2014 y 2015 a 2020. A partir de estos datos se permitió establecer que la precipitación media anual multianual antes de haber implementado el proyecto fue de 2719mm y después de haber implementado el proyecto fue de 2662 mm disminuyendo 2%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observan aumentos de 5% en Aguachica, Cesar y disminuciones de 9% en Yondó, Antioquia, 5% en La Esperanza, Norte de Santander y San Alberto, Cesar; en los municipios de Barrancabermeja, Puerto Wilches, Sabana de Torres, Santander y San Martín Cesar los cambios fueron inferiores al 5%, ver Figura 15 .

Finalmente, recopilando los análisis presentados anteriormente se observa que no ha existido un cambio considerable en la precipitación después de haber implementado el proyecto, sin embargo, es necesario enunciar que las series analizadas especialmente la de 2015 a 2020 poseen pocos datos siendo un limitante para el presente estudio.

Figura 15. a) Precipitación media anual multianual periodo 1980 a 2014 (izquierda) vs b) Precipitación media anual multianual después de Hidrosogamoso 2015 a 2022 (derecha)

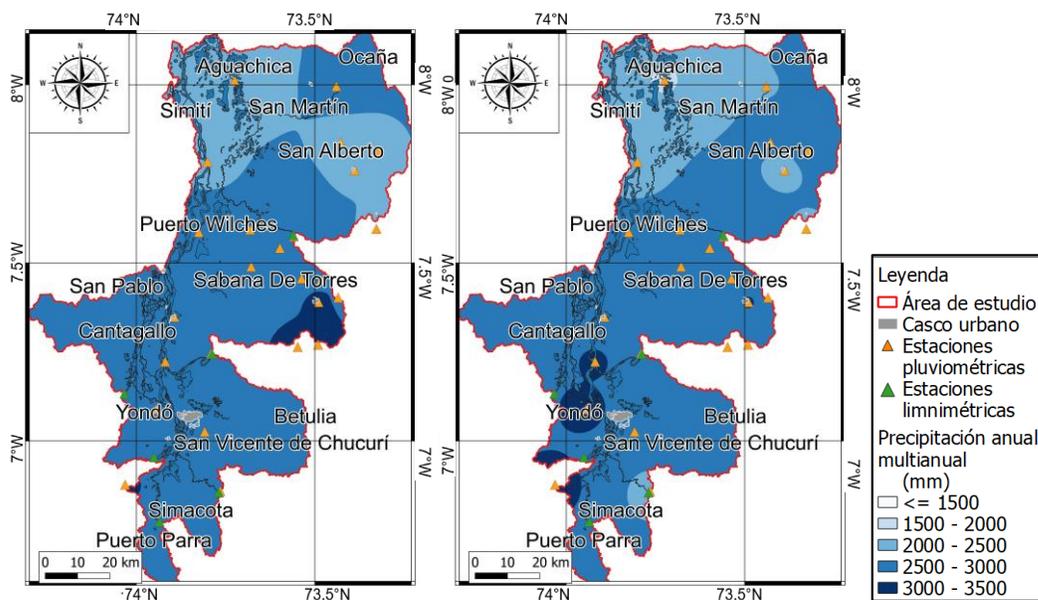
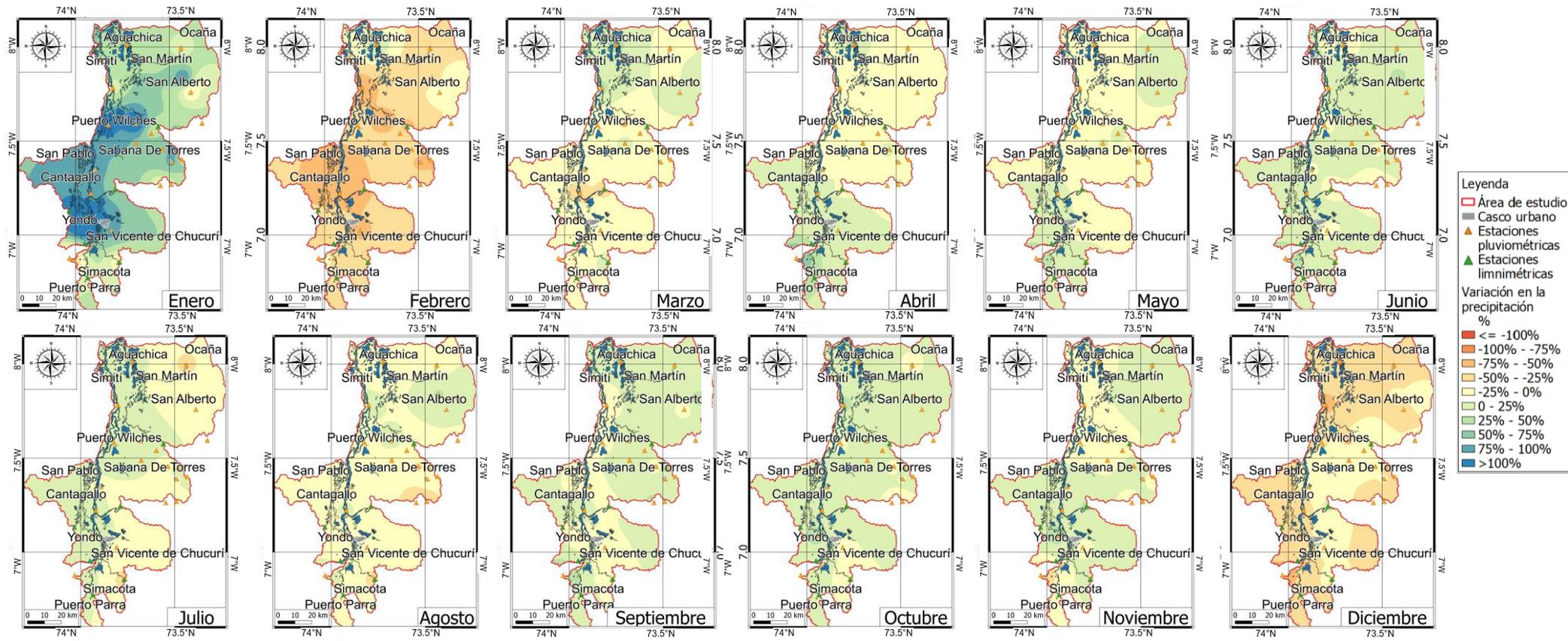


Figura 16. Variación porcentual de la precipitación media mensual multianual periodo 1980 a 2014 y de 2015 a 2020

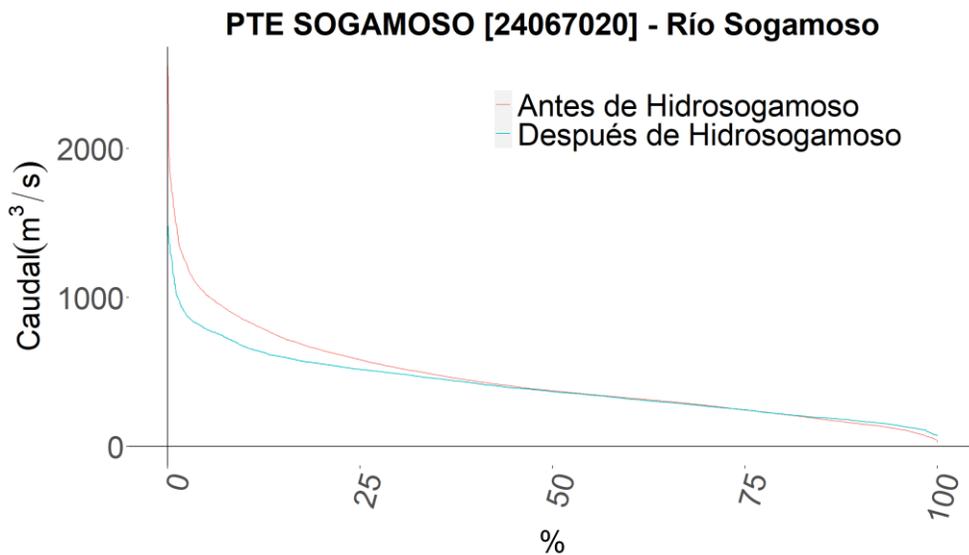


Teniendo en cuenta que el proyecto Hidrosogamoso afecta directamente al río Sogamoso se analizaron los cambios en los caudales antes y después del proyecto sobre esta corriente con los datos generados en la estación PTE SOGAMOSO [24067020] ubicada en el municipio de Puerto Wilches Santander. Por medio de los caudales diarios de los periodos 1980 a 2014 y 2015 a 2020 se estimaron las curvas de duración de caudales las sus diferencias porcentuales cuyos resultados se presentan en la Tabla 15 y Figura 17.

Tabla 15. Cambio porcentual en los tipos de caudales que se presentaron antes y después de implementar el proyecto

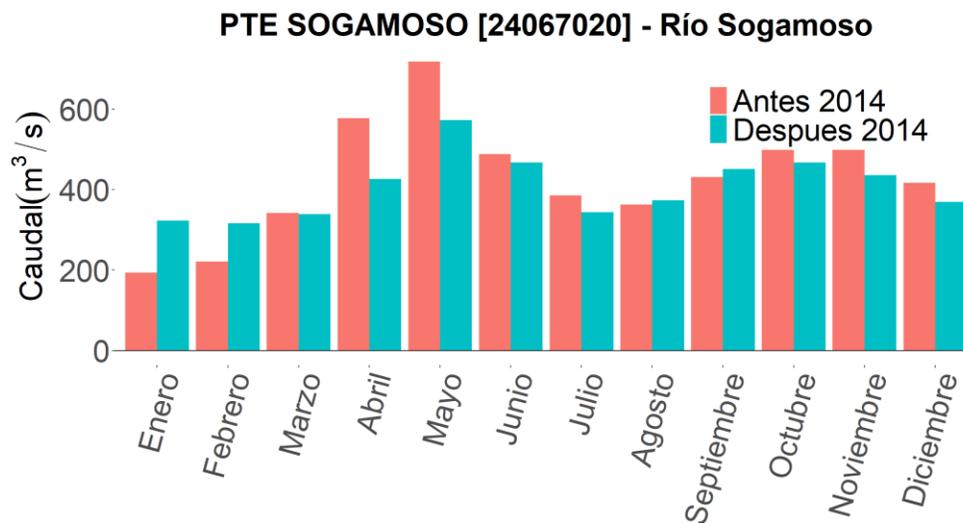
Variable	1980-2014	2015-2020	Cambio %
Q5%	1019	787	-22%
Q50%	374	368	-2%
Q95%	115	139	20%

Figura 17. a) Curva de duración de caudales antes y después de Hidrosogamoso



A partir de la serie de caudales diarios en esta estación se calculó la serie de caudales mensuales y se estimaron los caudales medios multianuales para los periodos 1980 a 2014 y 2015 a 2020 los cuales se presentan en la Figura 18. En el cual se observa que después de haber implementado este proyecto, en los meses secos como enero-febrero el río tiene 55% más de caudal y en los meses húmedos abril-mayo y octubre-noviembre el río posee 26% menos caudal.

Figura 18. Cambio en el histograma mensual multianual de caudales antes y después de Hidrosogamoso



Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente se determina que el proyecto Hidrosogamoso ha tenido un efecto directo sobre la distribución de los caudales del río Sogamoso causando una regulación de los caudales que se presentan condición normal de los embalses.

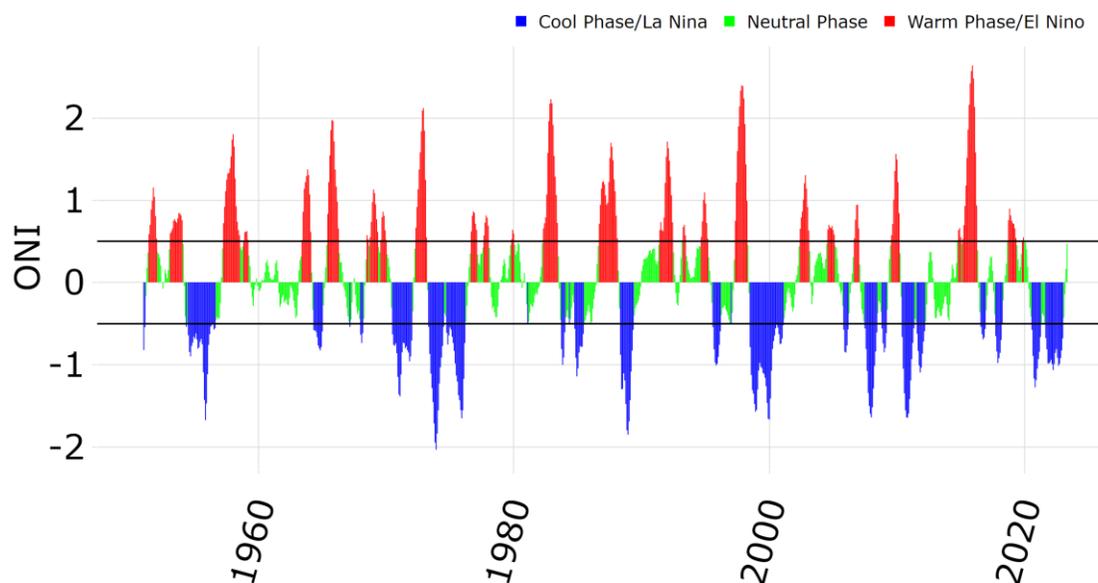
### 3.3 Caso de estudio ENOS

Como se presentó anteriormente, uno de los indicadores creados para establecer en qué fase del ENOS se está. Para el presente estudio se utilizó el Índice Niño Oceánico -ONI siendo el método adoptado por el IDEAM para en los estudios hidro climáticos, este índice se basa en la representación de la desviación promedio de la temperatura superficial del océano pacífico medida en dos puntos; de acuerdo con dicho indicador periodo El Niño se caracteriza por presentar valores positivos mayores o iguales a  $0.5^{\circ}\text{C}$ ; La Niña por valores negativos menores o iguales a  $0.5^{\circ}\text{C}$  y la condición Neutra o normal entre  $-0.5$  y  $0.5^{\circ}\text{C}$  (NOAA, 2023).

Teniendo en cuenta que desde 1980 más de 18 estaciones del IDEAM en el área de estudio registran información diaria de precipitación, se seleccionaron los años clasificados como El Niño por medio del índice ONI los cuales fueron: 1982, 1983, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2002, 2004, 2015 y 2019 ver Figura 19. Este mismo ejercicio realizó con los años considerados La Niña de acuerdo al índice ONI ver Figura 19 lo que dio como

resultado los años 1984,1985, 1988, 1989, 1996, 1999, 2000, 2007, 2008, 2010, 2011, 2021 y 2022. Así mismo, se determinó que los años Neutros son 1980, 1981, 1986, 1990, 1993, 1995, 1998, 2001, 2003, 2005, 2006, 2009, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018 y 2020.

Figura 19. Medición del ONI



### **Análisis de tendencia**

#### **Prueba de Mann-Kendall**

A partir de la serie mensual de precipitación por estación se aplicó la prueba de tendencia Mann-Kendall para los periodos considerados Neutro, El Niño y La Niña con el fin de establecer la tendencia que han tenido la precipitación mensual bajo estos fenómenos en la región. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 16 se establece no existe tendencia para ningún periodo, por lo cual se establece que no se observa que año a año estos fenómenos hayan aumentado o disminuidos en el periodo analizado.

Tabla 16. Prueba de tendencia Mann-Kendall precipitación ENOS

Variable	Neutro	EL Niño	La Niña
<b>Tau</b>	0.003	0.001	0.025
<b>trend</b>	no trend	no trend	no trend
<b>h</b>	False	False	False
<b>p</b>	0.890	0.960	0.360
<b>slope</b>	0.002	0.002	0.027

---

## ***Cambio en distribución temporal y espacial de la precipitación bajo el escenario El Niño-Neutro***

### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de precipitación mensual por estación se promediaron los valores y se estimaron las precipitaciones medias mensuales multianuales en el área de estudio para el periodo Neutro y El Niño, los cuales se presentan en la Figura 20, adicionalmente, en la Figura 22 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones mensuales bajo la condición Neutra con respecto a El Niño, se observan disminuciones en la precipitación en los meses de enero 31% y 16% en marzo principalmente en el municipio de Aguachica Cesar, 15% en junio principalmente en el municipio de Sabana de Torres, Santander, 35% en agosto principalmente en los municipios de San Alberto, Cesar y Yondó Antioquia y 42% en diciembre principalmente el municipio de Sabana de Torres; aumentos de 6% en febrero principalmente en La Esperanza Norte de Santander y 10% en abril principalmente en San Martín, Cesar; los meses de mayo, julio, septiembre, octubre y noviembre se observan cambios menores al 5%.

### ***Análisis anual***

A partir de la serie de precipitación mensual se estimó la serie de precipitación anual y se calcularon las precipitaciones medias anuales multianuales por estación. Con estos datos se logró establecer la precipitación media anuales multianual en el área de estudio para los periodos Neutro y El Niño. A partir de estos datos se permitió establecer que la precipitación media anual multianual en el periodo Neutra fue de 2710mm y en el periodo El Niño pasa a 2487mm disminuyendo 8%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observa una disminución de 13% en San Alberto, Cesar, 9% en Sabana de Torres, Santander, 8% en los municipios de Puerto Wilches Santander y Yondó, Antioquia y 6% en los municipios de La Esperanza, Norte de Santander, Aguachica, Cesar y Barrancabermeja; en el municipio de San Martín, Cesar los cambios fueron inferiores al 5%, ver Figura 21.

## ***Cambio en distribución temporal y espacial de la precipitación bajo el escenario La Niña-Neutro***

---

### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de precipitación mensual por estación se promediaron los valores y se estimaron las precipitaciones medias mensuales multianuales en el área de estudio para el periodo Neutro y La Niña, los cuales se presentan en la Figura 20, adicionalmente, en la Figura 23 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones mensuales bajo la condición Neutra con respecto a La Niña, se observan aumentos de 7% en enero principalmente en el municipio de San Martín, Cesar, 19% en febrero principalmente en el municipio de Puerto Wilches, Santander, 20% en junio principalmente en Aguachica, Cesar, 31% en julio principalmente en Yondó, Antioquia, 18% en agosto principalmente en los municipios de San Martín, Cesar y La Esperanza, Norte de Santander, 10% en septiembre en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander, 6% en octubre principalmente en el municipio de Puerto Wilches, Santander, 10% en noviembre principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar y 26% en diciembre principalmente en Puerto Wilches, Santander; los meses de marzo, abril y mayo se observan cambios menores al 5%.

### ***Análisis anual***

A partir de la serie de precipitación mensual se estimó la serie de precipitación anual y se calcularon las precipitaciones medias anuales multianuales por estación. Con estos datos se logró establecer la precipitación media anuales multianual en el área de estudio para los periodos Neutro y La Niña. A partir de estos datos se permitió establecer que la precipitación media anual multianual en el periodo Neutra fue de 2710mm y en el periodo La Niña pasa a 3001mm aumentando 11%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observa un aumento de 16% en Aguachica Cesar, 15% en San Martín Cesar, 13% en Puerto Wilches, Santander, 12% en San Alberto, Cesar y La Esperanza Norte de Santander, 10% en Sabana de Torres, Santander, 9% en Yondó, Antioquia y 6% en Barrancabermeja, Santander, ver Figura 21.

Figura 20. Histograma de precipitación media multianual en los periodos Neutro, El Niño y La Niña

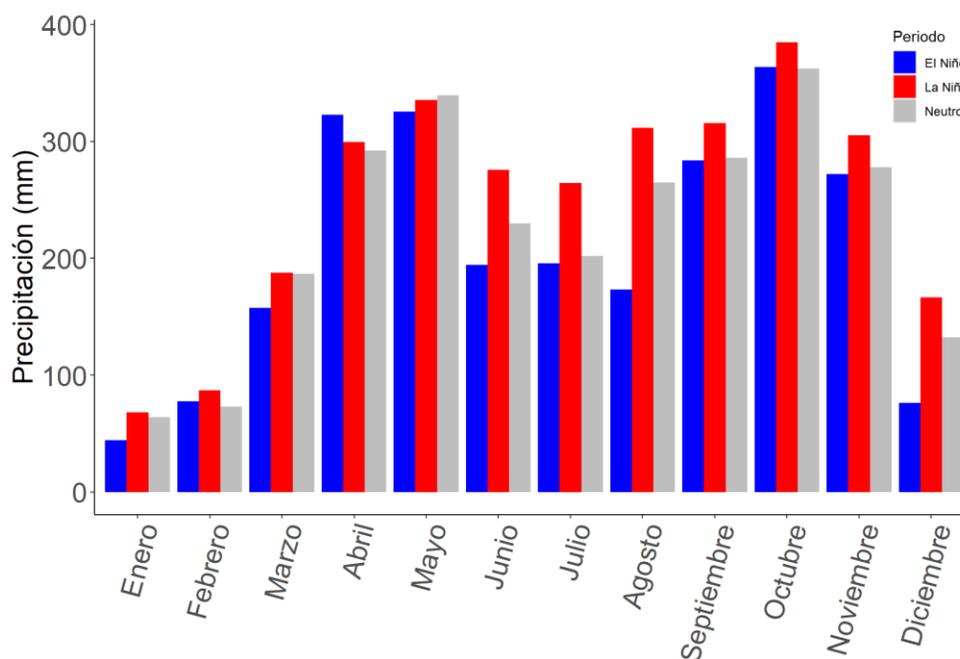


Figura 21. a) Precipitación media anual multianual periodo Neutro (izquierda) b) Precipitación media anual multianual periodo El Niño c) Precipitación media anual multianual en el periodo La Niña

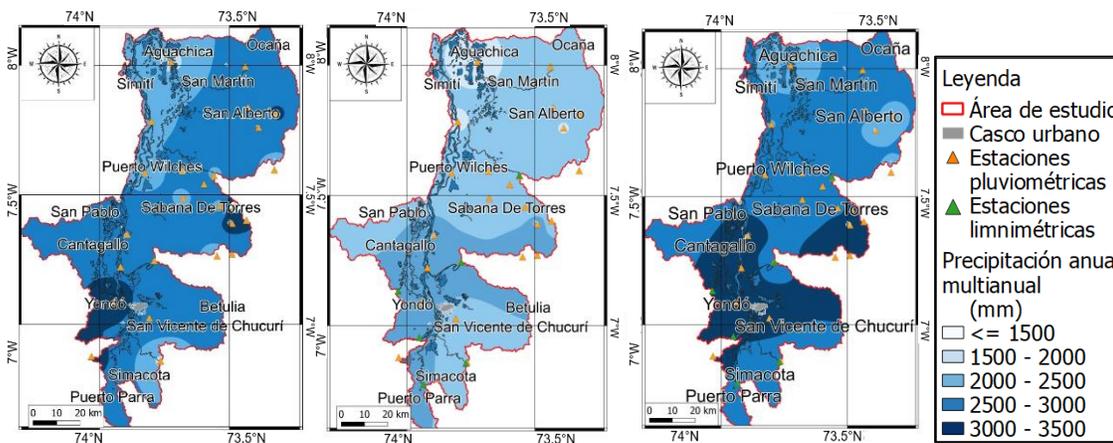


Figura 22. Variación porcentual de la precipitación media mensual periodo El Niño en comparación el periodo Neutro

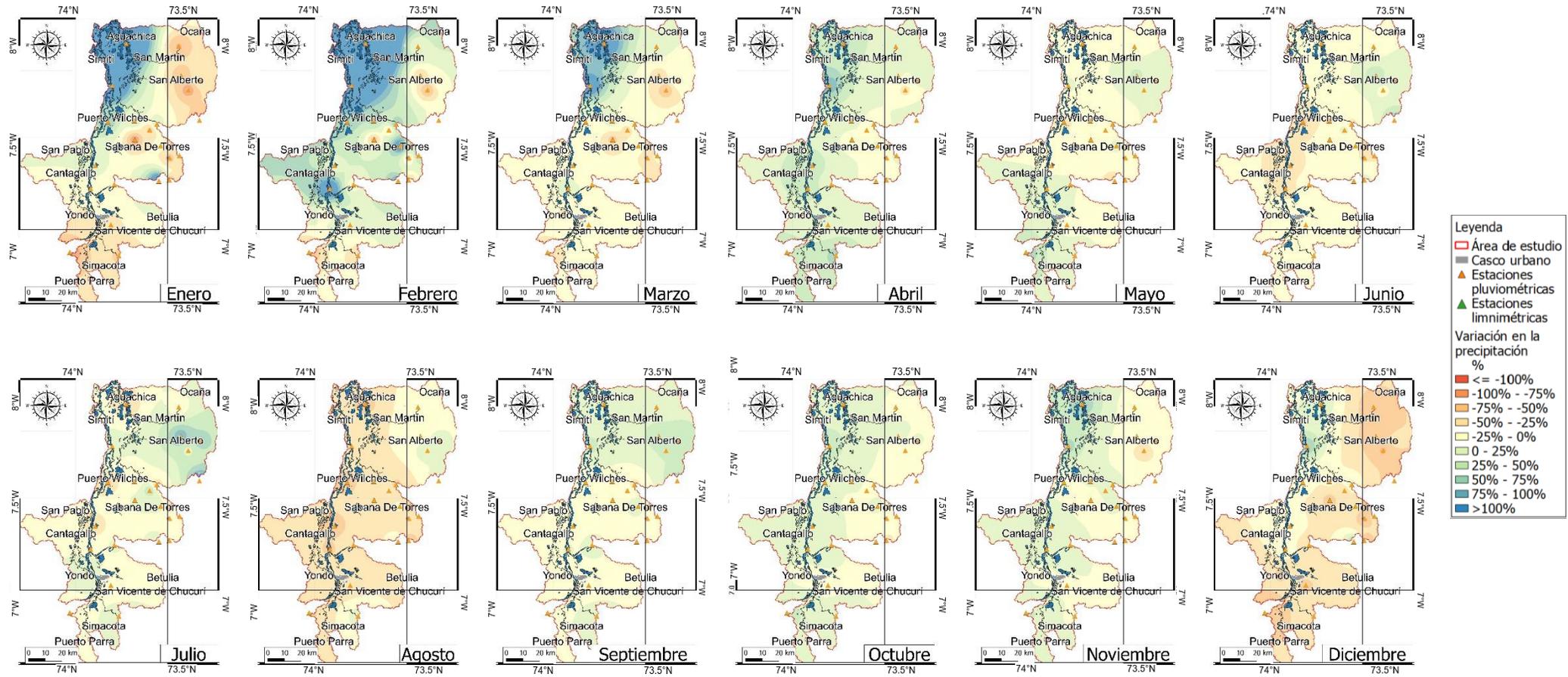
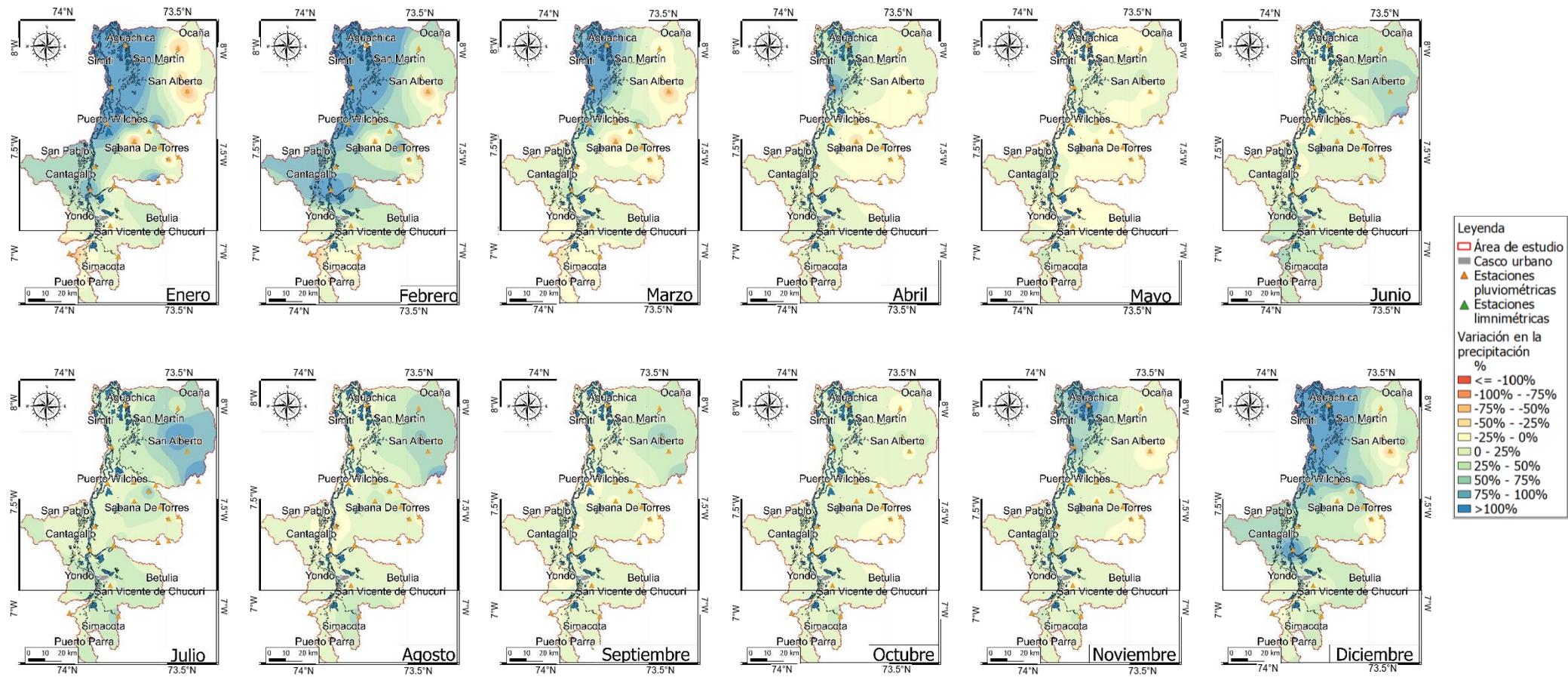


Figura 23. Variación porcentual de la precipitación media mensual periodo La Niña en comparación el periodo Neutro



### 3.4 Escenarios de cambio climático desde 2020 hasta 2100

Con el fin de poder realizar el análisis de cambio climático en la zona de estudio se recopilaron las simulaciones realizadas en la precipitación mensual desde 2021 hasta el año 2100 recopiladas por el CMIP6 para el área de estudio, las cuales están disponibles en el repositorio de información climática WorldClim versión 2.1<sup>6</sup> para los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.0 de 26<sup>7</sup> Modelos de Circulación Climática; 15 de ellos han sido utilizados por el IDEAM<sup>8</sup> para las proyecciones nacionales de cambio climático (IDEAM, 2018).

Con esta información se estableció el promedio de precipitación mensual de los modelos enunciados anteriormente por medio de la herramienta algebra de mapas de QGIS para los periodos 2021-2024, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100; así mismo se estableció que los datos pronosticados cumplan la bimodalidad que hidrológicamente se presenta en el área de estudio, la cual se mantiene ver Figura 24.

Con estos datos se estimaron las series de precipitación futura que se registraría en cada una de las 25 estaciones del IDEAM, con el fin de aplicar el método de Interpolación mediante distancia inversa-IDW para abarcar toda el área de estudio y establecer el comportamiento futuro de la precipitación en la zona de estudio. Una vez se realizó este proceso se analizó la información generada entre los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.0 y se estableció que la diferencia de precipitación entre los dos escenarios es del 0.3%. Por lo tanto, se asume que no hay diferencia considerable entre los valores y sólo se considerará en el presente estudio el escenario SSP5-8.0 ya que éste involucra mayores cambios en las variables climática o en otras palabras describe el peor escenario.

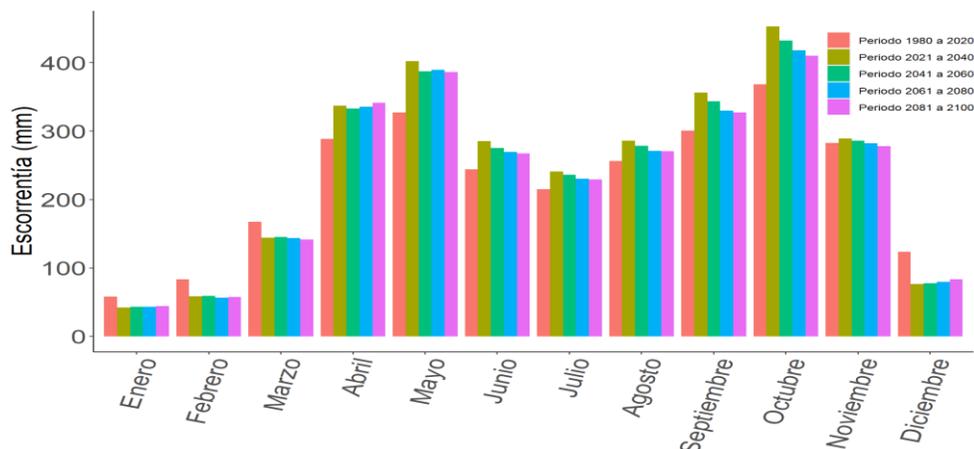
---

<sup>6</sup> <https://www.worldclim.org/>

<sup>7</sup> ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, CanESM5, CanESM5-CanOE, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, CNRM-CM6-1-HR, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-Veg, EC-Earth3-Veg-LR, FIO-ESM-2-0, GFDL-ESM4, GISS-E2-1-G, GISS-E2-1-H, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y UKESM1-0-LL

<sup>8</sup> BCC-csm1-1-m, CCSM4, CSIROmk3-6-0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM y NorESM1-ME

Figura 24. Comparación de bimodalidad del régimen hidrológico entre periodo 1980 a 2020 (histórico), 2021 a 2040, 2041 a 2060, 2061 a 2080 y 2081 a 2100



Teniendo en cuenta que los modelos descritos anteriormente son de escala mundial es necesario reducir las estimaciones futuras a una escala regional que tenga en cuenta la topografía del área de estudio, para ello se realizó un des escalamiento “downscaling” de la información meteorológica de los modelos globales de cambio climático (Guanuchi, 2015). Este proceso se generó mediante un downscaling estadístico en el que se establecieron relaciones cuantitativas de las variables locales con los modelos de nivel mundial, ver Ecuación 2.

#### Ecuación 2. Formula de downscaling estadístico

$$V_{real} = k(z)V_{mundial}$$

Donde,

$V_{real}$ , es la variable mensual que se quiere saber (precipitación, temperatura entre otros)

$k(z)$ , es la función determinista o estocástica (puede ser lineal o no lineal) en función de la altura (z)

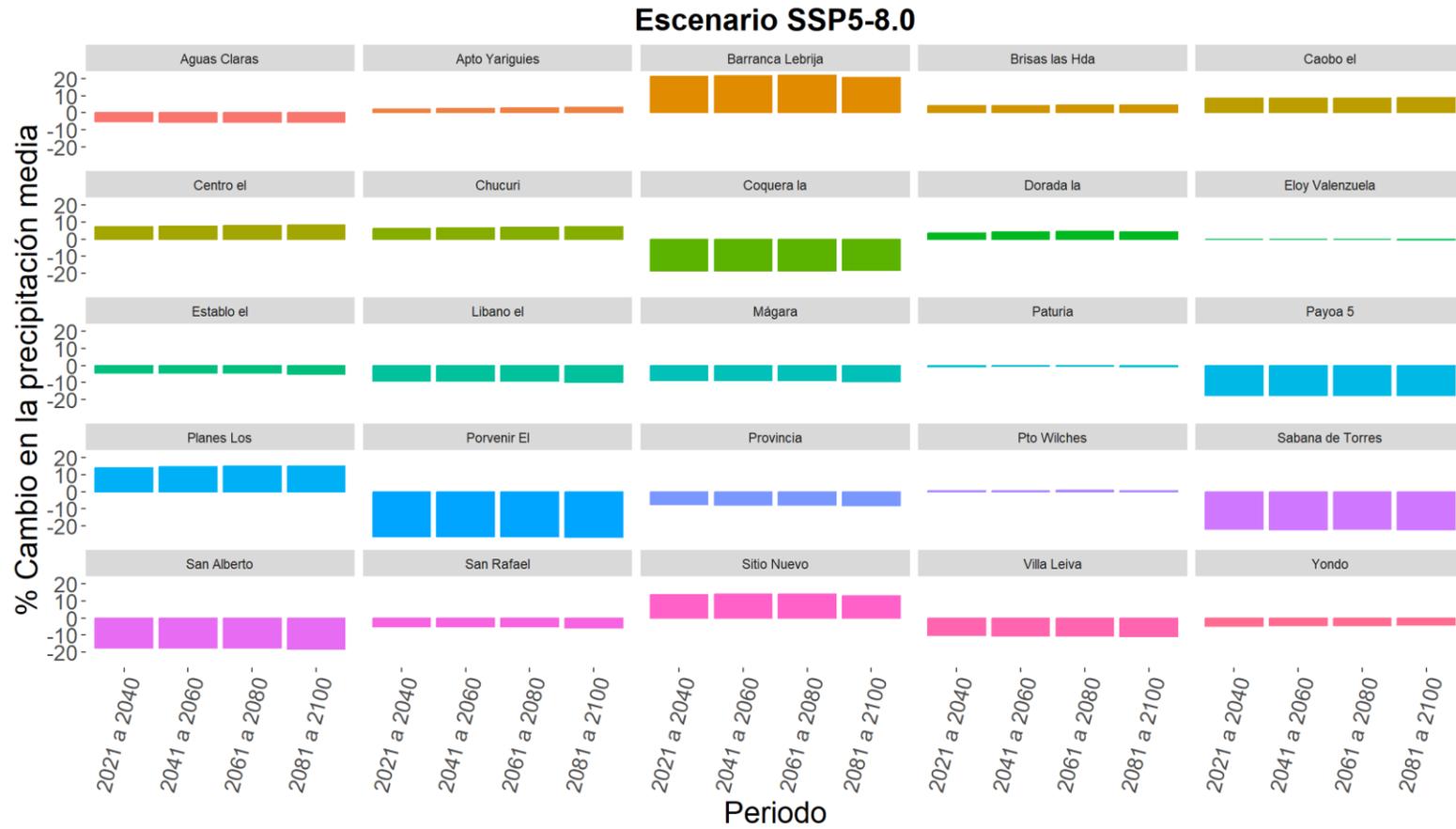
$V_{mundial}$ , es la variable mensual que se obtiene de los modelos de predicción de cambio climático (precipitación, temperatura entre otros)

Los valores  $V_{real}$  se estiman por medio de los valores mensuales registrados por el IDEAM; los valores  $V_{mundial}$  se estiman por medio de los valores mensuales calculados de los modelos de cambio climático provenientes del WorldClim en el mismo pixel que la estación del IDEAM; con estos resultados se estiman los valores de la función k los cuales se grafican vs la altura del DEM y se determina la ecuación por medio de una línea de tendencia, ver ANEXO B. Con los valores de la altura registrada por el IDEAM se utiliza la

ecuación definida anteriormente para determinar el valor de  $k$  y por medio de la Ecuación 2 se determina el  $V_{real}$ . Este método se aplicó para las series mensuales de precipitación y temperatura de los periodos 2021 a 2040, 2041 a 2060, 2061 a 2080 y 2081 a 2100 para cada una de las 25 estaciones climáticas del área de estudio, Ver Anexo B.

Con los datos estimados de precipitación media anual multianual del periodo 1980 a 2020 en las estaciones del área de interés y las estimaciones precipitación media anual multianual de los periodos 2021 a 2040, 2041 a 2060, 2061 a 2080 y 2081 a 2100 se estimó la variación porcentual de esta variable para cada estación, ver Figura 25. En ella se observa que, en 15 de las 25 estaciones analizadas, la precipitación disminuirá para el año 2100 con referencia a los históricos.

Figura 25. Variación de la precipitación a 2100 de acuerdo con las estimaciones de cambio climático



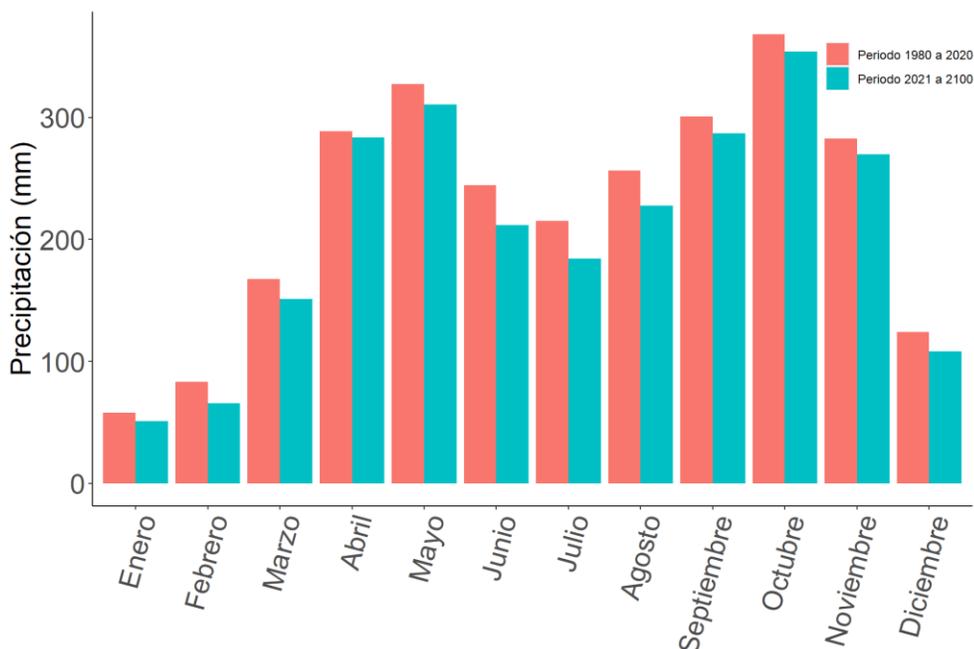
Para este caso no se aplicó prueba tendencia debido a que como se comentó anteriormente la serie de datos precipitación desde 2021 a 2100 fueron construidos artificialmente para cada estación siguiendo la tendencia descrita en la Figura 25, por lo tanto, este análisis no aportaría información relevante para el presente estudio.

### ***Distribución temporal y espacial de la precipitación***

#### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de precipitación mensual por estación se promediaron los valores y se estimaron las precipitaciones medias mensuales multianuales en el área de estudio para el periodo comprendido 2021 a 2100 y se compararon con las establecidas en el periodo 1980 a 2020, los cuales se presentan en la Figura 26, adicionalmente, en la Figura 28 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones mensuales a 2100 se observa una disminución de 12% en el mes de enero principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander, 21% en el mes de febrero principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander, 10% en el mes de marzo, principalmente en el municipio de Sabana de Torres, Santander, 13% en el mes de junio y 14% en julio principalmente en el municipio de Puerto Wilches, Santander, 11% en el mes de agosto principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar, 5% en septiembre en el municipio de Yondó, Antioquia, 5% en noviembre principalmente en Sabana de Torres, Santander y 13 % en diciembre principalmente en La Esperanza, Norte de Santander; los meses de abril, mayo y octubre se observan cambios menores al 5%.

Figura 26. Histograma de precipitación media multianual periodo 1980 a 2020 y 2021 a 2100



### **Análisis anual**

A partir de la serie de precipitación mensual se estimó la serie de precipitación anual y se calcularon las precipitaciones medias anuales multianuales por estación. Con estos datos se logró establecer la precipitación media anuales multianual en el área de estudio para los periodos 1980 a 2020 y 2021 a 2100. A partir de estos datos se permitió establecer que la precipitación media anual multianual en el periodo 1980 a 2020 fue de 2599mm pasando a 2464mm en el periodo 2021 a 2100 siendo una disminución de 5%. Al analizar los cambios de esta variable por municipio muestran una disminución del 22% en el municipio de Yondó, Antioquia, 16% en San Alberto, Cesar y 10% en San Martín, Cesar; aumentos de 6% en el municipio de Barrancabermeja, Santander y 9% en Yondó, Antioquia; los municipios de Aguachica, Cesar, Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander tienen cambios menores al 5%, ver . Estos resultados se equiparán a las estimadas por el IDEAM, donde se establece que en la zona de estudio el cambio en porcentaje de la precipitación entre 2070 a 2100 podrían estar entre 10% a -20% (IDEAM, 2017b).

Figura 27. Variación de precipitación multianual 1980 a 2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100

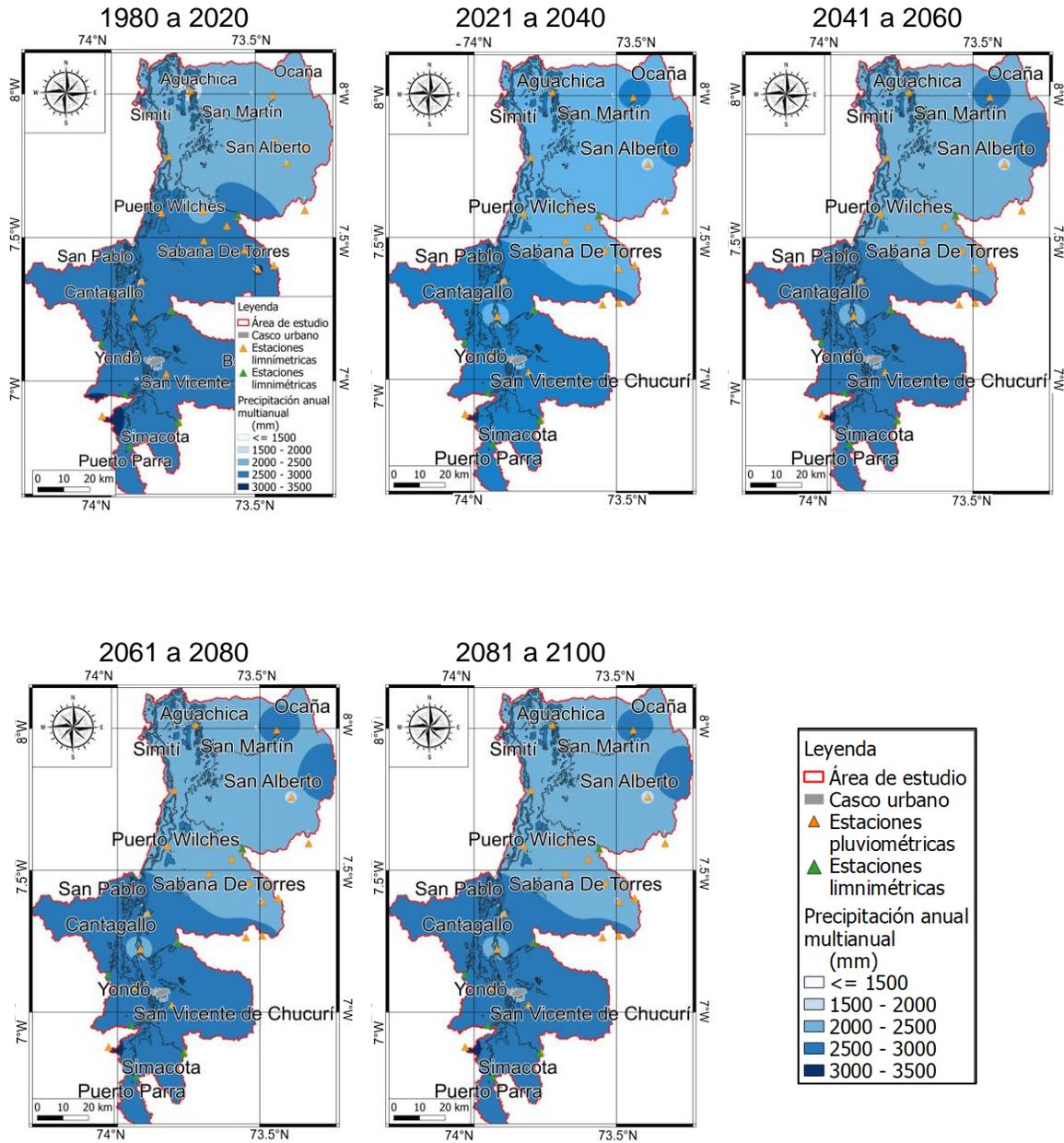
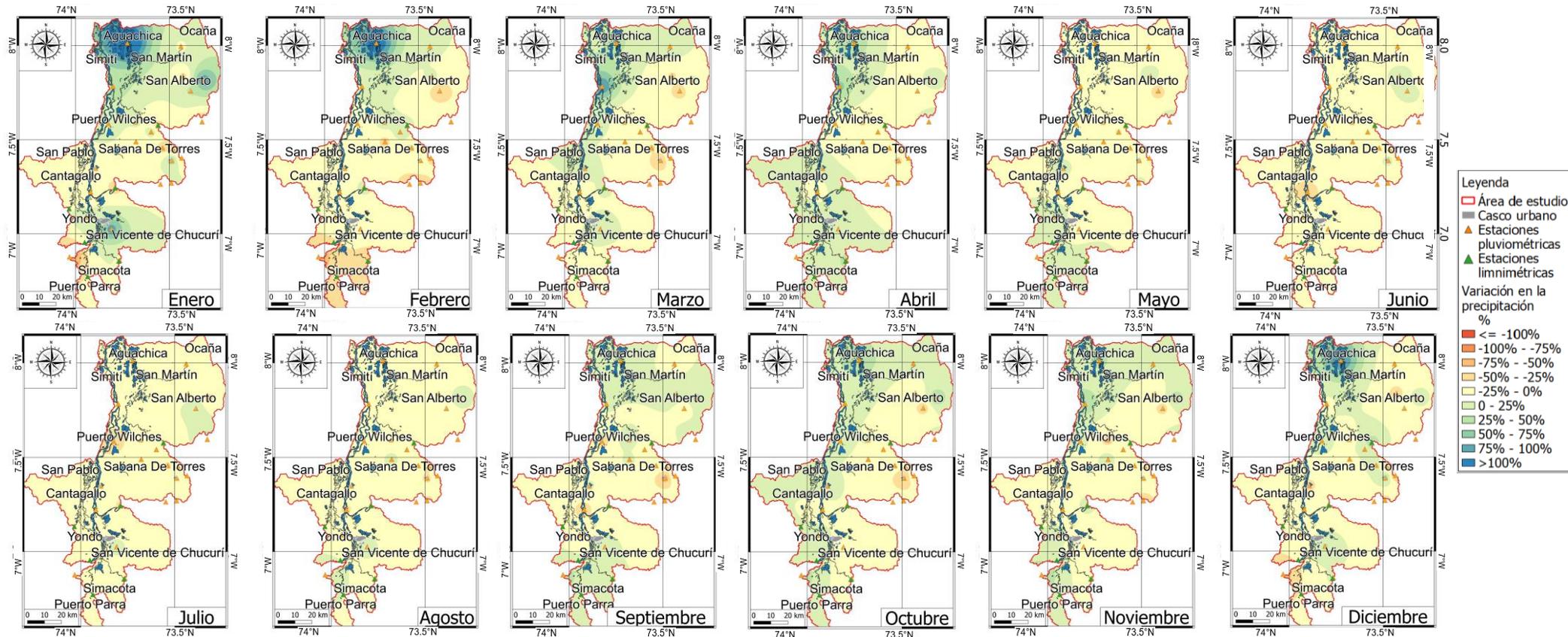


Figura 28. Variación porcentual de la precipitación media mensual multianual entre el periodo 2021 a 2100 con respecto a 1980 a 2020



En esta sección se presentó la línea base del comportamiento histórico de la precipitación y el caudal en el área de estudio, asimismo, se analizaron los cambios que Hidrosogamoso ha ocasionado en estas variables, así como El Niño/La Niña. Adicionalmente se estimaron los campos de lluvia pronosticados a 2100, por medio de las estimaciones del proyecto CMIP6 para el área estudio; las cuales se procesaron por medio de un downscaling con el fin de mejorar las estimaciones a las condiciones regionales. En el capítulo siguiente, se presenta los resultados obtenidos de la oferta de agua en la región a partir de los resultados hidrológicos que se presentaron este capítulo por medio de la modelación en SWAT.



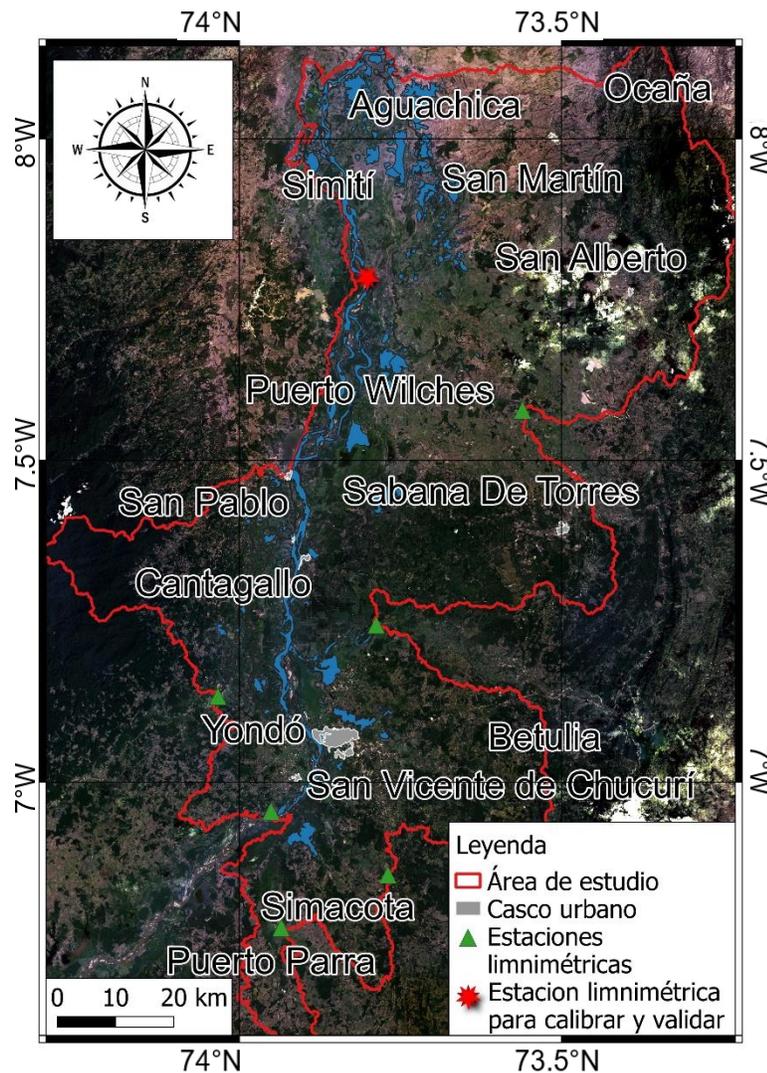
## **4. Modelación hidrológica**

Con el fin de establecer el comportamiento de la escorrentía superficial o la oferta hídrica en el área de estudio, actuales, bajo la influencia de Hidrosogamoso, ENSO y futuros. Se realizó un modelo hidrológico en el software SWAT recopilando la información presentada en los capítulos 1, 2 y 3 siguiendo el diagrama presentado en la Figura 3. Dicho modelo fue “calentado” con una serie de datos hidrológicos de datos de 10 años anteriores al horizonte de modelación, para posteriormente pasar al proceso de calibración, validación y pronóstico, cuyos resultados se presentan a continuación.

### **4.1 Calibración y validación del modelo**

Una vez se imprentó el modelo SWAT con los datos observados, es necesario realizar el análisis de sensibilidad, calibración y validación de un modelo hidrológico es fundamental porque analiza cuán similares son las predicciones del modelo a lo que se observa en la realidad. Para la actual investigación, dicho ejercicio se realizó por medio de los datos observados en la estación PEÑAS BLANCAS [23167010] ubicada sobre la corriente del río Magdalena siendo la única dentro del área de estudio y se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Estación utilizada para realizar la calibración del modelo SWAT



Para esto se realizó el proceso de calibración con la serie de datos simulados por el SWAT y se compararon los resultados de caudal con los observados por el IDEAM en la estación presentada anteriormente para el mismo periodo. Este ejercicio se realizó por medio de la herramienta CUP (Procedimientos de Calibración e Incertidumbre) del modelo SWAT, el cual, cuenta con cinco programas de calibración y permite realizar análisis de validación y sensibilidad. Para ello se utilizó el programa SUFI-2 debido a que ha funcionado para modelos a gran escala (Abbaspoura & et. Al, 2015) como el empleado en el presente estudio. Para ello se realizó la calibración de 24 parámetros del modelo a partir de 300 simulaciones, con el objetivo de tomar los parámetros en los cuales se lograba el mejor ajuste a los datos observados; durante este proceso se observó que después de varios intentos se encontró que las mejores simulaciones se lograban en la primera iteración

logrando un  $r^2$  de 0.84 por lo cual se considera que el modelo está calibrado, sin embargo la poca información observada dentro del área de estudio no permitió mejorar este proceso presentándose como una limitación del modelo.

En cuanto al análisis de sensibilidad a los parámetros analizados se encontró que el modelo es especialmente sensible al coeficiente de retraso de la escorrentía superficial, ver Tabla 17, el cual, influye directamente en la estimación del caudal del modelo.

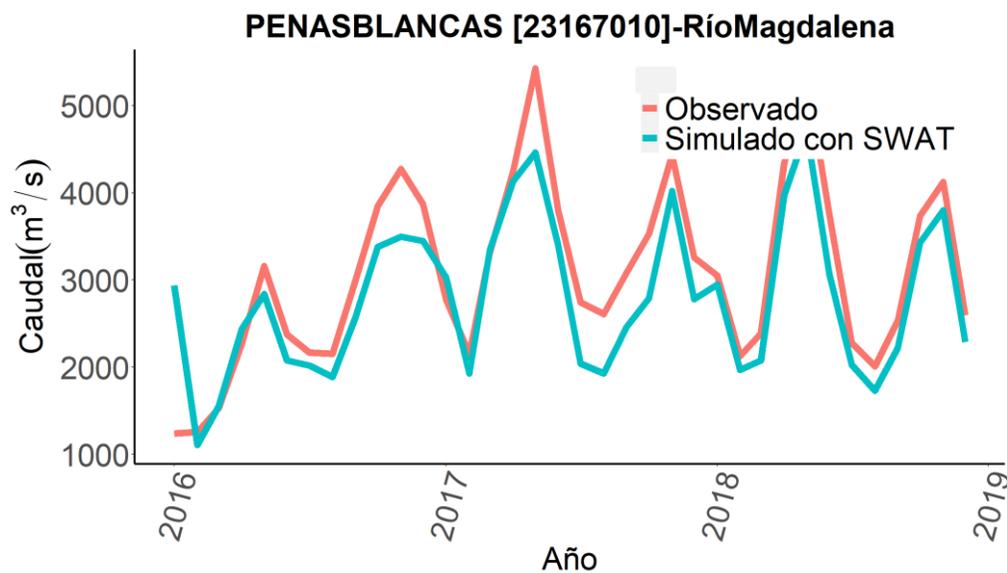
En cuanto al proceso de validación, en el cual se evalúa el desempeño del modelo para reproducir valores observados, se seleccionaron los caudales medios observados durante el periodo de 2016 a 2019 de la estación PEÑAS BLANCAS [23167010] debido a que fue el momento donde duró mayor tiempo de operación continua y se compararon con los generados por el modelo SWAT en el mismo periodo ver Figura 30.

Tabla 17. Parámetros calibrados y análisis de sensibilidad

No.	Parámetro de entrada	Descripción	Rango Min y Max	Análisis de sensibilidad global	
				t-Stat	P-Value
1	SURLAG.bsn	Coeficiente de retraso de la escorrentía superficial	1-24	5.34	0.00
2	SFTMP.bsn	Temperatura de las nevadas (°C)	0.01-5	5.03	0.00
3	GW_SPYLD.gw	Rendimiento específico del acuífero somero	0.01-0.4	5.03	0.00
4	SMFMN.bsn	Factor de fusión para la nieve el 21 de diciembre (mmH <sub>2</sub> O/°C-día)	0.01-10	4.40	0.00
5	GW_DELAY.gw	Tiempo de retraso del agua subterránea (días)	0.01-500	4.25	0.00
6	SMTMP.bsn	Temperatura base del derretimiento de la nieve (°C)	0.01-5	4.17	0.00
7	REVAPMN.gw	Umbral de la profundidad del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca la percolación de renovación hacia el acuífero profundo.	0.01-500	4.15	0.00
8	GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo requerida para que ocurra el flujo de retorno (mm H <sub>2</sub> O)	0.01-5000	4.03	0.00
9	CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en aluvión de canal principal. (mm/h)	0.01-250	4.02	0.00
10	ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0.01-1	3.90	0.00
11	ALPHA_BF.gw	Factor de flujo base (1/día)	0.01-1	3.69	0.00

No.	Parámetro de entrada	Descripción	Rango Min y Max	Análisis de sensibilidad global	
				t-Stat	P-Value
12	SMFMX.bsn	Factor de fusión para la nieve el 21 de junio (mmh2O/°C-día)	0.01-10	3.51	0.00
13	SHALLST.gw	Profundidad inicial del agua en el acuífero poco profundo (mm H2O)	0.01-1000	3.48	0.00
14	RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación de acuíferos profundos	0.01-1	2.89	0.00
15	TIMP.bsn	Factor de retraso de la temperatura de la capa de nieve	0.01-1	2.89	0.00
16	EPCO.hru	Factor de compensación de absorción de la planta	0.01-1	2.88	0.00
17	GW_REVAP.gw	Coefficiente de renovación de agua subterránea	0.02-0.2	2.78	0.01
18	GWHT.gw	Altura inicial del agua subterránea [m]	0.01-25	2.50	0.01
19	CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para el canal principal	-0.01-0.3	2.47	0.01
20	DEEPST.gw	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo (mm H2O)	0.01-5000	2.41	0.02
21	CANMX.hru	Almacenamiento máximo del dosel	0.01-100	2.33	0.02
22	BIOMIX.mgt	Eficiencia de mezcla biológica	0.01-1	1.89	0.06
23	TLAPS.sub	Tasa de lapso de temperatura (°C/km)	-10-10	-1.46	0.15
24	CN2.mgt	Número de curva	-0.3-0.3	-1.45	0.15

Figura 30. Comparación entre caudales medios mensuales observados (línea roja) y simulados por SWAT (línea roja) para el periodo enero de 2016 y enero de 2019.



Con el fin de realizar este análisis se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), en el cual, se estimó en 0.7 indicando que el modelo tiene un ajuste satisfactorio sobre los datos

observados, por lo tanto, continuó realizar los análisis de los escenarios propuestos en el presente trabajo. Sin embargo, como se comentó anteriormente la poca información hidrométrica existente dentro del área de estudio para realizar los procesos de calibración y validación fue una limitante en esta etapa para mejorar el modelo implementado y evaluar mejor las predicciones que se generan.

Si bien los procesos de calibración y validación buscan reducir la incertidumbre de los modelos hidrológicos y fue algo que se abordó en el estudio. Se observa que en el presente estudio existen dos variables de entrada que pueden aumentar la incertidumbre de los resultados y afectan el balance hídrico realizado por el SWAT que son 1) el uso del suelo que en la vida real cambia con respecto al tiempo dependiendo de las dinámicas socioeconómicas que se desarrollan en la región y 2) los datos hidrométricos (ej. precipitación, temperatura, entre otros) que para el presente trabajo son observados por las estaciones climatológicas o son estimaciones resultantes de los modelos de cambio climático. Por lo tanto, con el fin de informar la incertidumbre que pueden tener los resultados presentados se establece la siguiente caracterización cualitativa de la incertidumbre basada en el tipo de datos que se ingresan al SWAT:

- **Baja:** en la cual los datos de entrada hidrométricos que ingresan al modelo son los observados y el uso del suelo es aquel que está que existía durante el escenario evaluado.
- **Media:** en la cual se cumple una de las dos condiciones, los datos de entrada hidrométricos que ingresan son estimaciones o el uso del suelo no es el que existe o existirá durante el escenario evaluado.
- **Alta:** en la cual, los datos de entrada hidrométricos que ingresan al modelo son estimaciones y el uso del suelo no es el que existe o existirá durante el escenario evaluado.

## 4.2 Datos históricos

Una vez se ingresaron al SWAT los datos climatológicos de temperatura, velocidad del viento, radicación, humedad, precipitación y caudal desde 1980 hasta 2020 se estimó el balance hidrológico, el cual, se presenta en el Anexo C. A continuación, se presenta el análisis de la serie de escurrentía en el área de estudio.

### ***Análisis de tendencia***

### ***Prueba de Mann-Kendall***

A partir de la serie mensual de escorrentía por subcuenca se promediaron las escorrentías y se estimó la serie de escorrentía mensual en el área de estudio, a la cual, se le aplicó la prueba de tendencia de Mann-Kendall para el periodo 1980 a 2020, con el fin de establecer la tendencia que han tenido la escorrentía en la región. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 18 se establece no existe tendencia para la serie analizada, por lo cual se establece que no se observa que año a año la escorrentía este aumentando en el periodo analizado.

Tabla 18. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía periodo 1980 a 2020

Variable	Periodo 1980 a 2020
<b>Tau</b>	0.042
<b>trend</b>	no trend
<b>h</b>	False
<b>p</b>	0.161
<b>slope</b>	0.030

### ***Distribución temporal y espacial de la escorrentía***

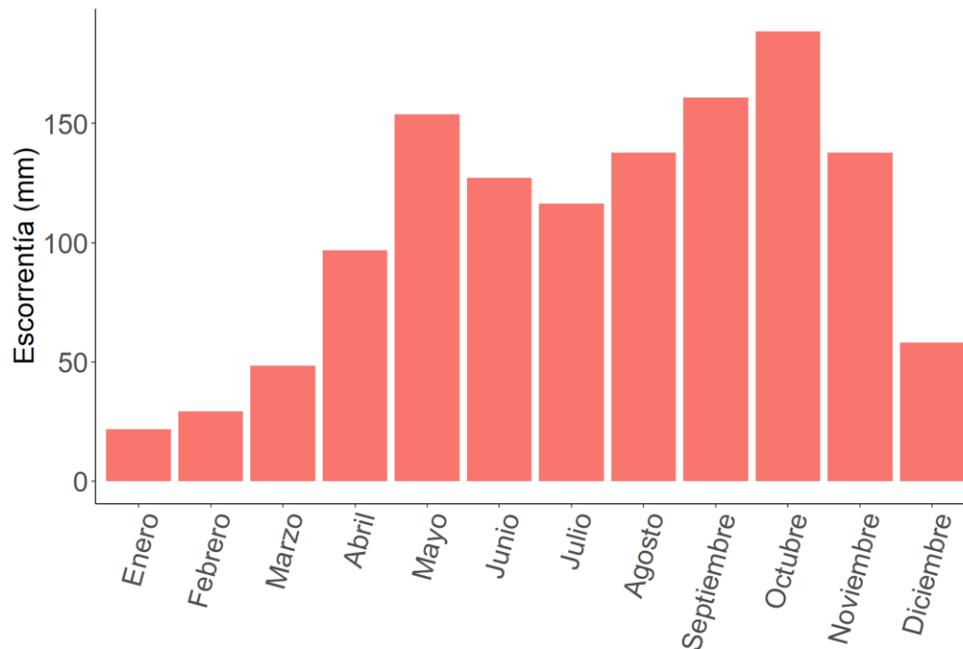
#### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de escorrentía mensual por subcuenca se promediaron los valores y se estimaron las escorrentías medias mensuales multianuales para el periodo comprendido entre 1980 a 2020, los cuales se presentan en la Figura 31, adicionalmente, en la Figura 33 se presenta el cambio de esta variable en el espacio. Al analizar la distribución espacial de la escorrentía media mensual multianual de cada mes en el área de estudio se presenta un comportamiento bimodal con picos en los meses de mayo y octubre, meses en los que se puede hablar de una mayor disponibilidad de agua para las actividades que se desarrollan en la región con valores promedio son de 154 mm y 189 mm respectivamente; por otro lado, las zonas secas en los meses de enero y diciembre cuentan con valores de escorrentías promedio de 22 mm y 58 mm respectivamente.

Es necesario tener en cuenta que un mal manejo del agua en los periodos con baja escorrentía puede llevar a conflictos del uso del recurso hídrico entre los diferentes sectores económicos que se encuentran en esta región en esta región (ej. extracción de

hidrocarburos vs consumo humano). Como forma de mitigación a esta problemática se pueden implementar sistemas de regulación del agua disponible en las épocas lluviosas para compensar la falta de recurso hídrico en las épocas seca.

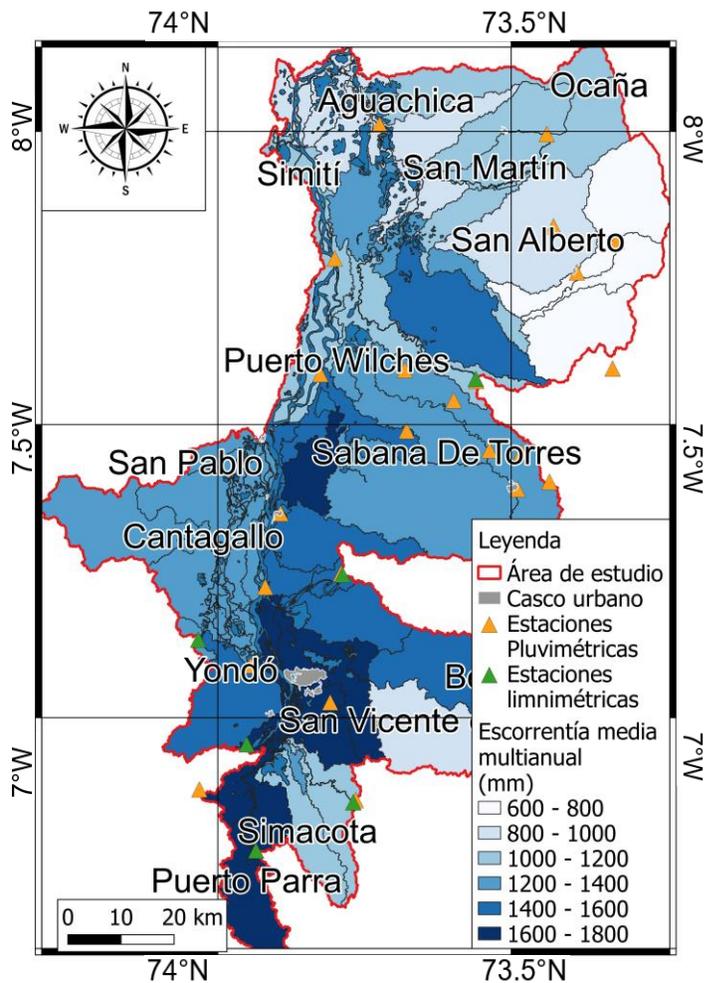
Figura 31. Estimación de escorrentía media mensual multianual



### **Análisis anual**

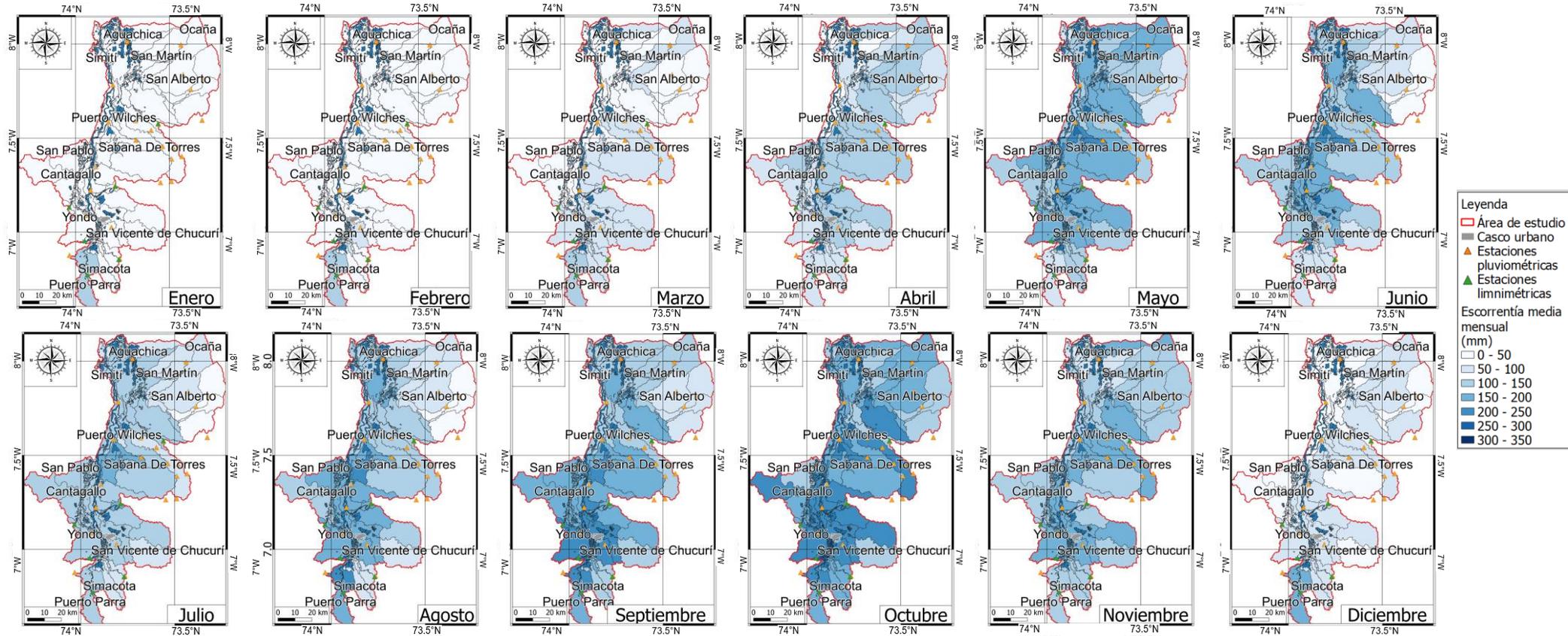
A partir de las series de escorrentía mensual se estimó la serie de escorrentía anual y se calcularon las escorrentías medias anuales multianuales subcuena. A partir de estos datos se logró establecer que en el área de estudio se presenta una escorrentía media anual multianual de 1276 mm, lo cual, está en el rango determinado por IDEAM para esta zona entre 1000mm y 2000 mm (IDEAM, 2018b). Cuyos máximos se observan al sur con estimaciones superiores a 1400 mm en los municipios de Yondó, Antioquia y Barrancabermeja y Santander. En contraste las zonas ubicadas al Norte asociada a los municipios de Aguachica, San Alberto y San Martín, Cesar y La Esperanza y Norte de Santander), presentan valores por debajo de los 800 mm donde se tienen zonas de poca precipitación y altas temperaturas. La Figura 32, presenta la distribución espacial de este parámetro.

Figura 32. Escorrentía media anual multianual del área de estudio periodo 1980 a 2020



Finalmente, debido a que los resultados del actual escenario fueron constituidos por medio de los datos hidrométricos observados en el periodo establecido y no se analizó el cambio del uso del suelo entre 1980 a 2020 se estima que la incertidumbre de los resultados es media.

Figura 33. Escorrentía media mensual en el área de estudio



### 4.3 Caso de estudio Hidrosogamoso

Como se presentó anteriormente, el proyecto de generación de energía de Hidrosogamoso intervino la cuenca hidrológica del río Sogamoso desde el año 2014 hasta la fecha. No se observa que estadísticamente esta actividad haya afectado los regímenes de lluvia como se presentan en el capítulo 3. A continuación, se presenta el análisis en el cambio en la escorrentía superficial en el área de estudio antes y después de la ejecución del proyecto, así mismo en el Anexo C se estimó el balance hidrológico para este periodo de tiempo.

#### *Análisis de tendencia*

##### *Prueba de Mann-Kendall*

Posterior a este análisis se aplicó la prueba de tendencia de Mann-Kendall para los datos presentados anteriormente para los periodos 1980 a 2015 y 2015 a 2020 con el fin de establecer si la entrada en operación de la Hidroeléctrica genera un cambio significativo en la tendencia de la escorrentía. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 19 se establece que las observaciones para el periodo 1980 a 2015 posee una tendencia creciente y posterior a 2015 deja de existir la tendencia, sin embargo, estos resultados no son suficientes para establecer la injerencia del proyecto en la escorrentía de la zona de estudio.

Tabla 19. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía Hidrosogamoso

Variable	1980-2015	2015-2020
<b>Tau</b>	0.072	0.019
<b>trend</b>	increasing	no trend
<b>h</b>	True	False
<b>p</b>	0.000	0.640
<b>slope</b>	0.020	0.022

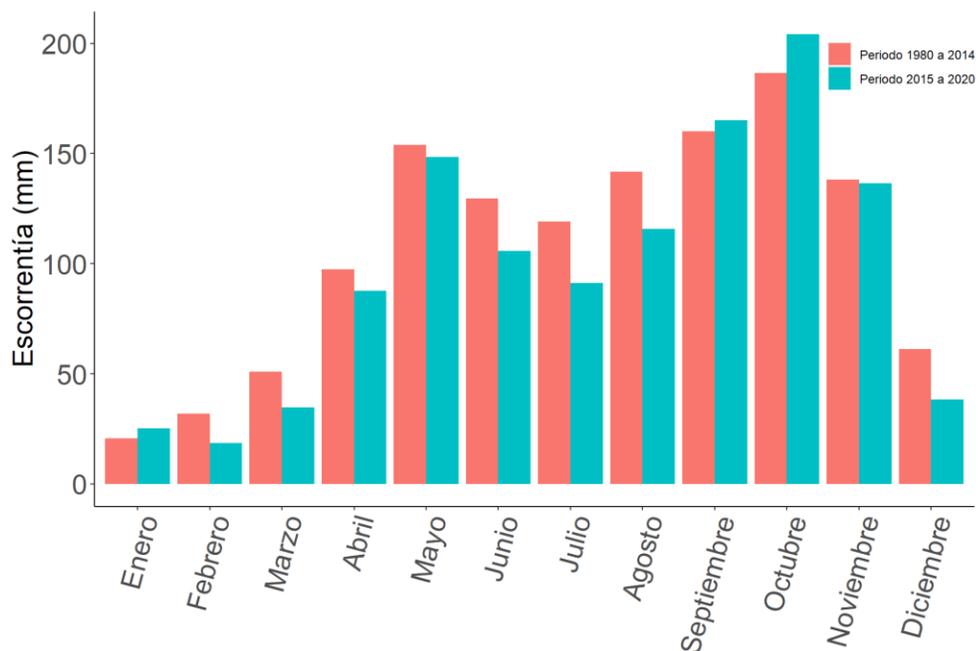
#### *Distribución temporal y espacial de la escorrentía*

##### *Análisis mensual*

A partir de la serie de escorrentía mensual por subcuenca se promediaron los valores y se estimaron las escorrentías medias mensuales multianuales para el periodo comprendido

entre 1980 a 2014 y 2015 a 2020, los cuales se presentan en la Figura 34, adicionalmente, en la Figura 36 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones de la escorrentía media mensual multianual en el área de estudio antes y después de haber implementado el proyecto se observan aumentos en la escorrentía en los meses de enero 22% principalmente en el municipio de Yondó, Antioquia y octubre 9% principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander; disminución en los meses de febrero 42% principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander, 32% en el mes de marzo principalmente en el municipio de Yondó Antioquia, 10% en el mes de abril principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander, 18% en junio principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar, 23% en el mes de julio principalmente en el municipio de San Alberto, Cesar, 18% en agosto principalmente en el municipio de Aguachica, Cesar y 37% en diciembre principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander; en los meses de septiembre y noviembre se observan cambios menores al 5%.

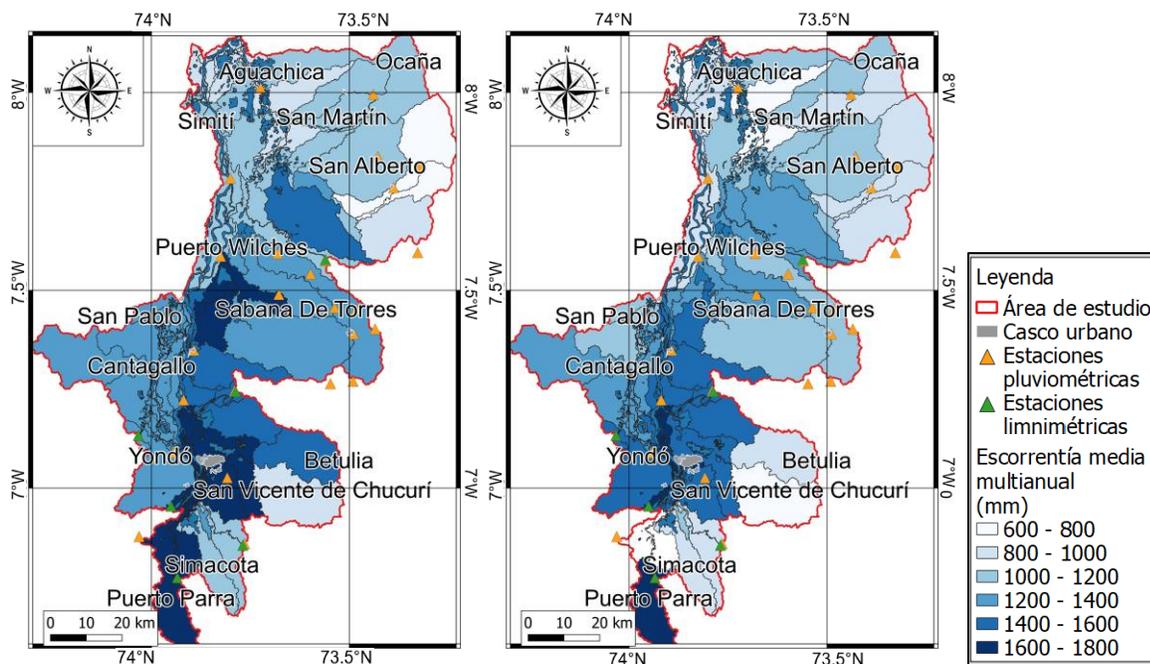
Figura 34. Histograma de escorrentía media multianual antes y después de implementar Hidrosogamoso



**Análisis anual**

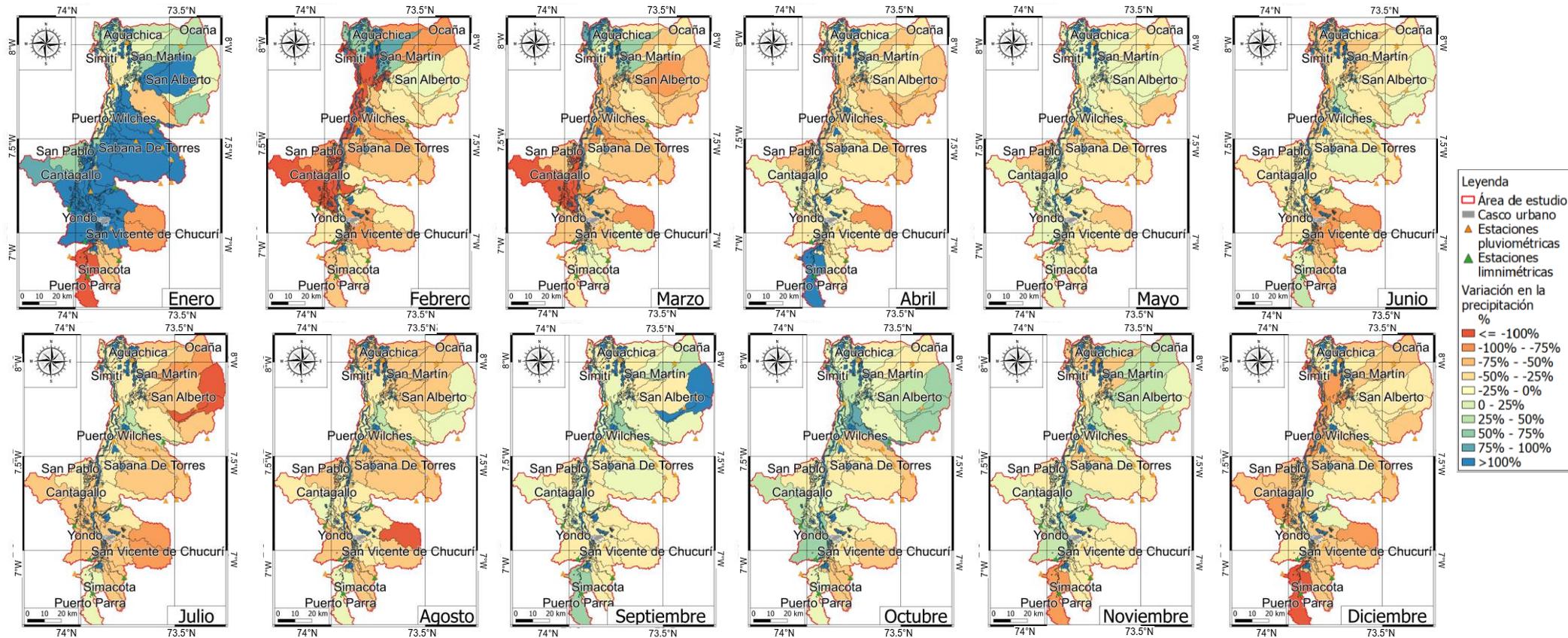
A partir de la serie de escorrentía mensual se estimó la serie de escorrentía anual y se calcularon las escorrentías medias anuales multianuales por subcuenca. Con estos datos se logró establecer la escorrentía media anual multianual en el área de estudio para los periodos 1980 a 2014 y 2015 a 2020. A partir de estos datos se permitió establecer que la escorrentía media anual multianual antes de haber implementado el proyecto fue de 1304mm y después de haber implementado el proyecto fue de 1203mm siendo una disminución del 7%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observan disminuciones de 14% Aguachica, Cesar, 11% en Sabana de Torres y Puerto Wilches Santander, 9% en San Martin Cesar; en cuanto a los municipios de Yondó, Antioquia, La Esperanza Norte de Santander, San Alberto y San Martin Cesar los cambios fueron menores al 5%, ver Figura 35.

Figura 35. A) Escorrentía media simulada multianual antes de Hidrosogamoso (izquierda) vs. B) Escorrentía media simulada multianual después de Hidrosogamoso (derecha).



Finalmente, debido a que los resultados del actual escenario fueron constituidos por medio de los datos hidrométricos observados en los periodos analizados y no se analizó el cambio del uso del suelo entre 1980 a 2014 o 2015 a 2020 se estima que la incertidumbre de los resultados es media.

Figura 36. Cambios porcentuales de la escorrentía media mensual para el periodo 2015-2020 después de la construcción Hidrosogamoso con respecto a la escorrentía media mensual antes del proyecto 1980-2014.



## 4.4 Caso de estudio ENOS

Así como El Niño/La Niña tienen efectos en la precipitación, a continuación, se presentan el análisis de los cambios en la escorrentía superficial en el área de estudio bajo los efectos de Neutro, El Niño y La Niña; así mismo en el Anexo C se estimó el balance hidrológico para estos periodos de tiempo.

### *Análisis de tendencia*

#### *Prueba de Mann-Kendall*

A partir de la serie mensual de escorrentía por subcuenca se le aplicó la prueba de tendencia de Mann-Kendall para los datos presentados anteriormente para los periodos considerados Neutro, El Niño y La Niña con el fin de establecer la tendencia que ha tenido en las escorrentías de la región. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 20 se establece que las observaciones para los periodos catalogados como Neutro y La Niña poseen una tendencia creciente, lo cual, significa que estas condiciones están aumentando la escorrentía en la región cuando se presentan; El Niño no posee tendencia lo que significa que no se observa que año a año este fenómeno aumente o disminuya con el tiempo.

Tabla 20. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía condición Neutra, El Niño y La Niña

Variable	Neutro	EL Niño	La Niña
<b>Tau</b>	0.053	0.052	0.075
<b>trend</b>	increasing	no trend	increasing
<b>h</b>	True	False	True
<b>p</b>	0.020	0.070	0.010
<b>slope</b>	0.021	0.032	0.048

### *Cambio en distribución temporal y espacial de la escorrentía bajo el escenario El Niño-Neutro*

#### *Análisis mensual*

A partir de la serie de escorrentía mensual por subcuenca se promediaron los valores y se estimaron las escorrentías medias mensuales multianuales para las condiciones Neutro y

El Niño, los cuales se presentan en la Figura 37, adicionalmente, en la Figura 39 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones en la escorrentía media mensual en el área de estudio bajo la condición Neutra con respecto a El Niño se observa disminuciones en esta variable en los meses de marzo 33% y 10% abril principalmente en el municipio de Yondó, Antioquia, 12% en mayo con efectos principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander, 19% en junio con efectos principalmente en el municipio de e Sabana de Torres, Santander, 12% en julio con efector principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander, 32% en el mes de agosto con efectos principalmente en el municipio de Yondó, Antioquia, 8% en octubre con efectos principalmente en el municipio de La Esperanza, Norte de Santander y diciembre con 14% con efectos principalmente en el municipio de Puerto Wilches, Santander; en cuanto a los aumentos se observaron en febrero 23% con efectos principalmente en el municipio de Puerto Wilches Santander y septiembre 9% con efectos principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander; en los meses de enero y noviembre se observan cambios menores al 5%.

### ***Análisis anual***

A partir de la serie de escorrentía mensual se estimó la serie de escorrentía anual y se calcularon las escorrentías medias anuales multianuales por subcuenca. Con estos datos se logró establecer la escorrentía media anuales multianual en el área de estudio para la condición Neutra y El Niño. A partir de estos datos se permitió establecer que la escorrentía media anual multianual en la condición Neutra fue de 1258mm a 1127 mm en El Niño siendo una disminución de 10%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observa una disminución de 24% en La Esperanza, Norte de Santander, 19% en San Alberto Cesar, 13% en Sabana de Torres, Barrancabermeja, Santander y San Martin, Cesar y 12% en Aguachica, Cesar, Yondó, Antioquia y Puerto Wilches Santander, ver Figura 38.

### ***Cambio en distribución temporal y espacial de la escorrentía bajo el escenario La Niña-Neutro***

#### ***Análisis mensual***

A partir de la serie de escorrentía mensual por subcuenca se promediaron los valores y se estimaron las escorrentías medias mensuales multianuales para las condiciones Neutro y

La Niña, los cuales se presentan en la Figura 37, adicionalmente, en la Figura 40 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones en la escorrentía media mensuales en el área de estudio bajo la condición Neutra con respecto a La Niña, se observan aumentos en los meses de enero 74% con efectos principalmente en el municipio de Puerto Wilches, Santander, 12% febrero con efectos principalmente en San Alberto, Cesar, 10% en abril con efectos principalmente en Sabana de Torres, 7% en mayo con efectos principalmente en el municipio de Barrancabermeja Santander, 18% en los meses de junio, julio y agosto con efectos principalmente en San Martín, Cesar, Puerto, Wilches y Barrancabermeja, respectivamente, 16% en octubre con efectos principalmente en el municipio de Barrancabermeja, Santander, 57% en noviembre con efectos principales en Yondó, Antioquia y 14% en diciembre con efectos principales en Barrancabermeja, Santander; en los meses de marzo y septiembre no se observan cambios mayores al 5%. Adicionalmente se puede observar que los efectos de La Niña generan espacialmente generan mayores cambios porcentuales en escorrentía considerando a los observado por El Niño y posee un comportamiento similar a lo sucedido con la precipitación.

### ***Análisis anual***

A partir de la serie de escorrentía mensual se estimó la serie de escorrentía anual y se calcularon las escorrentías medias anuales multianuales por subcuenca. Con estos datos se logró establecer la escorrentía media anuales multianual en el área de estudio para la condición Neutra y La Niña. A partir de estos datos se permitió establecer que la escorrentía media anual multianual en la condición Neutra fue de 1258mm a 1467mm en La Niña siendo un aumento de 17%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observan aumentos de 28% en Aguachica, Cesar, 22% en Barrancabermeja, 18% en Puerto Wilches, Santander, 16% en San Martin Cesar, 14% en Yondó, Antioquia, 12% en Sabana de Torres, Santander, y 6% en La Esperanza, Norte de Santander, ver Figura 38.

Figura 37. Histograma de escorrentía media multianual en los periodos Neutro, El Niño y La Niña

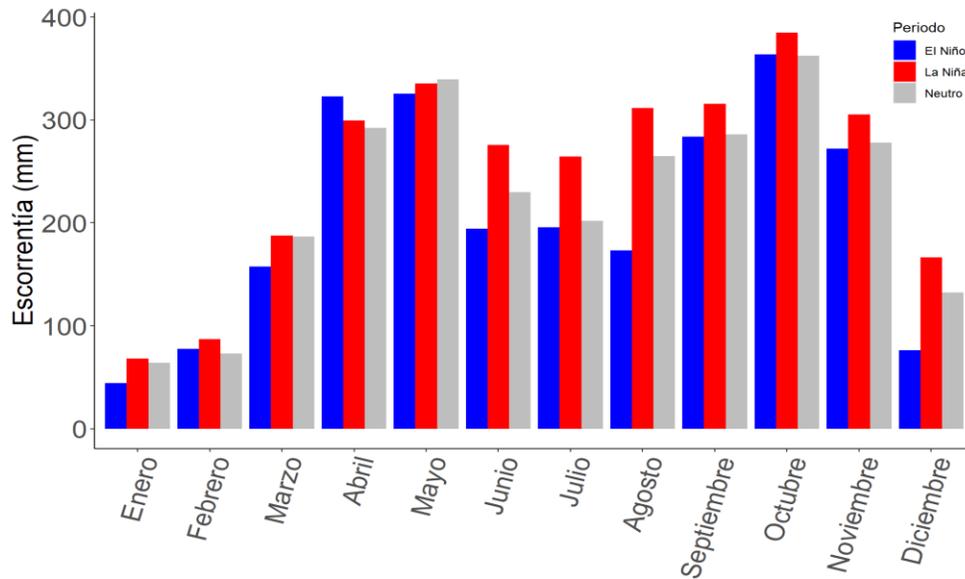
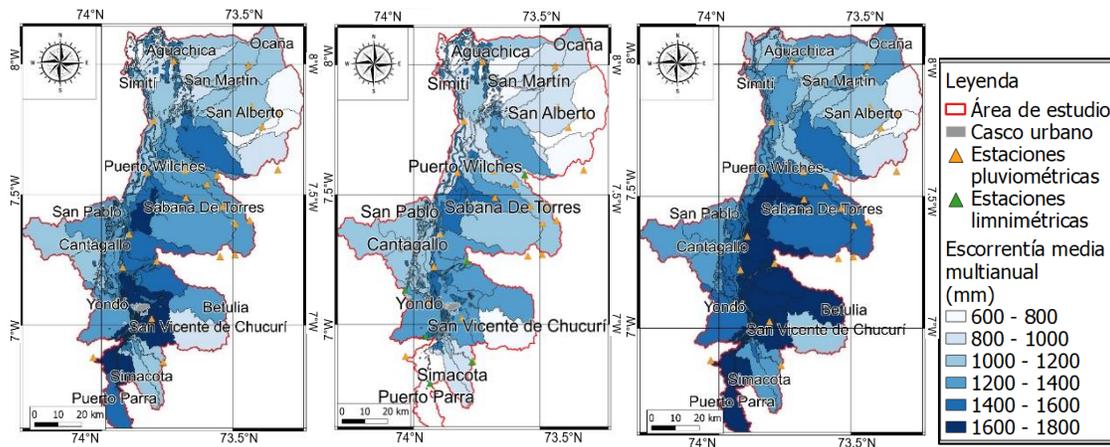


Figura 38. A) Escorrentía media anual multianual de años Neutro (izquierda) b) Escorrentía media anual multianual en los años considerados El Niño c) Escorrentía media anual multianual en los años considerados La Niña



Finalmente, debido a que los resultados del actual escenario fueron constituidos por medio de los datos hidrométricos observados en el periodo analizado y no se analizó el cambio del uso del suelo en los periodos Neutro, El Niño o La Niña se estima que la incertidumbre de los resultados obtenidos es media.

Figura 39. Variación de la esorrentía media mensual ENOS-EI Niño con respecto a la condición Neutra

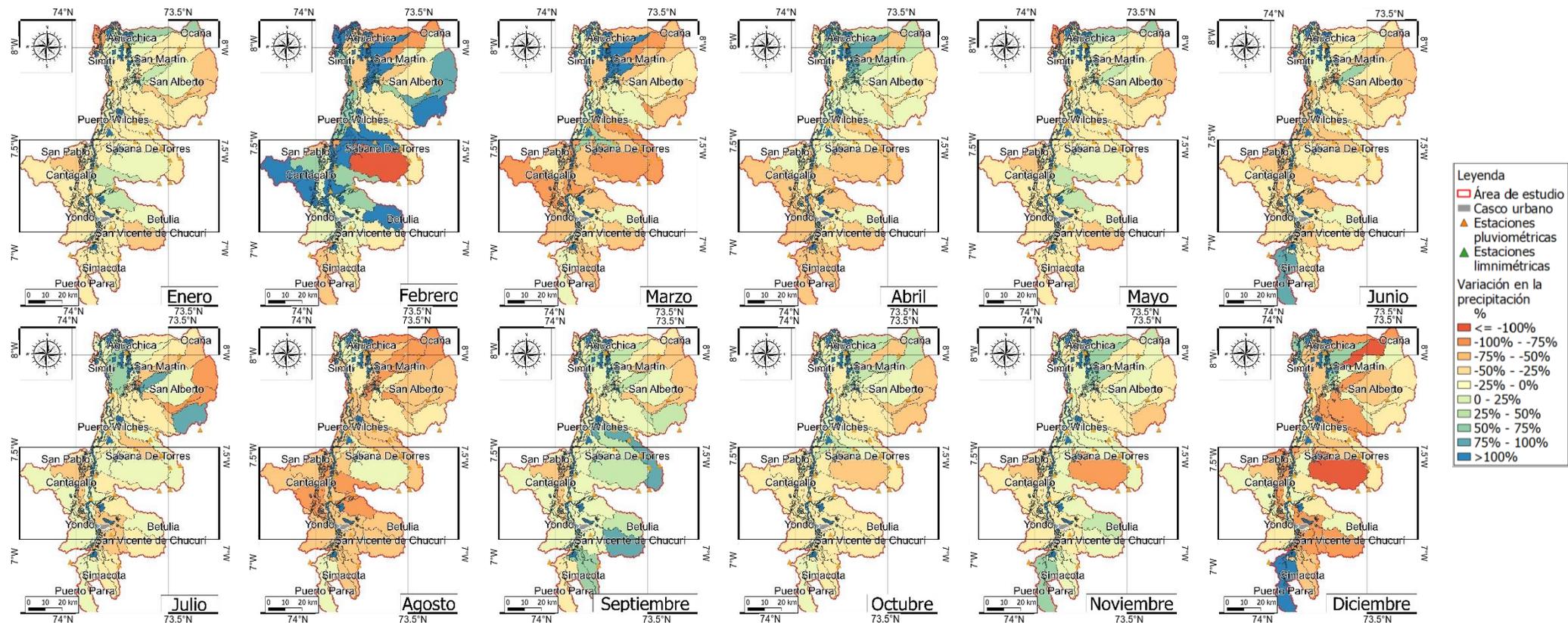
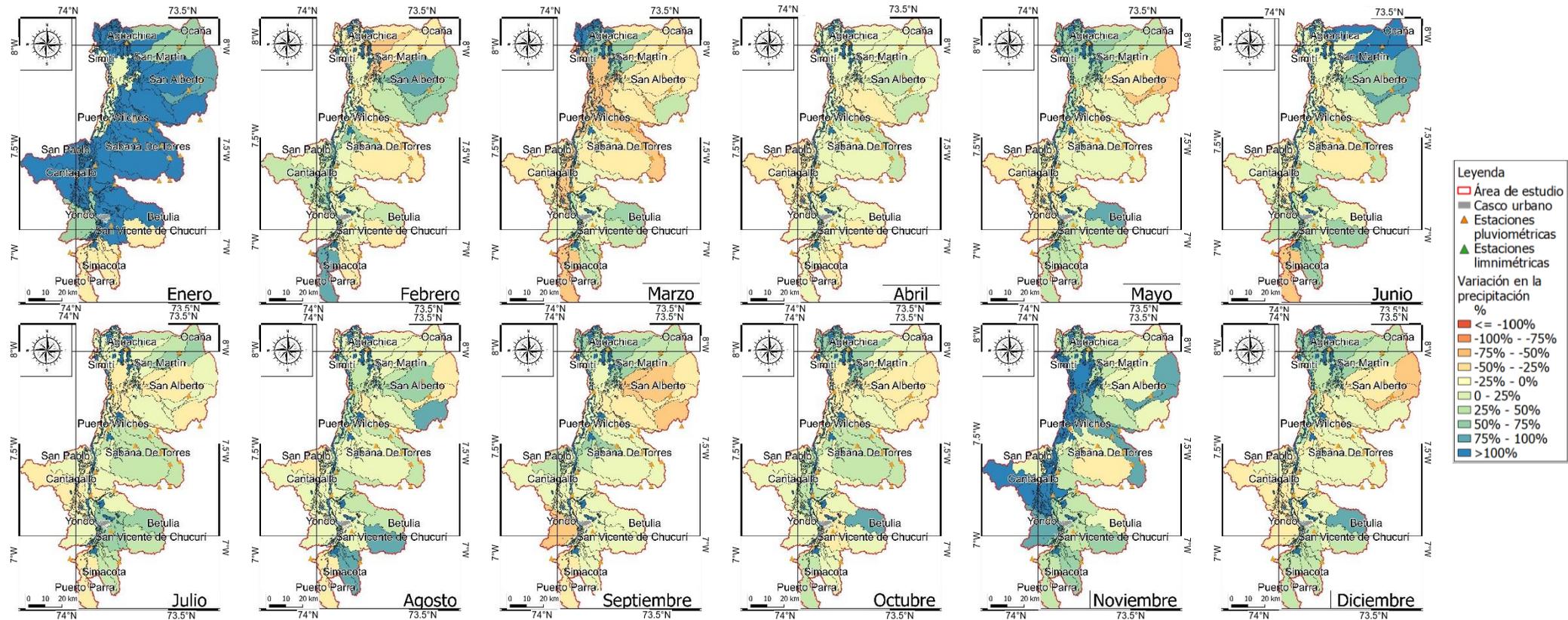


Figura 40. Variación de la escorrentía media mensual ENOS-La Niña con respecto a la condición Neutra



## 4.5 Escenarios de cambio climático desde 2020 hasta 2100

A partir de los datos de temperaturas de cada veinte años bajo el escenario SSP5-8.0, la humedad, radiación solar, velocidad del viento del IDEAM, la precipitación del 2020 proyectada a 2100 con el proceso de downscaling enunciado anteriormente y el caudal variable cada dos años (periodo seco<sup>9</sup>-normal-húmedo<sup>10</sup>), se realizó la modelación de la escorrentía superficial por medio del SWAT hasta el año 2100 los cuales se presentan a continuación; así mismo en el Anexo C se estimó el balance hidrológico para este periodo de tiempo.

### *Análisis de tendencia*

#### *Prueba de Mann-Kendall*

A partir de la serie mensual de escorrentía por subcuenca se promediaron las escorrentías y se estimó la serie de escorrentía mensual en el área de estudio, a la cual, se le aplicó la prueba de tendencia de Mann-Kendall escorrentía media mensual multianual de la zona de estudio para el periodo 2020 a 2100, con el fin de establecer la tendencia que puede tener la escorrentía afectada por el cambio climático en precipitación de la región. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 21 se establece que las observaciones este periodo analizado posee una tendencia creciente lo que significa que la escorrentía podría aumentar en la región con el tiempo a 2100.

Tabla 21. Prueba de tendencia Mann-Kendall escorrentía periodo 2020 a 2100

Variable	Periodo 2020 a 2100
<b>Tau</b>	0.072
<b>trend</b>	increasing
<b>h</b>	True
<b>p</b>	0
<b>slope</b>	0.005

<sup>9</sup> Disminuciones en promedio de 19% anualmente con respecto a los datos promedio multianuales

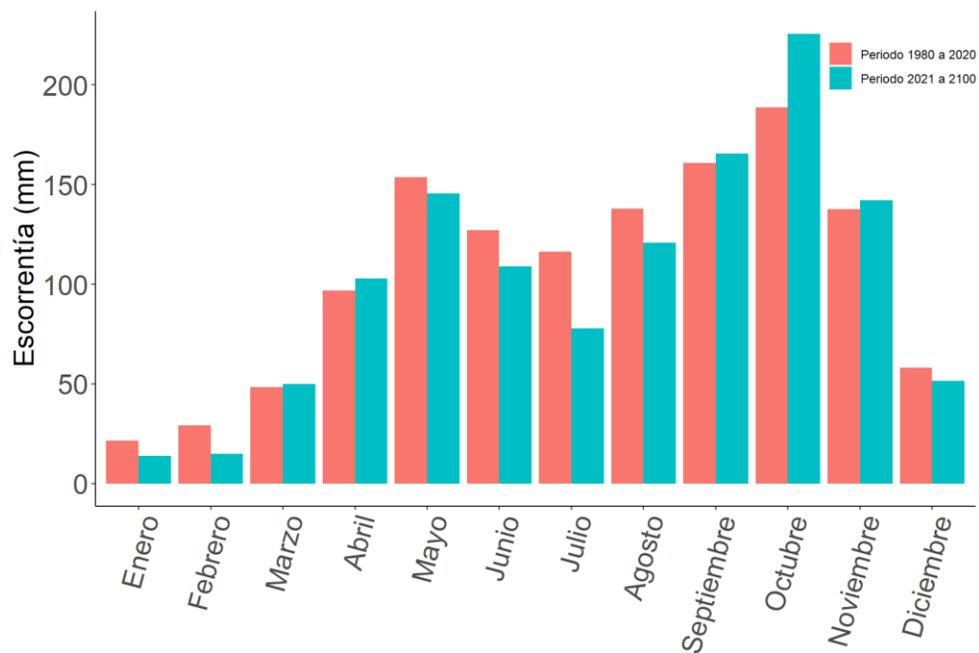
<sup>10</sup> Aumentos en promedio de 18% anualmente con respecto a los datos promedio multianuales

**Distribución temporal y espacial de la escorrentía**

**Análisis mensual**

A partir de la serie de escorrentía mensual por subcuenca se promediaron los valores y se estimaron las escorrentías medias mensuales multianuales para el periodo comprendido entre 2021 a 2100 y se compararon con las del periodo 1980 a 2020, los cuales se presentan en la Figura 41, adicionalmente, en la Figura 43 se presenta el cambio porcentual de esta variable en el espacio por cada mes. Al analizar las variaciones en la escorrentía media mensual en el área de estudio en el periodo de 1980 a 2020 con respecto al periodo 2021 a 2100 se observan disminuciones del 36% en el mes de enero con principales efectos en el municipio de Sabana de Torres, Santander, 49% febrero con principales efectos en el municipio de Aguachica, Cesar, 14% en junio, 33% en Julio, 12% en agosto y 11% con principales efectos en Yondó, Antioquia; aumentos en los meses de abril 6% y 20% en octubre con principales efectos en el municipio de Aguachica, Cesar; los meses de marzo, septiembre y noviembre se observan cambios menores al 5%.

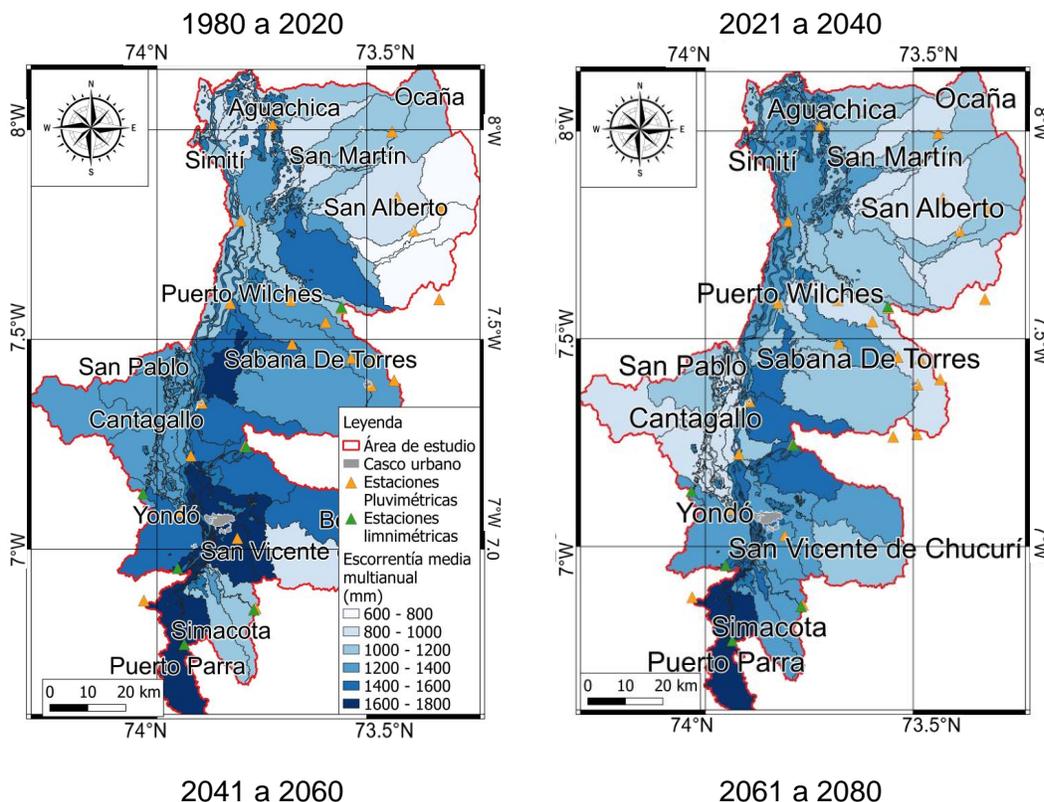
Figura 41. Histograma de escorrentía media multianual en los periodos 1980 a 2021 y 2020 a 2100

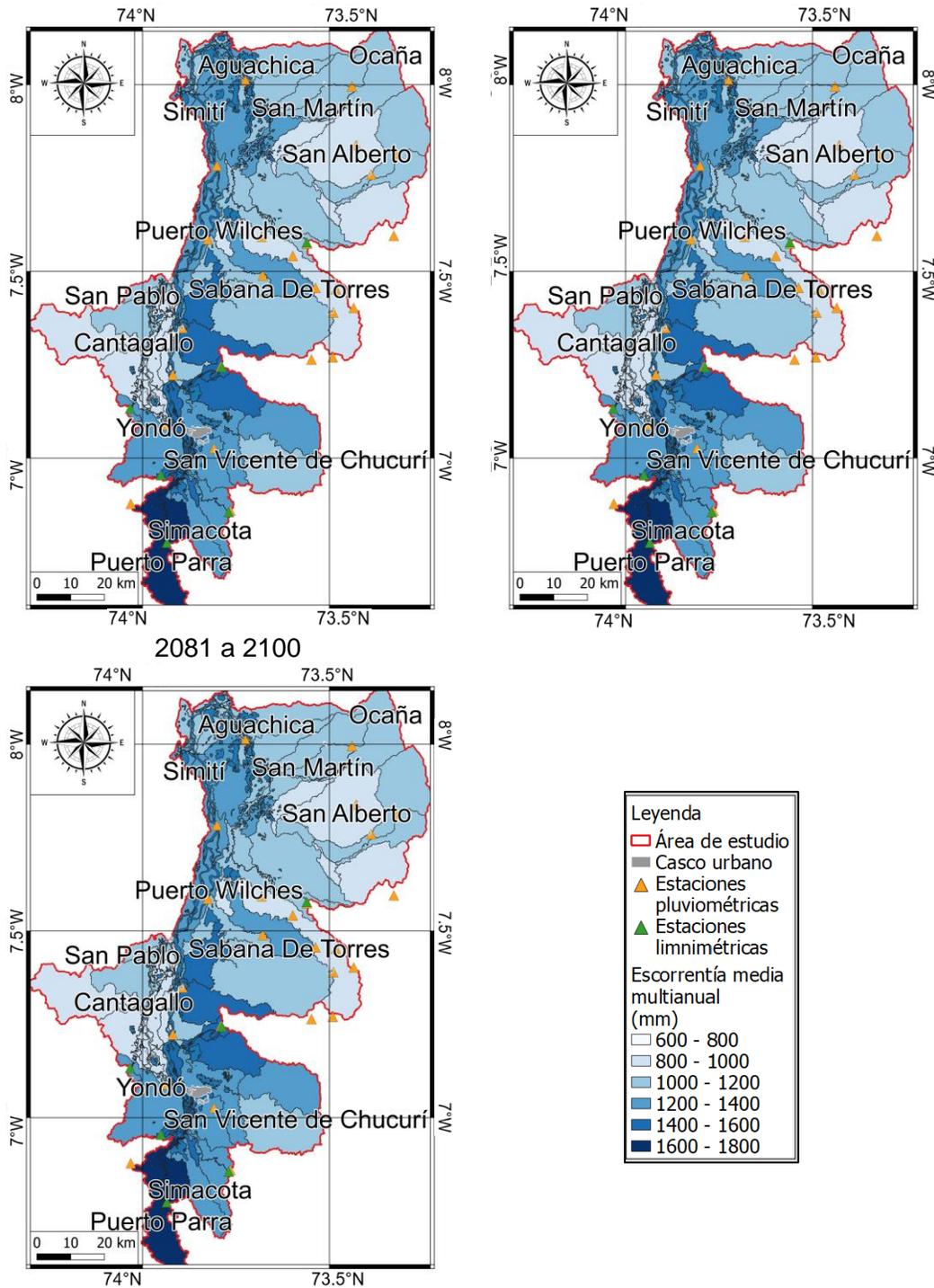


**Análisis anual**

A partir de la serie de escorrentía mensual se estimó la serie de escorrentía anual y se calcularon las escorrentías medias anuales multianuales por subcuenca. Con estos datos se logró establecer la escorrentía media anual multianual en el área de estudio para el periodo 2021 a 2100. A partir de estos datos se permitió establecer que la escorrentía media anual multianual puede pasar de 1276mm en el periodo 1980 a 2020 a 1220mm en el periodo 2021 a 2100 disminuyendo 4% pasando de 1276mm, esta estimación es superior a la establecida por el IDEAM para la zona de estudio la cual podría ser inferior al -10%. Sin embargo, al realizar el análisis por municipio se observa aumentos de 24% en Aguachica Cesar, 17% en La Esperanza Norte de Santander, 5% en San Martín Cesar; disminuciones de 5% en Barrancabermeja, Santander, 15% en Sabana de Torres y 18 en Yondó, Antioquia; en el municipio de Puerto Wilches no se observan cambios superiores al 5%, ver Figura 42.

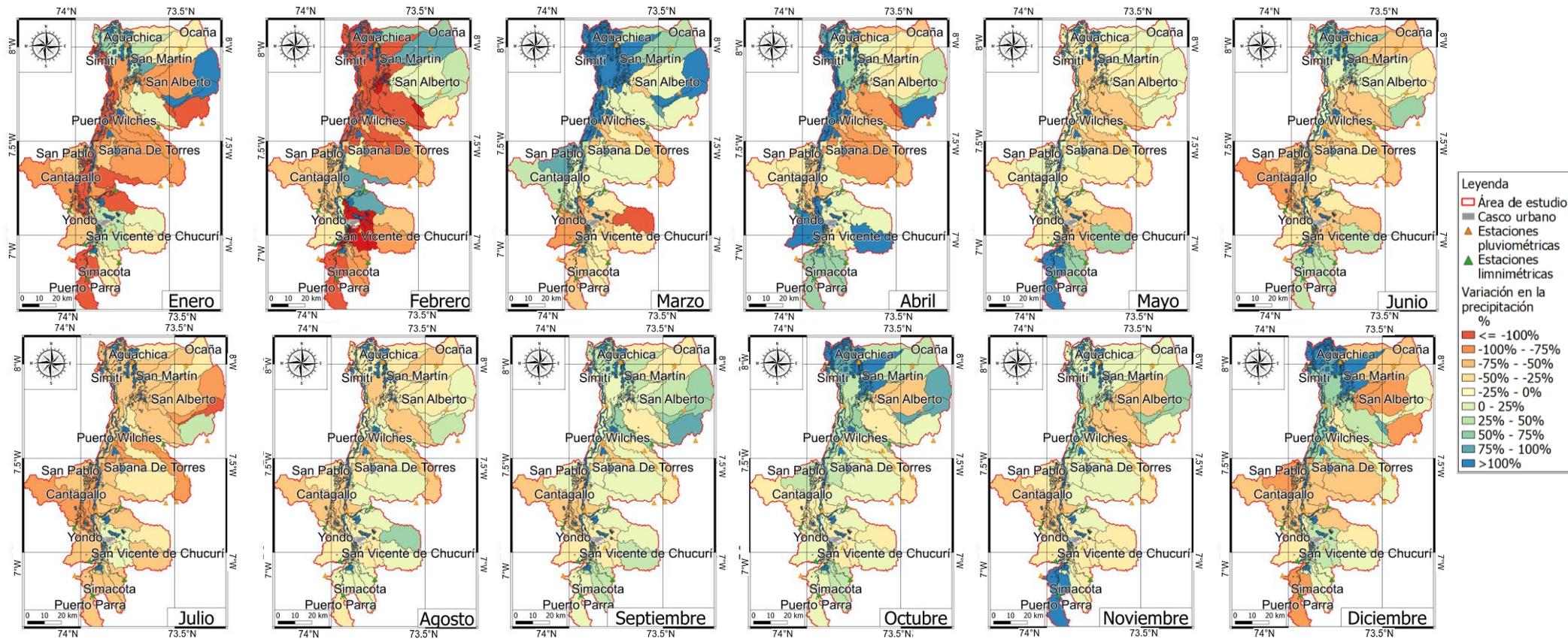
Figura 42. Variación de la escorrentía multianual histórico, periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100





Finalmente, debido a que los resultados presentados anteriormente fueron constituidos por medio de los datos hidrométricos estimados a partir de los escenarios de cambio climático (situaciones que no han sido observadas) y no se analizó el cambio del uso del suelo entre 2021-2100 se estima que la incertidumbre de los resultados es alta.

Figura 43. Variación de la escorrentía media mensual en el año 2100



En esta sección se presentaron las estimaciones de la oferta hídrica histórica en el área de estudio histórica, se analizaron los cambios en la escorrentía que generó el proyecto Hidrosogamoso y los que genera regularmente El Niño/La Niña. Finalmente, se estimó la cantidad de escorrentía disponible que puede llegar a tener la región en 2100 y cambio con respecto al histórico. En el capítulo siguiente, se presenta las principales conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de grado.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El presente capítulo recoge las conclusiones, recomendaciones y experiencias más relevantes de las secciones presentadas anteriormente, entre las cuales están las estimaciones de la oferta disponible de agua histórica, cambios observados en la zona bajo los efectos de El Niño/ La Niña y posible disponibilidad de agua bajo el escenario de cambio climático a 2100, adicionalmente se recopilan los efectos del embalse Hidrosogamoso en la escorrentía de la región, estos resultados son producto de la modelación hidrológica realizada en SWAT.

### 5.1 Conclusiones

Se observó que el comportamiento actual de la precipitación es bimodal con épocas húmedas en los meses de marzo-abril, septiembre-octubre y épocas secas en diciembre-enero y junio-julio con una precipitación media anual multianual de 2599 mm. En cuanto a los caudales se observa que el río Magdalena es el principal cauce del área de estudio regulando la disponibilidad de agua en el área de estudio. La escorrentía media anual multianual actual se estimó en 1276 mm con el mismo comportamiento bimodal sin una tendencia creciente o decreciente.

Respecto a los efectos de Hidrosogamoso en el área de estudio se estima una precipitación media anual multianual de 2719 mm en el periodo 1980 a 2014 y se redujo un 4% en el periodo 2015 a 2020 pasando a ser de 2662mm, al comparar las precipitaciones mensuales entre los dos periodos se observan aumentos significativos en los meses de enero, junio y septiembre; reducciones en los meses de febrero, marzo, agosto y diciembre; en cuanto a la escorrentía media anual multianual el área de estudio se estima que fue de 1304mm en el periodo 1980 a 2014 y se redujo un 7% en el periodo 2015 a 2020 pasando a ser de 1203mm, al comparar las escorrentías medias mensuales multianuales entre los dos periodos se observan aumentos significativos en los meses de

enero y octubre; disminuciones en los meses de febrero, marzo, abril, junio, julio agosto y diciembre. Sin embargo, no se observa un cambio en la tendencia de la serie de datos y solo se posee una serie de tiempo después de haber implementado el proyecto de 5 años de información por lo tanto los resultados no poseen una significancia estadística relevante.

En cuanto a los efectos del ENOS en la región se estima una precipitación media anual multianual de 2710mm en la condición Neutra, 2487mm en El Niño y 3001mm en La Niña. La escorrentía media anual multianual el área de estudio se estima la condición Neutra en 1258mm, 1127mm en El Niño (disminuyendo 10% con respecto al Neutro) y 1467mm en la Niña (aumentando 17% con respecto al Neutro). En cuanto a la comparación de los efectos de El Niño con respecto a la condición Neutra se encontraron aumentos en la precipitación media mensual multianual en los meses febrero y abril disminuciones disminuciones en el resto de los meses de enero, marzo, junio, agosto y diciembre; en cuanto a la escorrentía media mensual multianual se encontraron aumentos en los meses de febrero y septiembre; disminuciones en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre y diciembre. En cuanto a la comparación de los efectos de La Niña con respecto a la condición Neutra se encontraron aumentos en la precipitación media mensual multianual en todos los meses excepto enero y marzo en el cual disminuyó; para la escorrentía media mensual multianual se encontraron disminuciones en el mes de marzo y abril; aumentos en los otros meses.

Acerca de las estimaciones de precipitación futura al año 2100 basado en los 24 modelos de cambio climático evaluados en el CMIP6 bajo el escenario “desarrollo impulsado por combustibles fósiles” SSP5-8.0, se realizó el downscaling a las 25 estaciones de precipitación contenidas en el área de estudio con el fin de ingresarlas al SWAT y poder estimar la oferta futura de agua en la zona de estudio al año 2100. Teniendo en cuenta este proceso estima una precipitación media anual multianual en el área de estudio de 2464mm en el periodo 2021 a 2100 reduciéndose un 4% con respecto al periodo 1980 a 2100, al comparar las precipitaciones mensuales entre los dos periodos se disminuciones significativas en todos los meses excepto en abril, mayo y octubre; en cuanto a la escorrentía media anual multianual se estimó en 1276mm para el periodo 2021 a 2100 reduciendo se un 4% con respecto al periodo 1980 a 2020, al comparar las escorrentías medias mensuales multianuales entre los dos periodos se observan aumentos

significativos en los meses de abril y octubre y reducciones en los meses de enero, febrero, junio, julio y agosto.

En consideración a los datos climatológicos se considera que son de alta calidad teniendo en cuenta la cantidad de estaciones del IDEAM para los periodos evaluados entre 1980 a 2020. Sin embargo, existen dos factores que influyen en la incertidumbre de los resultados obtenidos: el cambio del uso del suelo a lo largo del tiempo el cual afecta directamente el balance hidrológico y los pocos datos hidrométricos dentro del área de estudio, lo cual, dificulto el proceso de calibración y validación, por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos poseen incertidumbre media y alta.

## **5.2 Recomendaciones**

Con el fin de poder realizar investigaciones de este tipo se recomienda analizar las variables que se poseen en las áreas de estudio y seleccionar los modelos hidrológicos que mejor convengan para los objetivos de las investigaciones.

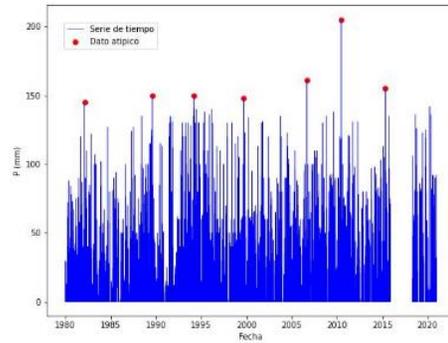
Para tener valores que representen mejor los procesos hidrológicos en las cuencas hidrológicas a analizar, se recomienda seleccionar áreas de estudio que contengan más de una estación que registre caudal en amplios periodos de tiempo, con el fin de mejorar los procesos de calibración y validación de los modelos hidrológicos. Adicionalmente, con el fin de mejorar los resultados obtenidos y disminuir la incertidumbre de los modelos se recomienda evaluar los cambios en los usos del suelo a lo largo del tiempo para este tipo de trabajos, especialmente cuando se evalúan escenarios de cambio climático (ej. proyecciones de la producción agrícola, aumento de población entre otros) ya que estos cambios cambian las áreas y afectan directamente el balance hídrico y las variables que se analicen.

Este tipo de trabajos poseen un nivel de incertidumbre en los resultados obtenidos, por lo cual, se deben manejar con precaución y ser mejorados a medida que existe más información, sin embargo, pueden servir para que los tomadores de decisiones en las regiones tomen decisiones sobre la gestión del recurso hídrico.

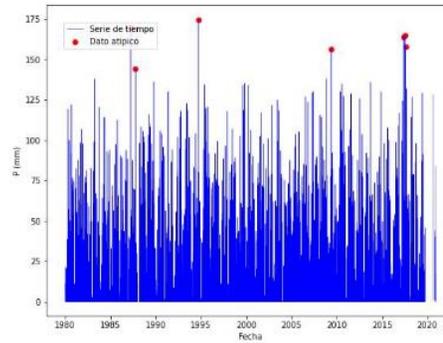


## **A. Anexo: Análisis de calidad de la información**

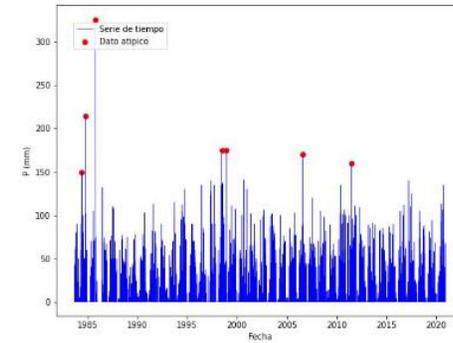
## Datos atípicos precipitación



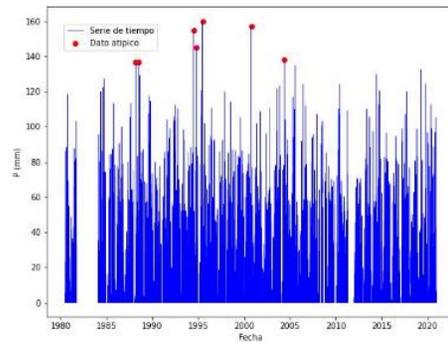
AGUASCLARAS [24060040]



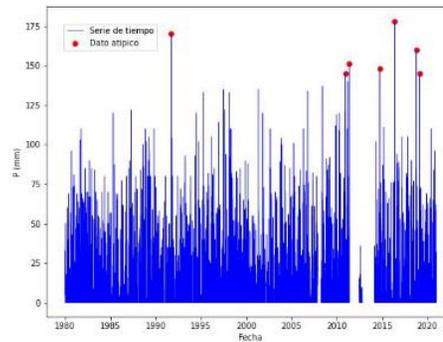
APTOYARIGÜES [23155030]



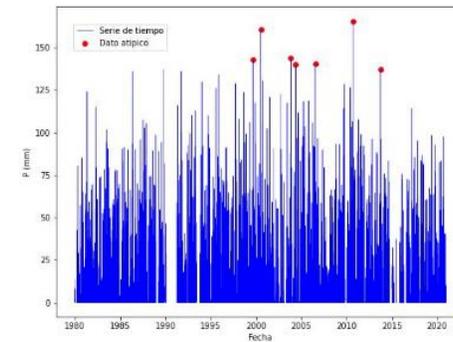
BARRANCALEBRÍJA [23190710]



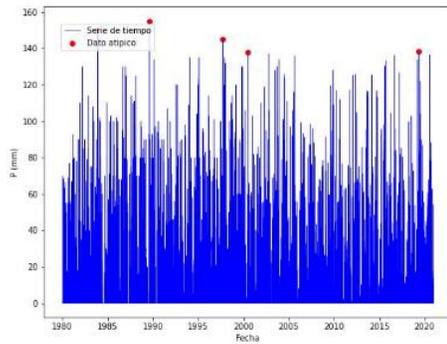
BRISASLASHDA [24065010]



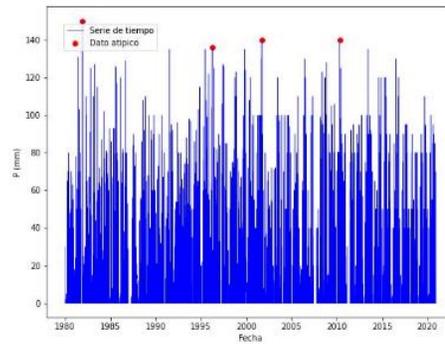
CAOBOEL [23190510]



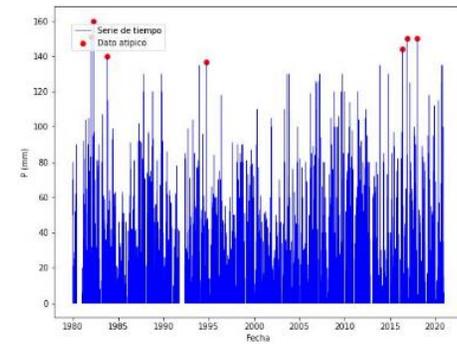
CENTROEL [23155040]



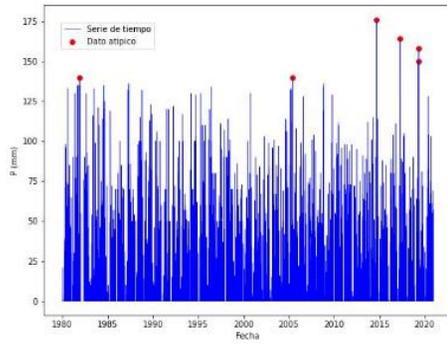
CHUCURI [23130010]



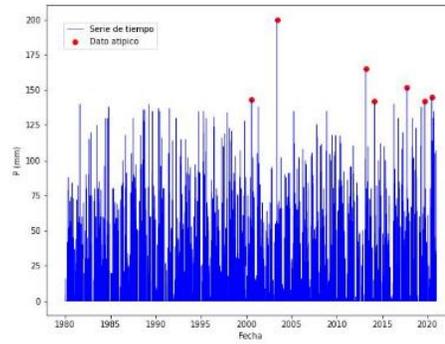
COQUERALA [23180120]



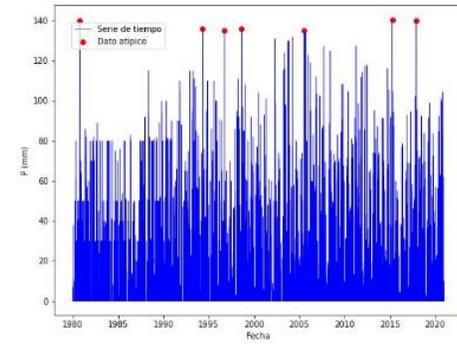
DORADALA [23190520]



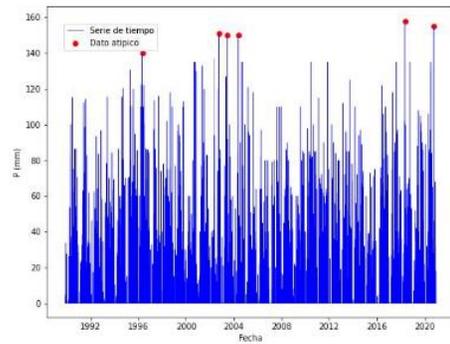
ELOYVALENZUELA [23180080]



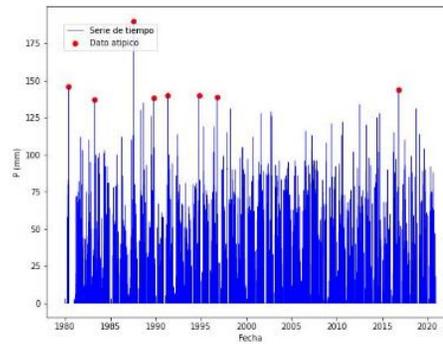
ESTABLOEL [23180050]



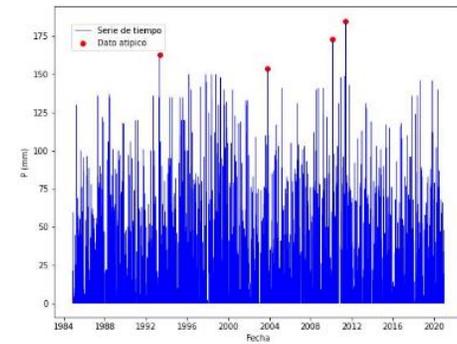
LIBANOEL [23190110]



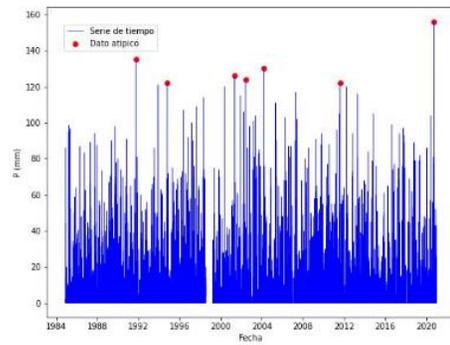
MAGARA [23190210]



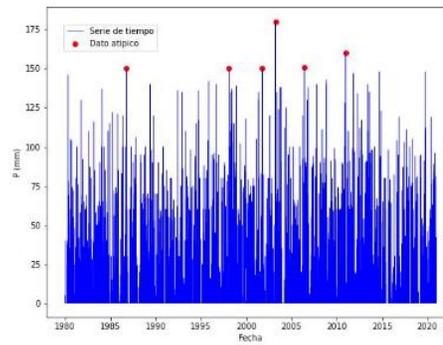
PATURIA [23180110]



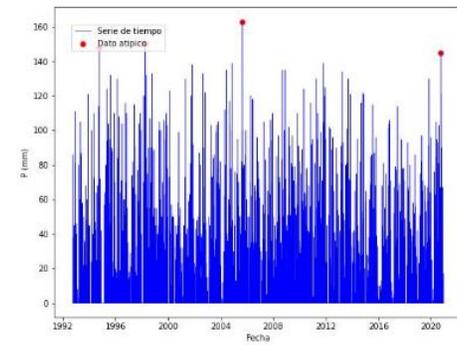
PAYOA5 [24060080]



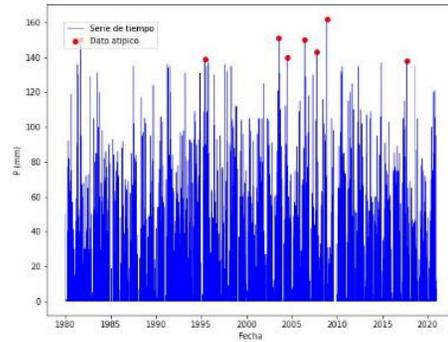
PLANESLOS [23190810]



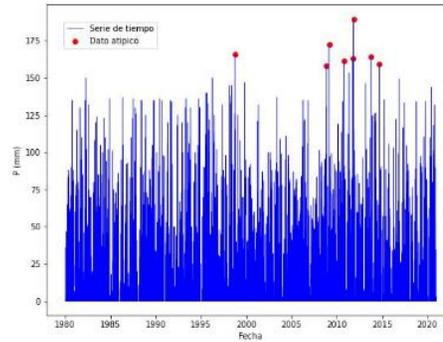
PORVENIREL [23180040]



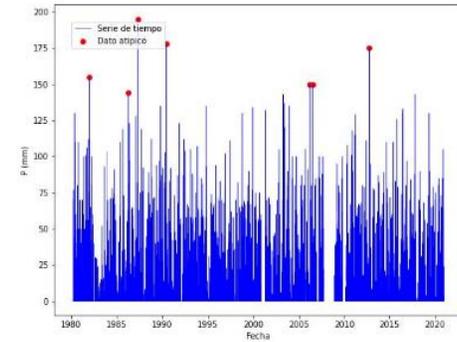
PROVINCIA [23190320]



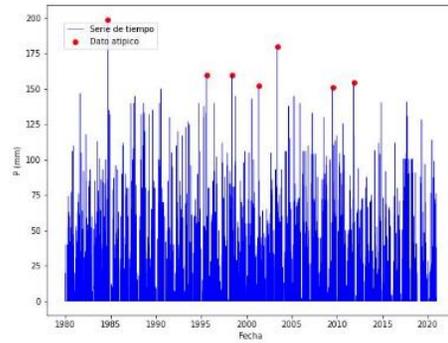
PTOWILCHES [23180020]



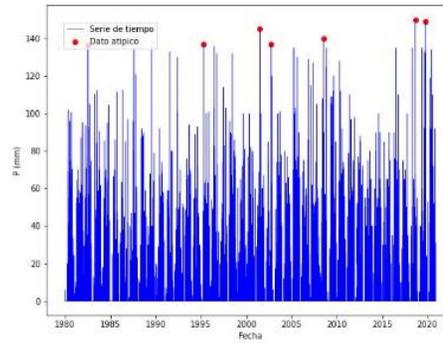
SABANADETORRES [23180070]



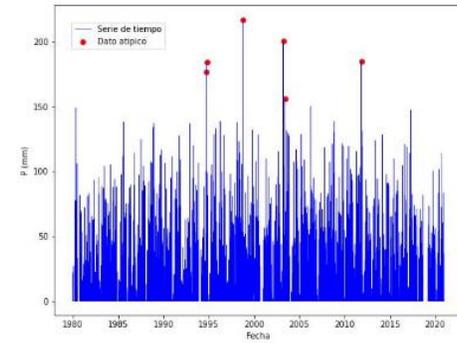
SANALBERTO [23190500]



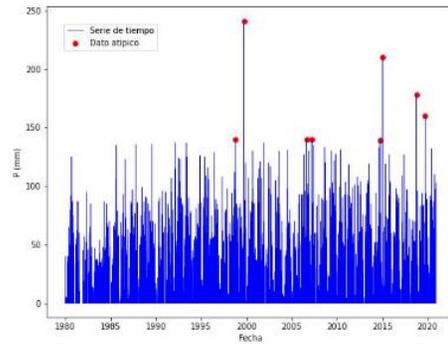
SANRAFAEL [23190560]



SITIONUEVO [23180100]

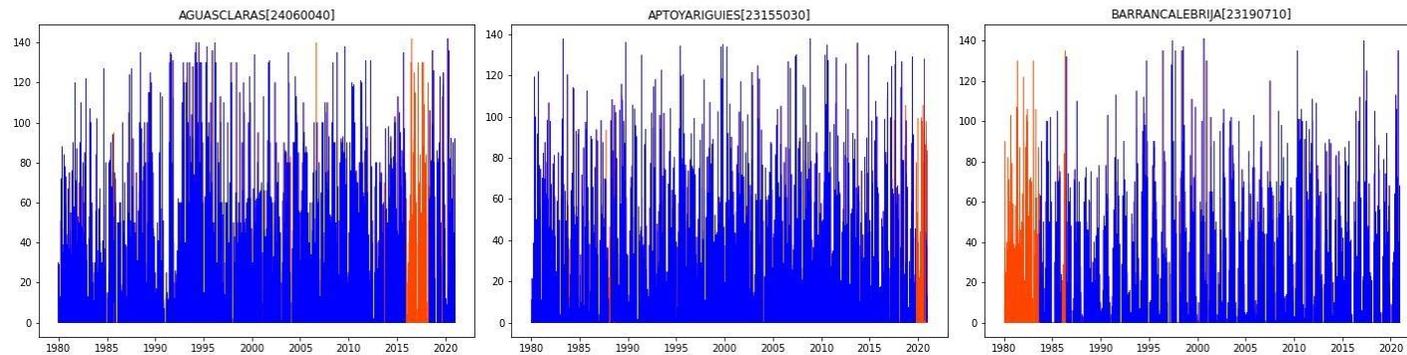


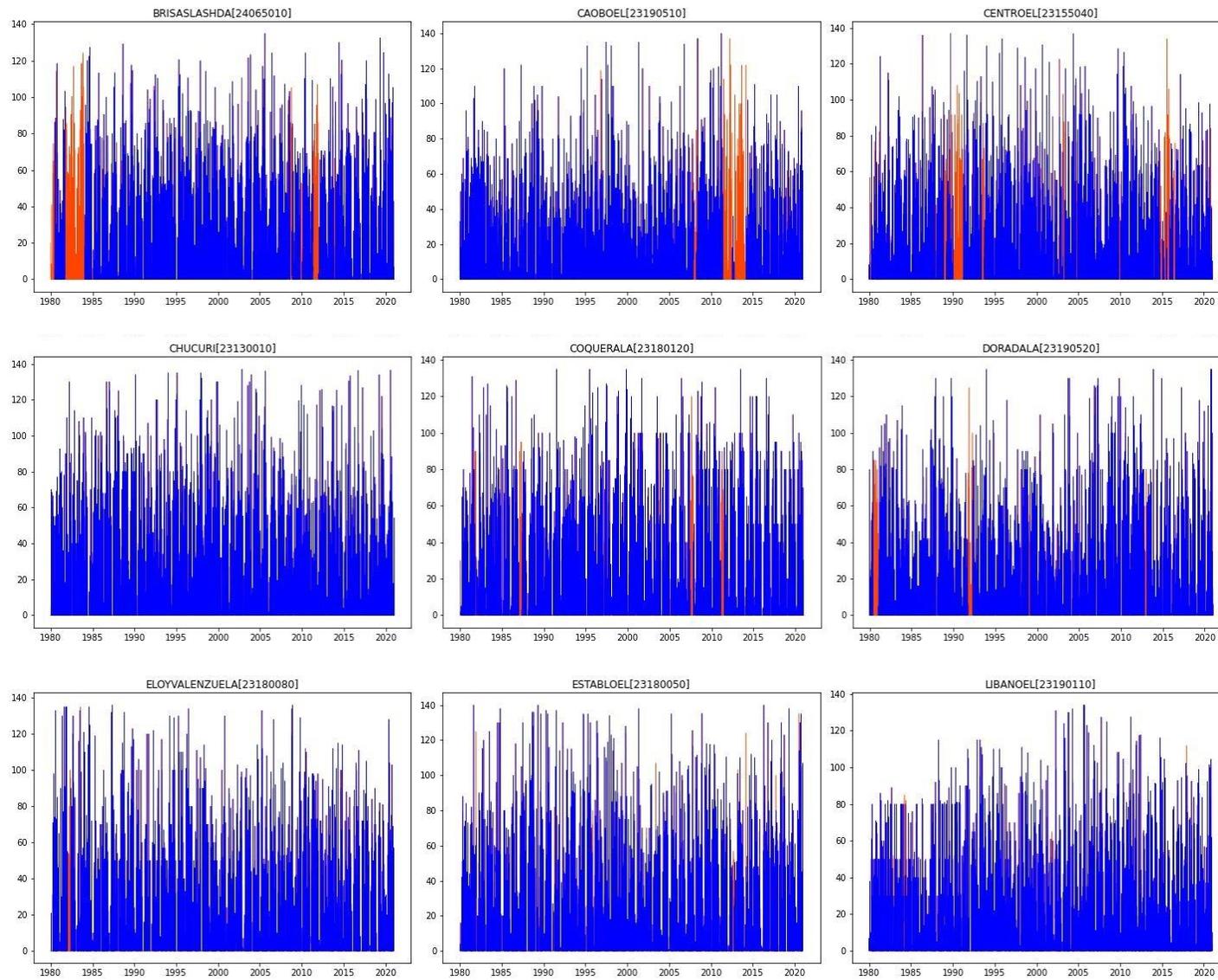
VILLALEIVA [23185010]

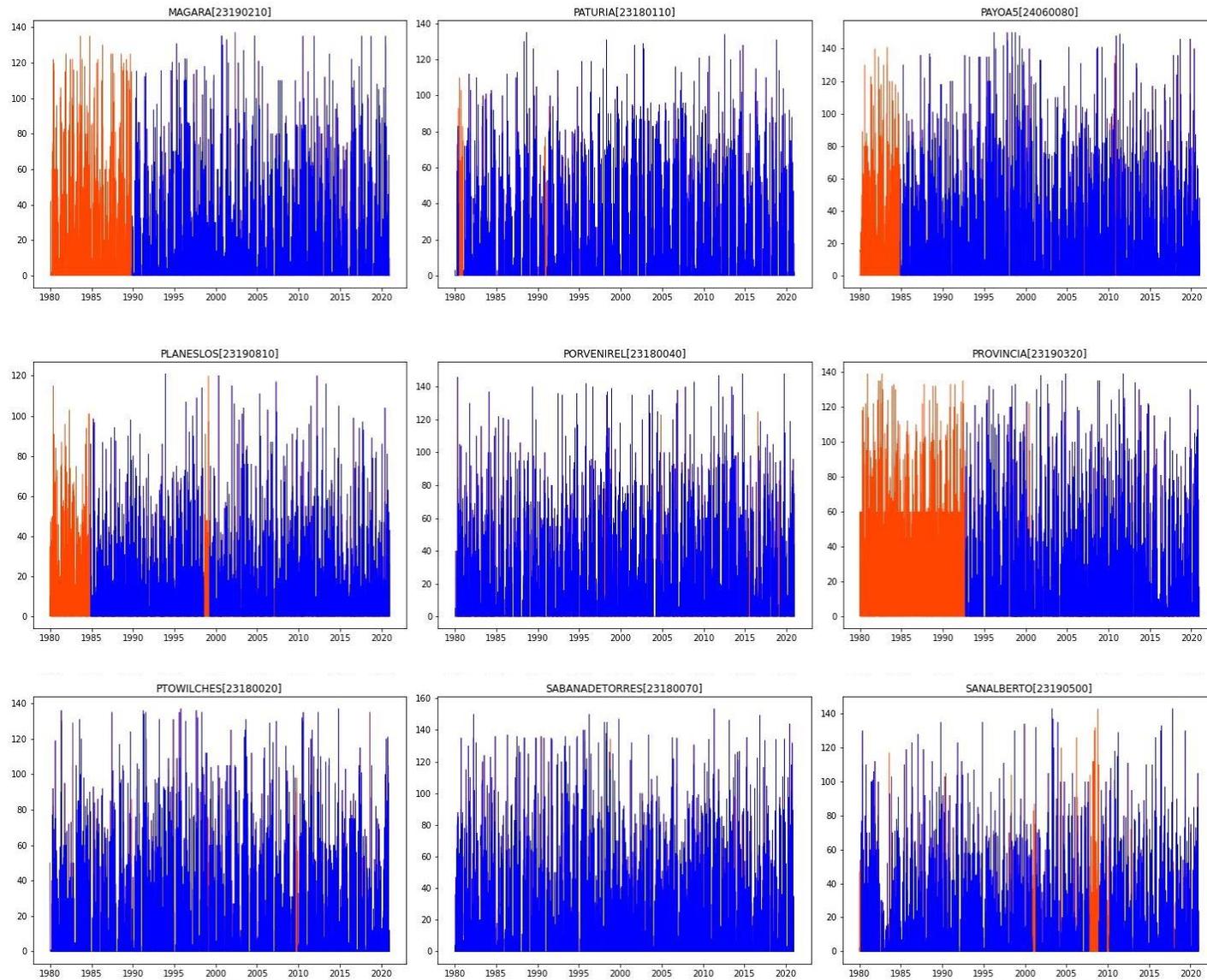


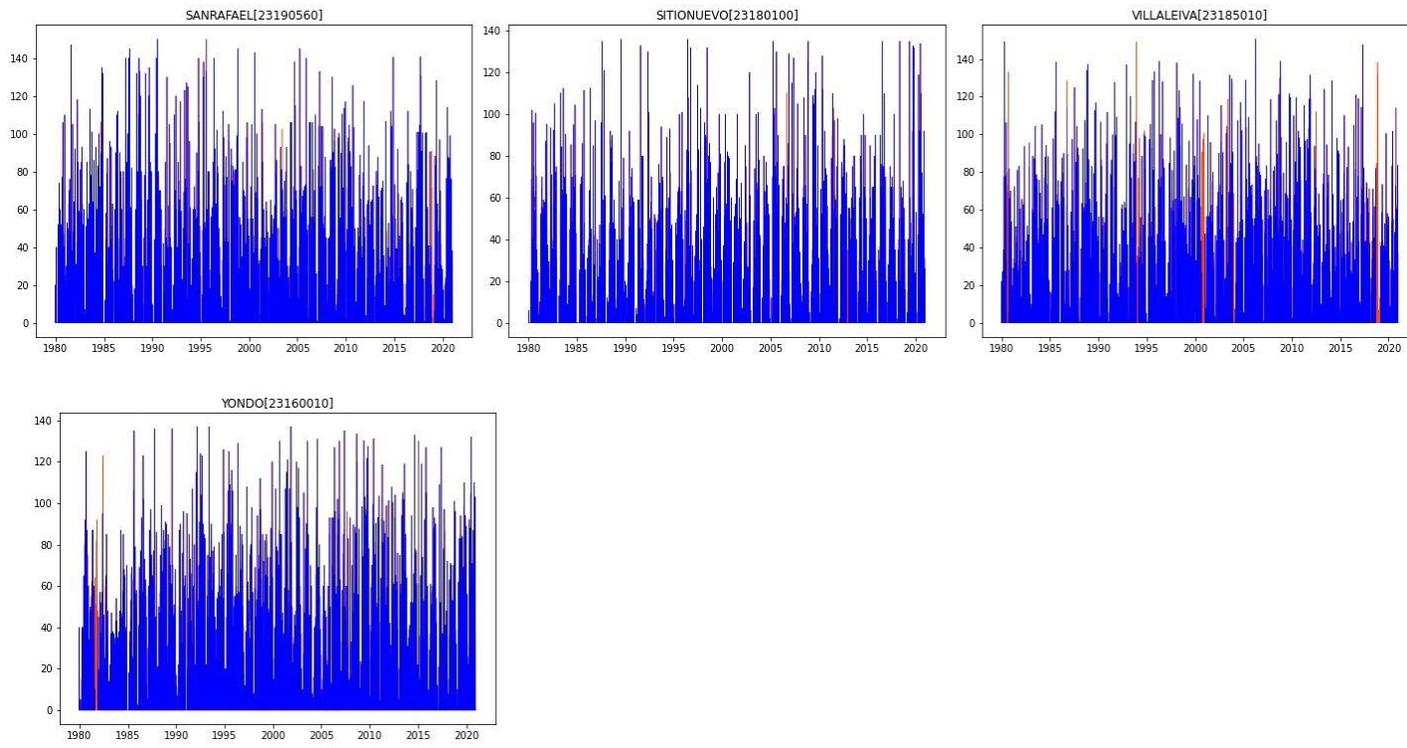
YONDO [23160010]

## Datos imputados precipitación

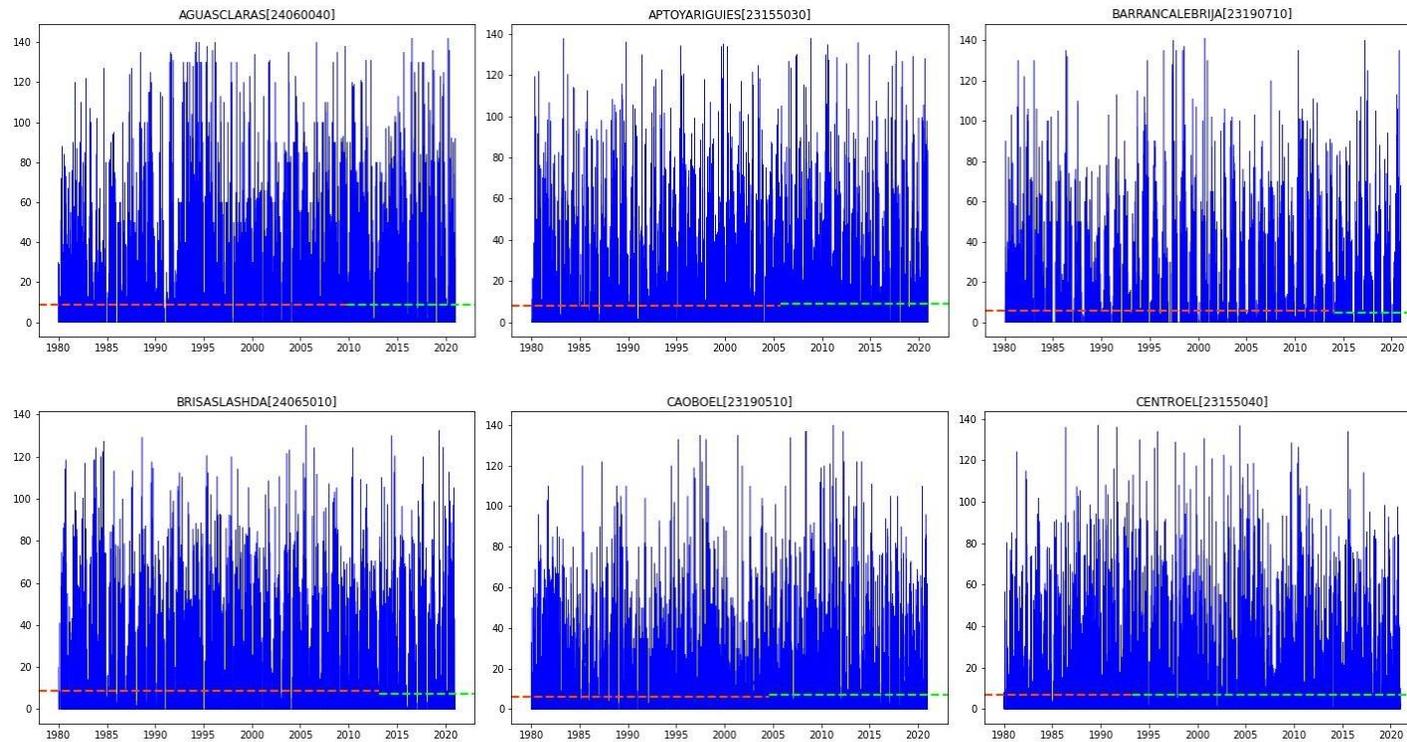


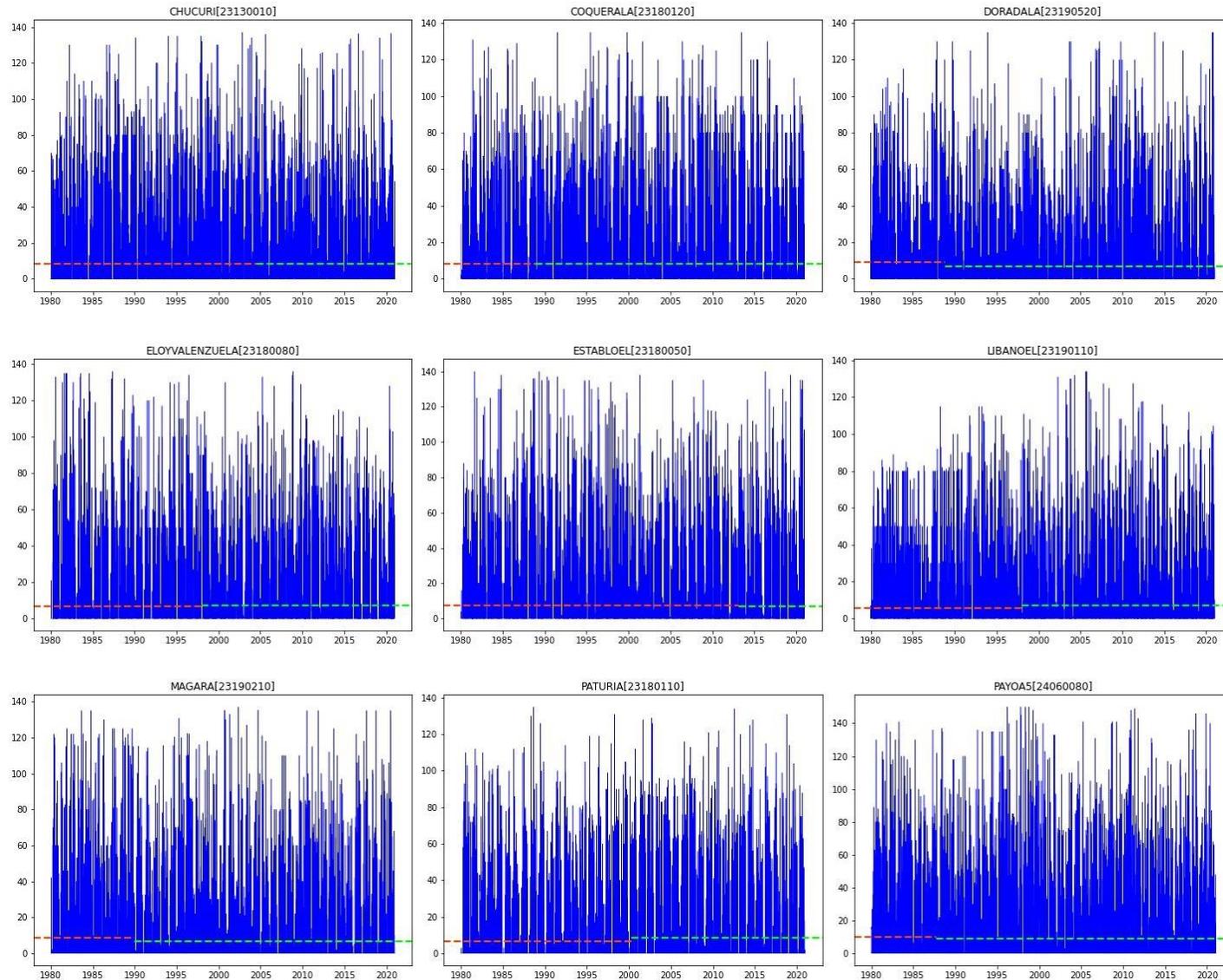


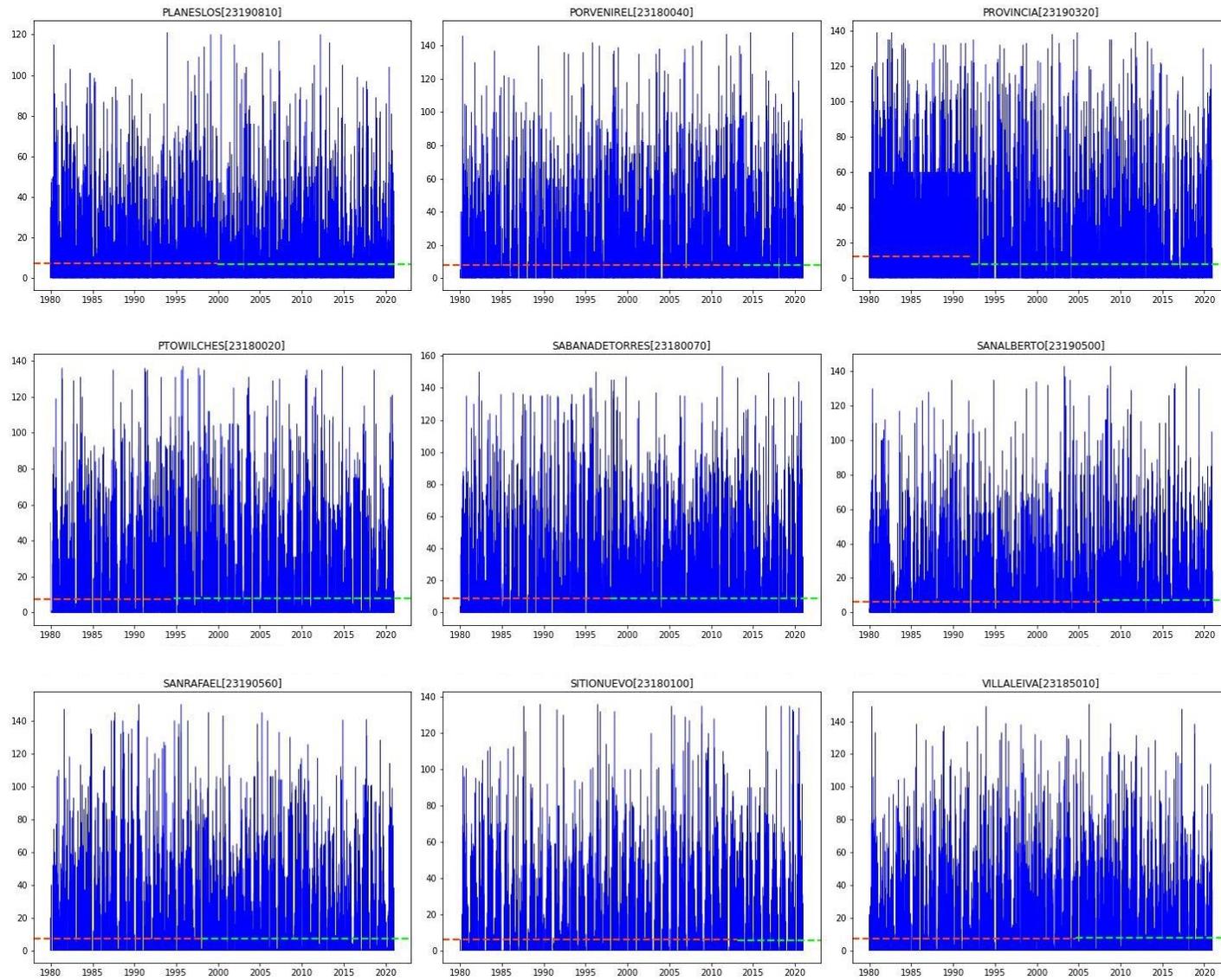


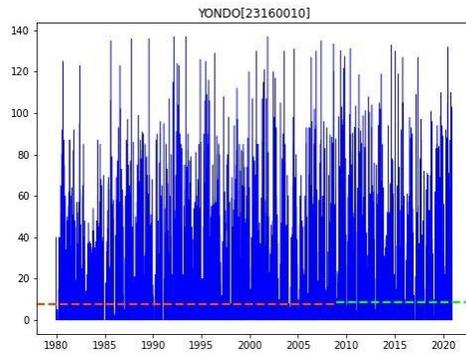


## Prueba homogeneidad precipitación

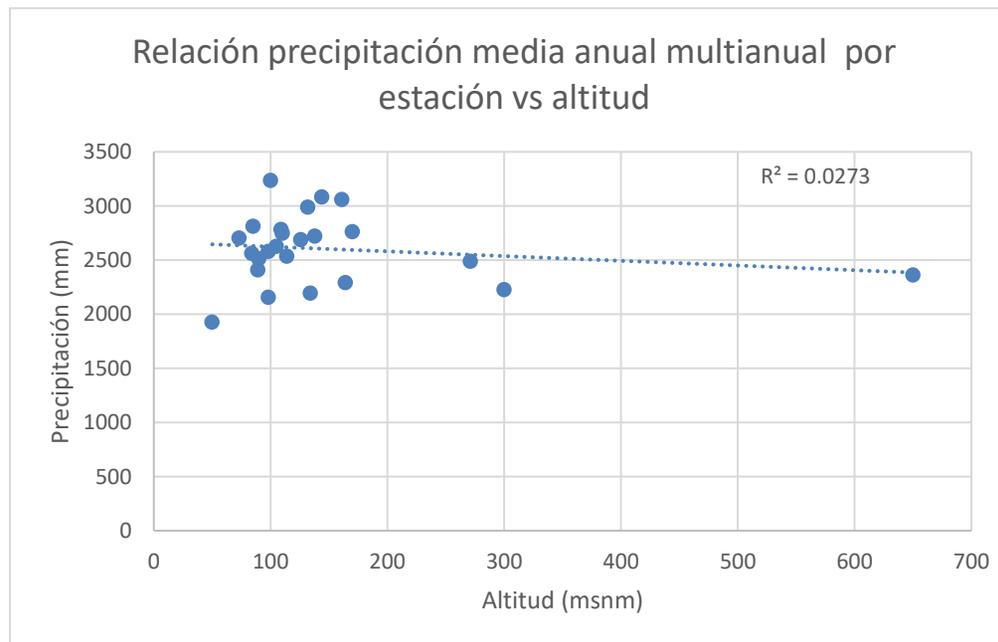




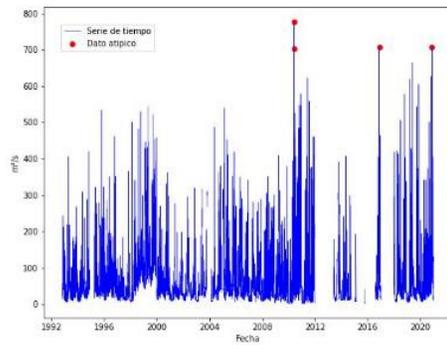




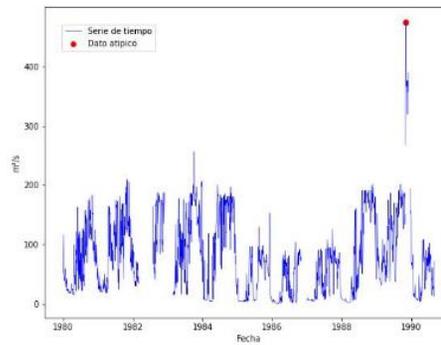
## Relación precipitación altitud



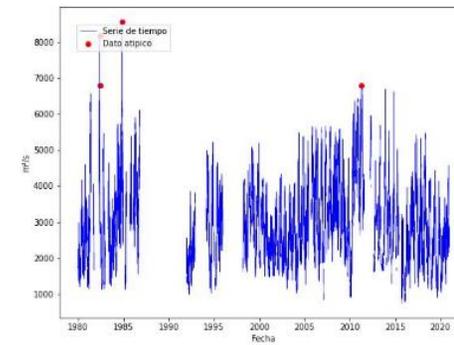
## Datos atípicos caudal



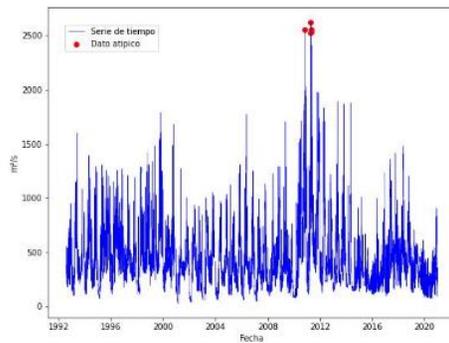
AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada



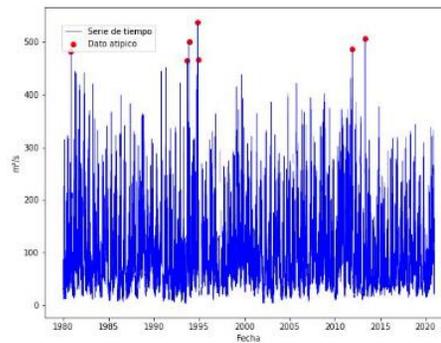
BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra



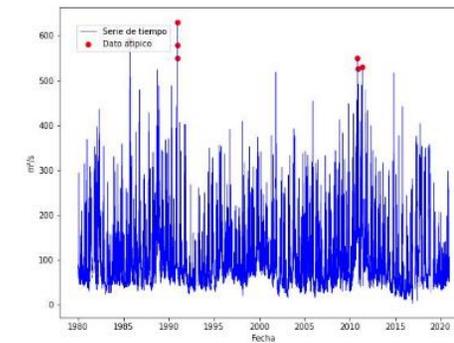
PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena



PTE SOGAMOSO [24067020] - Río Sogamoso

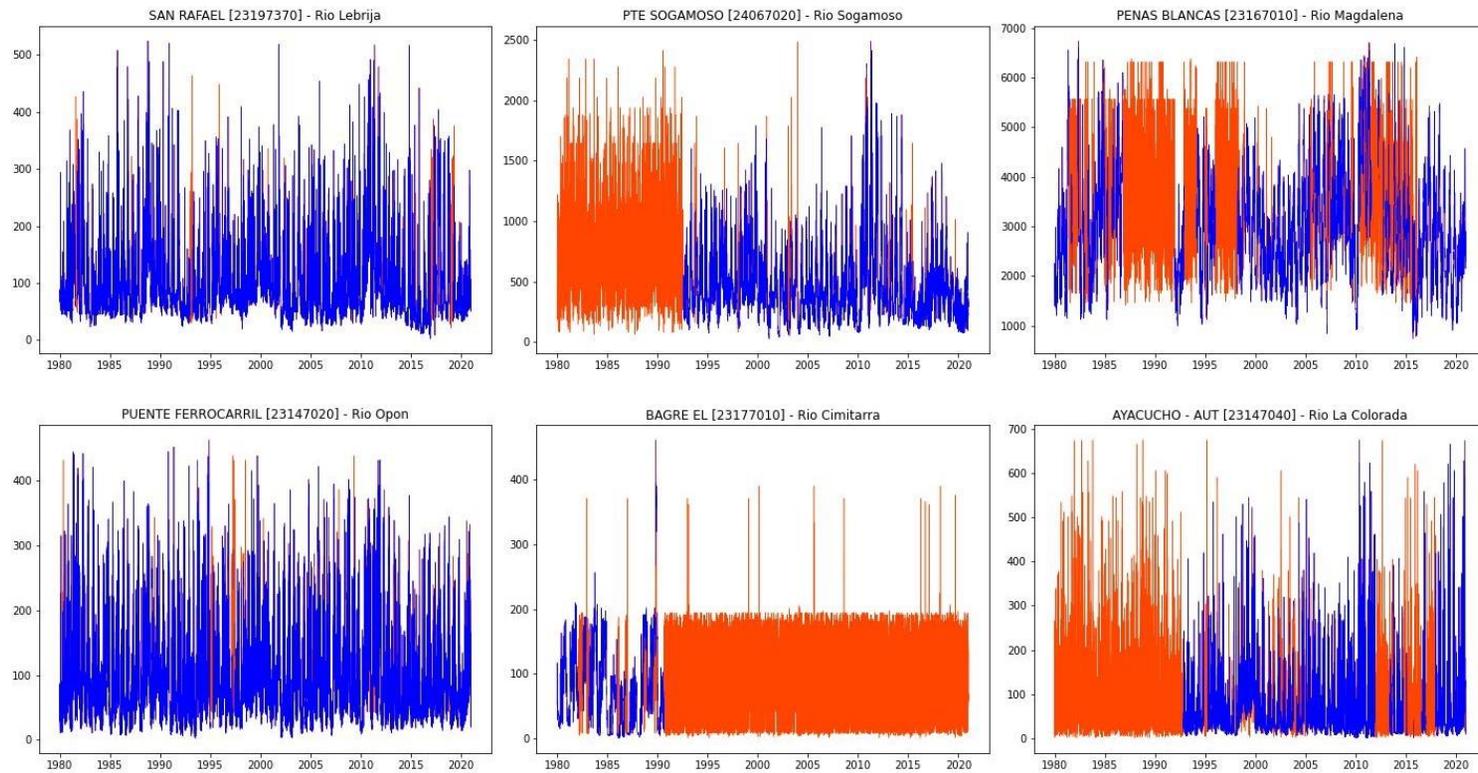


PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río Opón

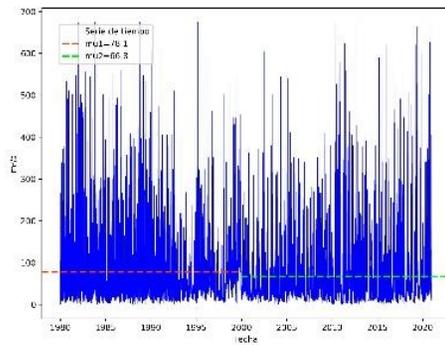


SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija

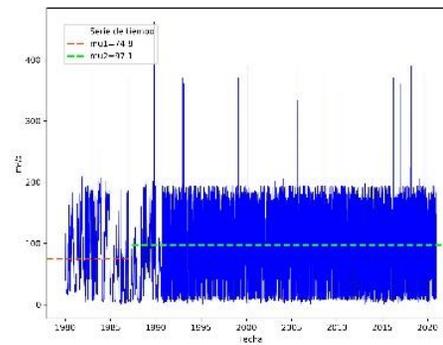
## Datos imputados caudal



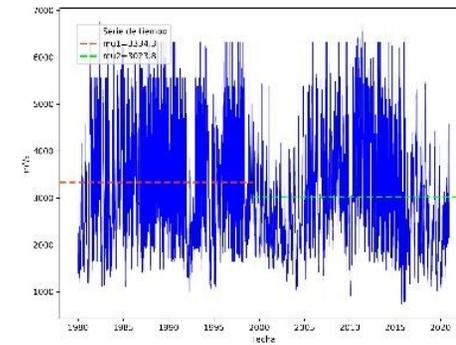
## Prueba homogeneidad caudal



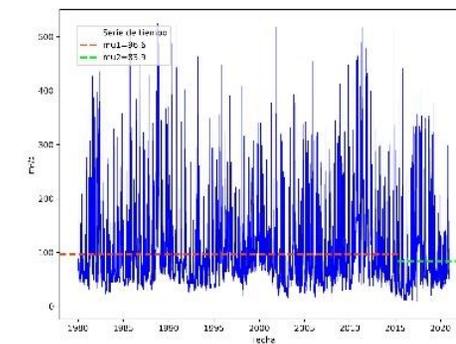
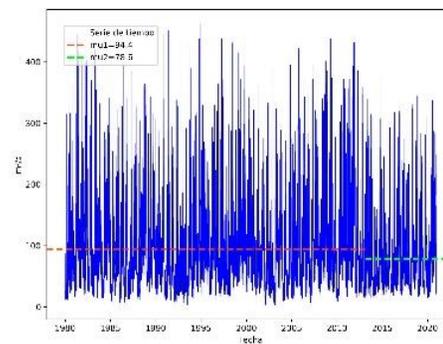
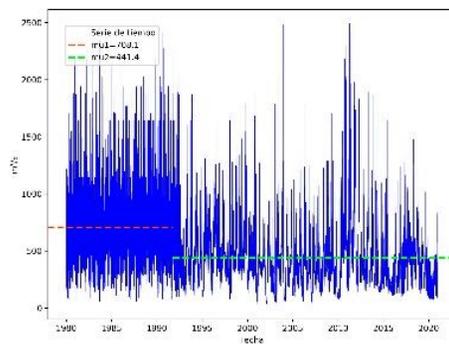
AYACUCHO - AUT [23147040] - Río La Colorada



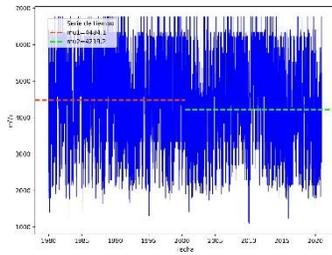
BAGRE EL [23177010] - Río Cimitarra



PENAS BLANCAS [23167010] - Río Magdalena



PTE SOGAMOSO [24067020] - Río  
Sogamoso



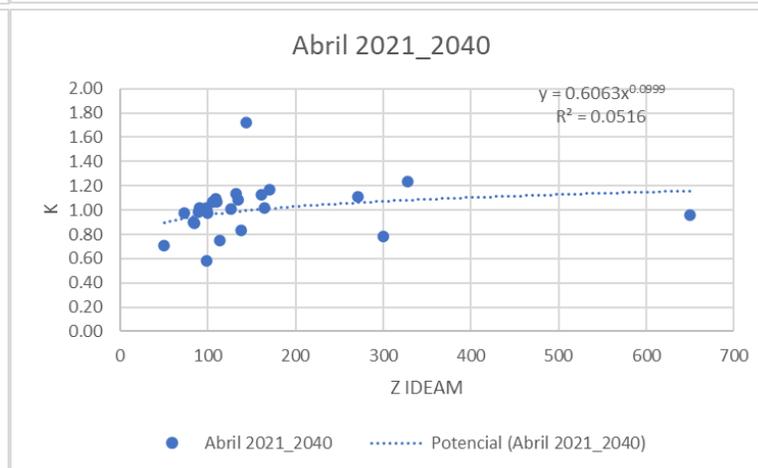
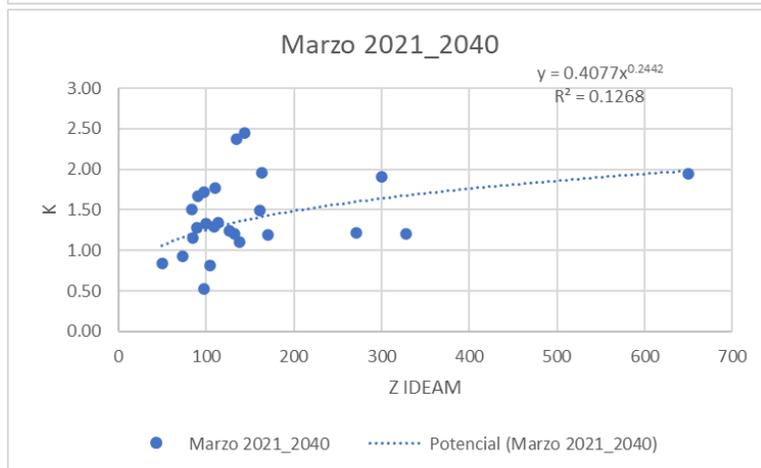
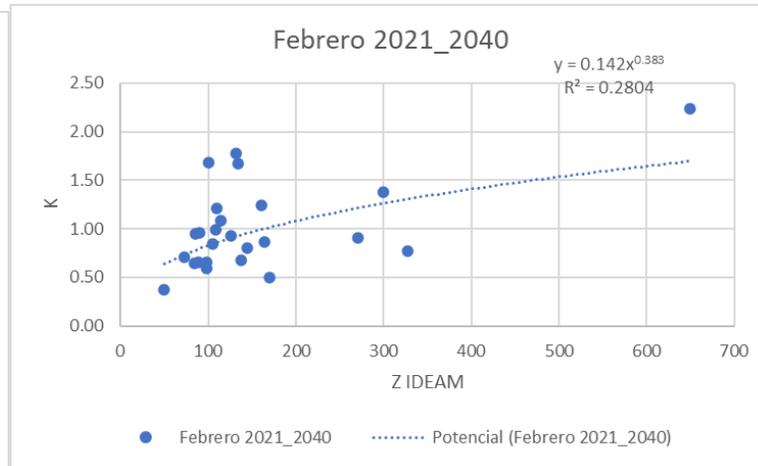
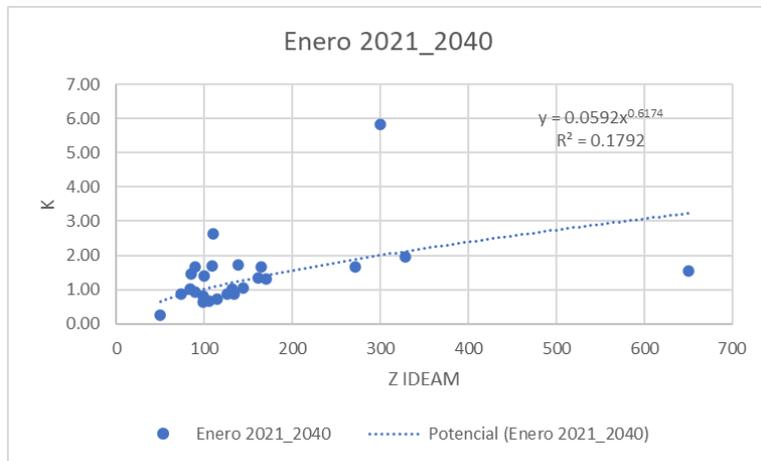
PUENTE FERROCARRIL [23147020] - Río  
Opón

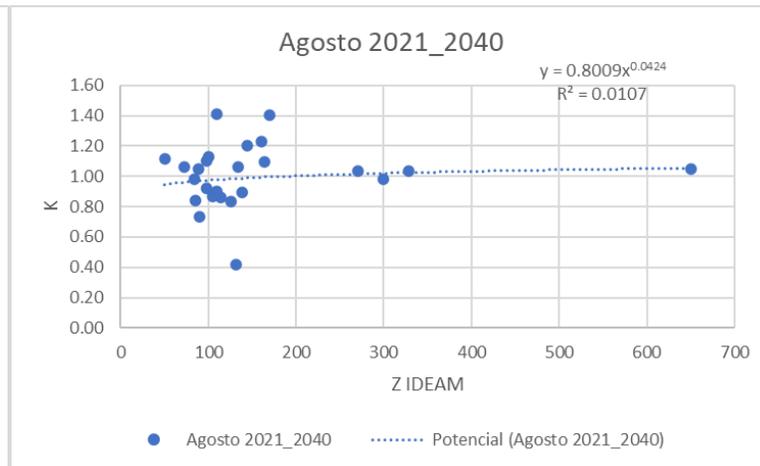
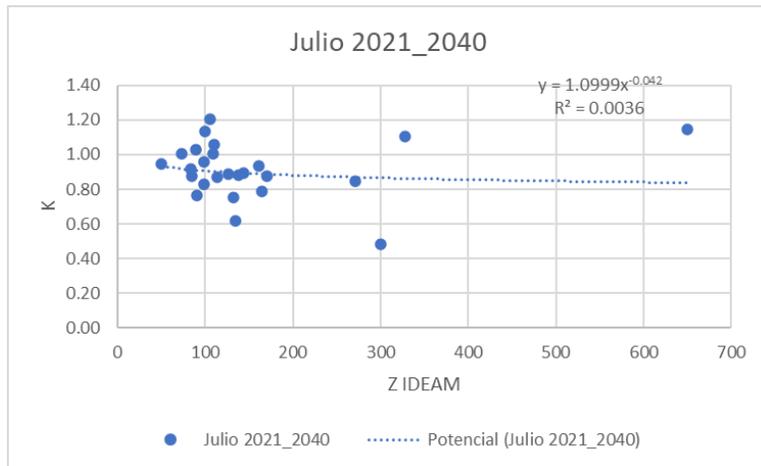
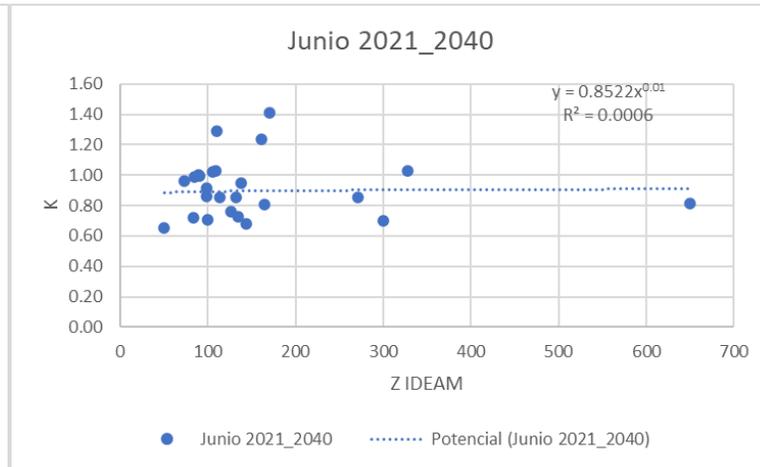
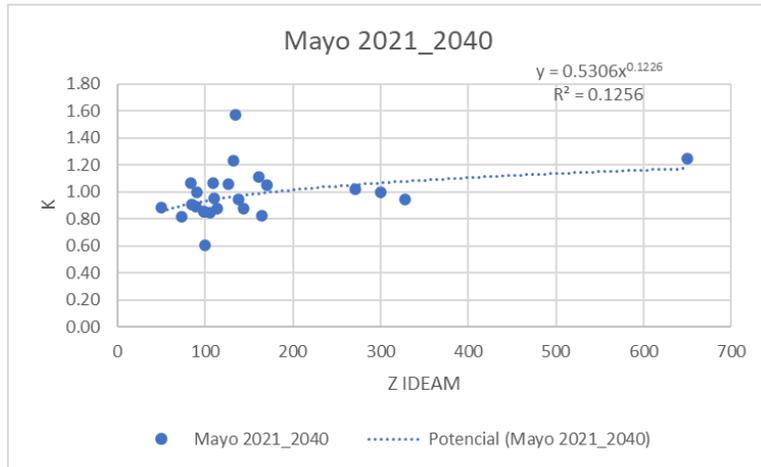
SAN RAFAEL [23197370] - Río Lebrija

SITIO NUEVO [23187280] - Río Magdalena

## **B. Anexo: Proceso de downscaling de las estaciones del área de estudio**

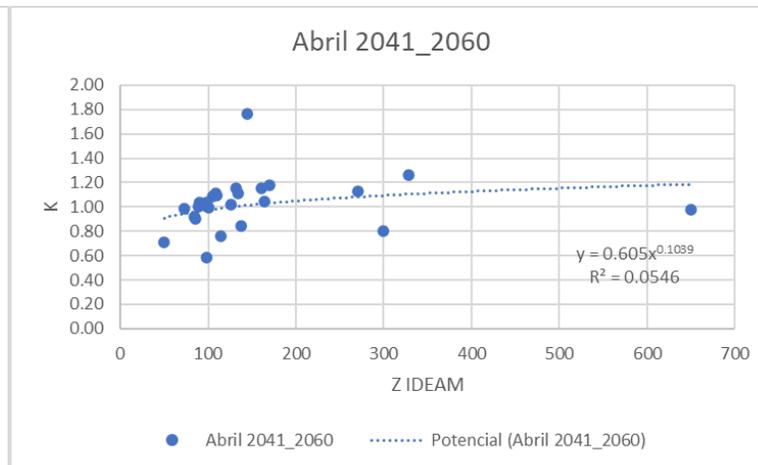
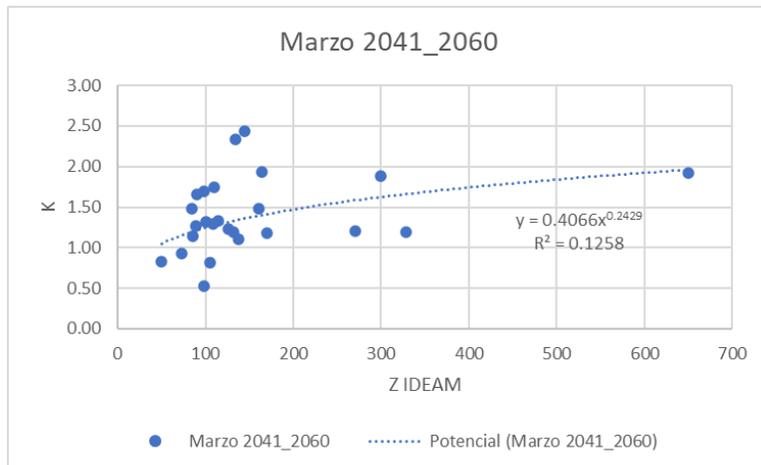
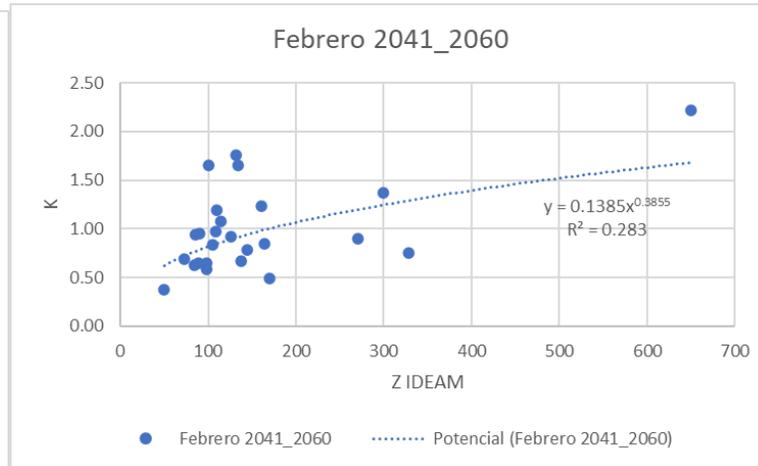
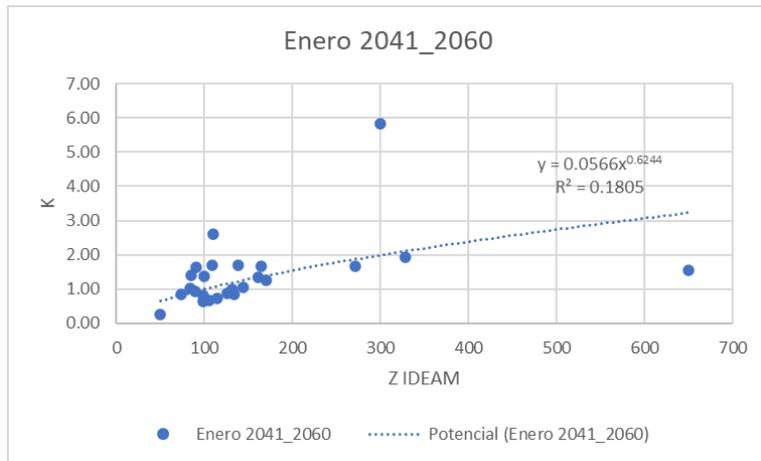
# 2021-2040

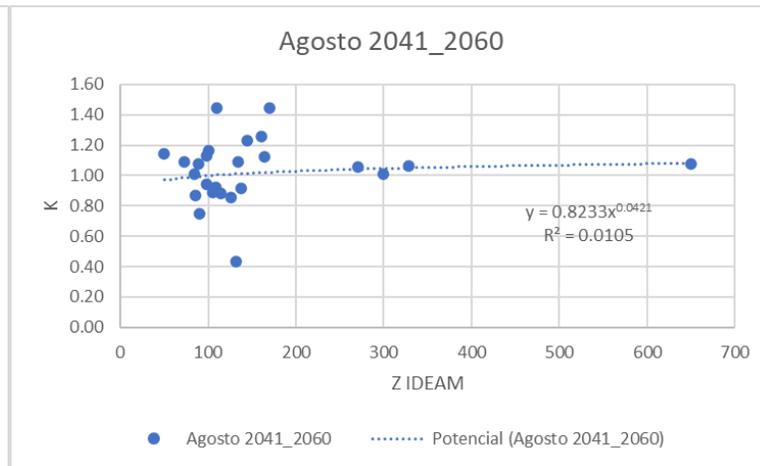
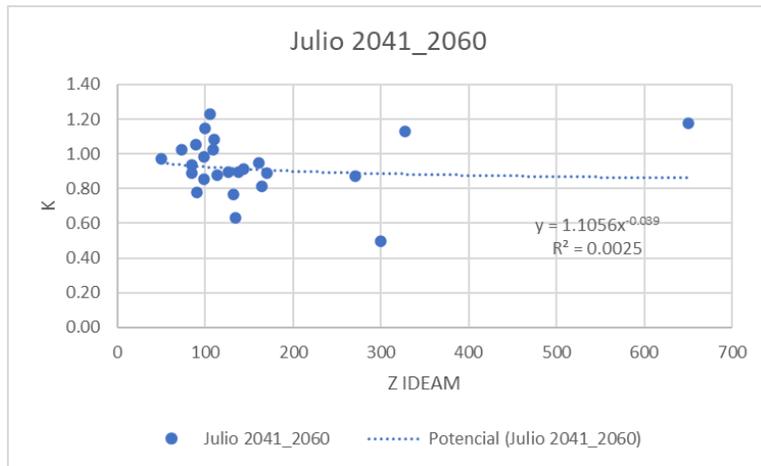
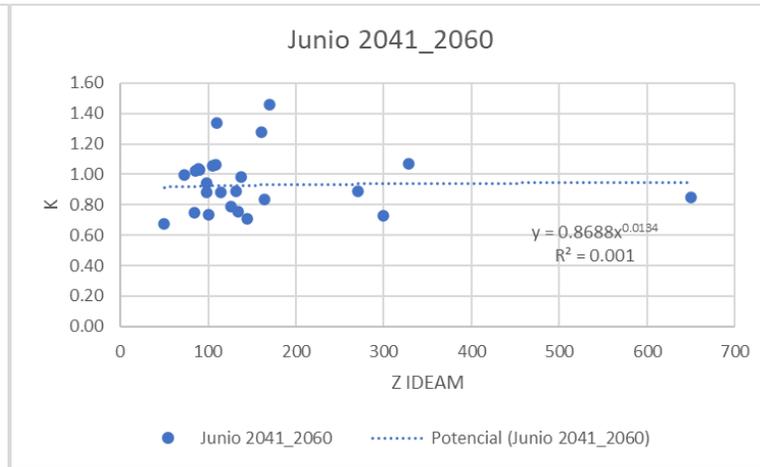
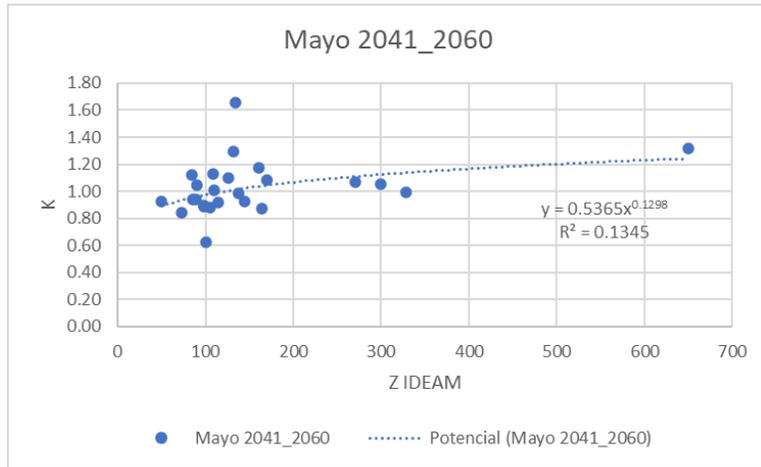


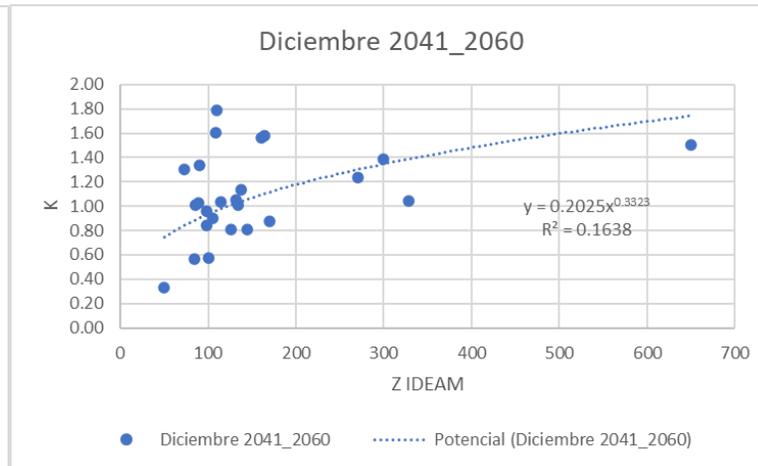
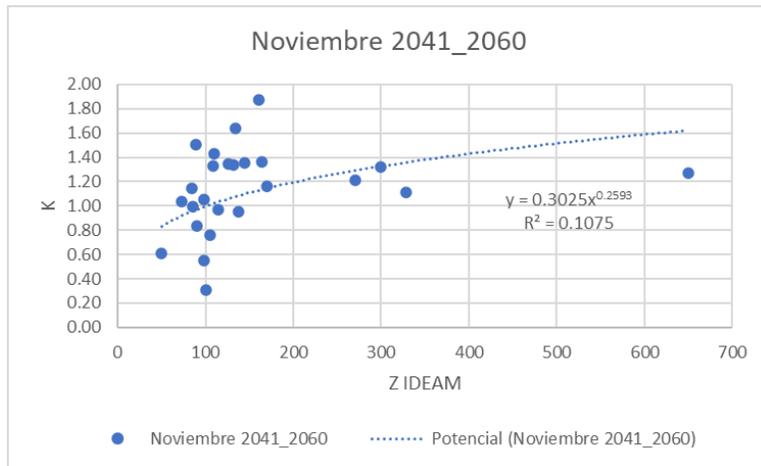
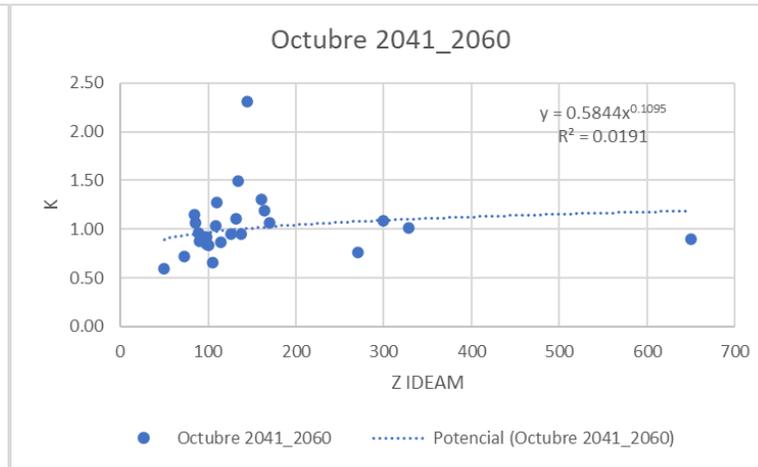
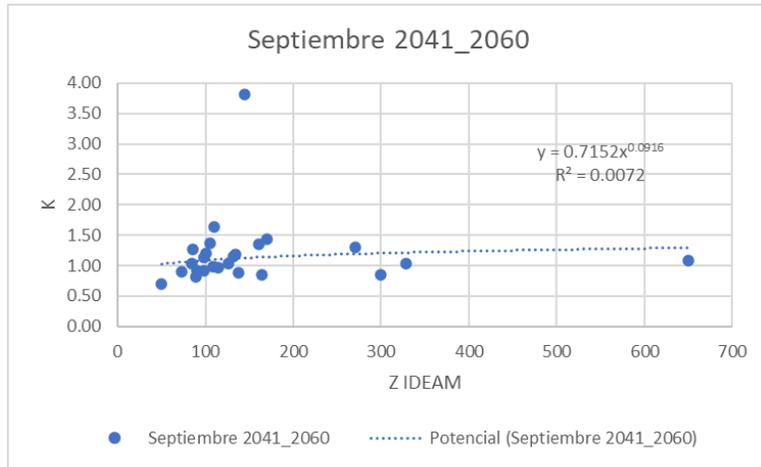




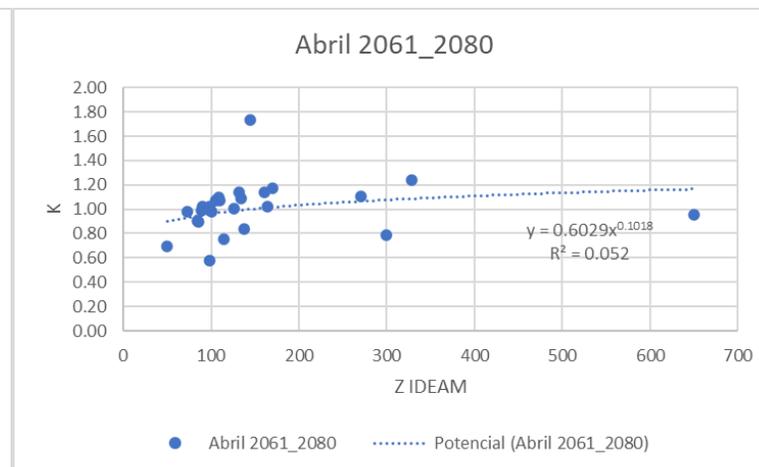
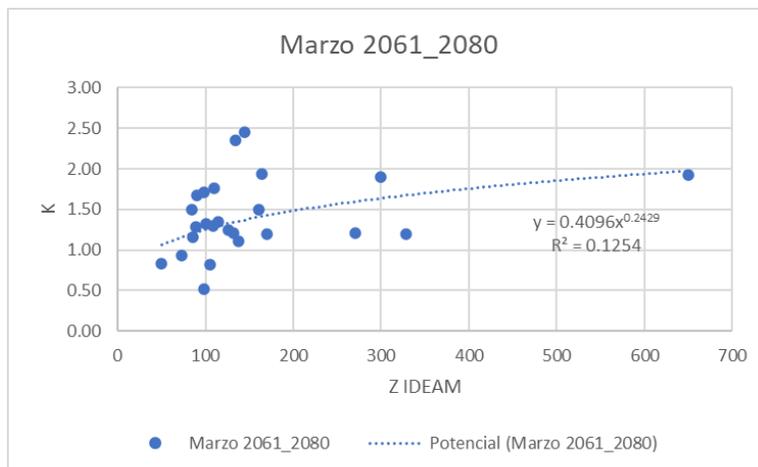
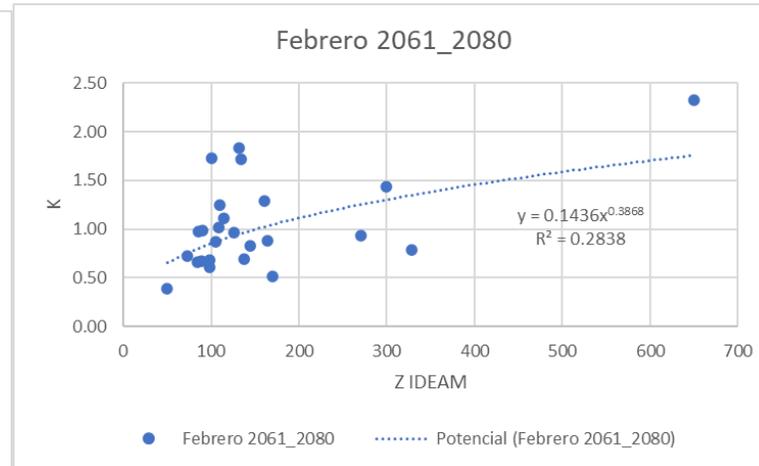
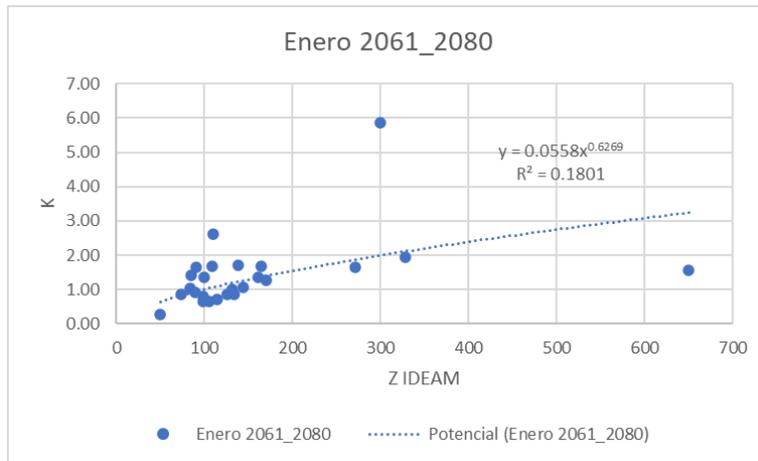
# 2041-2060

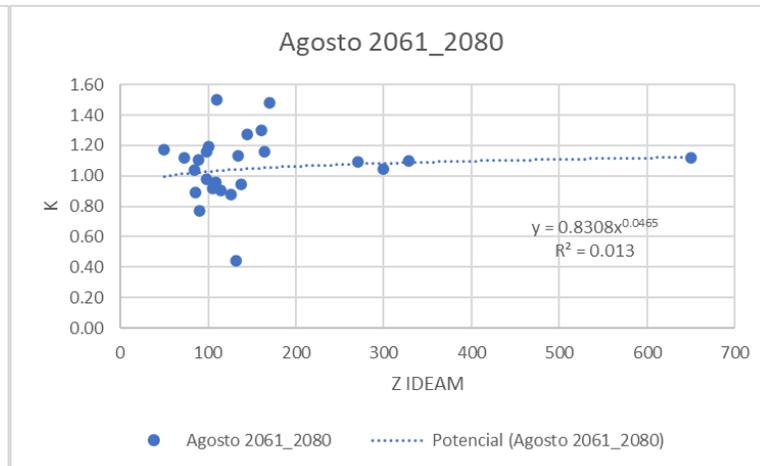
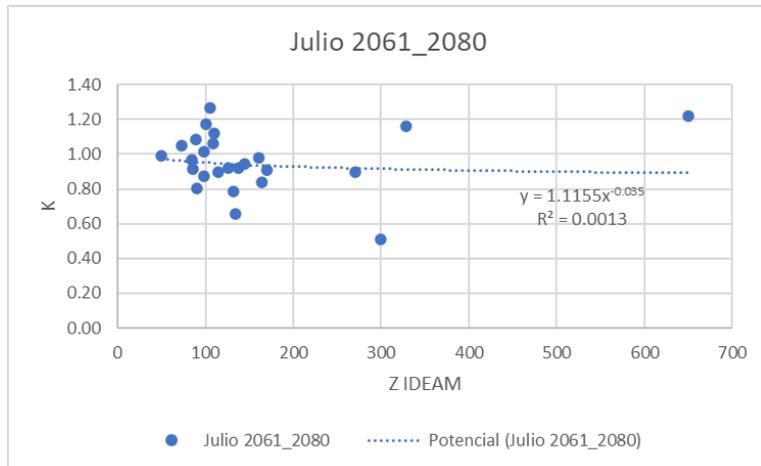
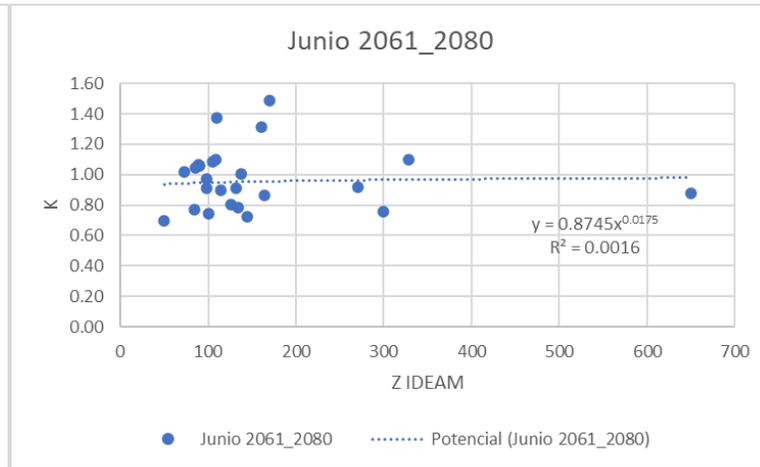
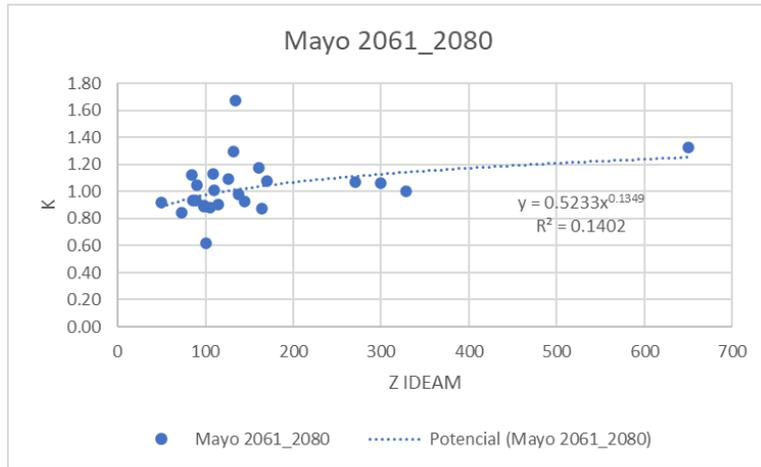


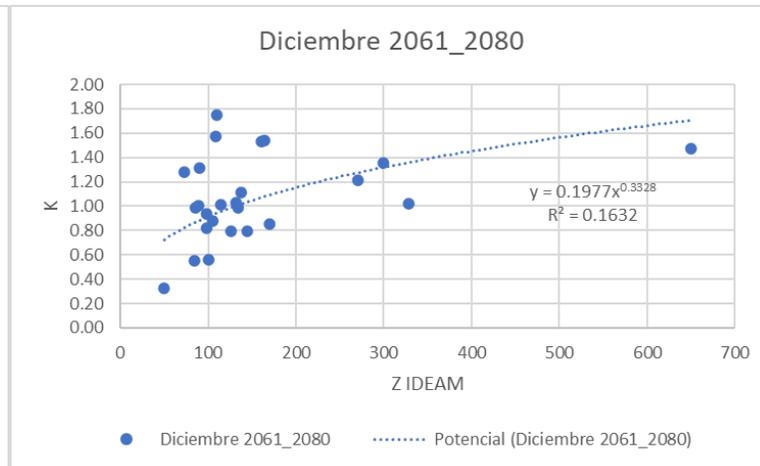
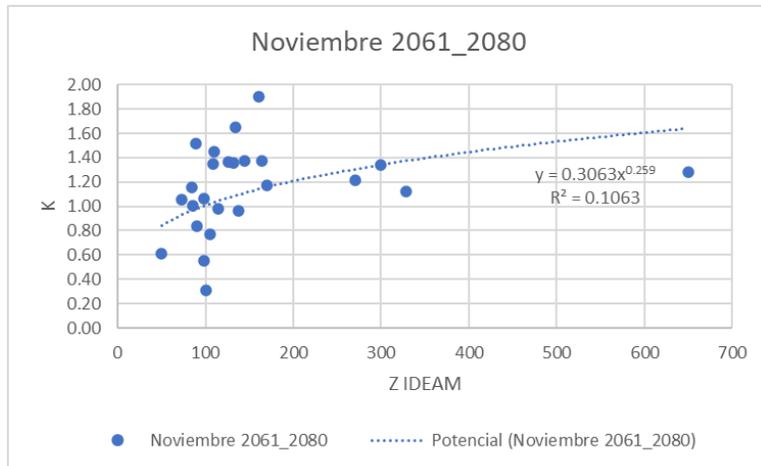
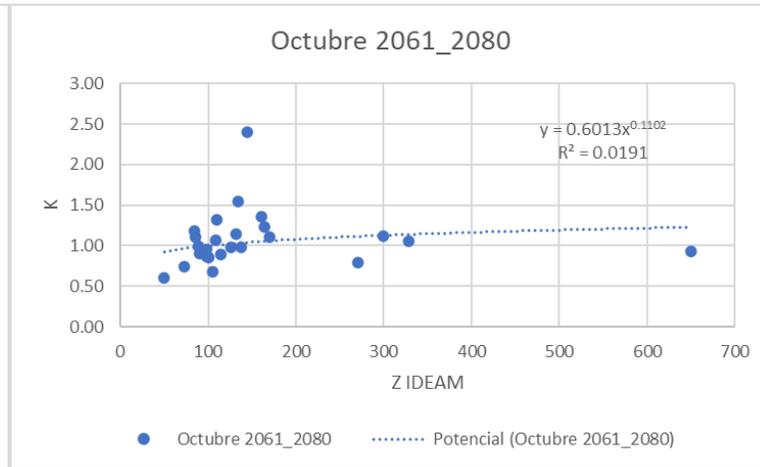
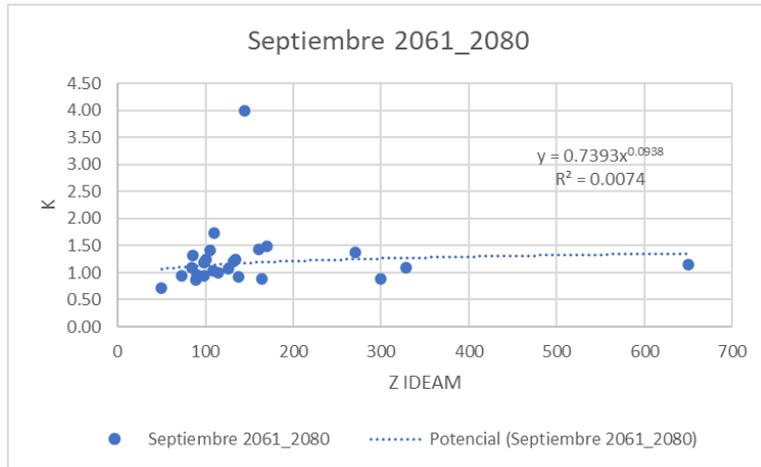




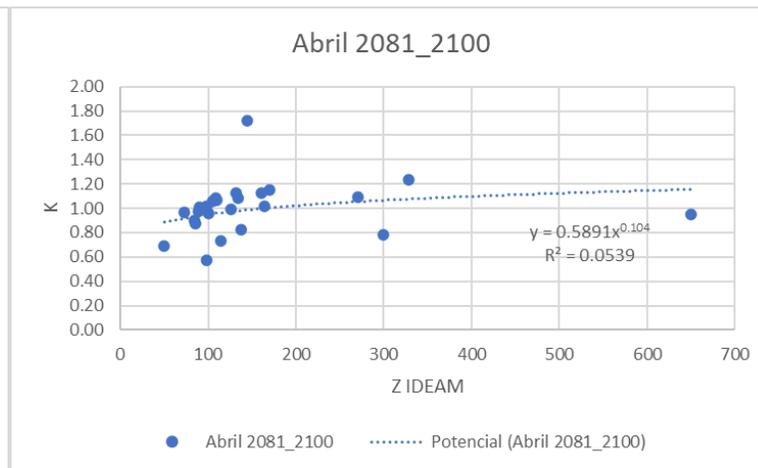
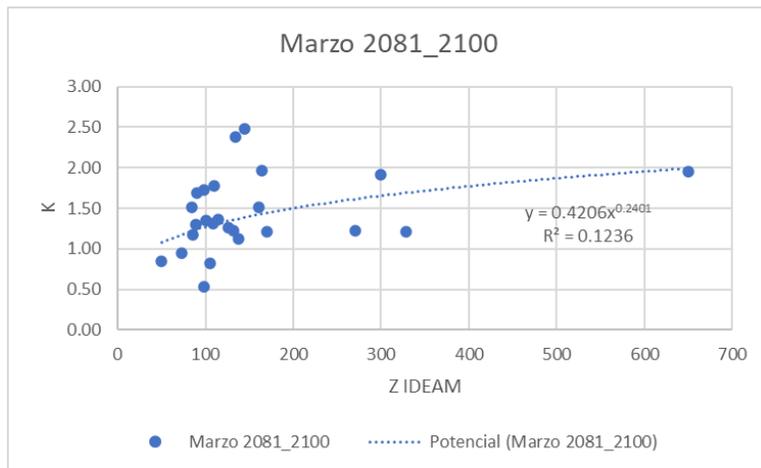
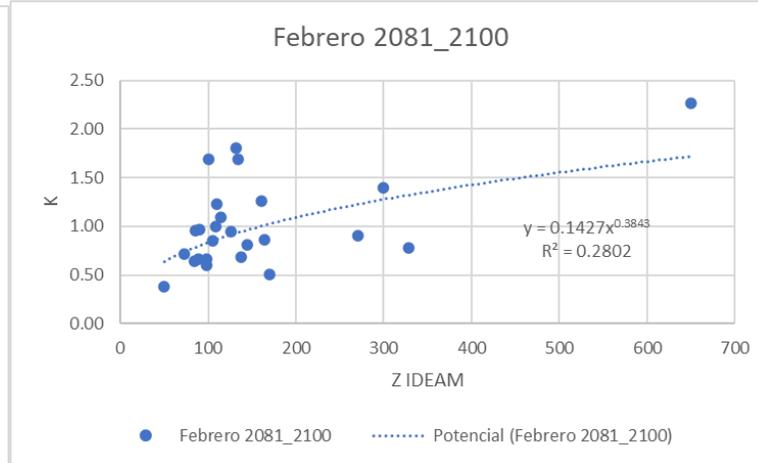
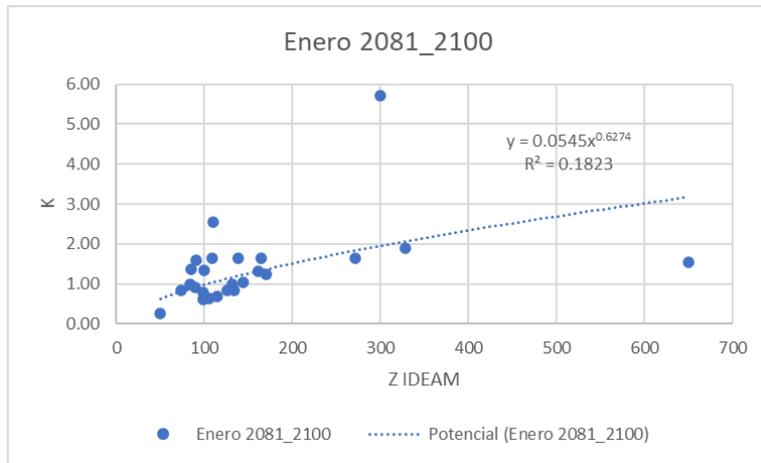
## 2061-2080

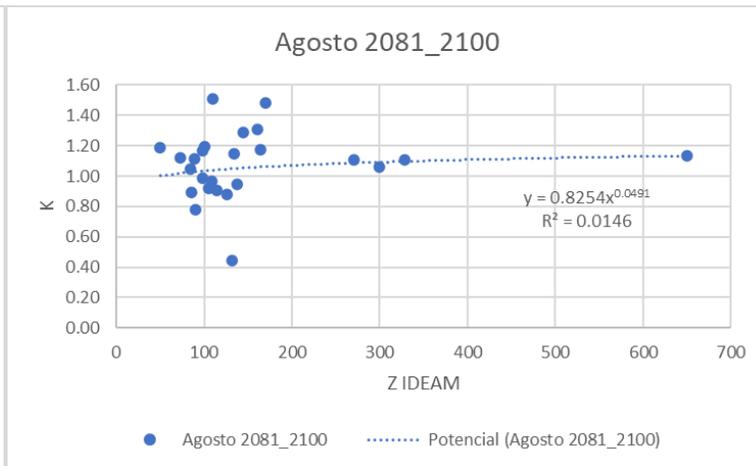
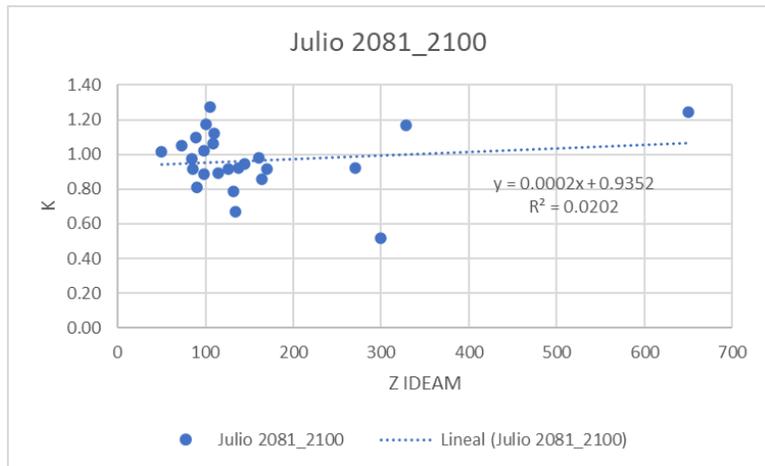
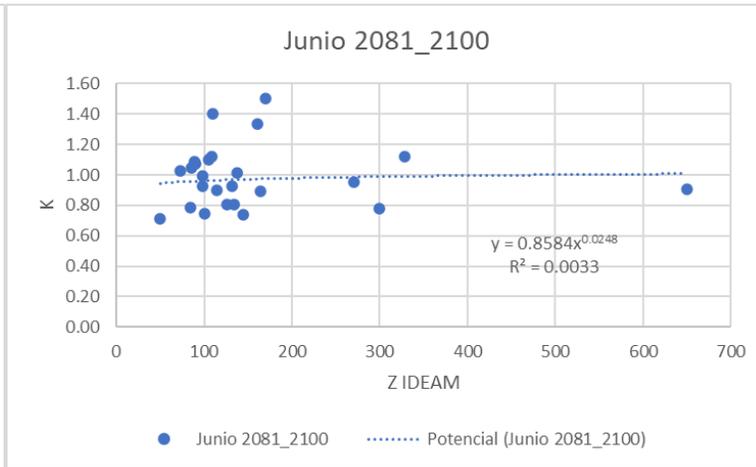
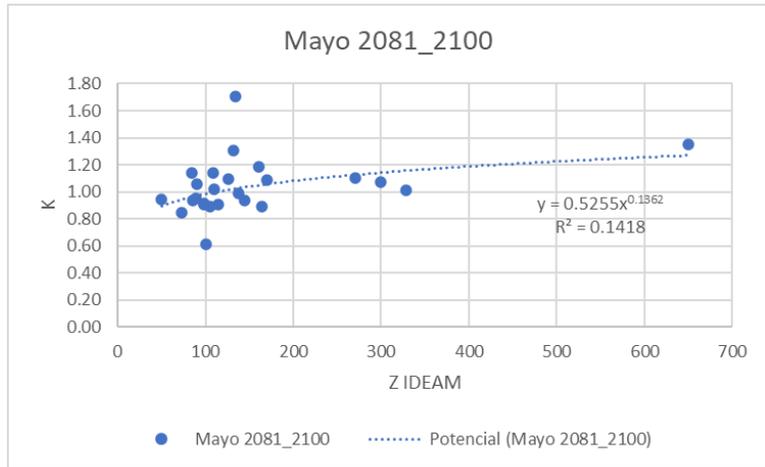


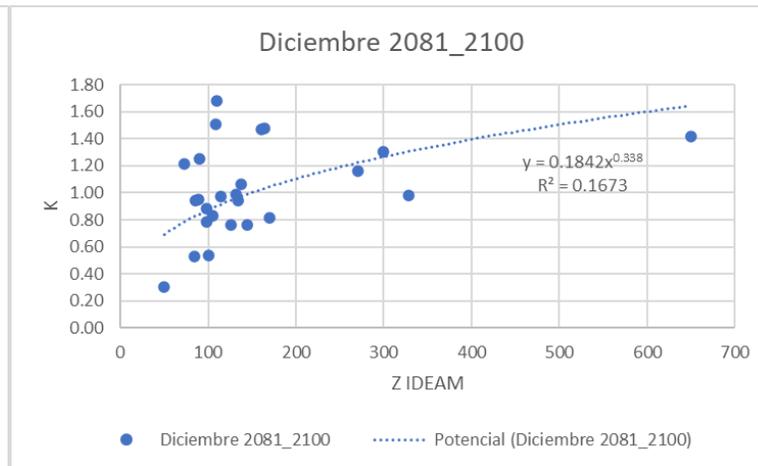
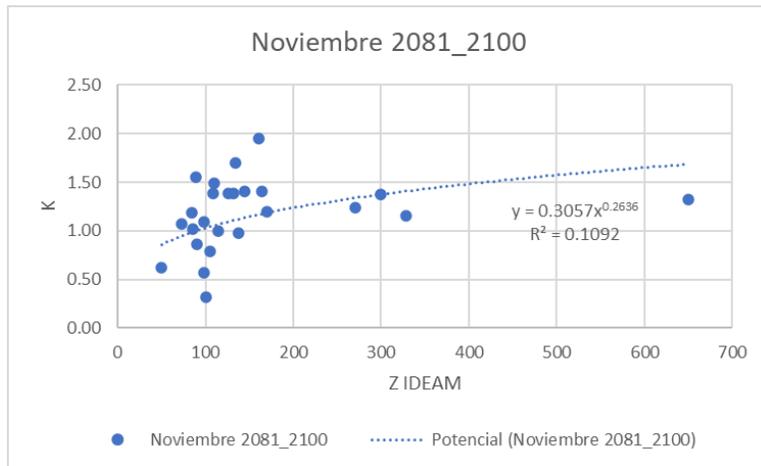
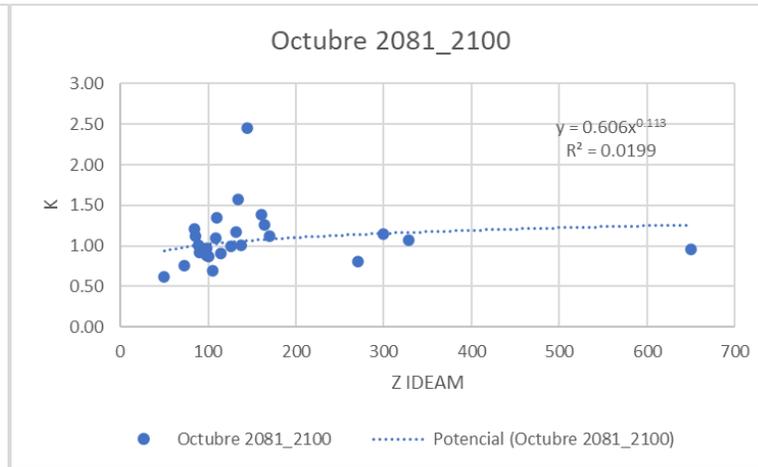
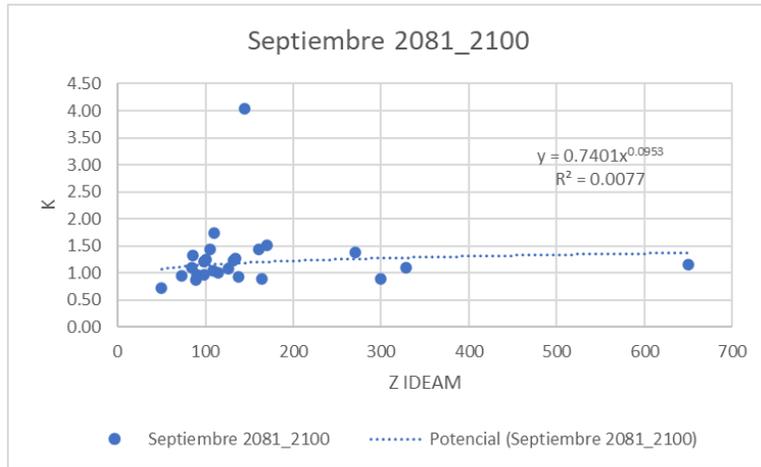




# 2081-2100







## C. Anexo: Balance hídrico

### Estimaciones medias mensuales multianuales

Periodo 1980 a 2020												
Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PRECIPmm	49.4	74.1	142.2	253.9	315.3	233.3	215.1	256.0	289.0	330.8	243.3	108.2
PETmm	160.4	137.0	163.7	139.2	145.8	148.6	130.6	145.5	134.3	138.9	120.9	128.2
ETmm	24.7	28.0	74.8	85.4	82.6	54.9	46.6	55.2	53.6	58.3	47.7	32.9
PERCmm	10.2	14.2	25.1	45.7	61.2	51.7	48.1	56.3	66.0	75.7	58.8	26.3
SURQmm	21.7	29.2	48.4	96.8	153.8	127.2	116.3	137.9	160.9	188.7	137.7	58.2
Periodo 1980 a 2014												
Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PRECIPmm	47.6	79.9	145.0	254.3	316.9	236.9	218.6	262.0	287.4	327.8	243.4	112.3
PETmm	160.0	135.6	162.8	138.3	145.8	148.0	130.5	144.7	133.8	138.4	120.6	127.7
ETmm	24.1	28.6	75.5	85.0	83.6	55.2	46.5	55.5	53.3	57.9	47.4	32.9
PERCmm	9.6	15.2	26.0	45.9	61.4	52.5	49.2	58.0	66.0	75.5	59.0	27.4
SURQmm	20.7	31.8	51.0	97.3	153.9	129.5	119.1	141.8	160.1	186.6	138.1	61.3
Periodo 2015 a 2020												
Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PRECIPmm	60.2	40.1	126.0	251.5	306.1	212.9	194.5	220.9	298.2	348.7	243.1	84.6

<b>PETmm</b>	162.6	145.2	168.7	144.6	145.9	152.5	131.1	150.6	137.5	142.1	122.6	131.2
<b>ETmm</b>	28.2	24.9	71.0	88.2	76.6	53.0	47.0	53.4	55.5	60.6	49.4	32.7
<b>PERCmm</b>	13.5	8.1	20.2	44.6	60.4	47.1	41.8	46.4	65.9	77.2	58.1	19.9
<b>SURQmm</b>	27.0	14.4	33.2	94.0	153.0	113.8	100.0	115.0	165.3	200.9	135.2	40.1
<b>Periodo Neutro</b>												
<b>Variable</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>PRECIPmm</b>	54.2	57.6	147.3	260.0	318.5	231.2	204.2	262.3	273.7	331.0	235.1	99.8
<b>PETmm</b>	157.0	141.9	163.1	139.1	145.4	149.1	132.7	146.7	136.4	140.8	120.7	128.2
<b>ETmm</b>	25.4	26.2	75.4	88.0	82.4	55.3	46.4	55.5	53.3	58.2	48.3	33.2
<b>PERCmm</b>	11.4	10.3	25.5	47.2	63.0	50.5	45.7	56.5	61.7	75.0	58.1	24.1
<b>SURQmm</b>	23.0	22.2	48.9	99.5	155.0	125.6	111.7	140.9	151.2	188.2	131.9	50.9
<b>Periodo El Niño</b>												
<b>Variable</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>PRECIPmm</b>	48.8	74.4	113.6	239.9	288.6	191.7	193.3	185.2	294.9	303.8	234.9	83.2
<b>PETmm</b>	164.0	132.8	167.6	139.0	149.4	153.5	133.4	151.6	134.8	139.3	124.1	131.4
<b>ETmm</b>	22.7	27.6	72.9	81.3	79.7	51.6	44.4	49.7	53.1	57.3	46.6	30.7
<b>PERCmm</b>	9.5	14.0	19.6	42.1	54.2	41.9	40.9	39.3	64.9	69.5	53.2	20.1
<b>SURQmm</b>	21.3	26.7	33.8	92.3	137.3	103.3	89.1	84.1	159.2	172.7	140.7	35.4
<b>Periodo La Niña</b>												
<b>Variable</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>PRECIPmm</b>	41.7	102.3	162.2	257.4	336.4	278.8	255.7	315.8	309.5	357.6	266.0	147.7
<b>PETmm</b>	163.5	133.3	160.8	136.8	142.7	142.4	124.1	138.6	131.1	136.3	118.7	125.3
<b>ETmm</b>	24.7	31.3	75.5	85.5	85.0	57.0	49.0	59.8	55.3	59.2	48.3	35.0
<b>PERCmm</b>	8.8	21.1	30.0	46.8	65.1	63.7	59.4	73.0	74.4	83.3	65.8	36.5
<b>SURQmm</b>	17.8	43.2	62.9	99.8	169.0	155.0	141.7	175.0	174.3	205.9	151.5	84.9
<b>Periodo 2021 a 2100</b>												
<b>Variable</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>PRECIPmm</b>	45.6	42.4	143.9	288.4	319.1	219.1	193.4	235.3	304.8	377.6	271.8	98.5
<b>PETmm</b>	158.3	140.6	174.9	144.7	146.6	144.7	117.6	147.7	135.9	135.4	113.8	126.9

<b>ETmm</b>	25.6	23.7	74.1	97.9	94.1	58.8	52.5	55.1	55.6	61.0	51.3	34.5
<b>PERCmm</b>	10.0	6.3	28.9	56.2	58.3	56.9	54.2	54.6	69.4	88.9	74.0	24.5
<b>SURQmm</b>	13.9	14.7	48.9	101.5	146.1	110.1	78.9	120.5	165.1	225.4	142.1	52.0

## Estimaciones medias anuales

Etiquetas de fila	PRECIPmm	PETmm	ETmm	PERCmm	SURQmm
<b>1980</b>	2033	1878	619	451	921
<b>1981</b>	2287	1749	634	516	1084
<b>1982</b>	2060	1779	584	465	979
<b>1983</b>	2346	1747	648	527	1121
<b>1984</b>	2882	1680	664	684	1488
<b>1985</b>	2210	1874	591	474	1098
<b>1986</b>	2178	1776	614	494	1020
<b>1987</b>	2619	1849	666	567	1323
<b>1988</b>	2960	1745	665	660	1559
<b>1989</b>	2712	1710	649	617	1388
<b>1990</b>	2261	1758	630	496	1093
<b>1991</b>	2212	1888	608	463	1096
<b>1992</b>	2326	1948	653	494	1135
<b>1993</b>	2531	1995	710	517	1248

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>PRECIPmm</b>	<b>PETmm</b>	<b>ETmm</b>	<b>PERCmm</b>	<b>SURQmm</b>
<b>1994</b>	2604	1839	681	551	1319
<b>1995</b>	3023	1841	693	646	1621
<b>1996</b>	2827	1811	686	626	1460
<b>1997</b>	2283	2003	610	447	1179
<b>1998</b>	2890	1835	700	625	1510
<b>1999</b>	2958	1726	707	689	1498
<b>2000</b>	2442	1890	670	519	1204
<b>2001</b>	2521	1845	657	538	1279
<b>2002</b>	2081	1966	613	429	1004
<b>2003</b>	2662	1860	668	551	1385
<b>2004</b>	2354	1860	639	500	1173
<b>2005</b>	2680	1780	691	593	1344
<b>2006</b>	2941	1773	703	648	1526
<b>2007</b>	2644	1772	653	606	1327
<b>2008</b>	3040	1659	686	683	1616
<b>2009</b>	2488	1594	633	546	1249
<b>2010</b>	3761	1424	691	892	2100
<b>2011</b>	3085	1615	663	722	1629
<b>2012</b>	2355	1686	648	520	1142
<b>2013</b>	2651	1672	674	582	1345
<b>2014</b>	2216	1704	616	494	1058
<b>2015</b>	2182	1776	616	472	1052
<b>2016</b>	2401	1756	629	527	1183
<b>2017</b>	2713	1571	626	618	1399
<b>2018</b>	2363	1624	623	547	1157
<b>2019</b>	2323	1693	631	508	1111
<b>2020</b>	2544	1720	634	561	1311
<b>2021</b>	2557	845	627	1291	522

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>PRECIPmm</b>	<b>PETmm</b>	<b>ETmm</b>	<b>PERCmm</b>	<b>SURQmm</b>
<b>2022</b>	2557	826	624	1304	524
<b>2023</b>	2557	827	631	1299	523
<b>2024</b>	2557	800	609	1315	530
<b>2025</b>	2557	872	651	1277	524
<b>2026</b>	2557	852	646	1286	522
<b>2027</b>	2557	844	637	1292	524
<b>2028</b>	2557	875	657	1277	521
<b>2029</b>	2557	843	636	1293	524
<b>2030</b>	2557	848	642	1288	522
<b>2031</b>	2557	837	634	1296	524
<b>2032</b>	2557	880	656	1277	522
<b>2033</b>	2557	856	644	1289	522
<b>2034</b>	2557	900	674	1260	519
<b>2035</b>	2557	877	663	1273	518
<b>2036</b>	2557	873	661	1273	520
<b>2037</b>	2557	804	614	1311	527
<b>2038</b>	2557	833	629	1302	526
<b>2039</b>	2557	876	650	1277	524
<b>2040</b>	2557	817	615	1312	524
<b>2041</b>	2561	778	592	1330	534
<b>2042</b>	2561	851	646	1288	524
<b>2043</b>	2561	823	624	1305	528
<b>2044</b>	2561	824	621	1307	530
<b>2045</b>	2561	839	635	1293	526
<b>2046</b>	2561	858	640	1294	527
<b>2047</b>	2561	830	625	1300	529
<b>2048</b>	2561	842	635	1296	527
<b>2049</b>	2561	837	634	1298	526

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>PRECIPmm</b>	<b>PETmm</b>	<b>ETmm</b>	<b>PERCmm</b>	<b>SURQmm</b>
<b>2050</b>	2561	804	609	1316	531
<b>2051</b>	2561	860	646	1289	523
<b>2052</b>	2561	849	638	1293	528
<b>2053</b>	2561	838	634	1299	526
<b>2054</b>	2561	825	621	1304	530
<b>2055</b>	2561	834	627	1303	527
<b>2056</b>	2561	869	653	1281	526
<b>2057</b>	2561	864	647	1288	525
<b>2058</b>	2561	831	631	1295	528
<b>2059</b>	2561	839	632	1296	527
<b>2060</b>	2561	843	638	1296	526
<b>2061</b>	2566	870	650	1284	526
<b>2062</b>	2566	826	625	1308	528
<b>2063</b>	2566	879	653	1281	528
<b>2064</b>	2566	849	640	1293	529
<b>2065</b>	2566	832	628	1304	531
<b>2066</b>	2566	862	651	1283	527
<b>2067</b>	2566	811	621	1311	529
<b>2068</b>	2566	840	632	1300	531
<b>2069</b>	2566	787	601	1323	534
<b>2070</b>	2566	794	601	1325	535
<b>2071</b>	2566	842	632	1301	530
<b>2072</b>	2566	843	636	1297	529
<b>2073</b>	2566	820	623	1308	532
<b>2074</b>	2566	845	638	1294	529
<b>2075</b>	2566	881	661	1278	526
<b>2076</b>	2566	845	638	1293	529
<b>2077</b>	2566	861	648	1283	530

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>PRECIPmm</b>	<b>PETmm</b>	<b>ETmm</b>	<b>PERCmm</b>	<b>SURQmm</b>
<b>2078</b>	2566	838	631	1300	530
<b>2079</b>	2566	901	677	1264	523
<b>2080</b>	2566	828	625	1305	530
<b>2081</b>	2562	835	628	1301	529
<b>2082</b>	2562	902	670	1266	524
<b>2083</b>	2562	838	631	1299	529
<b>2084</b>	2562	815	615	1309	531
<b>2085</b>	2562	880	660	1278	521
<b>2086</b>	2562	815	612	1312	533
<b>2087</b>	2562	828	625	1306	528
<b>2088</b>	2562	876	658	1276	525
<b>2089</b>	2562	832	631	1299	528
<b>2090</b>	2562	825	622	1303	531
<b>2091</b>	2562	807	614	1314	530
<b>2092</b>	2562	842	636	1294	528
<b>2093</b>	2562	830	627	1302	529
<b>2094</b>	2562	826	625	1304	526
<b>2095</b>	2562	837	635	1295	529
<b>2096</b>	2562	809	612	1313	531
<b>2097</b>	2562	835	631	1300	528
<b>2098</b>	2562	827	623	1301	531
<b>2099</b>	2562	807	618	1311	527
<b>2100</b>	2562	854	642	1291	526



## Bibliografía

- Abbaspoura, K., & et. al. (mayo de 2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Alcaldía de Barrancabermeja. (2023). *POT*. Obtenido de <https://www.barrancabermeja.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=visorpdf&file=https%3A%2F%2Fwww.barrancabermeja.gov.co%2Floader.php%3FIServicio%3DTools2%26ITipo%3Ddescargas%26IFuncion%3DexposeDocument%26idFile%3D102579%26tmp%3Daff7>
- Alcaldía de Puerto Wilches. (2005). *PBOT*.
- Alcaldía de Sabana de Torres. (1999). Obtenido de <https://repositoriodim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/11885/7938-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ANLA. (2021). *Reporte de Análisis Regional de la cuenca del río Sogamoso y cuenca Afluentes directos río Lebrija Medio (mi) - NSS*.
- Banco Republica. (2022). *El fenómeno de El Niño en Colombia: caracterización y posible impacto*. Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/es/emisor-182>
- Berg, A., & Sheffield, J. (2018). Soil Moisture–Evapotranspiration Coupling in CMIP5 Models: Relationship with Simulated Climate and Projections. *JOURNAL OF CLIMATE*, 4865-4878.
- Bonilla, L. P., & Et al. (2022). Modelación hidrológica Cuenca Río La Vieja., (pág. 4).

- Cabrera, J. (2015). *Modelos Hidrológicos*. Obtenido de Universidad Nacional de Ingeniería.
- CAS y CDMB. (2018). *Resoluciones POMCA de los ríos Lebrija y Sogamoso*. Obtenido de <https://cas.gov.co/quienes-somos/planeacion-gestion-y-control/pomcas/>
- Castañeda, Y. M. (2016). MODELACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RIO COELLO, BAJO ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL).
- Castillo, A. E., Sanchez, L. P., & Gachuz, S. D. (2017). *Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social*. Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-72102017000300669](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102017000300669)
- CCB. (2014). *CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO*. Obtenido de Proyectos Estratégicos: <https://santandercompetitivo.org/proyectos-estrategicos/en-funcionamiento/central-hidroelctrica-sogamoso/>
- CCB. (2017). *Resumen del comportamiento socioeconomico de Barrancabermeja y su area de influencia*. Obtenido de [http://www.ccbarranca.org.co/ccbar/images/documentos/estudio\\_economico\\_2017.pdf](http://www.ccbarranca.org.co/ccbar/images/documentos/estudio_economico_2017.pdf)
- Centro de la Transparencia PPII. (2021). *¿EN QUÉ CONSISTEN LOS PROYECTOS PILOTO DE INVESTIGACIÓN INTEGRAL (PPII)?* Obtenido de <https://www.centrodetransparenciappii.org/conoce-mas-de-los-ppii/generalidades-ppii>
- CEPAL. (2022). *Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/acuerdodeescazu>
- Chow, V. (1988). *Applied hydrology*.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018*. Obtenido de Población total censada, por sexo e índices de masculinidad y feminidad, según municipio, áreas (Total, Cabecera y Centros poblados y Rural disperso) y grupos de edad: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>
- Devia et al. (2015). A Review on Hydrological Models. *ScienceDirect*, 1001 – 1007. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001273>

- Doulabian, S., & et al. (2021). Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, 166–184.
- FAO. (1961). *Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO*. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>
- Fernani, P. (abril de 2022). R como un SIG: Extracción de datos climáticos de WorldClim. *Ecología Austral*. doi:<https://doi.org/10.25260/EA.22.32.1.0.1119>
- García Espinosa, E. (2013). *Análisis de la distribución de gastos máximos anuales*. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guanuchi, J. (2015). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO Y DINÁMICO EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAUTE Y JUBONES*. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21352/1/TESIS.pdf>
- Hausfather, z. (2018). *CarbonBrief*. Obtenido de Explainer: How ‘Shared Socioeconomic Pathways’ explore future climate change: <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>
- Hausfather, z. (2019). *CarbonBrief*. Obtenido de CMIP6: the next generation of climate models explained: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>
- Huntington, T. G. (2010). *Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture*. Augusta, Maine, USA: U.S. Geological Survey,.
- Ibañez, J. J., & Mariquez, J. (2011). *Fluvisoles*. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/01/26/137868>
- Ibañez, J. J., & Manriquez, F. J. (2012). *Acrisoles (WRB)*. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/06/07/142059>
- IDEAM. (2001). *El medio ambiente en Colombia*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf>
- IDEAM. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o++La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>

- IDEAM. (2017a). *Biodiversidad en Colombia*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/siac/biodiversidad>
- IDEAM. (2017b). *TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA A LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO*. Obtenido de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC\\_COLOMBIA\\_CMNUCC\\_2017\\_2.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf)
- IDEAM. (2018). *PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA AMAZONÍA COLOMBIANA, CON ÉNFASIS EN LAS SUBZONAS HIDROGRÁFICAS QUE CUBREN LOS QUINCE MUNICIPIOS DE MAYOR DEFORESTACIÓN PRIORIZADOS POR LA S*. Obtenido de [http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new\\_modelo/DOCUMENTOS/2020/Escenarios CC\\_Amazonia.pdf](http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/DOCUMENTOS/2020/Escenarios_CC_Amazonia.pdf)
- IDEAM. (2018a). *Escorrentia anual Colombia*. Obtenido de ENA: <http://www.ideam.gov.co/documents/10182/512295/Escorrentia+Promedio+Anual+de+Colombia+ENA+2010.pdf/6698a7ec-7e0a-4e85-80bb-cd5a75a7d0c9?version=1.0>
- IDEAM. (2018b). *Estudio Nacional del Agua*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/anexos-estudio-nacional-del-agua-2018>
- IDEAM. (2022 c). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM. (2022a). *CAMBIO CLIMATICO*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>
- IDEAM. (2022b). *ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>
- IGN. (2009). *Cambrisol*. Obtenido de [https://www.ign.es/espmap/figuras\\_bio\\_bach/pdf/bio\\_fig\\_11\\_texto.pdf](https://www.ign.es/espmap/figuras_bio_bach/pdf/bio_fig_11_texto.pdf)
- Inglezakis, V., & et al. (2016). *Aquatic Environment*. Obtenido de Chapter 3: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444627339000034>
- IPCC. (2013). *¿Qué es el IPCC?* Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS\\_what\\_ipcc\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_what_ipcc_es.pdf)
- IPCC. (2019). *Glosario*. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15\\_Glossary\\_spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf)

- IPCC. (2022a). *Glossary*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>
- IPCC. (2022b). *Technical Summary*. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_TS.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf)
- ISAGEN. (2014). *PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO*. Obtenido de <https://memoriaempresarial.eafit.edu.co/wp-content/uploads/2014/10/Proyecto-Hidroelectrico-Sogamoso.pdf>
- Khairi , K., & et al. (2016). Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm.
- Knutti, R. (2008). Should we believe model predictions of future climate change? *Royal Society, Phil. Trans. R. Soc. A* (2008) 366, 4647–4664, doi:10.1098/rsta.2008.0169.
- Lifeder. (2021). *Bosque húmedo tropical*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/bosque-humedo-tropical/>
- Maher, N. E. (2023). *The future of the El Niño–Southern Oscillation: using large ensembles to illuminate time-varying responses and inter-model differences*. Obtenido de <https://esd.copernicus.org/articles/14/413/2023/#bib1.bibx26>
- McCuen, R. H. (2016). *Modeling Hydrologic Change*. Boca Raton: CRC Press.
- Melese, T. (2021). *Impacts of climate change on water balance components of Guder Catchment, Upper Abbay Basin, Ethiopia: SWAT model*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00733-x>
- Minagricultura. (2022). *Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano*. Obtenido de AGRONET Estadísticas de producción agrícola Nacional: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4>
- NOAA. (2023). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- NWS. (2022). *The Hydrologic Cycle*. Obtenido de <https://www.weather.gov/jetstream/hydro>
- Ojeda, L. M. (2021). Análisis de calibración del modelo SWAT aplicado en la cuenca alta del río Cane-Iguaque.
- OMM. (2014). *El Niño/Oscilación del Sur*. Obtenido de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=7889](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7889)

- OMS. (2020). *Agua*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- OMS. (2021). *Agua para consumo humano*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Pajarito, X. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT, COMO HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA UNIDAD HIDROLÓGICA RIO HACHA – FLORENCIA CAQUETÁ*. Obtenido de Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 126-135.
- PNN. (2023). *Ecosistemas*. Obtenido de <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-pacifico/parque-nacional-natural-farallones-de-cali/ecosistemas/>
- RLE Colombia. (2015). *Orobiome of the Tropical Humid Forest Zonobiome O\_ZBH-S13*. Obtenido de <https://assessments.iucnrle.org/assessments/82>
- Rojas, T. (2023). *Colombia: científicos, pescadores y campesinos se unen para salvar el bosque húmedo en el Magdalena Medio*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/2023/03/conservacion-bosque-humedo-magdalena-medio-colombia/>
- Saavedra, C. (2020). Análisis de anomalías climáticas para la cuenca del río La Villa, Panamá, basado en los escenarios RCP. *I+D Tecnológico*.
- Sánchez, S. (2023). Estimación de la demanda actual y potencial de agua para agricultura en un área de bosque húmedo tropical de tierras bajas. *Trabajo de grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Suriano et al. (2014). *No estacionariedad y estimación bivariada: evaluación en los parámetros*. Obtenido de <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.27.pdf>
- TAMU. (2022). *The Soil & Water Assessment Tool*. Obtenido de <https://swat.tamu.edu/>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *CLIMATE RESEARCH*, Vol. 47: 123–138, 2011, doi: 10.3354/cr00953.
- UN. (2022a). *Acción por el clima*. Obtenido de ¿Qué es el cambio climático?: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- UN. (2022b). *DESAFÍOS GLOBALES*. Obtenido de <https://www.un.org/es/global-issues/water>

- UNAL. (2021a). MODELO MULTIESCALA DE GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA CON ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DE LA INFORMACIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA (EAE) DEL SUBSECTOR DE HIDROCARBUROS EN EL VALLE DEL MAGDALENA MEDIO | PROYECTO MEGIA. En *Producto 6 ESTUDIO DE LA DEMANDA DEL AGUA*.
- UNAL. (2021b). *MODELO MULTIESCALA DE GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA CON ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DE LA INFORMACIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA (EAE) DEL SUBSECTOR DE HIDROCARBUROS EN EL VALLE DEL MAGDALENA MEDIO | PROYECTO MEGIA*. Obtenido de Producto 8 BALANCE HÍDRICO INICIAL – INFORMACIÓN SECUNDARIA.
- UNEX. (2020a). *El suelo es un FERRALSOL*. Obtenido de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/FAO/Ferralsol.htm>
- UNEX. (2020b). *El suelo es un Gleysol*. Obtenido de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/FAO/Gleysol.htm>
- UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA. (2015). *Metodo de doble masa*.
- USAID. (2014). *¿Cuánta agua hay sobre (y dentro) de la Tierra?* Obtenido de A REVIEW OF DOWNSCALING METHODS FOR CLIMATE CHANGE PROJECTIONS.
- USGS. (1984). *¿Cuánta agua hay sobre (y dentro) de la Tierra?* Obtenido de <https://water.usgs.gov/gotita/earthhowmuch.html#:~:text=Cerca%20del%2070%20porcentaje%20de,tierra%20y%20en%20los%20acu%C3%ADferos>.
- USGS. (2019). *El Ciclo del Agua*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#overview>
- USGS. (2022). *El Ciclo Natural del Agua - The Natural Water Cycle, Spanish*. Obtenido de [https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/gip221\\_spanish.pdf](https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/gip221_spanish.pdf)
- Verstraeten et al. (2006). Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium). *Journal of Geophysical Research*.
- Wang, Y., & et al. (2020). Impacts of 1.5°C and 2.0°C Global Warming on Runoff of Three Inland Rivers in the Hexi Corridor, Northwest China. *Journal of Meteorological Research*, Volume 34.
- WCRP. (2020). *CMIP Phase 6 (CMIP6)*. Obtenido de <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>

WorldClim. (2022). *Global climate and weather data*. Obtenido de <https://www.worldclim.org/>

WWF. (2022). *Agua dulce*. Obtenido de [https://wwf.panda.org/es/que\\_hacemos/agua\\_dulce/](https://wwf.panda.org/es/que_hacemos/agua_dulce/)

Zhao, Q., & et al. (2012). The effects of dam construction and precipitation variability on hydrologic alteration in the Lancang River Basin of southwest China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 993-1011.